

16+

ISSN 2311-1402

НИЖНЕВАРТОВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА



БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

1(69)/2025

В

Е
С

Т

Н

И

К





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/10.36906/2311-4444/25-1>

Учредитель: ФГБОУ ВО «Нижневартковский государственный университет»

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

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

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

Подписной индекс АО «Почта России» ПП617

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

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

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

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

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



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

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

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

Подготовлено и отпечатано в изд-ве НВГУ
Изд. лиц. ЛР № 020742. Подписано в печать 14.03.2025
Дата выхода 20.03.2025
Формат 60×84 1/8. Гарнитура Times. Усл. печ. листов 4,87.
Тираж 100 экз. Заказ 2311 Цена: бесплатно

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

© Нижневартковский государственный университет, 2025





BULLETIN

of NIZHNEVARTOVSK
STATE UNIVERSITY



Bulletin of Nizhnevartovsk State University was founded in 2008

*Included in the List of peer-reviewed scientific publications,
approved by the Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation dated 01.12.2015*

<https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-1>

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

Registration certificate PI number FS77-80105 on 31.12.2020.

Registration certificate EL number FS77-79658 on 31.12.2020.

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

Quarterly

Language of publication: Russian, English

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

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

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



Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

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

*Prepared and printed in the publishing house of NVGU
Ed. persons. JIP No. 020742. Signed for printing on 14.03.2025
Release date 20.03.2025
Format 60×84 1/8. Times typeface. CONV. print sheets 4.87.
Circulation 100 copies. Order 2311. Free*

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+

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

© Nizhnevartovsk State University, 2025



СОДЕРЖАНИЕ

<i>Борисова Г.Г., Авраменко А.В., Тугбаева А.С., Собенин А.В., Малева М.Г.</i> Влияние бактериального биоудобрения на морфобиологические показатели горчицы в условиях солевого стресса	4
<i>Плугатарь Ю.В., Коренькова О.О.</i> Биометрические показатели пыльцы и особенности роста пылевых трубок <i>Juniperus deltoides</i> R. P. Adams в Горном Крыму	15
<i>Текебаева Ж.Б., Рахымжан Ж., Базарханқызы А., Темірбекова А.Ж., Бейсенова Р.Р., Кулагин А.А.</i> Опыт альголизации озера Майбалык (Астана, Казахстан)	29
<i>Чукина Н.В., Лукина Н.В., Филимонова Е.И., Глазырина М.А., Учаев А.П.</i> Анатомо-морфологические и биохимические характеристики <i>Pinus sylvestris</i> L. на отвалах месторождения тальк-магнезита.....	43
<i>Стариков В.П., Володина О.Ю., Кравченко В.Н., Тарикулиева С.Э.</i> Сообщества мелких млекопитающих Исетско-Пышминского междуречья (Южное Зауралье)	56
<i>Шаламова Е.Ю., Погоньшева И.А., Постникова В.В.</i> Тенденции изменения физического развития студентов в условиях севера: многолетняя динамика	65
<i>Коркина Е.А., Москвина Н.В., Штогрин А.В., Середовских Б.А.</i> Региональные особенности геоэкологического состояния почвенного покрова восточной части Сибирских увалов	76
<i>Шевцов Д.А., Иванцова Е.А., Новочадов В.В.</i> Оценка фитотоксичности светло-каштановой почвы при её загрязнении сырой нефтью и использовании биопрепаратов-нефтедеструкторов.....	100
<i>Томилов А.С., Сторчак Т.В., Гогой С.Б., Битнер М.И., Диденко Н.А.</i> Микропластик в пресноводных экосистемах: источники, методы исследования и экологические последствия. Опыт российских исследователей и перспективы контроля загрязнения в ХМАО-Югре	111

CONTENT

<i>G.G. Borisova, A.V. Avramenko, A.S. Tugbaeva, A.V. Sobenin, M.G. Maleva</i> Influence of Bacterial Biofertilizer on Morphophysiological Indicators of Mustard Under Salt Stress.	4
<i>Y.V. Plugatar, O.O. Korenkova</i> Biometric Indicators of Pollen and Growth Characteristics of Pollen Tubes of <i>Juniperus deltoides</i> R. P. Adams in Mountain Crimea	15
<i>Zh.B. Tekebaeva, Zh. Rahymzhan, A. Bazarhanқызы, A.Zh. Temirbekova, R.R. Beisenova, A.A. Kulagin</i> Experience of Algalization of Lake Maibalyk (Astana, Kazakhstan)	29
<i>N.V. Chukina, N.V. Lukina, E.I. Filimonova, M.A. Glazyrina, A.P. Uchaev</i> Anatomical, Morphological and Biochemical Characteristics of <i>Pinus Sylvestris</i> L. on the Talc-Magnetite Deposit Dumps.....	43
<i>V.P. Starikov, O.Yu. Volodina, V.N. Kravchenko, S.E. Tarikulieva</i> Small Mammal Communities of the Iset-Pyshma Interfluvium (The South Trans-Ural Region)	56
<i>E.Yu. Shalamova, I.A. Pogonysheva, V.V. Postnikova</i> Trends in Physical Development of Students in North: Long-Term Dynamics	65
<i>E.A. Korkina, N.V. Moskvina, A.V. Shtogrina, B.A. Seredovskikh</i> The Regional Features of the Geoecological Status of the Soil Cover in the Eastern Part of the Siberian Uvaly Region	76
<i>D.A. Shevtsov, E.A. Ivantsova, V.V. Novochadov</i> Assessment of Light Chestnut Soil Phytotoxicity After Crude Oil Pollution and the Use of Biodegradables	100
<i>A.S. Tomilov, T.V. Storchak, S.B. Gogoi, M.I. Bitner, N.A. Didenko</i> Microplastics in Freshwater Ecosystems: Sources, Research Methods and Environmental Consequences. Experience of Russian Researchers and Prospects for Pollution Control in Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Yugra	111

Борисова Г.Г., Авраменко А.В., Тугбаева А.С., Собенин А.В., Малева М.Г.

ВЛИЯНИЕ БАКТЕРИАЛЬНОГО БИОУДОБРЕНИЯ НА МОРФОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ГОРЧИЦЫ В УСЛОВИЯХ СОЛЕВОГО СТРЕССА

G.G. Borisova, A.V. Avramenko, A.S. Tugbaeva, A.V. Sobenin, M.G. Maleva

INFLUENCE OF BACTERIAL BIOFERTILIZER ON MORPHOPHYSIOLOGICAL INDICATORS OF MUSTARD UNDER SALT STRESS

Аннотация. Использование бактериальных удобрений является одной из эффективных технологий выращивания культурных растений в условиях засоления. Выполнена оценка влияния биоудобрения (ББУ) на основе биочара и галотолерантного штамма ростстимулирующих ризобактерий *Pseudomonas* sp. STF14 на рост и некоторые физиолого-биохимические характеристики горчицы сарептской салатной (*Brassica juncea* (L.) Czern, сорт «Частушка») в условиях солевого стресса, вызванного действием хлорида натрия. Растения горчицы выращивали в горшечных культурах в течение 21 суток при естественных условиях. Эксперимент включал 4 варианта: контрольный торфогрунт (ТГ); ТГ + ББУ (2,5%, по объему); ТГ + NaCl (80 mM); ТГ + ББУ (2,5%, по объему) + NaCl (80 mM). Растения поливали раствором соли дважды в неделю, начиная с 7-дня после посева. Добавление ББУ увеличивало длину и сырую биомассу побегов горчицы по сравнению с контролем (в среднем на 23%), тогда как обработка NaCl ингибировала их рост. Кроме того, ББУ (как отдельно, так и совместно с NaCl) положительно влияло на содержание фотосинтетических пигментов. При раздельном применении ББУ и NaCl содержание малонового диальдегида в листьях горчицы увеличивалось в сравнении с контролем в 1,4 и 1,9 раз, соответственно. Однако при их совместном использовании оно снижалось в 1,6 раза. Полив растений горчицы раствором соли почти в 5 раз увеличивал содержание свободного пролина и почти в 7 раз – Na⁺, тогда как ББУ + NaCl существенно снижали их количество. Таким образом, применение ББУ в условиях солевого стресса способствовало улучшению роста горчицы и повышению её устойчивости к хлориду натрия.

Ключевые слова: *Brassica juncea*; *Pseudomonas* sp.; галотолерантные ризобактерии; биочар; хлорид

Abstract. Bacterial fertilizers are an effective technology for growing crops under saline conditions. The effect of biofertilizer (BF) based on biochar and halotolerant strain of growth-promoting rhizobacteria *Pseudomonas* sp. STF14 on the growth and some physiological and biochemical characteristics of salad mustard (*Brassica juncea* (L.) Czern, variety “Chastushka”) under salt stress caused by sodium chloride was assessed. Mustard plants were grown in pot-scale experiment for 21 days under natural conditions. The experiment included 4 treatments: control peat soil (PS); PS + BF (2.5%, v/v); PS + NaCl (80 mM); PS + BF (2.5%, v/v) + NaCl (80 mM). From the 7th day after planting the plants were watered with a salt solution twice a week. Adding BF increased the length and fresh biomass of mustard shoots compared to the control (by 23% on average), while NaCl treatment inhibited their growth. BF added separately or together with salt increased photosynthetic pigments. Separate application of BF and NaCl led to the malondialdehyde in mustard leaves increasing by 1.4 and 1.9 times, respectively compared to the control. However, when combined, malondialdehyde decreased by 1.6 times. Watering mustard plants with a saline solution increased the content of free proline by almost 5 times and Na⁺ by almost 7 times, while BF + NaCl significantly reduced their amount. Thus, the use of BF under salt stress conditions contributed to the improvement of mustard growth and increased its resistance to sodium chloride.

Keywords: *Brassica juncea*; *Pseudomonas* sp.; halotolerant rhizobacteria; biochar; sodium chloride; growth parameters; photosynthetic pigments; lipid peroxidation; proline.

натрия; параметры роста; фотосинтетические пигменты; перекисное окисление липидов; пролин.

Сведения об авторах: Борисова Галина Григорьевна, ORCID: 0000-0001-6663-9948, д-р географ. наук, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия, G.G.Borisova@urfu.ru; Авраменко Анастасия Владимировна, ORCID: 0009-0000-3042-3643, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия, avramenkonastya963@mail.ru; Тугбаева Анастасия Сергеевна, ORCID: 0000-0001-9231-3650, канд. биолог. наук, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия, anastasia.tugbaeva@gmail.com; Собенин Артем Вячеславович, ORCID: 0000-0001-5513-5680, Институт горного дела Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург, Россия, arsob@yandex.ru; Малева Мария Георгиевна, ORCID: 0000-0003-1686-6071, канд. биолог. наук, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия, maria.maleva@mail.ru.

About the authors: Galina G. Borisova, ORCID: 0000-0001-6663-9948, Doctor of Geographical Sciences, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia, G.G.Borisova@urfu.ru; Anastasia V. Avramenko, ORCID: 0009-0000-3042-3643, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia, avramenkonastya963@mail.ru; Anastasia S. Tugbaeva, ORCID: 0000-0001-9231-3650, Candidate of Biological Sciences, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia, anastasia.tugbaeva@gmail.com; Artem V. Sobenin, ORCID: 0000-0001-5513-5680, Institute of Mining of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia, arsob@yandex.ru; Maria G. Maleva, ORCID: 0000-0003-1686-6071, Candidate of Biological Sciences, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia, maria.maleva@mail.ru.

Борисова Г.Г., Авраменко А.В., Тугбаева А.С., Собенин А.В., Малева М.Г. Влияние бактериального биоудобрения на морфофизиологические показатели горчицы в условиях солевого стресса // Вестник Нижневартковского государственного университета. 2025. № 1(69). С. 4-14. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-1/01>

Borisova, G.G., Avramenko, A.V., Tugbaeva, A.S., Sobenin, A.V., & Maleva, M.G. (2025). Influence of Bacterial Biofertilizer on Morphophysiological Indicators of Mustard Under Salt Stress. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 1(69), 4-14. (in Russ.). <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-1/01>

Введение

Засоление почв является одной из наиболее серьёзных экологических проблем, с которыми сталкивается сельское хозяйство во всем мире. Засоление может быть результатом естественных процессов, однако на сегодняшний день большая часть территорий с повышенным содержанием солей приурочена к урбанизированным районам [4; 7]. Чаще всего это связано с чрезмерным использованием химических удобрений и пестицидов, неправильным орошением и, в целом, с высокой нагрузкой на пахотный слой, что приводит к деградации почв и сокращению пахотных территорий [2; 7; 9].

Повышенное содержание солей в почве подкисляет её, ускоряет процессы минерализации, угнетает жизнедеятельность ассоциативных микроорганизмов, связывает почвенную влагу, приводит к нарушению не только физиологических процессов в растениях, но и биогеохимических циклов элементов в целом [2; 5]. Понимание этих процессов важно для разработки эффективных технологий выращивания культурных

растений на засоленных почвах, а также восстановления деградированных территорий [2; 8].

Перспективной стратегией решения данной проблемы является использование экологически безопасных биопрепаратов, повышающих устойчивость сельскохозяйственных культур к солевому стрессу, а также предотвращающих дальнейшее засоление почв. Одним из таких мелиорантов является биочар, получаемый из органических материалов путем пиролиза [8; 15]. Многими авторами отмечено, что добавление биочара в засоленную почву увеличивает содержание органических и минеральных веществ, улучшает аэрацию и влагоудерживающую способность почвы, а также нормализует pH почв. Благодаря абсорбционной способности, биочар может связывать различные токсичные вещества – например, ионы натрия, – уменьшая их доступность для растений [10; 12]. Кроме того, биочар может выступать в качестве носителя для различных микроорганизмов [3; 9; 16]. Поэтому его часто используют в сочетании с ризосферными бактериями, стимулирующими рост растений (от англ. “Plant Growth-Promoting Rhizobacteria”, PGPR), которые даже в условиях стресса улучшают усвоение питательных веществ и способствуют развитию корневой системы и росту растений [11; 13]. Такое комбинированное использование биочара и PGPR может создать синергетический эффект, способствующий снижению солевого стресса у растений, восстановлению засоленных почв, а также повышению их продуктивности [1; 9; 13; 14].

Цель исследования – оценить влияние биоудобрения на основе биочара и галотолерантного штамма PGPR *Pseudomonas* sp. STF14 на рост и некоторые физиолого-биохимические характеристики горчицы сарептской (*Brassica juncea* (L.) Czern) в условиях солевого стресса, вызванного действием хлорида натрия.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования был выбран салатный сорт горчицы сарептской «Частушка», как раннеспелый и высокоурожайный; кроме того, эта важная сельскохозяйственная культура широко используется в аграрном секторе и в пищевой промышленности. Известно, что горчица сарептская способна к быстрому росту, обладает высокой устойчивостью к неблагоприятным условиям среды и может расти на бедных и засоленных почвах, улучшая их структуру и повышая плодородие [19].

В ходе эксперимента изучали эффекты бактериального биоудобрения (ББУ) на основе биочара и селективного штамма PGPR (*Pseudomonas* sp. STF14). Для его создания был использован коммерческий биочар (ООО «ДианАгро», Новосибирск, Россия), изготовленный из берёзовой древесины путем пиролиза. Для создания ББУ был также выбран штамм PGPR, выделенный в 2023 г. из ризосферы *Tussilago farfara* L., произрастающей вблизи рудника «Сафьяновская медь» (Реж, Свердловская область). Принадлежность этого штамма к роду *Pseudomonas* была подтверждена с помощью секвенирования генома 16S рРНК [21]. Предварительное тестирование штамма на RGP-способности и устойчивость к засолению показало, что он способен к солюбилизации

фосфатов (до 34,8 мг $\text{PO}_4^{3-}/\text{л}$), продукции индолил-3-уксусной кислоты (ИУК, до 31,8 мг/л), выработке сидерофоров и аммиака [21]; кроме того, он оказался устойчив к высоким концентрациям NaCl – выдерживал до 800 мМ без угнетения роста культуры.

Для создания ББУ биочар измельчали, а затем смешивали в пропорции 5:1 (по объему) с жидкой культурой *Pseudomonas* sp. STF14 (10^8 КОЕ/мл), предварительно выращенной на среде Луриа–Бертани. Готовое биоудобрение добавляли к торфогрунту (низинный нейтрализованный торф, ГК «Селигер-Агро», Тверь, Россия) в концентрации 2,5% (по объему) и использовали для заполнения пластиковых контейнеров объемом 3 л. Эксперимент включал 4 варианта: 1) контрольный торфогрунт (ТГ); 2) ТГ + 2,5% ББУ; 3) ТГ + 80 мМ NaCl; 4) ТГ + 2,5% ББУ + 80 мМ NaCl. Повторность составляла 3 контейнера по ~150 растений. Для формирования солевого стресса растения в 3-м и 4-м вариантах поливали дважды в неделю 80 мМ раствором NaCl (0,5 л на контейнер), начиная с 7-го дня вегетации после появления всех всходов. Выбор данной концентрации соли был обусловлен результатами рекогносцировочного эксперимента, в ходе которого семена горчицы предварительно проращивали 5 суток на чашках Петри в градиенте концентраций NaCl (0–150 мМ). Всхожесть семян горчицы в среднем составляла около 50%. Растения выращивали при естественном освещении и комнатной температуре; общее время вегетации – 21 день.

По окончании эксперимента на свежем растительном материале были измерены длина и сырая биомасса сеянцев, а также определены некоторые физиолого-биохимические характеристики растений, содержание натрия в побегах и физико-химические параметры почв. Для анализа содержания фотосинтетических пигментов их экстрагировали из свежих листьев (50 мг) в 80% растворе охлажденного ацетона. Содержание хлорофиллов (Хл *a*, Хл *b*) и каротиноидов определяли спектрофотометрически («APEL» PD-303UV) при 470, 647 и 663 нм и рассчитывали согласно Lichtenthaler [20]. Содержание малонового диальдегида (МДА) определяли после гомогенизации навески свежих листьев в растворе 0,25% тиобарбитуровой кислоты в 10% трихлоруксусной кислоте [17]. Содержание свободного пролина определяли по модифицированной методике с использованием кислого нингидринового реактива [6]. Величину pH, удельную электропроводность (ЕС) и содержание NaCl определяли в почвенно-водной суспензии в соотношении 1:5 (почва: дистиллированная вода) с помощью портативного pH-метра/кондуктометра (Hanna Instruments GmbH, Graz, Австрия). Определение содержания доступного натрия в почве и общего натрия в побегах проводили при помощи атомно-абсорбционного спектрометра AA240FS (Varian Australia Pty Ltd., Австралия). Доступный натрий определяли после экстракции 2,5 г почвы в 50 мл 5% HNO_3 (осч.), а общий натрий в растительном материале – после его озоления 70%-ной азотной кислотой.

Статистическая обработка проводилась с использованием MS Excel 16.0 и STATISTICA 13.0 (StatSoft Inc., США) и включала в себя расчёт средних арифметических значений каждого параметра и их стандартных ошибок, которые отражены в таблице и на рисунках. При сравнении данных использовали двухфакторный дисперсионный анализ

(two-way ANOVA). В случае значимого влияния рассматриваемого фактора проводили попарное сравнение между его категориями с использованием апостериорного критерия Тьюки (Tukey's test). В таблице и на рисунках разными буквами латинского алфавита обозначены достоверные различия между вариантами при $p < 0,05$.

Результаты и их обсуждение

Оценка влияния ББУ и засоления на ростовые показатели горчицы показала, что наиболее значимым фактором оказалось добавление ББУ: длина и сырая биомасса побега увеличивались в среднем на 22% по сравнению с контролем (рис. 1). Это было подтверждено результатами двухфакторного дисперсионного анализа ($F = 29,44$; $p < 0,001$).

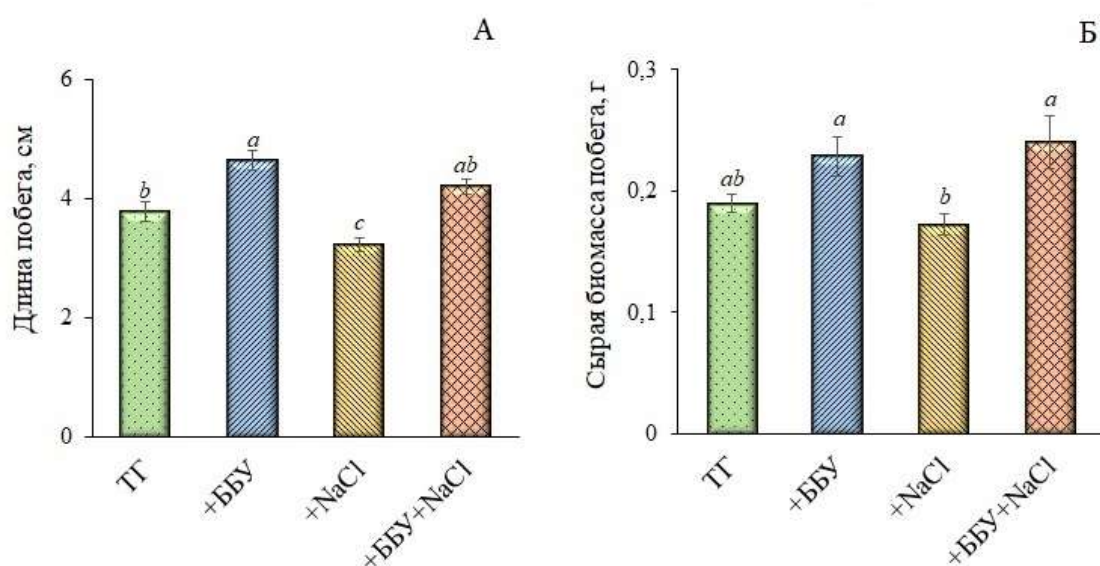


Рис. 1. Длина (А) и сырая биомасса (Б) трехнедельного побега горчицы сарептской. ТГ – контрольный торфогрунт. ББУ – бактериальное биоудобрение. Представлены средние арифметические значения \pm SE ($n = 4$). Разными латинскими буквами отмечены достоверные различия между вариантами при $p < 0,05$

Обработка соевым раствором ингибировала длину и биомассу побега в среднем на 15% от контроля (рис. 1). Совместное влияние ББУ и NaCl не было значимым ($F = 0,75$; $p = 0,48$), однако длина и биомасса побега увеличивались на 11 и 23%, соответственно, следовательно, внесение ББУ в некоторой степени нивелировало солевой стресс и способствовало росту горчицы.

Способность многих штаммов бактерий, ассоциированных с культурными растениями, стимулировать их рост и повышать устойчивость в условиях стресса давно доказана [1; 11; 21]. Положительный эффект ББУ на параметры роста горчицы, очевидно, объясняется увеличением доступности важнейших нутриентов под влиянием ризобактерий, а также проявлением ими других PGP-свойств. Так, ранее было показано, что используемый нами селективный штамм *Pseudomonas* sp. STF14 способен к солибилизации недоступных фосфатов, продукции ИУК, а также выработке сидерофоров и аммиака [21].

Улучшению роста горчицы при добавлении ББУ, возможно, благоприятствовал и биочар, входящий в его состав. Известно, что он обладает способностью улучшать структуру почвы, увеличивать её водоудерживающую способность и содержание питательных веществ [3; 10; 12].

Одним из индикаторов ответной реакции растений на условия произрастания является состояние пигментного комплекса, которое зависит от содержания и соотношения фотосинтетических пигментов [20]. При внесении ББУ (отдельно или совместно с NaCl) содержание хлорофиллов и каротиноидов в среднем увеличивалось на 20% (рис. 2).

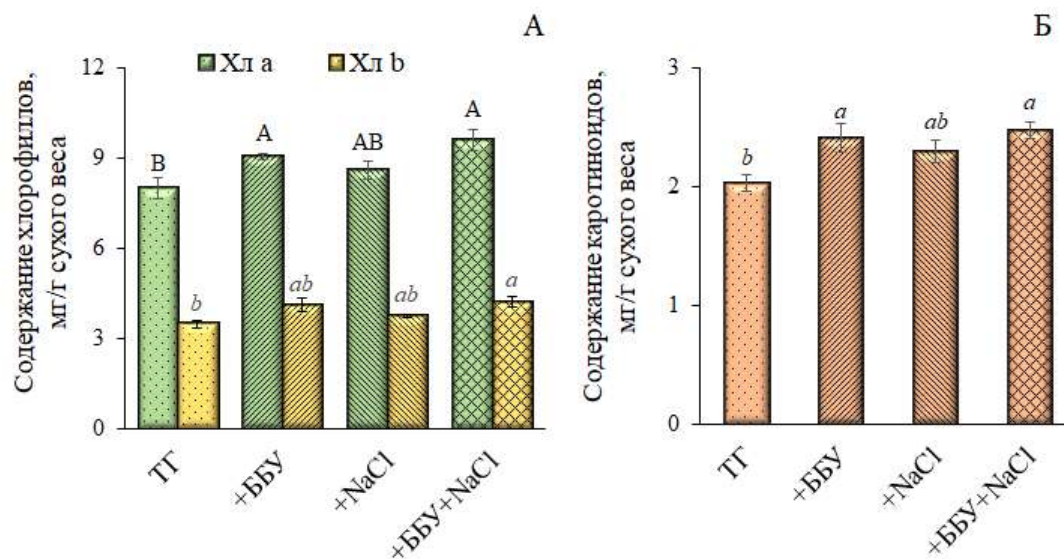


Рис. 2. Содержание хлорофиллов (А) и каротиноидов (Б) в листьях трехнедельных сеянцев горчицы сарептской. Хл – хлорофилл. ТГ – контрольный торфогрунт. ББУ – бактериальное биоудобрение. Представлены средние арифметические значения \pm SE ($n = 4$). Разными латинскими буквами отмечены достоверные различия между вариантами при $p < 0,05$

ANOVA-тест подтвердил значимость влияния данного фактора на фотосинтетические пигменты горчицы ($F = 11,69$; $p < 0,01$). При этом соотношение Хл *a*/Хл *b* и суммы хлорофиллов к каротиноидам в среднем составляло 2,3 и 5,5, соответственно, и достоверно не менялось, что свидетельствует об устойчивости пигментного комплекса изучаемой культуры.

Повышенное содержание продуктов перекисного окисления липидов (ПОЛ), таких как МДА – индикатор того, что растения испытывают стресс и их мембраны повреждены [17]. Дисперсионный анализ показал достоверную значимость всех факторов, влияющих на этот параметр ($F = 146,74$; $p < 0,001$).

Добавление ББУ приводило к увеличению содержания МДА в листьях горчицы на 38% по сравнению с контролем (рис. 3А). Однако наибольший окислительный стресс был отмечен при поливе 80 мМ раствором NaCl – содержание МДА увеличивалось в 2 раза. Внесение в почву ББУ при солевом воздействии нивелировало негативное влияние NaCl, снижая количество продуктов ПОЛ на 37% по сравнению с контролем (рис. 3А). Полив

растений горчицы раствором NaCl увеличивал содержание свободного пролина почти в 5 раз по сравнению с контролем, тогда как при совместном действии с ББУ его содержание было на 20% ниже (рис. 3Б).

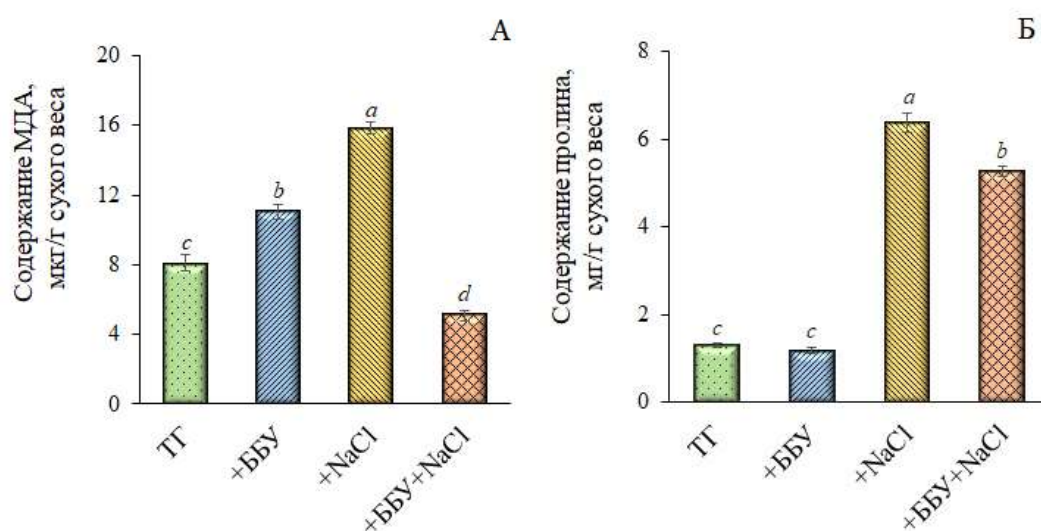


Рис. 3. Содержание малонового диальдегида, МДА (А) и свободного пролина (Б) в листьях трехнедельных семян горчицы сарептской. ТГ – контрольный торфогрунт. ББУ – бактериальное биоудобрение. Представлены средние арифметические значения \pm SE (n = 4). Разными латинскими буквами отмечены достоверные различия между вариантами при $p < 0,05$

Как было отмечено выше [19], *V. juncea* относится к культурам, для которых характерна высокая устойчивость к неблагоприятным факторам среды. Тем не менее, результаты исследования свидетельствуют о том, что используемая нами концентрация NaCl не только ингибировала рост салатной горчицы, но и вызывала окислительный стресс, сопровождающийся значительным увеличением содержания продуктов ПОЛ. Как известно, пролин играет ключевую роль в защите клеток от осмотического стресса. Поэтому NaCl-индуцируемая аккумуляция пролина является закономерной реакцией растения на солевой стресс. Более того, накопление пролина в клетках при стрессе способствует сохранению клеточного гомеостаза [18]. Подтверждением этому является отсутствие достоверных различий между вариантами по степени оводненности листьев горчицы: в среднем она составляла 93%.

Определение физико-химических показателей почвы по завершении эксперимента в сравнении с исходным ТГ показало отсутствие достоверных различий между всеми вариантами по значению рН, а также между субстратом до и после эксперимента – по значению ЕС, содержанию NaCl и ионов Na (табл.).

Таблица

Физико-химические показатели почвы до и после выращивания горчицы

Вариант	рН	ЕС, мСм/см	Содержание NaCl, %	Содержание Na, мг/г почвы
---------	----	------------	--------------------	---------------------------

Исходный ТГ	5,93 ± 0,03 ^a	0,623 ± 0,004 ^d	0,025 ± 0,003 ^b	0,212 ± 0,010 ^c
ТГ (контроль)	5,97 ± 0,06 ^a	0,851 ± 0,017 ^{cd}	0,028 ± 0,005 ^b	0,229 ± 0,010 ^c
+ББУ	6,08 ± 0,06 ^a	0,871 ± 0,025 ^c	0,038 ± 0,003 ^b	0,240 ± 0,011 ^c
+NaCl	5,86 ± 0,05 ^a	7,238 ± 0,107 ^b	0,433 ± 0,024 ^a	15,228 ± 0,515 ^b
+ББУ+NaCl	5,98 ± 0,05 ^a	8,350 ± 0,053 ^a	0,478 ± 0,013 ^a	17,375 ± 0,395 ^a

Добавление ББУ слегка увеличивало общее содержание солей в почве, в том числе NaCl (на 36%). Полив раствором NaCl увеличивал величину ЕС, содержание NaCl и Na по сравнению с контролем в среднем в 8,5, 15,5 и 66,5 раз, соответственно (таблица). При комбинированном действии ББУ и NaCl значения ЕС, содержание NaCl и Na возрастали еще больше, что объясняется таким свойством биочара как повышенная емкость катионного обмена [3; 9; 10]. Содержание ионов натрия в побегах горчицы при поливе солевым раствором увеличивалось в 6,8 раза (до 30,8 ± 0,6 мг/г сухого веса) по сравнению с контрольным ТГ и ББУ (в среднем 4,8 ± 0,1 мг/г сухого веса). Однако при использовании NaCl в комбинации с ББУ оно снижалось на 46% (до 21,1 ± 0,7 мг/г сухого веса). Возможно, это связано с адсорбирующей способностью биочара вследствие его повышенной емкости поглощения катионов [3].

Заключение

В условиях NaCl-засоления у горчицы салатной сорт Частушка было отмечено почти семикратное увеличение содержания ионов натрия в побегах и ингибирование ростовых процессов, что свидетельствует о недостаточно высокой солеустойчивости данного сорта. Несмотря на это, содержание фотосинтетических пигментов и их соотношение было стабильным. На действие хлорида натрия растения горчицы отвечали пятикратным увеличением содержания свободного пролина, что, вероятно, способствовало снижению окислительного стресса. Биоудобрение на основе берёзового биочара и галотолерантного штамма PGPR *Pseudomonas* sp. STF14 улучшало параметры роста, препятствовало повышенной аккумуляции Na⁺ и отчасти смягчало негативные эффекты солевого стресса.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, грант № 24-76-10062, <https://rscf.ru/project/24-76-10062>.

Литература

1. Аликулов Б.С. Механизмы снижения солевого стресса у растений при помощи солеустойчивых бактерий, выделенных из галофитов // Научное обозрение. Биологические науки. 2023. № 1. С. 98–104. <https://doi.org/10.17513/srbs.1321>.
2. Артамонова В.С., Дитц Л.Ю., Елизарова Т.Н., Лютых И.В. Техногенное засоление почв и их микробиологическая характеристика // Сибирский экологический журнал. 2010. Т. 3. С. 461–470.
3. Бучкина Н.П., Балашов Е.В., Шимански В., Игаз Д., Хорак Я. Изменение биологических и физических параметров почв разного гранулометрического состава после внесения биоугля // Сельскохозяйственная биология. 2017. Т. 52. № 3. С. 471–477. <https://doi.org/10.15389/agrobiol.2017.3.471rus>.

4. Гафурова Л.А., Саидова М.Э. Влияние почвенно-экологических факторов на изменение ферментативной активности засоленных почв Южного Приаралья // Научное обозрение. Биологические науки. 2019. № 3. С. 5–10. <https://doi.org/10.17513/srbs.1153>.
5. Иванищев В.В., Евграшкина Т., Бойкова О.И., Жуков Н.Н. Засоление почвы и его влияние на растения // Известия ТулГУ. 2020. № 3. С. 28–42.
6. Калинин Л.Г., Назаренко Л.В., Гордеева Е.Е. Модифицированный метод выделения свободных аминокислот и их определение на аминокислотном анализаторе // Физиология растений. 1990. Т. 37. № 3. С. 617–621.
7. Наместникова О.В., Бузаева М.В. Мониторинг засоления почв в системе обеспечения экологической безопасности крупного города // Современные проблемы гражданской защиты. 2019. № 1 (30). С. 44–52.
8. Осипов А.В., Колесниченко Т.В., Димитриенко О.В. Влияние антропогенных изменений на биологическую активность почв // Научный журнал «GLOBUS». 2021. Т. 7 (64). С. 26–28.
9. Шафигуллина Л.Р. Различные аспекты применения биочара // Вестник магистратуры. 2020. №5-5 (104). С. 7–10.
10. Chaganti V.N., Crohn D.M., Šimůnek J. Leaching and reclamation of a biochar and compost amended saline-sodic soil with moderate SAR reclaimed water // Agricultural Water Management. 2015. Vol. 158. P. 255–265. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.05.016>.
11. Chandran H., Meena M., Swapnil P. Plant growth-promoting rhizobacteria as a green alternative for sustainable agriculture // Sustainability. 2021. Vol. 13(19). P. 1–30. <https://doi.org/10.3390/su131910986>.
12. Drake J.A., Cavagnaro T.R., Cunningham S.C., Jackson W.R., Patti A.F. Does biochar improve establishment of tree seedlings in saline sodic soils? // Land Degradation and Development. 2016. Vol. 27. P. 52–59. <https://doi.org/10.1002/ldr.2374>.
13. Glick B.R. Plant Growth-Promoting Bacteria: Mechanisms and Applications // Scientifica. 2012. Vol. 5. P. 1–15. <https://doi.org/10.6064/2012/963401>.
14. Gul-Lalay, Ullah S., Shah S., Jamal A. Combined Effect of Biochar and Plant Growth-Promoting Rhizobacteria on Physiological Responses of Canola (*Brassica napus* L.) Subjected to Drought Stress // Journal of Plant Growth Regulation. 2024. Vol. 43(6). P. 1814–1832. <https://doi.org/10.1007/s00344-023-11219-1>.
15. Gunarathne V., Senadeera A., Gunarathne U., Biswas J.K., Almaroai Y.A., Vithanage M. Potential of biochar and organic amendments for reclamation of coastal acidic-salt affected soil // Biochar. 2020. Vol. 2 (1). P. 107–120. <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00036-4>.
16. Hammer E.C., Balogh-Brunstad Z., Jacobsen I., Olson P.A., Step S.L., Rilling M.C. A mycorrhizal fungus grows on biochar and captures phosphorus from its surfaces // Soil Biology and Biochemistry. 2014. Vol. 77. P. 252–260. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.06.012>.
17. Heath R.L., Packer L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation // Archives of Biochemistry and Biophysics. 1968. Vol. 125. P. 189–198. [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(68\)90654-1](https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1).
18. Kaur G., Asthir B. Proline: a key player in plant abiotic stress tolerance // Biologia Plantarum. 2015. Vol. 59(4). P. 609–619. <https://doi.org/10.1007/s10535-015-0549-3>.

19. Kumar K.V., Singh N., Behl H.M., Srivastava S. Influence of plant growth promoting bacteria and its mutant on heavy metal toxicity in *Brassica juncea* grown in fly ash amended soil // *Chemosphere*. 2008. Vol. 72(4). P. 678–683. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.03.025>.
20. Lichtenthaler H.K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic membranes // *Methods in Enzymology*. 1987. Vol. 148. P. 350–382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1).
21. Maleva M., Borisova G., Tripti, Tugbaeva A., Ahamuefule C., Salata A., Kumar A. Biofortification of pea microgreens through zinc-solubilizing bacteria inoculation with foliar iodine application // *Agriculture and Forest*. 2024. Vol. 70 (2). P. 123–134. <https://doi.org/10.17707/AgricultForest.70.2.9>.

References

1. Alikulov, B.S. (2023). Mexanizmy` snizheniya solevogo stressa u rastenij pri pomoshhi soleustojchivy`x bakterij, vy`delenny`x iz galofitov. *Nauchnoe obozrenie. Biologicheskie nauki*, 1, 98–104. (in Russ.). <https://doi.org/10.17513/srbs.1321>.
2. Artamonova, V.S., Ditc, L.YU., Elizarova, T.N., & Lyutykh, I.V. (2010) Tekhnogennoe zasolenie pochv i ikh mikrobiologicheskaya kharakteristika. *Sibirskij ehkologicheskij zhurnal*, 3, 461–470. (in Russ.).
3. Buchkina, N.P., Balashov, E.V., Shimanski, V., Igaz, D., & Xorak, Ya. (2017). Izmenenie biologicheskix i fizicheskix parametrov pochv raznogo granulometricheskogo sostava posle vneseniya biouglya. *Sel`skoxozyajstvennaya biologiya*, 52 (3), 471–477. (in Russ.). <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2017.3.471rus>.
4. Gafurova, L.A., & Saidova, M.E. (2019). Vliyanie pochvenno-e`kologicheskix faktorov na izmenenie fermentativnoj aktivnosti zasolenny`x pochv Yuzhnogo Priaral`ya. *Nauchnoe obozrenie. Biologicheskie nauki*, 3, 5–10. (in Russ.). <https://doi.org/10.17513/srbs.1153>.
5. Ivanishhev, V.V., Evgrashkina, T., Bojkova, O.I., & Zhukov, N.N. (2020). Zasolenie pochvy` i ego vliyanie na rasteniya. *Izvestiya TulGU*, 3, 28–42. (in Russ.). <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2020-3-1-28-42>.
6. Kalinkina, L.G., Nazarenko, L.V., & Gordeeva, E.E. (1990). Modificirovanny`j metod vy`deleniya svobodny`x aminokislot i ix opredelenie na aminokislotnom analizatore. *Fiziologiya rastenij*, 37 (3), 617–621. (in Russ.).
7. Namestnikova, O.V., & Buzaeva, M.V. (2019). Monitoring zasoleniya pochv v sisteme obespecheniya e`kologicheskoy bezopasnosti krupnogo goroda. *Sovremenny`e problemy` grazhdanskoj zashhity`*, 1 (30), 44–52. (in Russ.).
8. Osipov, A.V., Kolesnichenko, T.V., & Dimitrienko, O.V. (2021). Vliyanie antropogenny`x izmenenij na biologicheskuyu aktivnost` pochv. *Nauchnyj zhurnal «GLOBUS»*, 7 (64), 26–28. (in Russ.). <https://doi.org/10.52013/2658-5197-64-7-5>.
9. Shafigullina, L.R. (2020). Razlichny`e aspekty` primeneniya biochara. *Vestnik magistratury`*, 5-5 (104), 7–10. (in Russ.).
10. Chaganti, V.N., Crohn, D.M., & Šimůnek, J. (2015). Leaching and reclamation of a biochar and compost amended saline–sodic soil with moderate SAR reclaimed water. *Agricultural Water Management*, 158, 255–265. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.05.016>.
11. Chandran, H., Meena, M., & Swapnil, P. (2021). Plant growth-promoting rhizobacteria as a green alternative for sustainable agriculture. *Sustainability*, 13(19), 1–30. <https://doi.org/10.3390/su131910986>.

12. Drake, J.A., Cavagnaro, T.R., Cunningham, S.C., Jackson, W.R., & Patti, A.F. (2016). Does biochar improve establishment of tree seedlings in saline sodic soils? *Land Degradation and Development*, 27, 52–59. <https://doi.org/10.1002/ldr.2374>.
13. Glick, B.R. (2012). Plant Growth-Promoting Bacteria: Mechanisms and Applications. *Scientifica*, 5, 1–15. <https://doi.org/10.6064/2012/963401>.
14. Gul-Lalay, Ullah, S., Shah, S., & Jamal, A. (2024). Combined Effect of Biochar and Plant Growth-Promoting Rhizobacteria on Physiological Responses of Canola (*Brassica napus* L.) Subjected to Drought Stress. *Journal of Plant Growth Regulation*, 43(6), 1814–1832. <https://doi.org/10.1007/s00344-023-11219-1>.
15. Gunarathne, V., Senadeera, A., Gunarathne, U., Biswas, J.K., Almaroai, Y.A., & Vithanage, M. (2020). Potential of biochar and organic amendments for reclamation of coastal acidic-salt affected soil. *Biochar*, 2 (1), 107–120. <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00036-4>.
16. Hammer, E.C., Balogh-Brunstad, Z., Jacobsen, I., Olson, P.A., Step, S.L., & Rilling, M.C. (2014). A mycorrhizal fungus grows on biochar and captures phosphorus from its surfaces. *Soil Biology and Biochemistry*, 77, 252–260. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.06.012>.
17. Heath, R.L., & Packer, L. (1968). Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 125, 189–198. [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(68\)90654-1](https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1).
18. Kaur, G., & Asthir, B. (2015) Proline: a key player in plant abiotic stress tolerance. *Biologia Plantarum*, 59(4), 609–619. <https://doi.org/10.1007/s10535-015-0549-3>.
19. Kumar, K.V., Singh, N., Behl, H.M., & Srivastava, S. (2008). Influence of plant growth promoting bacteria and its mutant on heavy metal toxicity in *Brassica juncea* grown in fly ash amended soil. *Chemosphere*, 72(4), 678–683. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.03.025>.
20. Lichtenthaler, H.K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic membranes. *Methods in Enzymology*, 148, 350–382. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1).
21. Maleva, M., Borisova, G., Tripti, Tugbaeva, A., Ahamuefule, C., Salata, A., & Kumar, A. (2024). Biofortification of pea microgreens through zinc-solubilizing bacteria inoculation with foliar iodine application. *Agriculture and Forest*, 70 (2), 123–134. <https://doi.org/10.17707/AgricultForest.70.2.9>.

дата поступления: 27.12.2024

дата принятия: 06.02.2025

© Борисова Г.Г., Авраменко А.В., Тугбаева А.С., Собенин А.В., Малева М.Г., 2025

БИОМЕТРИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПЫЛЬЦЫ И ОСОБЕННОСТИ РОСТА ПЫЛЬЦЕВЫХ ТРУБОК *JUNIPERUS DELTOIDES* R. P. ADAMS В ГОРНОМ КРЫМУ

Y.V. Plugatar, O.O. Korenkova

BIOMETRIC INDICATORS OF POLLEN AND GROWTH CHARACTERISTICS OF POLLEN TUBES OF *JUNIPERUS DELTOIDES* R. P. ADAMS IN MOUNTAIN CRIMEA

Аннотация. В процессе индивидуального развития организма происходит его адаптация, закономерности и принципы которой, в том числе, отражаются в реализации мужского гаметофита. Естественное возобновление древостоя, прежде всего, зависит от показателей успешности формирования семян, которые, помимо прочего, определяются характеристиками пыльцы. Для видов, находящихся под угрозой исчезновения, особенно остро стоит проблема стабильности возобновления. Цель исследования – определить биометрические особенности и уровень жизнеспособности пыльцевых зёрен *J. deltoides* в Горном Крыму. Исходя из цели работы, были поставлены следующие задачи: определить морфометрические параметры пыльцевых зёрен *J. deltoides*, оценить потенциальную и реальную их жизнеспособность, а также выявить степень влияния факторов окружающей среды на развитие мужской репродуктивной сферы *J. deltoides* в Горном Крыму. В пределах каждой пробной площади определяли по 10 модельных деревьев, с которых собирали пыльцевые зерна в период их вылета. На временных ацетокарминовых препаратах измеряли диаметр пыльцевых зёрен в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Проращивание пыльцы осуществляли по методу висячей капли. Для определения интегральной оценки качества пыльцы была разработана собственная методика, включающая комплексный анализ её гистохимических и морфологических признаков, характеризующих жизнеспособность. Размеры пыльцевых зёрен *J. deltoides* в Горном Крыму отличаются в пределах ошибки. Средний диаметр фертильной пыльцы для вида, в условиях полуострова, составляет $27,08 \pm 0,49$ мкм. Средний процент фертильной (окрашенной) пыльцы составляет $55,19 \pm 3,84\%$. В 2002 г. этот показатель находился в диапазоне от 87,1% до 98,2%. Можно предположить, что за последние два десятилетия доля фертильной пыльцы снизилась в 1,7 раза. Наибольшее влияние на фертильность пыльцы *J. deltoides*, практически в равной степени, оказывают

Abstract. The process the organism individual development implies its adaptation, the patterns and principles of which, among other things, are reflected in the implementation of the male gametophyte. The forest stand natural renewal primarily depends on the indicators of the seed formation success, determined among other things by the pollen characteristics. For species threatened with extinction the problem of renewal stability is especially acute. The paper is aimed to determine the biometric characteristics and the viability level of *J. deltoides*'s pollen grains in the Mountainous Crimea. In that regard, the following tasks were set: to determine the morphometric parameters of *J. deltoides* pollen grains, to assess their potential and real viability, and to identify the degree of environmental factors influence on the development of the male reproductive system of *J. deltoides* in the Mountainous Crimea. Within each trial area, 10 model trees were identified to collect their pollen grains during the flight period. The diameter of pollen grains in two mutually perpendicular planes was measured on temporary acetocarmine preparations. Pollen germination was carried out using the hanging drop method. A new methodology was developed to determine the integral assessment of pollen quality, including a comprehensive analysis of its histochemical and morphological features characterizing viability. The sizes of *J. deltoides* pollen grains in Mountainous Crimea differ within the error limits. The average diameter of fertile pollen for the species, under the conditions of the peninsula, is 27.08 ± 0.49 μm . The average percentage of fertile (colored) pollen is $55.19 \pm 3.84\%$. At the beginning of the 21st century, this figure ranged from 87.1% to 98.2%. It can be assumed that within the past two decades, the amount of fertile pollen has decreased by 1.7 times. The greatest influence on the fertility of *J. deltoides* pollen is almost equally exerted by

высота над уровнем моря и эдафические условия мест произрастания особей (6,38% и 6,50% соответственно). При проведении интегральной оценки качества пыльцы крымской популяции *J. deltooides* установлено, что подавляющее большинство особей (64,71%) характеризуется хорошим качеством пыльцевых зёрен. Доля проросшей пыльцы *J. deltooides* в Горном Крыму низкая и составляет $20,16 \pm 1,12\%$. Основным фактором, оказывающим воздействие на жизнеспособность пыльцевых зёрен, выступает антропогенная нагрузка территории (сила влияния – 51,63%). Средняя доля проросшей пыльцы на значительно антропогенно нарушенных участках составляет $12,0 \pm 1,26\%$, что в 2,3 раза ниже, чем у особей, произрастающих на не нарушенных территориях.

Ключевые слова: пыльца; *J. deltooides*; фертильность; жизнеспособность; качество пыльцы; факторы окружающей среды; Горный Крым.

Сведения об авторах: Пругатарь Юрий Владимирович, ORCID: 0000-0001-5262-8957, член корреспондент РАН, д-р с.-х. наук, «Никитский ботанический сад – Национальный научный центр РАН», Республика Крым, г. Ялта, Россия, plugatar.y@mail.ru; Коренькова Олеся Олеговна, ORCID: 0000-0001-6482-7312, канд. биол. наук, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия, o.o.korenkova@mail.ru.

the altitude above sea level and the edaphic conditions of the places of growth of individuals (6.38% and 6.50%, respectively). During the integral assessment of the pollen quality of the Crimean population of *J. deltooides*, it was found that the overwhelming majority of individuals (64.71%) are characterized by good quality pollen grains. The proportion of germinated pollen of *J. deltooides* in Mountainous Crimea is low and amounts to $20.16 \pm 1.12\%$. The main factor influencing the viability of pollen grains is the anthropogenic load of the territory (the strength of influence is 51.63%). The average proportion of germinated pollen in significantly anthropogenically disturbed areas is $12.0 \pm 1.26\%$, which is 2.3 times lower than that of individuals growing in undisturbed areas.

Keywords: pollen; *J. deltooides*; fertility; viability; pollen quality; environmental factors; Mountain Crimea.

About the authors: Yurii V. Plugatar, ORCID: 0000-0001-5262-8957, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Agricultural Sciences, The Nikitsky Botanical Gardens - National Scientific Center of the RAS, Yalta, Russia, plugatar.y@mail.ru; Olesya O. Korenkova, ORCID: 0000-0001-6482-7312, Candidate of Biological Sciences, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia, o.o.korenkova@mail.ru.

Пругатарь Ю.В., Коренькова О.О. Биометрические показатели пыльцы и особенности роста пыльцевых трубок *Juniperus deltooides* R. P. Adams в Горном Крыму // Вестник Нижневартковского государственного университета. 2025. № 1(69). С. 15-28. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-1/02>

Plugatar, Y.V., & Korenkova, O.O. (2025). Biometric Indicators of Pollen and Growth Characteristics of Pollen Tubes of *Juniperus deltooides* R. P. Adams in Mountain Crimea. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 1(69), 15-28. (in Russ.). <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-1/02>

Введение. Одним из важных этапов репродуктивного цикла голосеменных является развитие мужской генеративной сферы. Процесс естественного возобновления древостоя, прежде всего, зависит от показателей успешности формирования семян, которые, помимо прочего, определяются характеристиками пыльцы (как количественными, так и качественными). Проблема стабильности возобновления особо остро стоит для видов, находящихся под угрозой исчезновения. К числу таких видов относятся все представители рода *Juniperus* естественно произрастающие на Крымском полуострове. В Красных книгах Республики Крым и города Севастополя *Juniperus deltooides* R. P. Adams (*Cupressus* L.) имеет статус – вид, сокращающийся в численности [1; 5; 8; 9; 23; 27; 30].

Биометрические характеристики пыльцы играют важную роль в систематике и филогении. Морфогенез мужского гаметофита позволяет выявить закономерности и механизмы адаптации организма, происходящие в процессе его индивидуального развития [2; 5; 11].

Одним из способов определения реальной жизнеспособности пыльцы является её проращивание. Именно жизнеспособность пыльцы и энергия её роста являются основными характеристиками оценки результативности развития мужских репродуктивных структур. Жизнеспособность пыльцевых зёрен отражается в их способности прорасти в пыльцевые трубки, а длина пыльцевых трубок, в свою очередь, позволяет оценивать энергию роста пыльцы. Снижение качества пыльцевых зёрен и тератология пыльцевых трубок могут отражать нарушение в мейозе микроспороцитов и, как следствие, приводить к пустосемянности или образованию дегенеративных зародышей [17-19; 22; 26].

Цель исследования – определить биометрические особенности и уровень жизнеспособности пыльцевых зёрен *J. deltoides* в Горном Крыму. Исходя из цели работы, были поставлены следующие задачи: определить морфометрические параметры пыльцевых зёрен *J. deltoides*, оценить потенциальную и реальную их жизнеспособность, а также выявить степень влияния факторов окружающей среды на развитие мужской репродуктивной сферы *J. deltoides* в Горном Крыму.

Материалы и методы исследования. В ходе изучения процессов развития мужской репродуктивной сферы *J. deltoides* было заложено 17 пробных площадей (ПП) по 0,2 га (рис. 1). Закладывали пробные площади в природных популяциях на высоте от 40 до 620 м н.у.м., в различных эдафо-орографических условиях.

В пределах каждой пробной площади определяли по 10 модельных деревьев, с которых, в 2022 году в период вылета пыльцы, собирали пыльцевые зерна посредством стряхивания микростробилов в простерилизованные бюксы. В период проведения лабораторных исследований их хранили в эксикаторе над хлористым кальцием при температуре плюс 5°C [7].

С использованием цифрового микроскопа Bresser LCD Micro 5mp на временных ацетокарминовых препаратах измеряли диаметр пыльцевых зёрен в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Кроме того, проводили их окраску ацетокармином по методике З.П. Паушевой [13], с целью выявления их потенциальной фертильности. На проращивание пыльцу ставили через 1–2 дня после сбора в висячей капле питательной среды – 1% раствор сахарозы при температуре 22°C [13]. Для каждого образца на 7-й и на 14-й день проращивания определяли качество пыльцы. Для анализа изменчивости признаков использовали шкалу коэффициентов вариации С.А. Мамаева [12]. Полученные данные обрабатывали методами математической статистики [10].



Рис. 1. Схема расположения пробных площадей в популяциях *J. deltoides* в Горном Крыму (1–2 – окрестности г. Инкерман; 3 – г. Чирка-Каясы; 4 – г. Самналых; 5 – г. Толака-Баир; 6–8 – г. Кара-Даг; 9 – г. Дракон; 10 – м. Мартьян; 11 – г. Папая-Кая; 12–13 – г. Коба-Кая; 14 – г. Сокол; 15 – г. Каршитерс; 16 – ск. Куллю-Кая; 17 – окрестности с. Кудрино)

Для определения интегральной оценки качества пыльцы была разработана собственная методика, включающая комплексный анализ её гистохимических и морфологических признаков, характеризующих жизнеспособность. На первом этапе проводили окрашивание пыльцы ацетокармином, а на втором осуществляли оценку окрашенной пыльцы по двум группам признаков: первая – доля окрашенных пыльцевых зёрен (0–5 баллов) и интенсивность окраски содержимого пыльцевого зерна (0–2 балла); вторая – размер пыльцевых зёрен (1–2 балла), их форма (1–4 балла) и аномалии развития (0–1 балл). Каждый признак оценивался в баллах. Максимальная оценка, которую мог получить образец пыльцы, составляла 14 баллов. Итоговая оценка качества пыльцы определялась посредством суммирования баллов гистохимических и морфологических характеристик её состояния. Образцы по уровню качества в зависимости от количества набранных баллов подразделяли следующим образом: крайне низкое качество пыльцы – 0–2 балла; низкое качество пыльцы – 3–5 баллов; удовлетворительное качество пыльцы – 6–8 баллов; хорошее качество пыльцы – 9–11 баллов; высокое качество пыльцы – 12–14 баллов [5].

В силу значительной неоднородности почвенно-климатических условий Горного Крыма (табл. 1) все пробные площади были разделены на четыре группы: в западную группу вошли пробные площади № 1–8; в югобережную – № 9–10; в восточную – № 11–15; в северную – № 16–17. Для западной группы использовали данные осадков метеорологической станции № 33991 (г. Севастополь); для восточной и югобережных групп – № 33976 (г. Феодосия) и № 33990 (г. Ялта) соответственно; для северной групп –

№ 339555и (г. Симферополь). Для выделенных групп подсчитывались средние температуры и количество осадков в зимне-весенний период до начала вылета пыльцы. Согласно данным С.П. Корсаковой и соавторов [6], именно эти климатические показатели являются определяющими в процессах опыления.

Таблица 1

Характеристика групп пробных площадей

Группа	Н, м	t, °С	Среднегодовое количество осадков, мм	Тип почв
Западная	1094	13,7	349	бурые горно-лесные
Южнобережная	415	14,3	736	коричневые
Восточная	100	13,4	500	коричневые
Северная	240	11,3	457	бурые горные остепненные

Примечание: Н – максимальная высота над. ур. м.; t – среднегодовая температура. Степень антропогенной нагрузки определялась по 3-бальной шкале путем оценки рекреационной дигрессии. Первая стадия рекреационной дигрессии (I) – вытаптывание поверхности почвы до 25%; вторая (II) – до 50%; третья (III) – свыше 50% [4]. Эдафический фактор оценивался по уровню плодородия почвы и её увлажненности [4].

Результаты и обсуждение. В ходе проведенных исследований установлено, что изменчивость размеров пыльцевых зёрен *J. deltoides* в Горном Крыму не превышают основную ошибку среднего значения (табл. 1). Средний размер фертильной пыльцы для вида, в условиях полуострова, составляет $27,08 \pm 0,49$ мкм, что полностью соответствует последним данным 2002 года, приведённым в работах А.И. Ругузовой [15] для *J. oxycedrus*. При этом, диаметр стерильной пыльцы, как правило, на 5–10% ниже. Подобная закономерность свойственна всем крымским можжевельникам. Дегенеративных или поврежденных пыльцевых зёрен обнаружено не было.

Согласно классификации С.А. Мамаева [12], изменчивость размеров пыльцевых зёрен крымской популяции *J. deltoides* можно характеризовать как низкую и очень низкую, коэффициент вариации не превышает 12%. Подобное явление было так же отмечено самим С.А. Мамаевым для представителей семейства *Pinaceae* Lindl. [12].

При проведении однофакторного дифференциального анализа не установлено достоверного влияния ни абиотических, ни антропогенных факторов на размеры пыльцевых зёрен исследуемого вида. Можно заключить, что данный показатель является генетически закрепленным для *J. deltoides*.

В результате оценки потенциальной фертильности пыльцы, установлено, что средний процент окрашенной пыльцы составляет $55,19 \pm 3,84\%$. По данным А.И. Ругузовой [15], в 2002 году этот показатель находился в диапазоне от 87,1% до 98,2%. В результате чего, можно предположить, что за последние два десятилетия число потенциально фертильной пыльцы снизилось в 1,7 раза. Такие изменения являются весьма существенными и свидетельствуют о необходимости выявления факторов, приведших к этому. При этом доля

окрашенной (потенциально фертильной пыльцы) в пределах популяции широко варьирует от $43,26 \pm 3,13\%$ (г. Папая-Кая) до $70,10 \pm 2,47\%$ (г. Чирка-Каясы) (табл. 2).

Таблица 2

Морфометрические и качественные показатели пыльцы *J. deltoides*

№ П/П	Диаметр пыльцы, мкм		Окрашенные пыльцевые зерна, %		Проросшие пыльцевые зерна, %		Качество пыльцы, баллы	
	$X \pm m_x$	CV, %	$X \pm m_x$	CV, %	$X \pm m_x$	CV, %	$X \pm m_x$	CV, %
1	26,13±0,46	11,8	48,92±3,13	17,8	3,43±0,28	18,0	8,00±0,38	12,5
2	26,28±0,44	10,3	47,18±4,26	17,0	6,67±0,54	18,4	8,44±0,47	18,6
3	26,90±0,71	11,9	65,10±2,47	14,9	23,46±1,13	19,2	12,18±0,41	16,8
4	27,11±0,60	9,7	57,89±3,28	20,1	26,86±1,72	17,3	9,88±0,54	18,3
5	27,33±0,48	11,3	62,70±4,21	18,9	31,80±3,03	19,5	10,25±0,53	14,5
6	27,41±0,75	10,8	52,21±4,63	21,9	29,82±1,50	18,6	10,33±1,2	20,2
7	26,50±0,56	8,3	54,76±4,18	19,4	24,85±1,62	20,1	10,56±0,93	20,5
8	27,20±0,43	9,4	56,43±4,78	16,0	27,07±1,94	19,9	9,92±1,15	17,5
9	27,15±0,28	8,3	55,84±3,96	18,2	29,14±1,29	18,3	10,97±0,95	14,3
10	26,84±0,21	6,8	54,75±4,14	20,0	26,95±2,16	18,7	10,43±0,43	10,9
11	27,44±0,30	7,3	43,26±3,13	16,8	5,81±0,44	17,4	7,33±0,56	11,4
12	26,56±0,51	10,6	48,77±4,14	19,5	2,60±0,19	18,2	8,55±0,42	14,7
13	27,07±0,46	7,7	46,16±3,93	20,8	6,76±0,37	19,0	8,19±0,55	16,2
14	27,08±0,62	12,0	58,73±4,79	16,6	25,91±1,56	16,2	10,01±0,63	12,2
15	27,51±0,86	11,4	61,09±4,23	20,5	29,76±1,52	20,2	10,14±0,72	18,6
16	27,44±0,53	9,9	57,70±4,66	15,2	27,49±2,10	17,0	9,21±0,44	12,8
17	27,82±0,59	10,6	61,73±4,24	21,5	31,41±2,83	17,3	9,00±0,73	13,0

В результате однофакторного дисперсионного анализа установлено, что наибольшее влияние на потенциальную фертильность пыльцы *J. deltoides*, практически в равной степени, оказывают высота над уровнем моря и эдафические условия мест произрастания особей (6,38% и 6,50% соответственно). Наименьшее число потенциально фертильной пыльцы – 47,2%, выявлено в нижнем высотном поясе (до 100 м н.у.м.). С увеличением высоты над уровнем моря возрастает и доля прокрашенной пыльцы. В высотном диапазоне от 500 до 700 м н.у.м. этот показатель достигает почти 63%. Подобное явление можно объяснить, в первую очередь, температурным режимом, который оказывает основное воздействие на развитие пыльцевых зёрен можжевельников [6].

Среди эдафических условий мест произрастания, наиболее благоприятным для развития пыльцевых зёрен *J. deltoides* является сухой можжевельниковый сугрудок (С₁). Число потенциально фертильной пыльцы в данных условиях составляет 62,7%. В сложных почвенных условиях сухого можжевельникового бора этот показатель снижается и составляет 52,2%. Подобная закономерность объясняется практически полным отсутствием плодородного слоя и низкой увлажненностью почвы, приводящим к снижению функционирования мужских генеративных структур.

Вторым, по величине воздействия (сила влияния – 3,12%) на развитие пыльцевых зёрен *J. deltoides* в горах Крыма выступает антропогенный фактор. Установлено, что с увеличением антропогенного прессинга на можжевельниковые древостои снижается доля

потенциально фертильной пыльцы. На пробных площадях, характеризующимися значительной антропогенной нарушенностью, доля потенциально фертильной пыльцы колеблется в диапазоне 43–48%. В древостоях, произрастающих на заповедных территориях, или просто не подверженных активной рекреационной нагрузке, изученный показатель, в среднем – 60,6% [3; 16]. Подобное явление можно объяснить общим снижением жизненного состояния растений на антропогенно нарушенных территориях.

Крайне незначительное воздействие на потенциальную фертильность пыльцевых зёрен *J. deltoides* оказывают локализация мест произрастания и экспозиция склона. Сила влияния факторов составляет 1,53% и 1,01% соответственно. Локальный фактор проявляет закономерности подобные, отмеченным ранее, для воздействия высоты мест произрастания особей над уровнем моря. Так, в древостоях северной группы, доля потенциально фертильной пыльцы – 60,0%. Среди основных климатических факторов, влияющих на развитие мужской репродуктивной сферы *J. deltoides*, исследователи выделяют влажность воздуха, которая в условиях северной границы крымской популяции вида выше. Экспозиционный фактор подтверждает эту закономерность. В древостоях, произрастающих на участках с западной экспозицией, доля потенциально фертильной пыльцы максимальная и составляет 57,7%.

При проведении интегральной оценки качества пыльцы крымской популяции *J. deltoides* установлено, что подавляющее большинство особей (64,71%) характеризуется хорошим качеством пыльцевых зёрен. Особей с низким качеством пыльцы, в пределах популяции, не было обнаружено вовсе. Что позволяет судить, о высокой потенциальной оплодотворяющей способности пыльцы, которая, в свою очередь, влияет на полнотелость семян и, как следствие, интенсивность естественного возобновления древостоев *J. deltoides* в Горном Крыму.

Среди ведущих факторов, оказывающих влияние на качество пыльцы *J. deltoides*, можно выделить эдафические условия и высоту над уровнем моря мест произрастания древостоев, а также антропогенное воздействие. Необходимо отметить, что сила влияния последнего фактора проявлена значительно сильнее, нежели в определении потенциальной фертильности пыльцевых зёрен и составляет 13,22%. В условиях низкой рекреационной нагрузке качество пыльцы, в среднем, оценивается на 15% выше, чем на участках с высокой степенью антропогенной нагрузки. На пробной площади № 11 (г. Папая-Кая) отмечается удовлетворительное качество пыльцы, что, в свою очередь, приводит к низкому качеству семян особей, произрастающих на данной территории. Необходимо отметить, что г. Папая-Кая является заповедной территорией, а именно Государственным природным заказником регионального значения Республики Крым «Папая-Кая». Однако, подобный охранный статус территории не препятствует противозаконной колоссальной туристической деятельности в реликтовых можжевельниковых древостоях. В результате чего, требуется ужесточение охранных мероприятий на данной территории.

Влияние эдафических и высотных факторов на качество пыльцы проявляет схожую зависимость с воздействием на фертильность пыльцевых зёрен. Так, древостои, произрастающие в нижнем высотном поясе, характеризуются удовлетворительным качеством пыльцы. При увеличении высоты над уровнем моря качество пыльцы возрастает. С улучшением эдафических условий так же прослеживается динамика на увеличение качества пыльцевых зёрен, при этом, во всех почвенных условиях среднее качество пыльцы – хорошее.

В меньшей степени проявляется влияние локального и экспозиционного факторов на интегральный показатель качества пыльцы. Древостои всех региональных групп и экспозиций склона, в целом, характеризуются хорошим качеством пыльцы.

В ходе проведения корреляционного анализа, установлена прямая связь качества пыльцы с размером пыльцевых зёрен. Коэффициент корреляции фертильности пыльцы от её размеров составляет 0,43. То есть при увеличении размеров пыльцы увеличивается и доля фертильных пыльцевых зёрен. Ранее было отмечено, что стерильные пыльцевые зерна, в среднем на 5–10% меньше, чем фертильные. При этом качество пыльцы в меньшей степени зависит её размеров ($r = 0,16–0,23$). Максимальная корреляция прослеживается между фертильностью пыльцы и её качеством ($r = 0,73$).

Таким образом, проведённые исследования, позволяют судить о высокой потенциальной оплодотворяющей способности пыльцевых зёрен *J. deltoides* в Горном Крыму. Однако, низкий уровень полнозернистости семян определяет необходимость определения не только оплодотворяющей способности пыльцы, а и её жизнеспособности путем проращивания на искусственной среде.

В ходе проведенных исследований установлено, что, в среднем, доля проросшей пыльцы *J. deltoides* в Горном Крыму низкая и составляет $20,16 \pm 1,12\%$. Показатель прорастания пыльцы имеет средний уровень изменчивости признака. Практически полным отсутствием проросшей пыльцы характеризуются особи, произрастающие на пробной площади № 12 (г. Коба-Кая) и № 1 (окрестности пгт. Инкерман). На долю жизнеспособных пыльцевых зёрен в данных древостоях приходится всего 2,60% и 3,43% соответственно (табл. 2). Эти территории находятся в различных частях Крымского полуострова, однако обе подвергаются значительному антропогенному прессингу. Максимальное количество жизнеспособной пыльцы отмечено на пробной площади № 5 (г. Толака-Баир) – $31,80 \pm 3,03\%$. В силу своей значительной удалённости от селитебной зоны данная территория в наименьшей степени испытывает на себе последствия деятельности человека. Согласно данным А.И. Ругузовой [15], в 2006 году максимальная доля проросшей пыльцы составляла 78,4%, что почти в 2,5 раза больше, что, в свою очередь, свидетельствует о погодичной динамике качества пыльцы исследуемого вида. При этом, в отличие от пыльцы *J. excelsa* [14] тератологии пыльцевых зёрен и трубок отмечено не было (рис. 2).

Однофакторный дисперсионный анализ показал, что основным фактором, оказывающим воздействие на жизнеспособность пыльцевых зёрен, выступает

антропогенная нагрузка территории (сила влияния – 51,63%). Средняя доля проросшей пыльцы на значительно антропогенно нарушенных участках составляет $12,0 \pm 1,26\%$, что в 2,3 раза ниже, чем у особей, произрастающих на не нарушенных территориях. Из литературных источников известно, что на формирование пыльцы оказывает воздействие загрязнение окружающей среды, возникающее в результате хозяйственной или рекреационной деятельности человека [21; 25; 29].

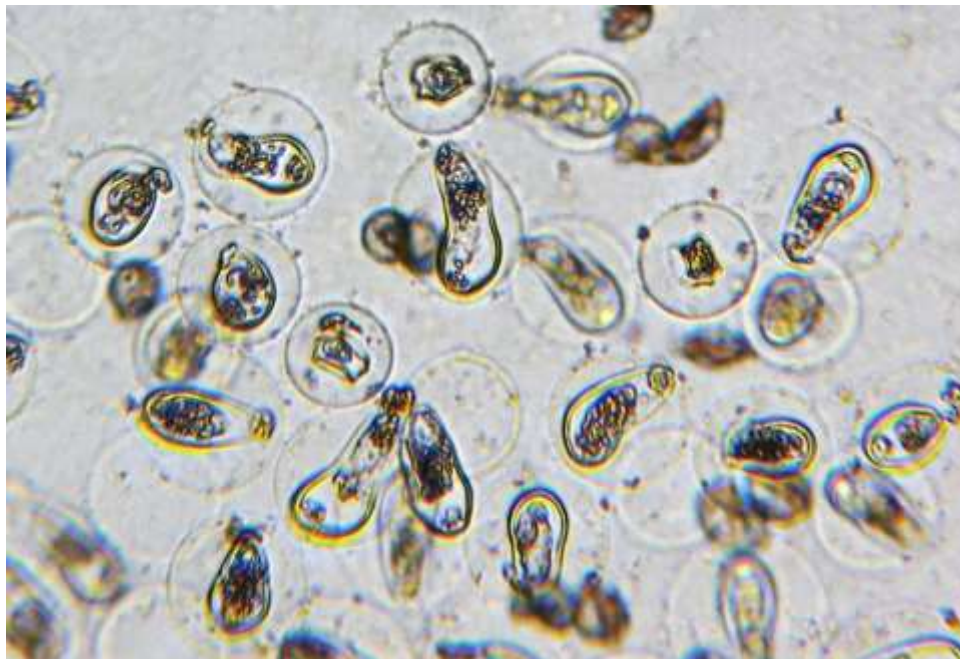


Рис. 2. Проросшие пыльцевые зерна *J. deltoides* в Горном Крыму

Кроме того, к ведущим факторам, влияющим на качество пыльцы, относятся локализация и высота мест произрастания над уровнем моря. Сила их воздействия составляет 24,90% и 40,64% соответственно. Установлено, что наименьшая доля жизнеспособной пыльцы (12,90%) формируется у особей, произрастающих в нижнем высотном поясе (до 100 м н.у.м). С увеличением высоты над уровнем моря возрастает и доля проросших пыльцевых зёрен. Так, на высоте более 600 м н.у.м. данный показатель почти в 2,5 раза выше и составляет 31,80%. Подобное явление можно объяснить различием во влажностном режиме. Из литературных данных известно, что на качество пыльцы оказывает влияние количество осадков и температура воздуха в период вылета пыльцы [20; 24; 28].

Выявлено, что в восточной части крымской популяции *J. deltoides* качество пыльцевых зёрен ниже, чем в других регионах. Доля проросшей пыльцы составляет 14,20%. Древостои *J. deltoides* в восточном Крыму находятся в пределах зон неорганизованного отдыха туристов, в результате чего сильнее подвергаются негативному воздействию со стороны человека. Северные части популяции подвергаются физическому уничтожению, однако данные территории имеют значительно меньшую плотность населения и низкий

уровень туристической нагрузки на регион. В результате чего доля жизнеспособной пыльцы составляет 29,50%, что в 2 раза выше, чем на востоке полуострова. Кроме того, данные территории разнятся по сумме годовых осадков.

В меньшей степени (4,41%) проявляется влияние экспозиционного фактора. Выявлено, что немного меньше жизнеспособных пыльцевых зёрен (их доля составляет 17,82%) у особей, произрастающих на слабо прогреваемых участках с северо-восточной и западной экспозициями. Достоверного влияния эдафических условий мест произрастания древостоев на качество их пыльцы установлено не было.

Таким образом, полученные результаты позволяют говорить о низком качестве мужского гаметофита и, как следствие, сложности при прорастании. На основании чего возникает необходимость в определении причин, приведших к низкой жизнеспособности пыльцевых зёрен.

Заключение. В ходе проведенных исследований установлено, что средний диаметр фертильных пыльцевых зёрен *J. deltoides* является генетически закрепленным признаком и составляет $27,08 \pm 0,49$ мкм ($CV \leq 12\%$). Среди ведущих факторов, оказывающих влияние на размеры пыльцевых зёрен, можно выделить высоту над уровнем моря (6,38%) и эдафические условия (6,50%) мест произрастания древостоев.

Установлено, что на долю потенциально жизнеспособной пыльцы *J. deltoides* приходится $55,19 \pm 3,84\%$ от общего количества пыльцевых зёрен. Интегральная оценка качества пыльцевых зёрен свидетельствует о том, что 64,71% особей характеризуются хорошим качеством пыльцы.

При оценке жизнеспособности пыльцы *J. deltoides* установлено, доля проросшей пыльцы *J. deltoides* в Горном Крыму низкая и составляет $20,16 \pm 1,12\%$ ($CV \leq 20\%$). В пределах большинства пробных площадей отношение проросшей пыльцы к прокрашенной составляет 1:2 – 1:3. Однако отмечены древостои, где данный показатель составляет 1:16 – 1:24. Такие пробные площади подвергаются активному антропогенному прессингу, сила влияния фактора – 51,63%. Кроме того, к ведущим факторам, влияющим на качество пыльцы, относятся регион и высота мест произрастания над уровнем моря. Сила их воздействия составляет 24,90% и 40,64% соответственно.

Литература

1. Геодакян В.А. Количество пыльцы как показатель эволюционной пластичности перекрестноопыляющихся растений // Доклады Академии наук СССР. 1977. Т. 234 (6). С. 1460–1463.
2. Глотов Н.В. Оценка генетической гетерогенности природных популяций: количественные признаки // Экология. 1983. № 1. С. 3–10.
3. Дзюба О.Ф., Кочубей О.В. Качество пыльцы растений как индикатор интенсивности воздействия нефтегазового комплекса на природную среду охраняемых территорий России // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2014. Т. 9. № 4. С. 1–24.

4. Исиков В.П., Плугатарь Ю.В., Коба В.П. Методы исследований лесных экосистем Крыма. Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2014. 252 с.
5. Коренькова О.О. Биометрические показатели, доброкачественность и жизнеспособность пыльцы можжевельника высокого (*Juniperus excelsa* M. Vieb.) в условиях Горного Крыма // Вестник Оренбургского государственного педагогического университета. Электронный научный журнал. 2024. № 1(49). С. 32–45. <https://doi.org/10.32516/2303-9922.2024.49.3>.
6. Корсакова С.П., Саркина И.С., Багрикова Н.А. Биология опыления *Juniperus excelsa* и *J. deltoides* (Cupressaceae) на Южном берегу Крыма // Ботанический журнал. 2019. Т. 104. № 10. С. 1574–1587. <https://doi.org/10.1134/S0006813619100077>.
7. Котелова Н.В. Проращивание пыльцы на искусственных средах и способы хранения пыльцы сосны обыкновенной // Научно-техническая информация МЛТИ. 1956. № 23. С. 13–20.
8. Красная книга города Севастополя. Калининград; Севастополь: ИД «РОСТ-ДООАФК», 2018. 432 с.
9. Красная книга Республики Крым. Растения, водоросли и грибы / отв. ред. д.б.н., проф. А.В. Ена и к.б.н. А.В. Фатерыга. Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2015. 480 с.
10. Лакин Г.Ф. Биометрия. М.: Высшая школа, 1990. 350 с.
11. Магомедмирзаев М.М. Введение в количественную морфогенетику. М.: Наука, 1990. 230 с.
12. Мамаев С.А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений. М.: Наука, 1973. 284 с.
13. Паушева З.П. Практикум по цитологии растений. М.: Агропромиздат, 1988. 271 с.
14. Плугатарь Ю.В., Коренькова О.О. Особенности возрастной структуры можжевельников древостоев (*Juniperus deltoides* R. P. Adams, *Juniperus excelsa* M.-Vieb.) Крыма // Вестник Оренбургского государственного педагогического университета. Электронный научный журнал. 2024. № 4(52). С. 26–37. <https://doi.org/10.32516/2303-9922.2024.52.2>.
15. Ругузова А.И. Биологические особенности можжевельника красного (*Juniper oxycedrus* L.) в Крыму в связи с его охраной: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Ялта, 2006. 18 с.
16. Сероглазова Н.Г., Бакташева Н.М. Индикация чистоты окружающей среды по состоянию пыльцы растений, произрастающих в дельте р. Волги // Вестн. МГОУ. Сер. Естественные науки. 2012. № 1. С. 65–68.
17. Сурсо М.В. Адаптация мужской репродуктивной сферы можжевельника обыкновенного к климату // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2018. № 6 (366). С. 57–69. <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.6.57>.
18. Сурсо М.В., Селиванова Н.В. Опыление у можжевельника обыкновенного (*Juniperus communis* L.): механизм вовлечения пыльцы и влияние мужского гаметофита на развитие семязачатков и «шишкоягод» // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2016. № 4 (352). С. 40–53. <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2016.4.40>.
19. Сурсо М.В., Чухчин Д.Г., Хвиюзов С.С., Покрышкин С.А. Механизм прорастания пыльцы и рост пыльцевых трубок у можжевельника обыкновенного (*Juniperus communis* L.) in vitro // Онтогенез. 2020. Т. 51. № 5. С. 351–362. <https://doi.org/10.31857/S0475145020050079>.

20. Barnes C.S., Dhar M., Portnoy J.M. Impact Of Temperature And Rainfall On Airborne Juniper Pollen // *Journal of Allergy and Clinical Immunology*. 2011. Vol. 127. Iss. 2. P. AB95. <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2010.12.384>.
21. Carmona-Velasco J., García-Cervigón A.I., Casimiro-Soriguer R. Population and reproductive structure of an endangered juniper from coastal pine forests // *Journal for Nature Conservation*. 2022. Vol. 67. P.126178. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2022.126178>.
22. Christopoulou A., Sazeides C.I., Fyllas N.M. Size-mediated effects of climate on tree growth and mortality in Mediterranean Brutia pine forests // *Science of The Total Environment*. 2022. Vol. 812. Art. 151463. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151463>.
23. Dias M.C., Oliveira J.M.P.F., Marum L., Pereira V., Almeida T., Nunes S., Araújo M., Moutinho-Pereira J., Correia C. M., Santos C. *Pinus elliottii* and *P. elliottii* × *P. caribaea* hybrid differently cope with combined drought and heat episodes // *Industrial Crops and Products*. 2022. Vol. 176. Art. 114428. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114428>.
24. Gross L., Weber R., Wolf M., Crooks J. L. The impact of weather and climate on pollen concentrations in Denver, Colorado, 2010-2018 // *Annals of Allergy, Asthma & Immunology*. 2019. Vol. 123. Iss. 5, P. 494–502.e4. <https://doi.org/10.1016/j.anai.2019.08.002>.
25. Jiménez-Moreno G., Anderson R.S., Markgraf V., Staley S.E., Fawcett P.J. Environmental and climate evolution in the Southwest USA since the last interglacial deduced from the pollen record from Stoneman lake, Arizona // *Quaternary Science Reviews*. 2023. Vol. 300. P. 107883. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107883>.
26. Krichevsky A., Kozlovsky S.V., Tian G.-W., Chen M.-H., Zaltsman A., Citovsky V. How Pollen Tubes Grow (Review) // *Developmental Biology*. 2007. Vol. 303. P. 405–420. <https://doi.org/10.1016/j.ydbio.2006.12.003>.
27. López-Orozco R., García-Mozo H., Oteros J., Galán C. Long-term trends in atmospheric *Quercus* pollen related to climate change in southern Spain: A 25-year perspective // *Atmospheric Environment*. 2021. Vol. 262. Art. 118637. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118637>.
28. Manangan A., Brown C., Saha Sh., Bell J., Hess J., Uejio Ch., Fineman S., Schramm P. Long-term pollen trends and associations between pollen phenology and seasonal climate in Atlanta, Georgia (1992-2018) // *Annals of Allergy, Asthma & Immunology*. 2021. Vol. 127. Iss. 4. P. 471–480.e4. <https://doi.org/10.1016/j.anai.2021.07.012>.
29. Muldavin E., Triepke F.J. North American Pinyon – Juniper Woodlands: Ecological Composition, Dynamics, and Future Trends // *Encyclopedia of the World's Biomes*. 2020. P. 516–531. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12113-X>.
30. Vergotti M.J., Fernández-Martínez M., Kefauver S.C., Janssens I.A., Penuelas J. Weather and trade-offs between growth and reproduction regulate fruit production in European forests // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2019. Vol. 279. Art. 107711. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107711>.

References

1. Geodakyan, V.A. (1977) Kolichestvo py`l`cy kak pokazatel` e`volyucionnoj plastichnosti perekrestnoopy`lyayushhixsya rastenij. *Doklady` Akademii nauk SSSR*, 234(6), 1460–1463. (in Russ.).
2. Glotov, N.V. (1983) Ocenka geneticheskoy geterogenosti prirodny`x populyacij: kolichestvenny`e priznaki. *E`kologiya*, (1), 3–10. (in Russ.).

3. Dzyuba, O.F., & Kochubej, O.V. (2014) Kachestvo py`l'cy rastenij kak indikator intensivnosti vozdejstviya neftegazovogo kompleksa na prirodnyuyu sredy ohranyaemy`x territorij Rossii. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*, 9 (4), 1–24. (in Russ.).
4. Isikov, V.P., Plugatar`, Yu.V., & Koba, V.P. (2014). Metody` issledovanij lesny`x e`kosistem Kry`ma. Simferopol`: IT «ARIAL». 252. (in Russ.).
5. Koren`kova, O.O. (2024) Biometricheskie pokazateli, dobrokachestvennost` i zhiznesposobnost` py`l'cy mozhzhevel`nika vy`sokogo (*Juniperus excelsa* M. Bieb.) v usloviyax Gornogo Kry`ma. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. E`lektronny`j nauchny`j zhurnal*, 1(49), 32–45. (in Russ.). <https://doi.org/10.32516/2303-9922.2024.49.3>.
6. Korsakova, S.P., Sarkina, I.S., & Bagrikova, N.A. (2019) Biologiya opy`leniya *Juniperus excelsa* i *J. deltoides* (*Cupressaceae*) na Yuzhnom beregu Kry`ma. *Botanicheskij zhurnal*, 104 (10), 1574–1587. (in Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0006813619100077>.
7. Kotelova, N.V. (1956) Prorashhivanie py`l'cy na iskusstvenny`x sredax i sposoby` xraneniya py`l'cy sosny` oby`knovennoj. *Nauchno-texnicheskaya informaciya MLTI*, (23), 13–20. (in Russ.).
8. Krasnaya kniga goroda Sevastopolya. (2018) Kaliningrad; Sevastopol`: ID «ROST-DOAFK», 432. (in Russ.).
9. Krasnaya kniga Respubliki Kry`m. Rasteniya, vodorosli i griby`. (2015) Simferopol`: IT «ARIAL», 480. (in Russ.).
10. Lakin, G.F. (1990). Biometriya. M.: Vy`sshaya shkola, 350. (in Russ.).
11. Magomedmirzaev, M.M. (1990) Vvedenie v kolichestvennyuyu morfogenetiku. M.: Nauka, 230. (in Russ.).
12. Mamaev, S.A. (1973) Formy` vnutrividovoj izmenchivosti drevesny`x rastenij. M.: Nauka, 284. (in Russ.).
13. Pausheva, Z.P. (1988) Praktikum po citologii rastenij. M.: Agropromizdat, 271. (in Russ.).
14. Plugatar', Ju.V., & Koren'kova, O.O. (2024) Osobennosti vozrastnoj struktury mozhzhevelovyh drevostoev (*Juniperus deltoides* R. P. Adams, *Juniperus excelsa* M.-Bieb.) Kryma. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Jelektronnyj nauchnyj zhurnal*. 4(52), 26–37. (in Russ.). <https://doi.org/10.32516/2303-9922.2024.52.2>.
15. Ruguzova, A.I. (2006) Biologicheskie osobennosti mozhzhevel`nika krasnogo (*Juniper oxycedrus* L.) v Kry`mu v svyazi s ego ohranoj: dis. ... kand. biol. nauk. Yalta, 163. (in Russ.).
16. Seroglazova, N.G., & Baktasheva, N.M. (2012) Indikaciya chistoty` okruzhayushhej sredy` po sostoyaniyu py`l'cy rastenij, proizrastayushhix v del`te r. Volgi. *Vestn. MGOU. Ser. Estestvenny`e nauki*, (1), 65–68. (in Russ.).
17. Surso, M.V. (2018) Adaptaciya muzhskoj reproduktivnoj sfery` mozhzhevel`nika oby`knoennogo k klimatu. *Izvestiya vy`sshix uchebny`x zavedenij. Lesnoj zhurnal*, 6 (366), 57–69. (in Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.6.57>.
18. Surso, M.V., & Selivanova, N.V. (2016) Opy`lenie u mozhzhevel`nika oby`knoennogo (*Juniperus communis* L.): mexanizm vovlecheniya py`l'cy i vliyanie muzhskogo gametofita na razvitie semyazchatkov i «shishkoyagod». *Izvestiya vy`sshix uchebny`x zavedenij. Lesnoj zhurnal*, 4(352), 40–53. (in Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2016.4.40>.

19. Surso, M.V., Chuxchin, D.G., Xviyuzov, S.S., & Pokry`shkin, S.A. (2020) Mexanizm prorastaniya py`l`cy i rost py`l`cevy`x trubok u mozhzhevel`nika oby`knoennogo (*Juniperus communis* L.) in vitro. *Ontogenez*, 51(5), 351–362. (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0475145020050079>.
20. Barnes, C.S., Dhar, M., Portnoy, J.M. (2011) Impact Of Temperature And Rainfall On Airborne Juniper Pollen. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 127(2), AB95. <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2010.12.384>.
21. Carmona-Velasco, J., García-Cervigón, A.I., & Casimiro-Soriguer, R. (2022) Population and reproductive structure of an endangered juniper from coastal pine forests. *Journal for Nature Conservation*, 67, 126178. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2022.126178>.
22. Christopoulou, A., Sazeides, C.I., & Fyllas, N.M. (2022) Size-mediated effects of climate on tree growth and mortality in Mediterranean Brutia pine forests. *Science of The Total Environment*, 812, 151463. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151463>.
23. Dias, M.C., Oliveira, J.M.P.F., Marum, L., Pereira, V., Almeida, T., Nunes, S., Araújo, M., Moutinho-Pereira, J., Correia, C.M., & Santos, C. (2022) *Pinus elliottii* and *P. elliottii* × *P. caribaea* hybrid differently cope with combined drought and heat episodes. *Industrial Crops and Products*, 176, 114428. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114428>.
24. Gross, L., Weber, R., Wolf, M., & Crooks, J. L. (2019) The impact of weather and climate on pollen concentrations in Denver, Colorado, 2010–2018. *Annals of Allergy, Asthma & Immunology*, 123 (5), 494–502.e4. <https://doi.org/10.1016/j.anai.2019.08.002>.
25. Jiménez-Moreno, G., Anderson, R.S., Markgraf, V., Staley, S.E., & Fawcett, P.J. (2023) Environmental and climate evolution in the Southwest USA since the last interglacial deduced from the pollen record from Stoneman lake, Arizona. *Quaternary Science Reviews*, 300, 107883. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107883>.
26. Krichevsky, A., Kozlovsky, S.V., Tian, G.-W., Chen, M.-H., Zaltsman, A., & Citovsky, V. (2007) How Pollen Tubes Grow (Review). *Developmental Biology*, 303, 405–420. <https://doi.org/10.1016/j.ydbio.2006.12.003>.
27. López-Orozco, R., García-Mozo, H., Oteros, J., & Galán, C. (2021) Long-term trends in atmospheric Quercus pollen related to climate change in southern Spain: A 25-year perspective. *Atmospheric Environment*, 262, 118637. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118637>.
28. Manangan, A., Brown, C., Saha, Sh., Bell, J., Hess, J., Uejio, Ch., Fineman, S., & Schramm, P. (2021) Long-term pollen trends and associations between pollen phenology and seasonal climate in Atlanta, Georgia (1992-2018). *Annals of Allergy, Asthma & Immunology*, 127(4), 471–480.e4. <https://doi.org/10.1016/j.anai.2021.07.012>.
29. Muldavin, E., & Triepke, F.J. (2020) North American Pinyon – Juniper Woodlands: Ecological Composition, Dynamics, and Future Trends. *Encyclopedia of the World's Biomes*, 516–531. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12113-X>.
30. Vergotti, M.J., Fernández-Martínez, M., Kefauver, S.C., Janssens, I.A., & Penuelas, J. (2019) Weather and trade-offs between growth and reproduction regulate fruit production in European forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 279, 107711. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107711>.

дата поступления: 22.11.2024

дата принятия: 11.02.2025

© Плугатарь Ю.В., Коренькова О.О., 2025

УДК 574.635

https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-1/03

*Текебаева Ж.Б., Рахымжан Ж., Базарханқызы А.,
Темирбекова А.Ж., Бейсенова Р.Р., Кулагин А.А.*

ОПЫТ АЛЬГОЛИЗАЦИИ ОЗЕРА МАЙБАЛЫК (АСТАНА, КАЗАХСТАН)

*Zh.B. Tekebayeva, Zh. Rahymzhan, A. Bazarhanқызу,
A.Zh. Temirbekova, R.R. Beisenova, A.A. Kulagin*

EXPERIENCE OF ALGOLIZATION OF LAKE MAIBALYK (ASTANA, KAZAKHSTAN)

Аннотация. Объектом исследования являлись пробы воды, культуры зеленых микроводорослей *Parachlorella kessleri* У1 и *Chlorella vulgaris* И2, озеро Майбалык (г. Астана). Цель и задачи исследования – изучить биоремедиационный потенциал консорциума двух штаммов микроводорослей *Parachlorella kessleri* У1 + *Chlorella vulgaris* И2 (далее У1+И2) посредством альголизации озера Майбалык по микробиологическим и гидрохимическим показателям. Данное озеро является крупным озером в г. Астана имея рыбохозяйственное значение. Состояние водоёма отражается на состоянии воздушного бассейна столицы. В мае-июне 2020 г. проведено исследование воды озера Майбалык по основным морфометрическим, гидрохимическим и гидробиологическим показателям. Для изучения действия и определения эффективности использования микроводорослей проведена предварительная наработка биомассы и альголизация консорциума У1+И2. Внесение консорциума микроводорослей через месяц показало улучшение санитарно-микробиологических показателей водоёма, благодаря высоким антимикробным свойствам и снижению по таким группам бактерий, как аммонификаторы, колиформных, гетеротрофных бактерий, кишечной палочки, псевдомонад, восковой бациллы, золотистого стафилококка, энтерококков, энтеробактерий, сальмонеллы, грибов и дрожжей. Через 30 суток после альголизации консорциумом И2+У1 зафиксировано улучшение не только органолептических характеристик воды, но и ряда гидрохимических показателей, включая снижение ХПК, концентрации взвешенных веществ, железа, СПАВ и фосфатов. Также отмечено повышение прозрачности, снижение цветности воды и отсутствие специфического запаха. Выявлено, что, хотя содержание БПК₅, нитратов, сульфатов в исходной пробе не превышало значений ПДК, внесение микроводорослей положительно

Abstract. The object of the study was water samples, cultures of green microalgae *Parachlorella kessleri* U1 and *Chlorella vulgaris* I2, Maybalyk Lake (Astana). The aim and objectives of the study were to study the bioremediation potential of a consortium of two strains of microalgae *Parachlorella kessleri* U1 + *Chlorella vulgaris* I2 (hereinafter U1+I2) through the algolization of Lake Maibalyk according to microbiological and hydrochemical indicators. This lake is a large lake in Astana with fishery importance. The state of the reservoir is reflected in the state of the capital's air basin. A study of the water quality of Lake Maibalyk was conducted on the main morphometric, hydrochemical and hydrobiological indicators in May and June of 2020. To study the effect and determine the efficiency of using microalgae, preliminary biomass production and algolization of the U1 + I2 consortium were carried out. The introduction of a consortium of microalgae showed an improvement in the sanitary and microbiological indicators of the reservoir after just one month, due to its high antimicrobial properties and a decrease in such groups of bacteria as ammonifiers, coliforms, heterotrophic bacteria, coli group bacteria, pseudomonas, wax bacilli, staphylococcus, enterococci, enterobacteria, salmonella, fungi and yeast. After algolization for 30 days by the consortium I2+U1, an improvement was recorded not only in the organoleptic characteristics of water, but also in a number of hydrochemical parameters, including a decrease in COD, suspended solids, iron, SSAA and phosphates. An increase in transparency, a decrease in water color and the absence of a specific odor were also noted. It was found that, although the content of BOD₅, nitrates, sulfates in the original sample did not exceed the MPC values, the introduction of microalgae had a positive effect on reducing the concentration of

сказалось на уменьшении концентрации данных веществ, что существенно повлияло на качество воды водоёма. Полученные результаты могут служить основой для разработки экологически чистых биотехнологий по улучшению качества воды. В дальнейшем необходимо проведение исследований в трехкратной повторности, что повысит достоверность и качество полученных данных, что позволит более эффективно проводить оценку состояния экосистемы водоёма и обеспечения безопасности использования воды.

Ключевые слова: озеро Майбалык; альголизация; микроводоросли; загрязнение; качество воды; биопрепарат.

Сведения об авторах: Текебаева Жанар Борамбаевна, ORCID: 0000-0002-5855-2655, г. Нижневартовск, Россия, ТОО «Республиканская коллекция микроорганизмов», г. Астана, Казахстан, zanartekebaeva@gmail.com; Рахымжан Жанар, ORCID: 0000-0003-0794-906X, PhD, НАО «Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева», г. Астана, Казахстан, r.zhanar80@mail.ru.; Базарханқызы Айдана, ORCID: 0000-0002-3584-9544, Медицинский университет, г. Астана, Казахстан, bazarkhankyzy.a@gmail.com.; Темирбекова Алия Жомартовна, ORCID: 0000-0001-8131-0390, ТОО «Республиканская коллекция микроорганизмов», г. Астана, Казахстан, atemirbekova94@gmail.com.; Бейсенова Райхан Рымбаевна, ORCID: 0000-0003-0913-9503, д-р биол. наук, НАО «Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева», Казахстан, Астана, raihan_b_r@mail.ru.; Кулагин Андрей Алексеевич, ORCID: 0000-0003-3107-1904, д-р биол. наук, профессор, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва, Россия, kulagin-aa@mail.ru.

these substances, which significantly affected the quality of the water in the reservoir. The results obtained can serve as a basis for developing environmentally friendly biotechnologies to improve water quality. In the future, it is necessary to conduct studies in triplicate, which will increase the reliability and quality of the data obtained, which will allow more effective assessment of the state of the ecosystem of the reservoir and ensure the safety of water use.

Keywords: Maybalyk Lake; algolization; microalgae; pollution; water quality; biological product.

About the authors: Zhanar B. Tekebayeva, ORCID: 0000-0002-5855-2655, Nizhnevartovsk, Russia, Republican Collection of Microorganisms LLP, Astana, Kazakhstan, zanartekebaeva@gmail.com; Zhanar Rahymzhan, ORCID: 0000-0003-0794-906X, PhD, Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, r.zhanar80@mail.ru.; Aidana Bazarhankyzy, ORCID: 0000-0002-3584-9544, Astana Medical University, Astana, Kazakhstan, bazarkhankyzy.a@gmail.com; Aliya Zh. Temirbekova, ORCID: 0000-0001-8131-0390, Republican Collection of Microorganisms LLP, Astana, Kazakhstan, atemirbekova94@gmail.com; Raikhan R.Beisenova, ORCID: 0000-0003-0913-9503, Doctor of Biological Sciences, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, raihan_b_r@mail.ru.; Andrey A. Kulagin, ORCID: 0000-0003-3107-1904, Doctor of Biological Sciences, Professor, National Research Technological University MISIS, Moscow, Russia, kulagin-aa@mail.ru .

Текебаева Ж.Б., Рахымжан Ж., Базарханқызы А., Темирбекова А.Ж., Бейсенова Р.Р., Кулагин А.А. Опыт альголизации Озера Майбалык (Астана, Казахстан) // Вестник Нижневартовского государственного университета. 2025. № 1(69). С. 29-42. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-1/03>

Tekebayeva, Zh.B., Rahymzhan, Zh., Bazarhankyzy, A., Temirbekova, A.Zh., Beisenova, R.R., & Kulagin, A.A. (2025). Experience of Algolization of Lake Maibalyk (Astana, Kazakhstan). *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 1(69), 29-42. (in Russ.). <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-1/03>

Введение. Загрязнение воды является существенной экологической проблемой и характеризуется наличием загрязняющих веществ в водных ресурсах, которые представляют опасность для всех живых организмов [4].

Загрязнение воды связано с ростом населения и индустриализацией [29]. Около 30% мировых ресурсов пресной воды используется промышленностью и городским населением,

которые, в свою очередь, производят большое количество сточных вод, содержащие химических вещества в различных концентрациях [22].

Загрязнение и очистка вод считаются проблематичным вопросом для многих стран мира, в том числе и для Казахстана. Качество воды является важнейшим фактором [10; 17; 27], поскольку оно напрямую влияет на здоровье и продуктивность водных организмов, что определяет продовольственную безопасность большинства стран, занимающихся аквакультурой.

Наиболее перспективными методами борьбы с загрязнением вод считаются биологические, основанные на использовании биохимической активности микроорганизмов (бактерий, простейших, микроводорослей и др.). Применение микроводорослей для доочистки сточных вод позволяет решить проблему возрастающей с каждым годом эвтрофикации поверхностных водоёмов [18].

Положительное значение микроводорослей в реабилитации водных техногенных экосистем состоит в фотосинтетической аэрации, продукции биологически активных веществ, обладающих стимулирующим или ингибирующим действием, а также способностью принимать непосредственное участие в утилизации некоторых поллютантов путем аккумуляции, трансформации и минерализации [3].

Микроводоросли обладают способностью поглощать из загрязнённых вод не только азот, фосфор, углекислый газ, которые необходимы для их жизнедеятельности, но также тяжёлые металлы и другие токсичные вещества. Очистка сточных вод с помощью биомассы микроводорослей является весьма перспективной и экономически выгодной [28].

В связи с этим, целью исследования являлась оценка эффективности альголизации озера Майбалык с использованием консорциума на основе зелёных микроводорослей для определения потенциала их применения в биологической очистке водоёмов.

Материалы и методы исследований

Отбор проб воды для изучения морфометрических и гидробиологических показателей озера проводили в июне-июле 2020 и 2021 гг. согласно известным методам в гидробиологической практике [11]. Координаты точек отбора проб (рисунок 1): точка 1 – на территории бывшего рыбопитомника «Maybalyk» (51°00'11.4"N, 71°28'30.3"E); точка 2 – заводь, со стороны заброшенной фермы (51°01'46.2"N, 71°30'31.1"E); точка 3 – место разрешённой рыбалки (50°59'30.1"N, 71°31'30.9"E).

Для проведения альголизации озера Майбалык предварительно была проведена наработка опытной партии консорциума микроводорослей У1+И2 с помощью фитобиореактора ИКА (10 Control, Германия) общим объемом 10 л на питательной среде Тамия.

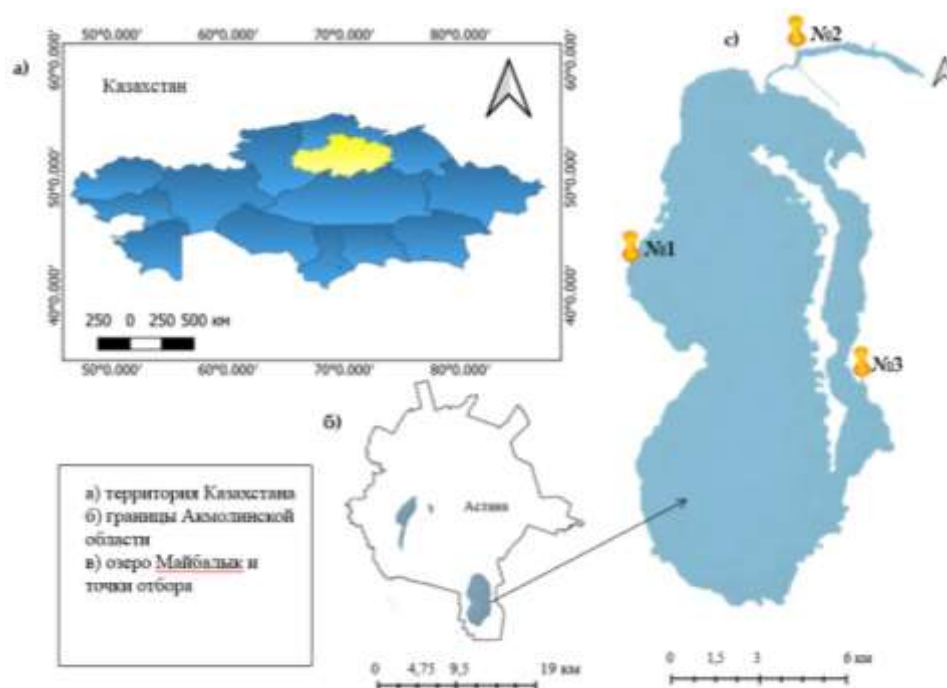


Рис. 1. Озеро Майбалык (г. Астана)

Микробиологический анализ воды озера Майбалык проводили в исходных образцах воды (до альголизации) и через 30 суток после обработки консорциума на основе ассоциации микроводорослей с помощью хромогенных селективных сред Compact Dry (Nissui Pharmaceutical Co. Ltd., Япония, предназначенные для определения и подсчета основных физиологических групп микроорганизмов: ТС (для выявления общего микробного числа, ОМЧ); ЕС (для выявления кишечной палочки и колиформных бактерий); YMR (для выявления дрожжей и грибов); X-SA (для выявления золотистого стафилококка); X-BC (для выявления восковой бациллы); ETC (для выявления энтерококка); ETB (для выявления энтеробактерий); CF (для выявления колиформных бактерий); SL (для выявления сальмонелл); AQ (для выявления гетеротрофов). Для этого методом предельных разведений был сделан высеv исследуемых образцов воды объемом 1 мл на поверхность готовых пластин Compact Dry. Чашки инкубировали согласно инструкции изготовителя в диапазоне от 28°C до 43°C в течение 1–3 суток для каждого вида микроорганизмов при аэробных условиях.

Химический анализ образцов проб воды озера Майбалык по основным гидрохимическим показателям во время исследования озера (2019–2020 гг), а также до и после альголизации (2021 г) проводили фотометрическим методом, используя портативный колориметр DR 900 (HACH, Китай), согласно протокола испытаний производителя. Для определения таких параметров как БПК₅, ХПК, растворённый кислород, перманганатная окисляемость, минерализация образцы проб передавали в аналитическую лабораторию Государственного коммунального предприятия «Астана Су Арнасы» (г. Астана).

Результаты и обсуждение

Озеро Майбалык (каз. «май балық» – жирная рыба) – бессточное озеро в Есильском районе города Нура-Ишимского междуречья, находится к юго-востоку от аэропорта. Озеро находится на высоте 350 метров над уровнем моря. Юго-восточный берег обрывистый, высота 3–4 метра, остальные пологие. Дно ровное, илистое. В Майбалык впадают 2 периодически действующих водотока – Карасу и Кызылсу, по которым в Майбалык весной поступает основная масса воды. Пересыхает редко. Толщина льда в малоснежные зимы достигает 1,0 метра, в обычные 0,6–0,8 метра (<https://clck.ru/3HPZYi>). Уровневый режим озера меняется в течение года, так весной во время снеготаяния уровень повышается, а с середины лета идет на спад. Питание водоёма в основном осуществляется за счет атмосферных осадков и весенних талых вод. Вблизи озера находятся сельскохозяйственные угодья.

Озеро Майбалык является единственным крупным озером в г. Астана, имеющим рыбохозяйственное значение. Ранее в озере Майбалык занимались воспроизводством рыбопосадочного материала на примере рыб семейства карповых. На сегодняшний день озеро находится на грани исчезновения, т. к. уровень воды в нем ежегодно падает с катастрофической скоростью. Причина не только в малоснежных зимах, но и в недавно построенной дамбе: она защищает от наводнений, однако при этом не позволяет талым водам просачиваться в озеро. Обмеление Майбалыка не только сведет на нет рыбный промысел, но также грозит атмосферными изменениями в столице: озеро Майбалык находится в нескольких километрах от мегаполиса, и благодаря ему в Астану поступают влажные массы воздуха. Единственное решение проблемы – направить в озеро воду из соседнего канала Нура – Ишим. В настоящее время около 35% берега и водного зеркала заросли тростником, глубина озера составляет всего 1 метр 20 сантиметров (<https://clck.ru/3HPZft>).

Проведено исследование (усредненная проба) озера Майбалык по основным морфометрическим, гидрохимическим и гидробиологическим показателям за 2020–2021 гг. Результаты представлены в таблице 1.

Данные показатели указывают на умеренное обогащение органикой и достаточный уровень кислорода, что создает благоприятные условия для проведения альголизации озера и в перспективе – для улучшения качества водоёма в целом.

Регулярное внесение суспензии хлореллы в рыбоводные пруды увеличивает численность кормовых водных организмов, улучшает гидрохимический, особенно кислородный режим водоёмов, что приводит к увеличению продуктивности рыбных прудов в поликультуре (толстолобик, белый амур, карп) до 40%. Благодаря выраженным антагонистическим действием ко многим патогенным микроорганизмам хлорелла имеет преимущества в приспособляемости к условиям аквакультуры [1].

Ввиду того, что микроводоросли для своего роста ассимилируют и потребляют N- и P- содержащие неорганические соединения, внедрение технологии на основе

микроводорослей для доочистки на очистных сооружениях является экономичным и экологически безопасным альтернативным методом удаления загрязняющих веществ из сточных вод [26]. К тому же, микроводоросли способны удалять такие микрозагрязнители как тяжёлые металлы, и стойкие органические загрязнители – хлорированные углеводороды, красители текстильной промышленности и гербициды, которые недостаточно удаляются в результате обычного процесса очистки [21; 24; 25; 29].

Таблица 1

Основные параметры воды озера Майбалык

Морфометрические параметры					
Площадь, га	Изрезанность береговой линии	Зарастаемость, %	Площадь водного зеркала, га	Максимальная глубина, м	Средняя глубина, м.
1	2	3	4	5	6
2000,00	1,65	35,00	1540,00	3,50	1,20
Гидрохимические показатели					
рН	БПК, мг/дм ³	Перманганатная окисляемость, мг/дм ³	Минерализация, мг/дм ³	Растворимый кислород, мг/дм ³	СО ₂ , мг/дм ³
8,10	2,80	9,54	1364,30	9,68	0,15
Гидробиологические показатели					
Ихтиофауна	Зоопланктон	Зообентос	Фитопланктон	Водная растительность	
щука, плотва, лещ, карась, карп, окунь, линь	коловратки, ветвистоусые, веслоногие, ракообразные	олигохеты, личинки хирономид, стрекоз, ракообразные, моллюски, пиявки	диатомовые, зелёные, сине-зелёные и эвгленовые микроводоросли	камыш, тростник, виды рдеста	

Для изучения действия и определения эффективности применения микроводорослей в 2021 г. проведена альголизация озера Майбалык консорциумом, сформированном из двух аборигенных штаммов *Parachlorella kessleri* (Fott & Nováková) Krienitz, 2004) У1 и *Chlorella vulgaris* (Beijerinck, 1890) И2 (далее У1+И2). Согласно ранее проведенным лабораторным исследованиям, штамм *P. kessleri* У1 обладает высокой способностью к аккумуляции биогенных элементов и главных ионов [15], тогда как штамм *C. vulgaris* И2 демонстрирует эффективность в аккумуляции тяжёлых металлов, таких как медь, цинк, железо и марганец [16]. Учитывая эти свойства, было принято решение о внесении ассоциации данных штаммов в виде консорциума У1+И2 в исследуемый водоём. Для подготовки консорциума биомасса была предварительно наработана в лабораторном фотобиореакторе общим объемом 30 л с плотностью суспензии 20 ± 10^6 кл/мл. Внесение консорциума осуществлялось вручную в 3-х точек озера Майбалык однократно в июне месяце при температуре воды 22 °С. Суспензию микроводорослей разливали на расстоянии 5–10 м и 15–20 м от берега с расчетом 2 л/га. На рисунке 2 представлен процесс внесения консорциума микроводорослей У1+И2 в озеро Майбалык.

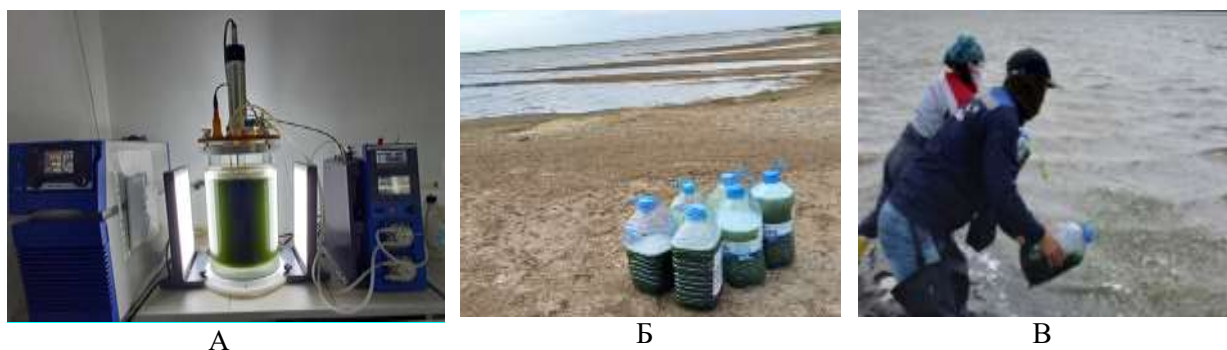


Рис. 2. Альголизация озера Майбалык:
А) наработка биомассы в фотобиореакторе; Б) биомасса микроводорослей перед внесением; В) внесение биопрепарата

Автохтонные микроорганизмы составляют основную часть микробиоты водоёмов. Они постоянно развиваются в значительном количестве или испытывают вспышки сезонного развития, являются существенным компонентом трофической цепи и определяют скорости круговоротов углерода, азота, серы и железа [20].

В связи с этим, проведен микробиологический анализ образцов проб воды озера Майбалык до и после альголизации ассоциацией штаммов микроводорослей. Результаты представлены в таблице 2 и на рисунке 3.

Таблица 2

Микробиологический анализ проб воды озера Майбалык до и после внесения консорциума микроводорослей

Обозначение группы	Наименование группы микроорганизмов	До альголизации, КОЕ/мл	После альголизации биопрепаратом У1+И2, КОЕ/мл
ТС	общее микробное число	392	111
CF	колиформные бактерии	232	10
PA	псевдомонады	36	8
AQ	гетеротрофные бактерии	226	57
YM	грибы и дрожжи	24	16
X-BC	восковая бацилла	15	4
EC	кишечная палочка	258	9
X-SA	золотистый стафилококк	56	50
ETC	энтерококки	6	1
ETB	энтеробактерии	125	2
SL	сальмонелла	20	10

В результате проведённых исследований выявлено, что через месяц после внесения консорциума микроводорослей наблюдается снижение параметров по всем исследуемым группам бактерий. Внесение биопрепарата уменьшило количество такой условно-патогенной и патогенной флоры как ОМЧ – в 3,5 раз, колиформных бактерий – в 23,2 раза, гетеротрофных бактерий – в 3,9 раз, кишечной палочки – 28,7 раз, псевдомонад – в 4,5 раз, восковой бациллы – в 3,8 раз, золотистого стафилококка – в 1,1 раза, энтерококков – в 6 раз, энтеробактерий – в 62,5 раз, сальмонеллы – в 2 раза, грибов и дрожжей – в 1,5 раза. Данные

результаты позволяют установить, что альголизация озера Майбалык штаммами микроводорослей рода *Chlorella* улучшила санитарно-микробиологические показатели водоёма благодаря высоким антимикробным свойствам.

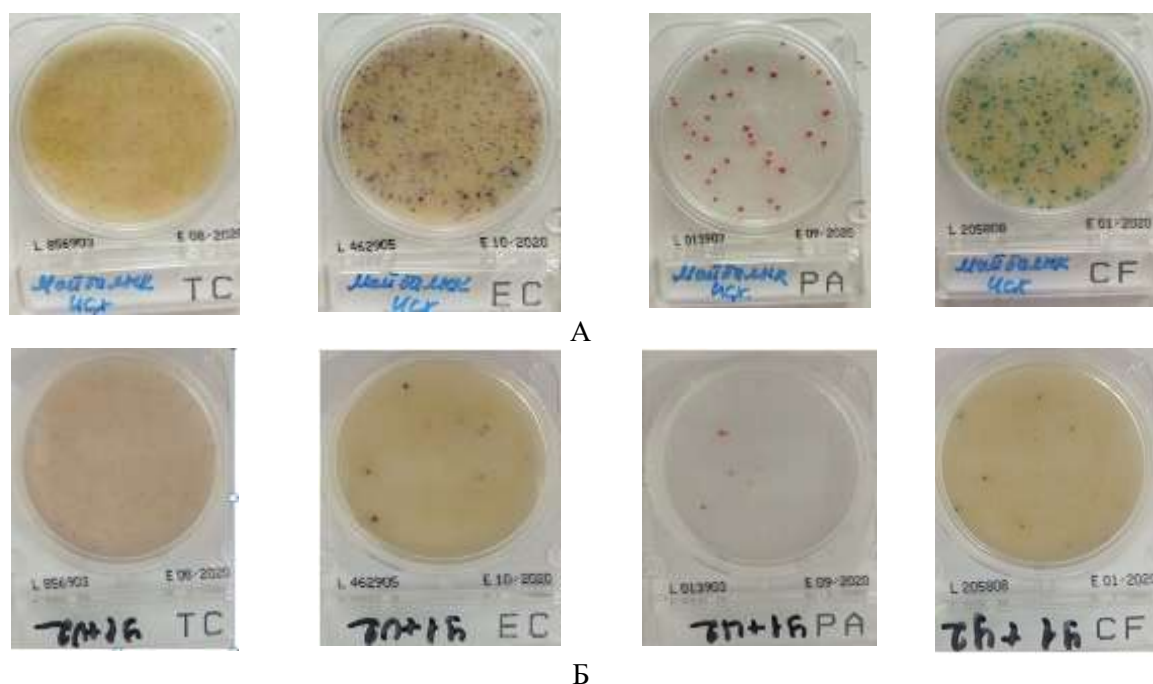


Рис. 3. Микробиологический анализ проб воды озера Майбалык:
А) до внесения консорциума микроводорослей;
Б) после внесения консорциума микроводорослей

Проведен анализ образцов проб воды озера Майбалык по основным гидрохимическим показателям до и после альголизации. Результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3

Гидрохимический анализ проб воды озера Майбалык до и после альголизации

№ п/п	Наименование показателя	ПДК для водоёмов рыбохозяйственного значения, мг/дм ³	Значения показателей, мг/л	
			исходное (до внесения)	после альголизации консорциумом И2 + У1
1	рН	6,50-8,50	8,10	7,96
2	БПК ₅	3,00	2,80	1,50
3	ХПК	30,00	50,00	35,00
4	Взвешенные вещества	0,25	30,60	18,00
5	Хлориды	300,00	1030,00	1018,00
6	Фосфат-ионы	0,15 для мезотрофных водоёмов	0,16	0,14
7	Азот аммонийный	0,50	0,90	1,44
8	Нитриты	0,08	0,013	0,018
9	Нитраты	40,00	24,80	8,00
10	Железо общее	0,10	0,40	0,15
11	СПАВ	0,10	0,22	0,15
12	Сульфаты	100,00	130,00	45,00
13	Фториды	0,05	0,38	0,28

Исследование образцов воды, отобранных до внесения консорциума, показало несоответствие ПДК для водоёмов рыбохозяйственного значения по следующим показателям: ХПК – 1,7 ПДК, взвешенных веществ – 122,4 ПДК, хлоридов – 3,4 ПДК, азота аммонийного – 1,8 ПДК, железа – 4 ПДК, СПАВ – 2,2 ПДК, сульфатов – 1,3 ПДК, фторидов – 7,6 ПДК. По показателям концентрации БПК₅, рН, фосфатов, нитритов и нитратов в пробе воды не превышали ПДК.

Через 30 суток после проведения альголизации озера Майбалык консорциумом И2 + У1 отмечены положительные изменения не только по органолептическим, но и по ряду биогенных и органических показателей, включая ХПК, взвешенные вещества, железо, СПАВ, фосфаты. Зафиксировано повышение прозрачности воды, снижение цветности воды, а также отсутствие специфического запаха. Следует отметить, что, хотя содержание БПК₅, нитратов, сульфатов в исходной пробе не превышало значений ПДК, внесение микроводорослей положительно сказалось на уменьшении концентрации данных веществ, что существенно может повлиять на качество воды водоёма в целом.

Наблюдалось также незначительное увеличение концентрации азота аммонийного, что связано, по-видимому, со свежим загрязнением, вызванным разведением и выгулом животных вблизи озера, хозяйственно-бытовой деятельностью человека, сезонной рыбалкой.

В последние годы процесс очистки водоёмов имеет большое экологическое значение. Эта проблема широко обсуждается в научной литературе. Функционирование предприятий, особенно расположенных в городах, наносит непоправимый ущерб экологии. Повышение требований к качеству поверхностных водоёмов заставляет искать более эффективные и экологически безопасные способы удаления загрязнений [12].

Для биоремедиации техногенных экосистем как правило, используют биопрепараты на основе бактерий, мицелиальных грибов и дрожжей, а также высшие растения [13]. Для предотвращения загрязнения водоёмов микроорганизмы и микроводоросли применялись как отечественными учеными, так и в мировой практике [3; 5; 6; 9; 14; 23; 30].

Доказано, что альголизация, т.е. внесение в водоёмы планктонного штамма хлореллы, нормализует гидробиологический режим, предохраняет их от «цветения» сине-зелеными водорослями, которые в процессе массового развития выделяют цианотоксины, губительно действующие на все водные гидробионты [1; 2; 7; 8]. Регулярное внесение хлореллы в течение нескольких лет способствует формированию полидоминантного альгокомплекса, который обеспечивает санитарно-гигиеническое и экологическое благополучие водной экосистемы [19].

Выводы. Таким образом, в результате проведённых исследований по альголизации озера Майбалык выявлена эффективность применения консорциума микроводорослей рода хлорелла У1+И2 как по гидрохимическим, органолептическим, так и по микробиологическим показателям. Установлено, что применение данного консорциума способствует значительному снижению условно-патогенной микрофлоры, тем самым улучшая санитарные показатели исследуемого водоёма. По гидрохимическим показателям

наибольшей деструкции подверглось содержание нитратов, железа и сульфатов. По остальным показателям наблюдалось незначительное снижение концентрации веществ, которые в целом не превышали нормы ПДК в исходных пробах. Полученные данные позволяют судить о том, что консорциум на основе автохтонных штаммов микроводорослей *Parachlorella kessleri* У1 и *Chlorella vulgaris* И2 имеет перспективу использования в мероприятиях, направленных на улучшение качества воды в поверхностных водоёмах и проведении биологической очистки от различных органико-минеральных поллютантов.

Литература

1. Богданов Н.И. Хлорелла – резерв повышения продуктивности животноводства // Ценовик.2002. № 4. С. 26.
2. Богданов Н.И. Биологическая реабилитация водоёмов.3-е изд., перераб. и доп. Пенза: РИО ПГСХА. 2008. 126 с.
3. Вайшла О.Б., Кулятов Д.В. Перспективные виды микроводорослей для биодеградации поллютантов водных экосистем юга западной Сибири // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 1(4). С. 787–789.
4. Дуктов А.П., Лавушев В.И. Экология аквакультуры. Курс лекций: учебно-методическое пособие. Горки: БГСХА. 2022. 103 с.
5. Закарья К.Д., Сармурзина З.С., Бисенова Г.Н., Уразова М.С., Шахабаева Г.С., Абитаева Г.К., Абжалелов А.Б. Биопрепарат на основе штаммов молочнокислых пробиотических бактерий для профилактики и лечения дисбактериозов, вызванными бактериальными возбудителями, а также оздоровления и очищения и аквасреды. Патент РК 33967, 16 октября 2019.
6. Заядан Б.К., Садвакасова А.К., Кирбаева Д.К., Болатхан К., Салех М., Бауенова М. Безотходная технология биологической очистки сточных вод с помощью микроводорослей // Вестник КазНУ. Серия экологическая. 2013. № 2/2 (38). С. 159–163.
7. Кульнев В.В., Почечун В.А. Опыт альголизации питьевых водоёмов Нижнетагильского промышленного узла // Биосфера. 2016. Т. 8. №3. С. 287–290.
8. Мелихов В.В., Кружилин И.П., Кузнецов П.И., Московец М.В. Биологическая мелиорация пресноводных водоёмов // Деловая слава России. 2008. С. 28–31.
9. Михайлюк А.В. Питательная среда Люка для культивирования микроводорослей. RU патент 2 556 126, 10 июля 2015.
10. Проскуренко И.В. Замкнутые рыбоводные установки. Москва: Издательство ВНИ. Речн. и озёрн. рыбн. хоз-ва. 2003. 152 с.
11. Сверчкова Н.В., Романовская Т.В., Самсонова А.С. и др. Консорциум бактерий – основа препарата для обеззараживания и очистки воды в прудах и водоёмах: Сборник научных трудов «Микробные биотехнологии: Фундаментальные и Прикладные аспекты». 2015. №7. С. 445–457.
12. Саинова В.Н., Катков И.С., Саинов Д.И. Некоторые аспекты технологии очистки сточных вод от биогенных элементов. Булатовские чтения: Сборник статей. 2018. С. 270–272.
13. Сафонова Е.Ф. Биодеградация компонентов нефтяного загрязнения с участием микроводорослей и цианобактерий: автореф. канд. биол. наук: Санкт-Петербург, 2004. 21 с.
14. Спотт С. Содержание рыб в замкнутых системах. Москва // Легкая и пищевая промышленность. 1983. 192 с.

15. Текебаева Ж.Б., Абжалелов А.Б., Абжалелова Л.А., Айтуганов К.А. Штамм микроводоросли *Parachlorella kessleri* У1, используемый для очистки загрязненных природных вод от различных поллютантов. Патент КЗ № 103430 от 20.10.2017 г.
16. Текебаева Ж.Б., Абжалелов А.Б., Абжалелова Л.А., Айтуганов К.А. Штамм микроводоросли *Chlorella vulgaris* И2, используемый для очистки загрязненных природных вод от различных поллютантов. Патент КЗ № 103434 от 20.10.2017 г.
17. Тренкеншу Р.П., Боровков А.Б., Лелеков А.С. Унифицированная лабораторная установка для исследования низших фототрофов. Севастополь. 2009. 41 с.
18. Фролова М.В., Комарова О.П., Московец М.В. Современная биотехнология в улучшении качества воды открытых водоёмов многоцелевого назначения // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2018. № 4(52). С. 2013-218. <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2018-04-30>.
19. Шеховцева Н.В. Экология водных микроорганизмов: учебное пособие// Ярослав. Гос. ун-т. Ярославль: ЯрГУ. 2008. 132 с.
20. Alprol, A.E., Haneash, A.M.M., Ashour, M., Abualnaja, K.M., Alhashmialameer, D., Mansour, A.T., Sharawy, Z.Z., Abu-Saied, M.A., & Abomohra, A.E.-F. (2021). Potential application of *Arthrospira platensis* lipid-free biomass in bioremediation of organic dye from industrial textile effluents and its influence on marine rotifer (*Brachionus plicatilis*). *Materials*, 14(16), 4446. <https://doi.org/10.3390/ma14164446>.
21. Burek P., Satoh Y., Fischer G., Kahil T., Nava Jimenez L., Scherzer A., Tramberend S., Wada Y., Eisner S., Flörke M., Hanasaki N., Magnuszewski P., Cosgrove B., Wiberg D. Water Futures and Solution; Fast Track and Initiative. Final Report. ADA Project Number 2725-00/2014. IIASA: Laxenburg, Austria, 2016. 113. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3267-2020>.
22. Castillo-Carvajal L.C., Sanz-Martin J.L., Barragan-Huerta B.E. Biodegradation of organic pollutants in saline wastewater by halophilic microorganisms: a review // Environmental science and pollution research. 2014. 21(16), 9578-9588. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3036-z>.
23. Haripriya U., Gopinath K.P., Arun J., Govarthanan M. Bioremediation of organic pollutants: A mini review on current and critical strategies for wastewater treatment // Arch. Microbiol. 2022. 204. 286. <https://doi.org/10.1007/s00203-022-02907-9>.
24. Kube M., Jefferson B., Fan L., Roddick F. The impact of wastewater characteristics, algal species selection and immobilisation on simultaneous nitrogen and phosphorus removal // Algal Res. 2018. 31. 478–488. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.01.009>.
25. Pasqualino J.C., Meneses M., Castells F. Life Cycle Assessment of Urban Wastewater Reclamation and Reuse Alternatives // J. Ind. Ecol. 2011. 15. 49-63. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2010.00293.x>.
26. Rahman M.S. Water quality management in aquaculture. Dhaka, BRAC Printers, 1992. 84.
27. Safi C., Zebib B., Merah O., Pontalier P.Y., Vaca Garcia C. Morphology, composition, production, processing and applications of *Chlorella vulgaris*: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. 35. 265-278. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.007>.
28. Singh D.V., Kumar Upadhyay A., Singh R., Singh, D.P. Persistent organic pollutants: Sources, impacts, and their remediation by microalgae. In Environmental Biotechnology // Apple Academic Press: New York, USA, 2022.

29. Schwarzenbach R.P., Egli T., Hofstetter T.B., Von Gunten U., Wehrli B. Global Water Pollution and Human Health // *Annual Review of Environment and Resources*. 2010. 35. 109-136. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-100809-125342>.

30. Usharani K., Sruthilaya K., Divya K. Determination of nitrate utilization efficiency of selective strain of *Bacillus sp.* Isolated from Eutrophic Lake, Theerthamkara, Kasaragod, Kerala // *Pollution*. 2017. 3 (1). 55-67. <https://doi.org/10.7508/pj.2017.01.007>.

References

1. Bogdanov, N.I. (2002). *Chlorella* – rezerv povysheniya produktivnosti zhivotnovodstva. *Tsenovik*, (4), 26. (In Russ.).

2. Bogdanov, N.I. (2008). *Biologicheskaya rehabilitatsiya vodoyemov. 3-ye izd., pererab. i dop. Penza: RIO PGSKHA.*, 126. (In Russ.).

3. Vayshlya, O.B., & Kulyatov, D.V. (2011). Perspektivnyye vidy mikrovodorosley dlya biodegradatsii pollyutantov vodnykh ekosistem yuga zapadnoy Sibiri // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 13, №1(4), 787-789. (In Russ.).

4. Duktov, A.P., & Lavushev, V.I. (2022). *Ekologiya akvakul'tury. Kurs lektsiy: uchebno-metodicheskoye posobiye. Gorki: BGSKHA*, 103. (In Russ.).

5. Zakar'ya, K.D., Sarmurzina, Z.S., Bisenova, G.N., Urazova, M.S., Shakhabayeva, G.S., Abitayeva, G.K., & Abzhalelov, A.B. (2019). Biopreparat na osnove shtammov molochnokislykh probioticheskikh bakteriy dlya profilaktiki i lecheniya disbakteriozov, vyzvannymi bakterial'nymi vzbuditel'yami, a takzhe ozdorovleniya i ochishcheniya i akvasredy. *Patent RK 33967, 16 oktyabrya* (In Russ.).

6. Zayadan, B.K., Sadvakasova, A.K., Kirbayeva, D.K., Bolatkhan, K., Salekh, M., & Bauyenova, M. (2013). Bezotkhodnaya tekhnologiya biologicheskoy ochistki stochnykh vod s pomoshch'yu mikrovodorosley. *Vestnik KazNU. Seriya ekologicheskaya*, №2/2 (38), 159-163. (In Russ.).

7. Kulnev, V.V., & Pochechun, V.A. (2016). Experience of algolization of drinking water bodies of the Nizhny Tagil industrial hub. *Biosphere*, 8, №3, 287-290. (In Russ.).

8. Melikhov, V.V., Kruzhilin, I.P., Kuznetsov, P.I., & Moskovets, M.V. (2008). *Biologicheskaya melioratsiya presnovodnykh vodoyemov. Delovaya slava Rossii*, 28-31. (In Russ.).

9. Mikhaylyuk, A.V. (2015). Pitatel'naya sreda Lyuka dlya kul'tivirovaniya mikrovodorosley. *RU patent 2 556 126, 10 iyulya* (In Russ.).

10. Proskurenko, I.V. (2003). *Zamknutyie rybovodnyie ustanovki. Moskva: Izdatel'stvo VNI Rechn. i ozern. rybn. khoz-va*, 152. (In Russ.).

11. Sverchkova, N.V., Romanovskaya, T.V., & Samsonova, A.S. i dr. (2015). Konsortsium bakteriy – osnova preparata dlya obezzarzhivaniya i ochistki vody v prudakh i vodoyemakh. *Sbornik nauchnykh trudov «Mikrobnyie biotekhnologii: Fundamental'nyie i Prikladnyie aspekty»*, (7), 445-457. (In Russ.).

12. Sainova, V.N., Katkov, I.S., & Sainov, D.I. (2018). Nekotoryie aspekty tekhnologii ochistki stochnykh vod ot biogenykh elementov. *Bulatovskiye chteniya: Sbornik statey*, 270-272. (In Russ.).

13. Safonova, Ye.F. (2004). *Biodegradatsiya komponentov neftyanogo zagryazneniya s uchastiyem mikrovodorosley i tsianobakteriy: avtoref. kand. biol. nauk: Sankt-Peterburg*. 21. (In Russ.).

14. Spott, S. (1983). *Soderzhaniye ryb v zamknutykh sistemakh. Moskva. Legkaya i pishchevaya promyshlennost'*, 192. (In Russ.).

15. Tekebayeva Zh.B., Abzhalelov A.B., Abzhalelova L.A., & Ajtuganov K.A. (2017). Shtamm mikrovdorosli *Parachlorella kessleri* U1, ispol`zuemy`j dlya ochistki zagryaznenny`x prirodny`x vod ot razlichny`x pollyutantov. Patent KZ №103430 (In Russ.).
16. Tekebayeva Zh.B., Abzhalelov A.B., Abzhalelova L.A., & Ajtuganov K.A. (2017). Shtamm mikrovdorosli *Chlorella vulgaris* I2, ispol`zuemy`j dlya ochistki zagryaznenny`x prirodny`x vod ot razlichny`x pollyutantov. Patent KZ №103434 (In Russ.).
17. Trenkenshu, R.P., Borovkov, A.B., & Lelekov, A.S. (2009). Unifitsirovannaya laboratornaya ustanovka dlya issledovaniya nizshikh fototrofov, 41. (In Russ.).
18. Frolova, M.V., Komarova, O.P., & Moskovets, M.V. (2018). Sovremennaya biotekhnologiya v uluchshenii kachestva vody otkrytykh vodoyemov mnogotselevogo naznacheniya. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vyssheye professional'noye obrazovaniye*, (4 (52)), 2013-218. (In Russ.). <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2018-04-30>.
19. Shekhovtseva, N.V. (2008). Ekologiya vodnykh mikroorganizmov. *Uchebnoye posobiye. Yarosl. Gos. un-t. Yaroslavl': Yar GU*. 132. (In Russ.).
20. Alprol, A.E., Haneash, A.M.M., Ashour, M., Abualnaja, K.M., Alhashmialameer, D., Mansour, A.T., Sharawy, Z.Z., Abu-Saied, M.A., & Abomohra, A.E.-F. (2021). Potential application of *Arthrospira platensis* lipid-free biomass in bioremediation of organic dye from industrial textile effluents and its influence on marine rotifer (*Brachionus plicatilis*). *Materials*, 14 (16), 4446. <https://doi.org/10.3390/ma14164446>.
21. Burek, P., Satoh, Y., Fischer, G., Kahil, T., Nava Jimenez, L., Scherzer, A., Tramberend, S., Wada, Y., Eisner, S., Flörke, M., Hanasaki, N., Magnuszewski, P., Cosgrove, B., & Wiberg, D. (2016). Water Futures and Solution; Fast Track and Initiative. *Final Report. ADA Project Number 2725-00/2014. IIASA: Laxenburg, Austria*. 113. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3267-2020>.
22. Castillo-Carvajal, L.C., Sanz-Martin, J.L., & Barragan-Huerta, B.E. (2014). Biodegradation of organic pollutants in saline wastewater by halophilic microorganisms: a review. *Environmental science and pollution research*. 21(16), 9578-9588. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3036-z>.
23. Haripriya, U., Gopinath, K.P., Arun, J., & Govarthanam, M. (2022). Bioremediation of organic pollutants: A mini review on current and critical strategies for wastewater treatment. *Arch. Microbiol.*, 204, 286. <https://doi.org/10.1007/s00203-022-02907-9>.
24. Kube, M., Jefferson, B., Fan, L., & Roddick, F. (2018). The impact of wastewater characteristics, algal species selection and immobilisation on simultaneous nitrogen and phosphorus removal. *Algal Res.*, 31, 478–488. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.01.009>.
25. Pasqualino, J.C., Meneses, M., & Castells, F. (2011). Life Cycle Assessment of Urban Wastewater Reclamation and Reuse Alternatives. *J. Ind. Ecol.*, 15, 49-63. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2010.00293.x>.
26. Rahman, M.S. (1992). Water quality management in aquaculture. Dhaka, BRAC Printers, 84.
27. Safi, C., Zebib, B., Merah, O., Pontalier, P.Y., & Vaca Garcia, C. (2014). Morphology, composition, production, processing and applications of *Chlorella vulgaris*: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 35, 265-278. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.007>.
28. Singh, D.V., Kumar Upadhyay, A., Singh, R., & Singh, D.P. (2022). Persistent organic pollutants: Sources, impacts, and their remediation by microalgae. *In Environmental Biotechnology. Apple Academic Press: New York, USA*.

29. Schwarzenbach, R.P., Egli, T., Hofstetter, T.B., Von Gunten, U., & Wehrli, B. (2010). Global Water Pollution and Human Health. *Annual Review of Environment and Resources*, 35, 109-136. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-100809-125342>.

30. Usharani, K., Sruthilaya, K., & Divya, K. (2017). Determination of nitrate utilization efficiency of selective strain of *Bacillus sp.* Isolated from Eutrophic Lake, Theerthamkara, Kasaragod, Kerala. *Pollution*, 3 (1), 55-67. <https://doi.org/10.7508/pj.2017.01.007>.

дата поступления: 19.12.2024

дата принятия: 07.02.2025

© Текебаева Ж.Б., Рахымжан Ж., Базарханқызы А., Темирбекова А.Ж.,
Бейсенова Р.Р., Кулагин А.А., 2025

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

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

ANATOMICAL, MORPHOLOGICAL AND BIOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF *PINUS SYLVESTRIS* L. ON THE TALC-MAGNEZITE DEPOSIT DUMPS

Аннотация. Целью исследований было изучение анатомо-морфологических и биохимических характеристик *Pinus sylvestris* L., произрастающей на отвалах Шабровского месторождения тальк-магнезита и в естественном местообитании (Средний Урал) и выявление влияния на них свойств субстрата. Анатомо-морфологические параметры хвои изучали на поперечных срезах с использованием системы обработки изображений «SIAMS Mesoplant». Содержание низкомолекулярных антиоксидантов, а также уровень перекисного окисления липидов (ПОЛ) в хвое исследовали стандартными спектрофотометрическими методами. Показано, что у *P. sylvestris* в техногенных условиях происходило уменьшение высоты, годовичного прироста, диаметра ствола деревьев, а также длины хвои. В хвое *P. sylvestris* отмечено уменьшение площади поперечного сечения, центрального цилиндра, мезофилла, числа смоляных ходов. Выявлено, что в хвое *P. sylvestris* в условиях отвалов происходило усиление накопления продуктов ПОЛ, свободного пролина, фенольных соединений и в том числе флавоноидов, а также уменьшение накопления азота и фосфора по сравнению с контрольными растениями из естественного лесного фитоценоза. Показано, что на анатомо-морфологические параметры *P. sylvestris* большое влияние оказывали такие свойства субстратов, как содержание углерода, гигровлаги и рН. Увеличение синтеза в хвое пролина, фенолов, флавоноидов и продуктов ПОЛ было связано с пониженными значениями гигроскопической влаги в субстратах отвалов.

Ключевые слова: сосна обыкновенная; анатомо-морфологическое строение; адаптивные реакции; антиоксиданты; промышленные отвалы.

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

Abstract. The aim of the research was to study the anatomical, morphological and biochemical characteristics of *Pinus sylvestris* L. growing on the dumps of the Shabrovsky talc-magnesite deposit and in its natural habitat (Middle Urals) and to identify the substrate influence on plants features. The anatomical and morphological parameters of the needles were studied on cross sections using the «SIAMS Mesoplant» image processing system. The content of low-molecular antioxidants, as well as the level of lipid peroxidation (POL) in the needles were studied using standard spectrophotometric methods. Under technogenic conditions a reduction of height, annual growth of shoots and the tree trunk diameter, as well as the length of the needles were shown. In the needles of *P. sylvestris*, a decrease in the cross-sectional area, central cylinder, mesophyll, and the number of resin ducts also was noted. It was revealed that in needles of trees under waste dump conditions there were an increase POL level, at the same time, the synthesis of low-molecular antioxidants (proline, phenolic compounds, including flavonoids) has been activated, the total phosphorus and nitrogen content in the needles were significantly lower compared to the control plants from the natural forest phytocoenosis. It was shown that the anatomical and morphological parameters of *P. sylvestris* were greatly influenced by such substrates properties as the total carbon content, hygroscopic moisture, and pH. The increase of the synthesis of proline, phenols, including flavonoids, and POL products in the needles were associated with reduced values of hygroscopic moisture in the waste dump substrates.

Key words: Scots pine; anatomical and morphological structure; adaptive reactions; antioxidants; industrial waste dumps.

About the authors: Nadezhda V. Chukina, ORCID: 0000-0001-5517-0240, Candidate of Biological Sciences; Ural Federal University

Б.Н. Ельцина; г. Екатеринбург, Россия, nady_dicusar@mail.ru; Лукина Наталия Валентиновна, ORCID: 0000-0001-6425-6214, канд. биол. наук, доцент, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина; г. Екатеринбург, Россия, 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; г. Екатеринбург, Россия, 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, г. Екатеринбург, Margarita.Glazyrina@urfu.ru; Учаев Антон Павлович, ORCID: 0000-0002-7670-0084, канд. биол. наук; Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина; г. Екатеринбург, Россия, Anton.Uchaev@urfu.ru.

named after the First President of Russia B.N. Yeltsin; Yekaterinburg, Russia, 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; Yekaterinburg, Russia, 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; Yekaterinburg, Russia, 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; Yekaterinburg, Russia, Margarita.Glazyrina@urfu.ru; Anton P. Uchaev, ORCID: 0000-0002-7670-0084, Candidate of Biological Sciences; Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin; Yekaterinburg, Russia, Anton.Uchaev@urfu.ru.

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>

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-Magnetite Deposit Dumps. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 1(69), 46-55. (in Russ.). <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-1/04>

Введение. Добыча полезных ископаемых приводит к катастрофическим изменениям экосистем и сопровождается разрушением литологической основы, уничтожением почвенного и растительного покровов [15]. Глубинные горные породы, вынесенные на дневную поверхность, имеют низкий актуальный уровень плодородия, что связано с незначительным содержанием в них элементов минерального питания, особенно азота [21], неблагоприятные значения pH (избыточная щелочность или кислотность), наличие засоления, высокое количество доступных для растений форм тяжёлых металлов, чрезмерную плотность укладки пород и низкую влагоемкость [4]. Восстановление подобных территорий происходит крайне медленно. Однако некоторые виды растений способны заселять нарушенные местообитания и успешно адаптироваться к условиям произрастания.

Одним из таких видов является сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L., семейство *Pinaceae* Lindl.) – основная лесообразующая порода на Урале. Как вид-пионер, требовательный к свету, он может колонизировать нарушенные участки [8].

Техногенное загрязнение окружающей среды несомненно негативно влияет на состояние растений и вынуждает их «включать» различные защитно-адаптационные механизмы для выживания в стрессовых условиях. Изучению механизмов устойчивости *P. sylvestris* к неблагоприятным условиям техногенных местообитаний посвящено много работ [12; 13; и др.]. Известно, что хвойные растения очень чувствительны к условиям произрастания, поэтому структурно-функциональные характеристики *P. sylvestris* могут служить информативными показателями, отражающими состояние растений в условиях загрязнения и степень адаптации к ним. Однако работы, включающие комплексную оценку анатомо-морфологических и биохимических параметров *P. sylvestris* на промышленных отвалах, немногочисленны [7; 19].

Цель работы – изучение анатомо-морфологических и биохимических характеристик *Pinus sylvestris* L. в естественных и трансформированных местообитаниях Среднего Урала (отвалы после добычи тальк-магнезита) и оценка влияния свойств субстрата на морфофизиологические параметры.

Объекты и методы исследования. Исследования проводились в июле 2022 и 2023 гг. Объектами исследования являлись насаждения *P. sylvestris* на отвалах Шабровского месторождения тальк-магнезита, расположенного в 27 км к югу от г. Екатеринбурга в подзоне южной тайги (56° 37' 45" с.ш. 60° 35' 59" в.д.).

Климат района континентальный. Лето тёплое, среднемесячная температура воздуха в июле +17°C. Зима холодная, длится с ноября по март, среднемесячная температура воздуха в январе -15,9°C. Среднегодовая температура воздуха +1°C. Среднегодовое количество осадков 577 мм (по данным метеостанции г. Сысерти) [18].

Отвалы платообразные террасированные, высотой до 30 м и площадью около 1 км² сложены пустыми и вскрышными породами, оставшимися после разработки месторождения открытым карьерным способом. Возраст отвалов варьирует от 55 до 70 лет.

Породы, складываемые в отвалах, сильнокаменистые (каменистость 50–90%), обеспеченность азотом и доступными фосфатами очень низкая, обменным калием – средняя и высокая. В породах повышенное содержание Mn, Cr, Cu, Mo, Co, Ni, Pb и др. [9].

Исследования показали, что на отвалах Шабровского тальк-магнезитового месторождения формируются лесные фитоценозы с доминированием *P. sylvestris* и *Betula pendula* Roth. В подлеске встречались *Salix caprea* L., *Salix myrsinifolia* Salisb., *Sorbus aucuparia* L., общее проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса от 1 до 50% [17].

Модельные деревья *P. sylvestris* отбирали на 4-х опытных площадках (далее – ОП), размерами 10x10 м каждая. Три из них (ОП1 – ОП3) заложены на участках отвалов с разной степенью каменистости, одна (ОП4) – на борту карьера «Старая линза». Контрольная

площадка (далее – КП) была заложена в естественном лесном фитоценозе, расположенном рядом с пос. Белоречка в 65 км от Екатеринбурга (57°20'14.50" с.ш. 60°1'51.21" в.д.).

Для исследования на каждой ОП и КП у 10 модельных деревьев (возраст 18–20 лет) измеряли высоту, годичный прирост ствола (длину годичных побегов), диаметр (толщину) ствола на высоте 1,3 м, а также собирали полностью сформированную двухлетнюю хвою с южной стороны кроны. Для изучения анатомических показателей хвою фиксировали в 70% растворе этилового спирта. На замораживающем микротоме МЗ-2 изготавливали поперечные срезы хвои и помещали их в глицерин. Измерения анатомических параметров хвои (площадь поперечного сечения, центрального цилиндра и мезофилла, толщина эпидермы и гиподермы, число и диаметр смоляных ходов) ($n=30$) проводили с использованием светового микроскопа и специализированной системы анализа изображений «SIAMS Mesoplant» («СИАМС», г. Екатеринбург).

Для изучения биохимических показателей использовали свежесобранную хвою. Определение интенсивности перекисного окисления липидов (ПОЛ) проводили по реакции с тиобарбитуровой кислотой согласно методике [29], свободного пролина – по реакции водной вытяжки хвои с ациднингидриновым реактивом после кипячения [3]. Для анализа содержания фенольных соединений и флавоноидов использовали этанольный экстракт хвои (200 мг в 10 мл 70% этилового спирта, 24 часа экстракция при комнатной температуре, в темноте). Содержание фенолов в хвое определяли по реакции с реактивом Фолина-Чокальтеу, расчёт производили по галловой кислоте, содержание флавоноидов – по реакции с $AlCl_3$, в пересчете на рутин, согласно методикам [23; 27].

Содержание общего азота определяли с использованием реактива Несслера, общего фосфора – с молибдатом аммония в серной кислоте спектрофотометрическим методом [2] после мокрого озоления навески сухой измельченной хвои смесью концентрированных кислот H_2SO_4 и $HClO_4$ (в соотношении 10:1).

Определение биохимических параметров проводили в 4-кратной биологической и 5 аналитических повторностях. Результаты представлены в расчете на сухой вес (с.в.) хвои.

На каждой ОП и в контроле для исследований отбирали образцы грунта с глубины 0–20 см. Общий органический углерод (С) определяли по методу Тюрина, рН анализировали потенциометрически. Обменный Са и Mg устанавливали титрованием [1]. Значения удельной электропроводности, общее содержание солей измеряли в водной суспензии «субстрат:вода» (1:2,5; вес/объем) с помощью портативного многопараметрического анализатора HI98129 Combo (Hanna Instruments GmbH, Австрия).

Обработку полученных данных проводили с использованием стандартного пакета программ Microsoft Excel 2019 и STATISTICA 10. Достоверность различий оценивали с помощью непараметрического критерия Манна-Уитни при уровне значимости $p < 0,05$.

Результаты исследования и обсуждение. Исследования показали, что субстраты отвалов Шабровского месторождения тальк-магнезита (ОП1 – ОП4) характеризовались

нейтральной и слабокислой реакцией среды, более низким содержанием элементов минерального питания растений и гигроскопической влаги по сравнению с КП (табл. 1).

Таблица 1

Агрохимические показатели субстратов исследуемых участков на отвалах Шабровского тальк-магнезитового месторождения и в контрольном местообитании

№ ОП	рН H ₂ O	Общий органический углерод, %	Гигро-влаги, %	Содержание, г/100 г субстрата		Электропроводность, мСм/см	Общее содержание солей, мг/л
				Са	Mg		
ОП1	6,8–7,0	0,68	0,75	0,068	0,031	0,203	102
ОП2	6,8–7,0	2,39	1,94	0,052	0,022	0,325	162
ОП3	6,7–7,1	1,45	1,15	0,078	0,048	0,150	75
ОП4	6,3–6,8	2,78	3,11	0,104	0,066	0,223	101
КП	6,2–6,3	4,3	11,40	0,429	0,034	0,163	81

По показателю удельной электропроводности (значения менее 2 мСм/см) и общему содержанию солей все исследованные субстраты можно отнести к слабозасоленным [10].

Сравнение морфологических параметров *P. sylvestris*, произрастающей на отвалах и в естественном лесу показало, что высота 18–20-летних особей на всех ОП варьировала от 1,73 до 4,25 м, а на КП – в среднем составляла 5,60 м (табл. 2).

Таблица 2

Анатомо-морфологические показатели *P. sylvestris*, произрастающей на отвалах Шабровского тальк-магнезитового месторождения и в контрольном местообитании

Параметры	ОП1	ОП2	ОП3	ОП4	КП
Морфологические показатели					
Высота ствола, м	3,20±0,24b	1,73±0,35a	1,96±0,18a	4,25±0,21c	5,60±0,13d
Диаметр ствола, см	1,80±0,25c	0,90±0,10a	1,32±0,15b	9,0±0,25d	12,87±0,51e
Прирост ствола, см	13,60±0,70a	8,43±2,36a	9,78±0,56a	17,10±1,10b	28,01±0,95c
Длина хвои, см	3,74±0,04a	4,73±0,11b	4,40±0,06b	5,54±0,04c	6,59±0,058d
Анатомические показатели хвои					
Площадь поперечного сечения хвои, мм ²	0,49±0,01a	0,41±0,01b	0,60±0,02c	0,89±0,02d	1,10±0,013e
Площадь центрального цилиндра, мм ²	0,12±0,003b	0,10±0,003a	0,15±0,001c	0,24±0,001d	0,27±0,002e
S _{ц.ц} /S _{п.сеч} , %	25,54±0,34a	25,10±0,39a	25,67±0,48a	27,20±0,30b	25,77±0,28a
Площадь мезофилла, мм ²	0,28±0,01a	0,25±0,01b	0,36±0,01c	0,55±0,01d	0,74±0,01e
Толщина эпидермы, мкм	16,05±0,25b	13,49±0,28a	15,84±0,34bc	15,25±0,25c	19,32±0,24d
Толщина гиподермы, мкм	10,41±0,14b	9,71±0,11a	10,77±0,20b	10,42±0,18b	12,56±0,21c
Число смоляных ходов, шт.	6,48±0,19b	3,68±0,21a	6,19±0,21b	7,1±0,18c	9,9±0,17d
Диаметр смоляных ходов, мкм	41,82±0,60b	35,52±0,83a	46,84±0,64c	44,93±0,75c	47,19±0,69c

Примечание. Представлены средние арифметические значения ± SE (n = 30). Разными латинскими буквами отмечены достоверные различия между участками при p < 0,05.

Исследования показали, что в условиях отвалов происходило статистически значимое снижение морфометрических параметров: уменьшение годичного прироста (в 1,6–3,3 раза), диаметра ствола деревьев (в 1,4–14,3 раза), а также длины хвои (в 1,2–1,5 раза) по сравнению с деревьями из естественного лесного фитоценоза, что является ответной реакцией растений на стресс [5] (табл. 2).

Корреляционный анализ выявил высокое влияние агрохимического состава субстратов, а именно: содержания С, гигровлаги и рН на высоту ствола ($r = 0,69$; $r = 0,83$; $r = -0,85$ соответственно), его диаметр ($r = 0,85$; $r = 0,88$; $r = -0,93$), прирост ($r = 0,85$; $r = 0,88$; $r = -0,89$) и на длину хвои ($r = 0,98$; $r = 0,91$; $r = -0,84$).

Известно, что структура листа в целом, и отдельных его тканей очень пластична и обнаруживает большую зависимость от экологических условий и в наибольшей степени – от уровня водоснабжения и освещения [14].

Анализ анатомического строения хвои *P. sylvestris* показал, что на ОП по сравнению с КП наблюдалось статистически значимое уменьшение таких показателей, как площадь поперечного сечения хвои, центрального цилиндра, ассимиляционных тканей (мезофилла), толщины эпидермы и гиподермы. Число смоляных ходов в хвое с отвала было меньше, чем в контроле, но статистически значимых различий диаметра смоляных ходов не было выявлено (табл. 2). Самым стабильным из изученных анатомических характеристик хвои являлся показатель отношения площади центрального цилиндра к площади поперечного среза ($S_{ц.ц}/S_{п.сеч.}$). На всех исследованных участках данный показатель варьировал незначительно, в пределах от 25,1% до 27,2%. Это свидетельствует об оптимальном соотношении между проводящей системой хвои *P. sylvestris* и ассимиляционными тканями.

Полученные результаты согласуются с литературными данными. Многие авторы также отмечают уменьшение анатомо-морфологических характеристик хвои *P. sylvestris* в неблагоприятных условиях среды [7; 24].

Корреляционный анализ показал высокое влияние агрохимического состава субстратов, а именно: содержания С, гигровлаги и рН на площадь поперечного сечения хвои ($r = 0,81$; $r = 0,93$; $r = -0,97$), центрального цилиндра ($r = 0,79$; $r = 0,88$; $r = -0,81$) и мезофилла ($r = 0,84$; $r = 0,89$; $r = -0,95$).

Воздействие стрессовых факторов на растения нередко приводит к увеличению содержания в клетках продукта ПОЛ – малонового диальдегида (МДА), в связи с чем концентрация данного метаболита может служить индикатором уровня окислительного стресса, который испытывают растения в условиях техногенного загрязнения [26].

Согласно полученным результатам, на всех ОП в хвое исследованных особей *P. sylvestris* было зарегистрировано увеличение содержания МДА по сравнению с КП, что свидетельствует о наличии окислительного стресса, и отмечается в работах многих авторов [11; 16]. Для борьбы с негативными последствиями окислительного стресса, развивающегося в условиях высоких техногенных нагрузок, в растениях функционирует система антиоксидантной защиты, одним из важных звеньев которой являются

низкомолекулярные антиоксиданты, такие как фенолы, в том числе флавоноиды, пролин и др. Данные соединения имеют различные механизмы действия и могут как непосредственно препятствовать развитию окислительного стресса, инактивируя образующиеся активные формы кислорода, так и участвовать в устранении его последствий, например, способствуя репарации поврежденных макромолекул [22].

Установлено, что в хвое растений *P. sylvestris*, произрастающих на ОП наблюдалось значительное (в среднем в 2,4 раза) увеличение содержания свободного пролина по сравнению с растениями с КП (табл. 3). При воздействии неблагоприятных факторов, таких, например, как высокие концентрации тяжёлых металлов в субстрате, обычно наблюдается увеличение содержания свободного пролина, что можно рассматривать как защитно-приспособительную реакцию к условиям среды [6; 25].

Общее содержание фенольных соединений в хвое *P. sylvestris*, произрастающей на участках отвала Шабровского месторождения, также увеличивалось по сравнению с контролем в 1,5 раза (табл. 3). Отмечено существенное (в 2,1–2,8 раза) увеличение концентрации флавоноидов в хвое деревьев, произрастающих на отвалах.

Таблица 3

Биохимические показатели хвои *P. sylvestris*, произрастающей на отвалах Шабровского тальк-магнетитового месторождения и в контрольном местообитании

Показатели	ОП1	ОП2	ОП3	ОП4	КП
ПОЛ, нМ МДА /г с.в.	285,37±5,13с	368,41±5,95е	320,76±4,04d	248,46±0,95b	135,49±4,79а
Пролин, мг/г с.в.	347,31±11,18с	480,82±11,30d	375,85±7,12с	168,66±6,16b	144,08±2,42а
Фенолы, мг/г с.в.	16,48±0,37b	19,06±0,32с	18,63±0,25с	23,37±0,37d	12,80±0,37а
Флавоноиды, мг/г с.в.	5,09±0,12b	5,29±0,18b	6,16±0,30с	6,67±0,53с	2,38±0,14а
Азот, %	0,97±0,02b	1,09±0,01с	0,93±0,01а	1,27±0,05d	1,60±0,03е
Фосфор, %	0,04±0,001а	0,05±0,002b	0,05±0,001b	0,04±0,003а	0,19±0,01с

Примечание. Представлены средние арифметические значения ± SE (n = 20). Разными латинскими буквами отмечены достоверные различия между участками при p < 0,05.

Известно, что на содержание азота в хвое *P. sylvestris* большое влияние оказывает обеспеченность почвы доступными формами элементов минерального питания, а также климатические условия и степень освещенности [20; 28].

Исследования показали, что в хвое особей *P. sylvestris*, произрастающих в условиях отвалов, происходило уменьшение содержания общего азота и фосфора по сравнению с растениями из ненарушенного местообитания: в 1,4 и 4,2 раза соответственно (табл. 3).

Корреляционный анализ выявил статистически значимое влияние содержания С, Са, гигровлаги, и величины рН на количество N (r = 0,94; r = 0,90; r = 0,95; r = -0,98) и P (r = 0,80; r = 0,99; r = 0,97; r = -0,92) в хвое *P. sylvestris*, а также продемонстрировал зависимость

содержания в хвое пролина, фенолов, флавоноидов и продуктов ПОЛ от количества гигровлаги в субстрате ($r = -0,70$; $r = -0,62$; $r = -0,85$; $r = -0,88$).

Дискриминантный анализ, проведённый с использованием таких биохимических параметров хвои, как уровень ПОЛ, содержание общего азота и фосфора, а также общих фенольных соединений, флавоноидов и пролина, отделил КП от ОП1–ОП4 по дискриминантным функциям 1 и 2 (рис. 1). Корректность отнесения в группы составляла: КП – 100%, ОП1 – 67%, ОП2 – 78%, ОП3 – 100%, ОП4 – 58%.

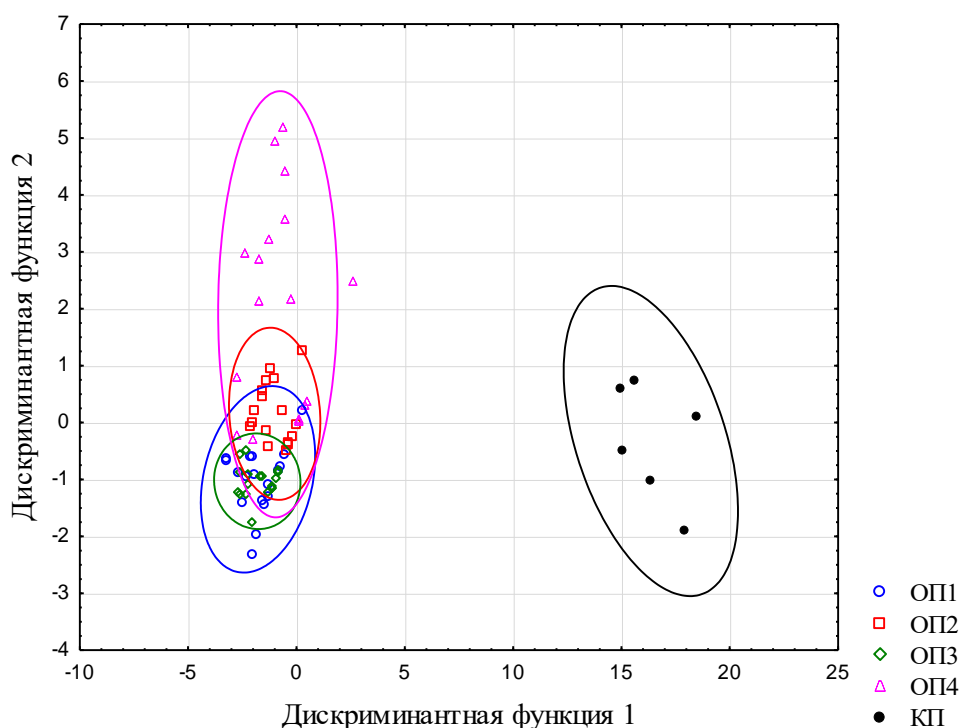


Рис. 1. Дискриминантный анализ изученных ценопопуляций *P. sylvestris* по биохимическим показателям хвои (Wilks' Lambda = 0,0096275, F=27,260, при $p < 0,0000$)

Заключение. Неблагоприятные условия промышленных отвалов, связанные прежде всего с низким уровнем плодородия и влагоемкости субстратов, а также высокой каменистостью и повышенными концентрациями ряда тяжёлых металлов, вызывали у *Pinus sylvestris* существенное снижение показателей высоты и диаметра ствола деревьев, величины годичного прироста и длины хвои. Ответная реакция ассимиляционного аппарата *P. sylvestris* на стрессовые условия заключалась в уменьшении таких анатомо-морфологических показателей хвои, как площадь поперечного сечения, центрального цилиндра и мезофилла, число смоляных ходов. В условиях высоких техногенных нагрузок в хвое *P. sylvestris* происходило уменьшение накопления азота и фосфора по сравнению с контрольными растениями из естественного лесного сообщества. Отмечено также усиление накопления в хвое продуктов перекисного окисления липидов, что вызывало активацию системы антиоксидантной защиты, а именно усиление накопления свободного пролина, фенольных соединений и в том числе флавоноидов. Показано, что на анатомо-

морфологические параметры *P. sylvestris* большое влияние оказывали такие свойства субстратов, как содержание общего органического углерода, гигровлаги и pH. Содержание в хвое низкомолекулярных антиоксидантов зависело от количества гигровлаги в субстрате отвалов. Выявленные анатомо-морфологические и биохимические изменения *P. sylvestris* являются защитно-приспособительной реакцией на стресс и способствуют адаптации вида к антропогенно нарушенным местообитаниям.

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

Литература

1. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. Москва: Изд-во МГУ, 1970. 487 с.
2. Борисова Г.Г., Чукина Н.В., Киселева И.С., Малева М.Г. Биохимия. Практикум: учеб.-метод. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. 116 с.
3. Калинин 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.
4. Капелькина Л.П. Самозарастание и рекультивация нарушенных земель на месторождениях севера России // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: Материалы V Всероссийской научной конференции с международным участием, 2014. Апатиты: КНЦ РАН, 2014. С. 17-21.
5. Колясникова Н.Л., Карнажицкая Т.Д., Паршакова К.А. Влияние аэротехногенного загрязнения на морфологические и эмбриологические признаки сосны обыкновенной // Вестник Удмуртского университета. Серия «Биология. Науки о Земле». 2011. № 2. С. 31-35.
6. Кузнецова Н.Ф., Клушевская Е.С. Смена жизненного состояния как способ выживания *Pinus sylvestris* L. на техногенно загрязненной территории // Принципы экологии: научный электронный журнал. 2020. № 2. С. 40-47.
7. Лукина Н.В., Чукина Н.В., Филимонова Е.И., Глазырина М.А., Учаев А.П., Борисова Г.Г. Морфофизиологические особенности *Pinus sylvestris* L. в искусственных насаждениях на дражном отвале после золотодобычи // Лесохозяйственная информация. 2022. № 3. С. 145-157. <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2022.3.13>.
8. Мамаев С.А. Виды хвойных на Урале и их использование в озеленении. Свердловск: Уральский Научный Центр АН СССР, 1983. 109 с.
9. Махонина Г.И. Экологические аспекты почвообразования в техногенных экосистемах Урала. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2003. 355 с.
10. Поздняков А.И. Электрические параметры почв и почвообразование // Почвоведение. 2008. № 10. С. 1188-1197.
11. Самусик Е.А., Марчик Т.П., Головатый С.Е. Интенсивность окислительных процессов и активность антиоксидантной системы в листьях древесных растений, произрастающих в условиях техногенного загрязнения // Социально-экологические технологии. 2022. Т. 12, № 4. С. 418-438. <https://doi.org/10.31862/2500-2961-2022-12-4-418-438>.

12. Стасова В.В., Скрипальщикова Л.Н., Астраханцева Н.В., Барченков А.П. Морфолого-анатомические характеристики и пигментный состав хвои сосны обыкновенной в зеленых насаждениях г. Красноярска // Сибирский лесной журнал. 2022. № 2. С. 3-10. <https://doi.org/10.15372/SJFS20220201>.
13. Тужилкина В.В. Влияние аэротехногенного загрязнения целлюлозно-бумажного производства на пигментный комплекс сосны обыкновенной // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 1. С. 90-96. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-1-090-096>.
14. Уразгильдин Р.В., Кулагин А.Ю. Техногенез и структурно-функциональные реакции древесных видов: повреждения, адаптации, стратегии. Ч 1. Влияние на макро- и микроморфологию ассимиляционного аппарата // Биосфера. 2021. Т. 13, № 3. С. 86–100.
15. Федотов В.И. Техногенные ландшафты – теория, региональные структуры, практика. Воронеж: Изд-во Воронежского гос. ун-та, 1985. 186 с.
16. Цандекова О.Л. Оценка состояния *Pinus sylvestris* (*Pinaceae*) и *Betula pendula* (*Betulaceae*) по некоторым биохимическим показателям в условиях породного отвала угледобывающей промышленности // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2017. № 2(148). С. 70-76.
17. Чукина Н.В., Глазырина М.А., Лукина Н.В. Анатомио-морфологические особенности строения листа *Chimaphila umbellata* на промышленных отвалах (Средний Урал) // Вестник Нижневартовского государственного университета. 2024. № 2(66). С. 49-60. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/24-2/05>.
18. Шакиров А.В. Физико-географическое районирование Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 2011. 617 с.
19. Шаяхметова Р.И. Сосна обыкновенная как биоиндикатор в условиях ХМАО // Культура, наука, образование, проблемы и перспективы: Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции (Нижневартовск, 12–13 февраля 2015 г.). Нижневартовск: Нижневартовский гос. ун-т, 2015. С. 69-71.
20. Якимов Н.И., Соколовский И.В., Цай В.В. Содержание элементов питания в сеянцах сосны с закрытой корневой системой в зависимости от дозы и сроков внесения минеральных удобрений // Труды Белорусского государственного технологического университета. Серия 1. Лесное хозяйство. 2005. № 13. С. 113-115.
21. Яковченко М.А., Баумгартэн М.И., Дремова М.С., Кондратенко Е.П., Филипович Л.А. Воспроизводство плодородия почв: исследование физико-химических параметров субстратов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2011. № 4. С. 48-50.
22. Ahmad P., Jaleel C.A., Salem M.A., Nabi G., Sharma S. Roles of enzymatic and nonenzymatic antioxidants in plants during abiotic stress // Critical Reviews in Biotechnology. 2010. V. 30, № 3. P. 161-175. <https://doi.org/10.3109/07388550903524243>.
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. P. 178-182.
24. Kalugina O.V., Afanasyeva L.V., Mikhailova T.A. Anatomical and morphological changes in *Pinus sylvestris* and *Larix sibirica* needles under impact of emissions from a large aluminum enterprise // Ecotoxicology. 2024. V. 33. P. 66-84. <https://doi.org/10.1007/s10646-023-02723-x>.

25. Kandziora-Ciupa M., Ciepał R., Nadgórska-Socha A., Barczyk G. Accumulation of heavy metals and antioxidant responses in *Pinus sylvestris* L. needles in polluted and non-polluted sites // *Ecotoxicology*. 2016. V. 25. P. 970-981.

26. Mittler R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance // *Trends Plant Sci*. 2002. V. 7(9). P. 405-410. [https://doi.org/10.1016/s1360-1385\(02\)02312-9](https://doi.org/10.1016/s1360-1385(02)02312-9).

27. Singleton V.L., Orthofer R., Lamuela-Raventós R.M. Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent // *Methods in enzymology*. 1999. V. 299. P. 152-178. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(99\)99017-1](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(99)99017-1).

28. Pietrzykowski M., Woś B., Haus N. Scots pine needles macronutrient (N, P, K, CA, MG, and S) supply at different reclaimed mine soil substrates – as an indicator of the stability of developed forest ecosystems // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2013. V. 185. P. 7445-7457. <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3111-9>.

29. Uchiyama M., Mihara M. Determination of malonaldehyde precursor in tissues by thiobarbituric acid test // *Anal. Biochem*. 1978. V. 86, 1. P. 287-297. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(78\)90342-1](https://doi.org/10.1016/0003-2697(78)90342-1).

References

1. Arinushkina, E.V. (1970). *Rukovodstvo po himicheskomu analizu pochv*. Moskva: Izd-vo MGU (in Russ.).

2. Borisova, G.G., Chukina, N.V., Kiseleva, I.S., & Maleva, M.G. (2017). *Biohimiya. Praktikum: ucheb.-metod. posobie*. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta (in Russ.).

3. Kalinkina, L.G., Nazarenko, L.V., & Gordeeva, E.E. (1990). Modificirovanny metod vydeleniya svobodnyh aminokislot dlya opredeleniya na aminokislotnom analizatore. *Fiziologiya rasteniy*, (37, 3), 617-621. (in Russ.).

4. Kapelkina, L.P. (2014). Samozarastanie i rekultivaciya narushennyh zemel na mestorojdeniyah severa Rossii. In *E'kologicheskie problemy severnyh regionov i puti ih resheniya: Materialy V Vserossiyskoy nauchnoy konferencii s mejdunarodnym uchastiem* (ss. 17-21). Apatity: KNC RAN. (in Russ.).

5. Kolyasnikova, N.L., Karnajiczskaya, T.D., & Parshakova, K.A. (2011). Vliyanie ae'rotehnogennoho zagryazneniya na morfologicheskie i e'mbriologicheskie priznaki sosny obyknovennoy. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya «Biologiya. Nauki o Zemle»*, (2), 31-35. (in Russ.).

6. Kuznecova, N.F., & Klushevskaya, E.S. (2020). Smena jiznennogo sostoyaniya kak sposob vyjivaniya *Pinus sylvestris* L. na tehnogenno zagryaznennoy territorii. *Principy e'kologii: nauchnyy e'lektronnyy jurnal*, (2), 40-47. (in Russ.).

7. Lukina, N.V., Chukina, N.V., Filimonova, E.I., Glazyrina, M.A., Uchaev, A.P., & Borisova, G.G. (2022). Morfofiziologicheskie osobennosti *Pinus sylvestris* L. v iskusstvennyh nasajdeniyah na drajnom otvale posle zolotodobychi. *Lesohozyaystvennaya informaciya*, (3), 145-157. (in Russ.). <https://doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2022.3.13>.

8. Mamaev, S.A. (1983). *Vidy hvoynyh na Urale i ih ispolzovanie v ozelenenii*. Sverdlovsk: Uralskiy Nauchnyy Centr AN SSSR (in Russ.).

9. Mahonina, G.I. (2003). *E'kologicheskie aspekty pochvoobrazovaniya v tehnogennyh ekosistemah Urala*. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta (in Russ.).

10. Pozdnyakov, A.I. (2008). E'lektricheskie parametry pochv i pochvoobrazovanie. *Pochvovedenie*, (10), 1188-1197. (in Russ.).
11. Samusik, E.A., Marchik, T.P., & Golovaty, S.E. (2022). Intensivnost oksidatelnykh processov i aktivnost antioksidantnoy sistemy v listyakh drevesnykh rasteniy, proizrastayushchikh v usloviyakh tehnogennoy zagryazneniya. *Sotsialno-ekologicheskie tekhnologii*, (12, 4), 418-438. (in Russ.).
12. Stasova, V.V., Skripalschikova, L.N., Astrahanceva, N.V., & Barchenkov, A.P. (2022). Morfoloogo-anatomicheskie harakteristiki i pigmentnyy sostav hvoi sosny obyknovennoy v zelenykh nasajdeniyah g. Krasnoyarska. *Sibirskiy lesnoy jurnal*, (2), 3-10. (in Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20220201>.
13. Tujilkina, V.V. (2021). Vliyanie aerotehnogennoy zagryazneniya cellulozno-bumajnoy proizvodstva na pigmentnyy kompleks sosny obyknovennoy. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*, (1), 90-96. (in Russ.). <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-1-090-096>.
14. Urazgildin, R.V., & Kulagin, A.Yu. (2021). Tehnogenez i strukturno-funktsionalnye reakcii drevesnykh vidov: povrezhdeniya, adaptatsii, strategii. Vliyanie na makro- i mikromorfologiyu assimilyatsionnogo apparata (Ch. 1). *Biosfera*, 13(3), 86-100. (in Russ.).
15. Fedotov, V.I. (1985). *Tehnogennyye landshafty – teoriya, regionalnyye struktury, praktika*. Voronej: Izd-vo Voronejskogo gos. un-ta (in Russ.).
16. Candekova, O.L. (2017). Ocenka sostoyaniya *Pinus sylvestris* (Pinaceae) i *Betula pendula* (Betulaceae) po nekotorym biokhimicheskim pokazatelyam v usloviyakh porodnogo otvala ugledobyvauschey promyshlennosti. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, (2; 148), 70-76. (in Russ.).
17. Chukina, N.V., Glazyrina, M.A., & Lukina, N.V. Anato-morfologicheskie osobennosti stroeniya lista *Chimaphila umbellata* na promyshlennykh otvalah (Sredniy Ural). *Vestnik Nijnevartovskogo gosudarstvennogo universiteta*, (2 (66)), 49-60. (in Russ.). <https://doi.org/10.36906/2311-4444/24-2/05>.
18. Shakirov, A.V. (2011). *Fiziko-geograficheskoye rajonirovaniye Urala*. Ekaterinburg: UrO RAN. (in Russ.).
19. Shayahmetova, R.I. (2015). Sosna obyknovennaya kak bioindikator v usloviyakh HMAO. In *Kultura, nauka, obrazovanie, problemy i perspektivy: Materialy VI Vserossiyskoy nauchnoy6prakticheskoy konferentsii (Nijnevartovsk, 12–13 fevralya 2015 g.)* (ss. 69-71). Nijnevartovsk: Nijnevartovskiy gos. un-t. (in Russ.).
20. Yakimov, N.I., Sokolovskiy, I.V., & Cay, V.V. (2005). Soderzhanie elementov pitaniya v seyancah sosny s zakrytoy kornevoy sistemoy v zavisimosti ot dozy i srokov vneseniya mineralnykh udobreniy. *Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya 1. Lesnoye hozyaystvo*, (13), 113-115. (in Russ.).
21. Yakovchenko, M.A., Baumgarte'n, M.I., Dremova, M.S., Kondratenko, E.P., & Filipovich, L.A. (2011). Vosproizvodstvo plodorodiya pochv: issledovanie fiziko-himicheskikh parametrov substratov. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, (4), 48-50. (in Russ.).
22. Ahmad, P., Jaleel, C.A., Salem, M.A., Nabi, G., & Sharma, S. (2010). Roles of enzymatic and nonenzymatic antioxidants in plants during abiotic stress. *Critical Reviews in Biotechnology*, (30, 3), 161-175. <https://doi.org/10.3109/07388550903524243>.

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. Kalugina, O.V., Afanasyeva, L.V., & Mikhailova, T.A. (2024). Anatomical and morphological changes in *Pinus sylvestris* and *Larix sibirica* needles under impact of emissions from a large aluminum enterprise. *Ecotoxicology*, (33), 66-84. <https://doi.org/10.1007/s10646-023-02723-x>.

25. Kandziora-Ciupa, M., Ciepał, R., Nadgórska-Socha, A., & Barczyk, G. (2016). Accumulation of heavy metals and antioxidant responses in *Pinus sylvestris* L. needles in polluted and non-polluted sites. *Ecotoxicology*, (25), 970-981.

26. Mittler, R. (2002). Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. *Trends Plant Sci.*, (7, 9), 405-410. [https://doi.org/10.1016/s1360-1385\(02\)02312-9](https://doi.org/10.1016/s1360-1385(02)02312-9).

27. Singleton, V.L., Orthofer, R., & Lamuela-Raventós, R.M. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. *Methods in enzymology*, (299), 152-178. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(99\)99017-1](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(99)99017-1).

28. Pietrzykowski, M., Woś, B., & Haus, N. (2013). Scots pine needles macronutrient (N, P, K, CA, MG, and S) supply at different reclaimed mine soil substrates – as an indicator of the stability of developed forest ecosystems. *Environmental Monitoring and Assessment*, (185), 7445-7457. <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3111-9>.

29. Uchiyama, M., Mihara, M. (1978). Determination of malonaldehyde precursor in tissues by thiobarbituric acid test. *Anal. Biochem*, (86, 1), 287-297. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(78\)90342-1](https://doi.org/10.1016/0003-2697(78)90342-1).

дата поступления: 21.12.2024

дата принятия: 06.02.2025

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

УДК [599.32+599.36/38]:591.91

<https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-1/05>

Стариков В.П., Володина О.Ю., Кравченко В.Н., Тарикулиева С.Э.

СООБЩЕСТВА МЕЛКИХ МЛЕКОПИТАЮЩИХ ИСЕТСКО-ПЫШМИНСКОГО
МЕЖДУРЕЧЬЯ (ЮЖНОЕ ЗАУРАЛЬЕ)

V.P. Starikov, O.Yu. Volodina, V.N. Kravchenko, S.E. Tarikulieva

SMALL MAMMAL COMMUNITIES OF THE ISET-PYSHMA INTERFLUVE
(THE SOUTH TRANS-URAL REGION)

Аннотация. В работе впервые даётся оценка состояния сообществ мелких млекопитающих подтайги Исетско-Пышминского междуречья в пределах Курганской области. Показано, что видовой состав, группы фоновых и доминирующих видов, показатели суммарного обилия насекомоядных и грызунов во многом определялись спецификой метода учёта животных. Эффективнее работали конусы с направляющими системами (ловчие канавки, заборчики из полиэтиленовой пленки). Всего учтено 19 видов мелких млекопитающих, 18 из них с помощью ловчих канавок (заборчиков), 14 видов – в учетах ловушко-линиями. Группу фоновых видов подтайги составили обыкновенная и средняя бурозубки, полёвки – экономка, обыкновенная, тёмная (пашенная) и узкочерепная. Первые четыре из них доминировали (учеты с помощью ловчих канавок, заборчиков). В учетах с помощью ловушко-линий фоновых видов не установлено, в этом случае обычные и многочисленные виды отсутствовали, группу доминантов составили обыкновенная бурозубка и малая лесная мышь. На характер соотношения видов мелких млекопитающих изученных территорий в 2021 и 2024 гг., несомненно, оказало влияние различная доля залесённых и открытых площадей. Вне зависимости от погодных условий лет учетов животных в весенне-летний период мелкие млекопитающие с наибольшей плотностью концентрировались в околородных и залесённых биотопах. В бедных по продуктивности сосновых лесах и на открытых пространствах показатели суммарного обилия ниже. Фаунистический состав населения мелких млекопитающих подтайги Южного Зауралья как по числу видов, так и по количеству особей европейско-транспалеарктный. Доля сибирских

Abstract. The article presents a new assessment of the small mammal communities in the sub-taiga of the Iset-Pyshma interfluve (the Kurgan Oblast). It shows that the species composition, groups of common and dominant species, and indicators of the total abundance of insectivores and rodents are largely determined by the specificities of the animal recording method. The use of ditches with pitfalls or polyethylene guide fences is more effective than the use of trap-lines. A total of 19 small mammal species were recorded, including 18 that were captured using ditches with pitfalls or polyethylene fences, and 14 that were recorded using trap-lines. The common species group in the subtaiga included the common shrew, Laxmann's shrew, root vole, common vole, and field vole, while the dominant species were the common shrew, Laxmann's shrew, root vole, and common vole (recorded using ditches with pitfalls and polyethylene guides). In trap-line records, no common species were identified. In this case, common and abundant species were absent, and the dominant species were the common shrew and the herb wood mouse. The pattern of small mammal species ratios in the study areas in 2021 and 2024 was influenced by the different proportions of forested and open areas. Regardless of weather conditions in spring and summer of a particular year, small mammals were most densely concentrated in near-water and forested biotopes. Total abundance was lower in pine forests and open spaces. The faunistic composition of the small mammal population in the subtaiga of the South Trans-Ural region is European-Transpalaeartic, both in terms of species diversity and individual numbers. The

видов и тундро-лесостепных реликтов в разы меньше.

Ключевые слова: мелкие млекопитающие; сообщества; Южное Зауралье.

Сведения об авторах: Стариков Владимир Павлович ORCID: 0000-0003-4849-2158: д-р биол. наук, профессор, Институт естественных и технических наук, Сургутский государственный университет, г. Сургут, Россия, e-mail: starikov_vp@inbox.ru; Володина Оксана Юрьевна, ORCID: 0000-0003-4960-6807, преподаватель, Институт среднего медицинского образования, Сургутский государственный университет, г. Сургут, Россия; Кравченко Вероника Николаевна, ORCID: 0000-0002-6516-1580, Сургутский государственный университет, г. Сургут, Россия; Тарикулиева Сабина Эзберовна: Сургутский государственный университет, г. Сургут, Россия.

proportion of Siberian and tundra-forest-steppe species is much smaller.

Key words: small mammals; communities; the South Trans-Ural region.

About authors: Vladimir P. Starikov, ORCID: 0000-0003-4849-2158, Doctor of Biological Sciences, Professor, Institute of Natural and Technical Sciences, Surgut State University, Surgut, Russia, starikov_vp@inbox.ru; Oksana Yu. Volodina, ORCID: 0000-0003-4960-6807, Lecturer, the Institute of Secondary Medical Education, Surgut State University, Surgut, Russia; Veronika N. Kravchenko, ORCID: 0000-0002-6516-1580, Lecturer, the Institute of Secondary Medical Education, Surgut State University, Surgut, Russia; Sabina E. Tarikulieva Surgut State University, Surgut, Russia.

Стариков В.П., Володина О.Ю., Кравченко В.Н., Тарикулиева С.Э. Сообщества мелких млекопитающих Исетско-пышминского междуречья (Южное Зауралье) // Вестник Нижневартовского государственного университета. 2025. № 1(69). С. 56-64. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-1/05>

Starikov, V.P., Volodina, O.Yu., Kravchenko, V.N., & Tarikulieva, S.E. (2025). Small Mammal Communities of the Iset-Pyshma Interfluve (The South Trans-Ural Region). *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 1(69), 56-64. (in Russ.). <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-1/05>

Ведение

Территория Южного Зауралья (Курганская область) расположена на границе леса и степи. В соответствии со схемой ботанико-географического районирования Западно-Сибирской равнины здесь выделяют подтаёжную подзону лесной зоны и две подзоны степной зоны – лесостепь и разнотравно-дерновинно-злаковую степь [1; 5]. Наши исследования проведены в Исетско-Пышминском междуречье (подтайга). Одной из важнейших составляющих сообществ этой территории являются широко представленные здесь мелкие млекопитающие, главным образом, насекомоядные и грызуны. В работе поставлена цель – выявить видовой состав, особенности пространственного распределения, обилия, группы фоновых и доминирующих видов мелких млекопитающих подтайги Южного Зауралья.

Материалы и методы

В апреле-августе 2021 и 2024 гг. сборы мелких млекопитающих выполнены на севере и северо-западе Курганской области вблизи села Самохвалово Шатровского района и деревни Лукина Катайского района. Учёты животных осуществляли в конусы с помощью направляющих систем [5; 13; 8] и методом ловушко-линий [3]. Всего отработано 24860 конусо-суток (к/с) и 21413 давилко-суток (д/с). Отловлено 1711 особей насекомоядных и грызунов. В целом по этой подзоне учтено 19 видов: обыкновенная бурозубка *Sorex araneus*

Linnaeus, 1758; тундряная бурозубка *S. tundrensis* Merriam, 1900; средняя бурозубка *S. caecutiens* Laxmann, 1785; равнозубая бурозубка *S. isodon* Turov, 1924; малая бурозубка *S. minutus* Linnaeus, 1766; крошечная бурозубка *S. minutissimus* Zimmermann, 1780; обыкновенная кутора *Neomys fodiens* Pennant, 1771; азиатский бурундук *Eutamias sibiricus* Laxmann, 1769; лесная мышовка *Sicista betulina* Pallas, 1779; рыжая полёвка *Myodes glareolus* Schreber, 1780; красная полёвка *M. rutilus* Pallas, 1779; узкочерепная полёвка *Lasiopodomys gregalis* Pallas, 1779; тёмная (пашенная) полёвка *Agricola agrestis* Linnaeus, 1761; полёвка-экономка *Alexandromys oeconomus* Pallas, 1776; обыкновенная полёвка *Microtus arvalis* Pallas, 1778; мышь-малютка *Micromys minutus* Pallas, 1771; полевая мышь *Apodemus agrarius* Pallas, 1771; малая лесная мышь *Sylvaemus uralensis* Pallas, 1811 и домовая мышь *Mus musculus* Linnaeus, 1758. Русские и латинские названия видов млекопитающих приведены по А.А. Лисовскому с соавторами [4]. Обилие насекомоядных и грызунов оценивали с помощью балльной шкалы А.П. Кузякина [2] с добавлением верхних и нижних градаций [9]. Для выявления отношений сходства-различия мелких млекопитающих исследованных территорий использовали коэффициент общности Жаккара [14]. Принадлежность мелких млекопитающих к тому или иному типу фауны определяли по Л.И. Галкиной (личное сообщение).

Результаты и их обсуждение

Материалы по населению мелких млекопитающих подтайги за 2021 г. изложены в работе В.П. Старикова с соавторами [12]. В 2024 г. учётами в конусы с помощью направляющих систем и давилок зарегистрировано соответственно 13 и 7 видов насекомоядных и грызунов (табл. 1 и 2).

Независимо от способа отлова животных, сообщества мелких млекопитающих были полидоминантными. В учётах конусами (в среднем по стационару) доминировали: обыкновенная бурозубка, узкочерепная и красная полёвки. Все учтенные виды отнесены к обычным, либо редким или очень редким. Самые низкие показатели обилия в 2024 г. зарегистрированы для лесной мышовки (в норме обычного вида для Южного Зауралья). Причиной, на наш взгляд, явились метеоусловия мая этого года, который был аномально холодным. Это отрицательно отразилось на самих зверьках, чутко реагирующих на перепады температуры (с апреля по август включительно был отловлен лишь один взрослый самец). Несомненно, это не могло не сказаться и на кормовых объектах мышовок, существенную долю которых составляют насекомые.

Таблица 1

Распределение и обилие (особей на 100 конусо-суток) мелких млекопитающих подтайги Южного Зауралья (Курганская область, Катайский район, окр. д. Лукина, апрель-август 2024 г.)

Биотопы	Виды										Суммарное обилие			
	<i>S. araneus</i>	<i>S. caecutiens</i>	<i>S. minutus</i>	<i>S. minutissimus</i>	<i>S. betulina</i>	<i>M. rutilus</i>	<i>A. agrestis</i>	<i>L. gregalis</i>	<i>A. oeconomus</i>	<i>M. arvalis</i>		<i>M. minutus</i>	<i>A. agrarius</i>	<i>S. uralensis</i>
ивняковые разнотравные приречные заросли	7,53	0,43	1,25	—	—	0,43	1,25	2,11	3,74	1,25	0,43	0,43	6,28	25,13
малиново-смородиновые разнотравные заросли	3,83	1,89	0,65	—	—	1,89	3,18	1,59	1,29	4,13	—	—	3,48	21,93
колок осиновый шиповниково-разнотравный заболоченный	2,58	0,39	0,39	—	0,39	4,77	1,12	2,58	2,52	1,12	—	0,39	4,77	21,42
осоково-разнотравный приколочный луг	2,05	3,37	0,24	0,35	—	1,50	5,98	1,38	1,35	3,10	1,05	0,34	0,35	21,06
ивняково-берёзовые разнотравные заросли	0,82	3,27	0,82	0,43	—	5,72	4,09	0,43	0,43	1,25	0,43	0,43	0,82	18,94
д. Лукина (огород)	7,87	1,25	—	—	—	—	—	—	0,82	0,43	0,82	3,74	2,49	17,42
экотон: берёзовый осоково-разнотравный лес – злаково-разнотравный увлажненный луг	0,93	0,22	—	—	—	2,54	—	10,17	0,34	1,00	—	—	—	15,20
крапивно-разнотравные заросли	1,20	0,82	—	—	—	0,39	—	3,66	2,45	1,63	0,82	0,82	1,20	12,99
сосновый караганово-осоково-разнотравный лес	0,63	2,25	0,25	—	—	0,50	0,63	0,25	0,50	0,75	—	—	0,13	5,89
берёзовый осоково-разнотравный лес	0,50	0,31	—	—	—	1,20	0,51	0,50	0,31	0,61	0,30	0,10	0,49	4,83
ивняковые осоково-разнотравные приозерные заросли	0,85	0,12	0,49	—	—	0,24	—	1,46	0,61	0,61	0,12	—	0,24	4,74
злаково-разнотравный суходольный луг	0,29	0,29	0,59	—	—	0,10	0,41	1,64	0,41	0,41	0,20	—	—	4,44
В среднем по стационару	2,42	1,22	0,39	0,07	0,03	1,61	1,43	2,15	1,26	1,36	0,35	0,52	1,69	14,50



Таблица 2

**Распределение и обилие (особей на 100 давилко-суток)
мелких млекопитающих подтайги Южного Зауралья
(Курганская область, Катайский район, окр. д. Лукина, апрель-август 2024 г.)**

Биотопы	Виды							Суммарное обилие
	<i>S. araneus</i>	<i>M. rutilus</i>	<i>A. agrestis</i>	<i>L. gregalis</i>	<i>M. arvalis</i>	<i>A. agrarius</i>	<i>S. uralensis</i>	
колок осиновый шиповниково-разнотравный заболоченный	—	0,58	—	0,19	0,10	—	1,63	2,50
д. Лукина (надворные постройки)	—	—	—	—	0,09	0,18	0,53	0,80
ивняково-берёзовые разнотравные заросли	—	0,20	0,20	—	—	—	0,20	0,60
малиново-смородиновые разнотравные заросли	0,35	0,15	—	—	—	—	0,12	0,59
ивняковые разнотравные приречные заросли	0,23	—	—	—	—	—	0,34	0,57
крапивно-разнотравные заросли	—	0,20	—	—	—	—	0,20	0,40
осоково-разнотравный приколочный луг	—	—	—	—	0,40	—	—	0,40
д. Лукина (огород)	—	—	—	—	—	—	0,40	0,40
сосновый караганово-осоково-разнотравный лес	—	—	—	—	—	—	0,14	0,14
ивняковые осоково-разнотравные приозерные заросли	—	—	—	—	—	—	—	—
берёзовый осоково-разнотравный лес	—	—	—	—	—	—	—	—
эктон: берёзовый осоково-разнотравный лес – злаково-разнотравный увлажненный луг	—	—	—	—	—	—	—	—
злаково-разнотравный суходольный луг	—	—	—	—	—	—	—	—
В среднем по стационару	0,04	0,08	0,02	0,01	0,05	0,01	0,27	0,48

В учётах с помощью давилок состав доминирующих видов несколько иной. Более половины (56,25%) из отловленных животных приходилось на малую лесную мышь. В группу доминантов также входили обыкновенная бурозубка и обыкновенная полёвка. В целом численность мелких млекопитающих в 2024 г. была очень низкой. Например, в среднем по стационару, среди учтенных давилками, животные отнесены только к редким или очень редким видам. Как и в 2021 г. максимальные показатели обилия мелких млекопитающих зарегистрированы в группе околородных и облесённых биотопов. В бедных по продуктивности сосновых лесах и на открытых пространствах показатели суммарного обилия ниже.

При сопоставлении результатов учётов мелких млекопитающих в 2021 и 2024 гг. (в среднем по стационарным участкам этой подзоны) выявилось следующее (табл. 3).

Обилие мелких млекопитающих подтайги Южного Зауралья

Виды	Территория учётов				Среднее за 2 года	
	окр. с. Самохвалово, 2021 г.		окр. д. Лукина, 2024 г.			
	особей на 100 к/с	особей на 100 д/с	особей на 100 к/с	особей на 100 д/с	особей на 100 к/с	особей на 100 д/с
<i>S. araneus</i>	1,80	0,71	2,42	0,04	2,11	0,38
<i>S. tundrensis</i>	0,04	—	—	—	0,02	—
<i>S. caecutiens</i>	2,77	0,08	1,22	—	2,00	0,04
<i>S. isodon</i>	0,05	—	—	—	0,025	—
<i>S. minutus</i>	1,39	0,08	0,39	—	0,89	0,04
<i>S. minutissimus</i>	—	—	0,07	—	0,035	—
<i>N. fodiens</i>	0,08	—	—	—	0,04	—
<i>E. sibiricus</i>	0,05	0,02	—	—	0,025	0,01
<i>S. betulina</i>	0,39	0,03	0,03	—	0,21	0,015
<i>M. glareolus</i>	0,31	0,10	—	—	0,16	0,05
<i>M. rutilus</i>	0,32	0,04	1,61	0,08	0,97	0,06
<i>L. gregalis</i>	0,05	—	2,15	0,01	1,10	0,005
<i>A. agrestis</i>	0,83	0,10	1,43	0,02	1,13	0,06
<i>A. oeconomus</i>	1,63	0,12	1,26	—	1,45	0,06
<i>M. arvalis</i>	1,33	0,13	1,36	0,05	1,35	0,09
<i>M. minutus</i>	0,07	—	0,35	—	0,21	—
<i>A. agrarius</i>	0,09	0,03	0,52	0,01	0,31	0,02
<i>S. uralensis</i>	0,15	0,10	1,69	0,27	0,92	0,19
<i>M. musculus</i>	—	0,05	—	—	—	0,025
Суммарное обилие	11,35	1,59	14,50	0,48	12,96	1,05

В 2021 г. зарегистрировано 18 видов насекомоядных и грызунов, в 2024 – 13. Индекс фаунистического сходства этих территорий в пределах одной подзоны сравнительно низкий и не превышал 67%. В 2021 г. специфику подтайги определяли очень редкие равнозубая бурозубка и азиатский бурундук, не свойственные для более южных подзон Южного Зауралья. В 2024 г. в сборах они отсутствовали. Причина, на наш взгляд, кроется в соотношении облесенных и открытых биотопов изученных территорий. Расчёт соотношения площадей открытых и облесённых территорий севера Шатровского и севера Катайского районов Курганской области проводился с помощью ГИС Google Планета Земля и соответственно составил 78 и 61% облесённости этих территорий. Очевидно, не случайно в окр. д. Лукина зарегистрирована крошечная бурозубка, которая в условиях Южного Зауралья тяготеет к открытым и полуоткрытым биотопам [7; 11]. Обилие других, – также обитателей открытых пространств, – полевой мыши и узкочерепной полёвки в окр. д. Лукина, по сравнению с окр. с. Самохвалово соответственно выше в 6 и 43 раза.

Фаунистический состав населения мелких млекопитающих как по числу видов, так и по количеству особей – европейско-транспалеарктический (табл. 4).

Таблица 4

**Фаунистический состав населения мелких млекопитающих
Исетско-Пышминского междуречья, 2021 и 2024 гг.**

Показатель	Тип фауны			
	европейский	сибирский	трансполеаркты	тундро-лесостепные реликты
доля видов (%)	47,37	15,78	26,32	10,53
доля особей (%)	54,65	7,87	28,83	8,65

Доля сибирских видов и тундро-лесостепных реликтов существенно ниже. Преобладание представителей европейского типа фауны вполне объяснимо. Ещё в первой половине XX в. М.Д. Рузский указывал, что Западная Сибирь теснее связана с Восточной Европой, то есть с более западными частями Палеарктики и поэтому в ней западные формы преобладают над восточносибирскими, придавая западносибирской фауне европейский отпечаток [10]. Такое преобладание европейских животных определенно указывает на то, что заселение Западной Сибири в послеледниковый период шло преимущественно с запада, при этом Уральские горы не могли служить серьёзным препятствием.

Заключение

Итак, по результатам двух лет исследований в Исетско-Пышминском междуречье в пределах Курганской области установлено обитание представителей 19 видов насекомоядных и грызунов. Среди используемых методов отлова эффективнее работали конусы с направляющими системами (ловчие канавки, заборчики из полиэтиленовой пленки), по сравнению с методом ловушко-линий (учтено соответственно 18 и 14 видов). В последнем случае разное отношение животных к приманке, их размеры не позволили сравнительно полно выявить видовой состав. Сообщество мелких млекопитающих подтайги полидоминантно. Это установлено как с помощью конусов с направляющими системами (обыкновенная и средняя бурозубки, полёвки экономка и обыкновенная), так и ловушко-линий (обыкновенная бурозубка и малая лесная мышь). На характер соотношения видов мелких млекопитающих изученных мест учётов, несомненно, оказывало влияние соотношение облесённых и открытых территорий, погодные условия 2021 и 2024 гг., которые существенно отличались. Однако, и в том и другом случае животные в основном концентрировались в увлажнённых и облесённых (закрытых) биотопах, где условия существования для мелких млекопитающих в Южном Зауралье более стабильны, по сравнению с группой открытых и полукрытых биотопов.

Литература

1. Ильина И.С., Лапшина Е.И., Лавренко Н.Н., Мельцер Л.И., Романова Е.А., Богоявленский Б.А., Махно В.Д. Растительный покров Западно-Сибирской равнины. Новосибирск: Наука, 1985. 251 с.
2. Кузякин А.П. Зоогеография СССР // Ученые записки МОИП им. Н.К. Крупской. М., 1962. Т. 109, вып. 1. С. 3-182.

3. Кучерук В.В. Новое в методике количественного учёта грызунов и землероек // Организация и методы учёта птиц и вредных грызунов. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 159-184.
4. Лисовский А.А., Шефтель Б.И., Савельев А.П., Ермаков О. А., Козлов Ю.А., Смирнов Д.Г., Стахеев В.В., Глазов Д.М. Млекопитающие России: список видов и прикладные аспекты // Сб. трудов Зоол. музея МГУ. М.: КМК, 2019. Т. 56. 191 с.
5. Науменко Н.И. Флора и растительность Южного Зауралья: Монография. Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2008. 512 с. Кузякин А.П. Зоогеография СССР // Учён. зап. МОПИ им. Н.К. Крупской, 1962. Т. 109. Вып. 1. С. 3-182.
6. Наумов Н.П. Изучение подвижности и численности мелких млекопитающих с помощью ловчих канавок // Вопросы краевой, общей и экспериментальной паразитологии и медицинской зоологии. М.: Медгиз, 1955. Т. 9. С. 179-202.
7. Никифоров Л.П. Новое нахождение крошечной бурозубки (*Sorex tscherskii* Ogn.) // Бюлл. МОИП. Отд. биол. 1955. Т. 60. Вып. 4. С. 93.
8. Охотина М.В., Костенко В.А. Полиэтиленовая плёнка – перспективный материал для изготовления направляющих заборчиков // Фауна и экология позвоночных юга Дальнего Востока СССР. Владивосток: ДВНЦ АН СССР 1974. С. 193-196.
9. Равкин Ю.С., Ливанов С.Г. Факторная зоогеография: принципы, методы и теоретические представления. Новосибирск: Наука, 2008. 205 с.
10. Рузский М.Д. Зоодинамика Барабинской степи // Труды Томского гос. ун-та. Серия биологическая. Вопросы зоологии. Т. 97. Томск: Изд-во Томского гос. ун-та, 1946. С. 17-68.
11. Стариков В.П. Землеройки Южного Зауралья // 4-й съезд Всесоюзного Териологического общ-ва: тез. докладов. М.: АН СССР, 1986. Т. 1. С. 140.
12. Стариков В.П., Володина О.Ю., Кравченко В.Н., Муртазин Д.И., Ялымова Д.М. Население мелких млекопитающих подтайги Южного Зауралья // Известия Иркутского гос. ун-та. Серия «Биология». «Экология». 2022. Т. 39. С. 47-59.
13. Тупикова Н.В., Заклинская В.П., Евсеева В.С. Учёт численности и массовый отлов мелких млекопитающих при помощи заборчиков // Организация и методы учёта птиц и вредных грызунов. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 231-236.
14. Jaccard P. Lois de distribution florale dans la zone alpine // Bull. Soc. Vaund. Sci. Nat., 1902. V. 38, p. 69-130.

References

1. И`ина, I.S., Lapshina, E.I., Lavrenko, N.N., Mel`cer, L.I., Romanova, E.A., Bogoyavlenskij, V.A., & Maxno, V.D. (1985). Rastitel`ny`j pokrov Zapadno-Sibirskoj ravniny`. Novosibirsk: Nauka, 251 s.
2. Kuzyakin, A.P. (1962). Zoogeografiya SSSR. *Ucheny`e zapiski MOIP im. N.K. Krupskoj*. M., T. 109, vy`p. 1. S. 3-182.
3. Kucheruk, V.V. (1963). Novoe v metodike kolichestvennogo uchyota gry`zunov i zemlerоек. *Organizaciya i metody` uchyota pticz i vredny`x gry`zunov*. M.: Izd-vo AN SSSR, S. 159-184.
4. Lisovskij, A.A., Sheftel`, B.I., Savel`ev, A.P., Ermakov, O. A., Kozlov, Yu.A. Smirnov, D.G., Staxeev, V.V., & Glazov, D.M. (2019). Mlekopitayushhie Rossii: spisok vidov i prikladny`e aspekty`. *Sb. trudov Zool. muzeya MGU*. M.: KMK, T. 56. 191 s.

5. Naumenko, N.I. (1962). Flora i rastitel'nost' Yuzhnogo Zaural'ya: Monografiya. Kurgan: Izd-vo Kurganskogo gos. un-ta, 2008. 512 s. Kuzyakin A.P. Zoogeografiya SSSR. *Uchyon. zap. MOPI im. N.K. Krupskoj*, T. 109. Vy`p. 1. S. 3-182.
6. Naumov, N.P. (1955). Izuchenie podvizhnosti i chislennosti melkix mlekopitayushhix s pomoshh`yu lovchix kanavok. *Voprosy` kraevoj, obshhej i e`ksperimental'noj parazitologii i medicinskoj zoologii*. M.: Medgiz, T. 9. S. 179-202.
7. Nikiforov, L.P. (1955). Novoe naxozhdenie kroshechnoj burozubki (Sorex tscherskii Ogn.)ю *Byull. MOIP. Otd. biol.* T. 60. Vy`p. 4. S. 93.
8. Oxotina, M.V., & Kostenko, V.A. (1974). Polie`tilenovaya plyonka – perspektivny`j material dlya izgotovleniya napravlyayushhix zaborchikov. *Fauna i e`kologiya pozvonochny`x yuga Dal'nego Vostoka SSSR*. Vladivostok: DVNCz AN SSSR S. 193-196.
9. Ravkin, Yu.S., & Livanov, S.G. (2008). Faktornaya zoogeografiya: principy`, metody` i teoreticheskie predstavleniya. Novosibirsk: Nauka, 205 s.
10. Ruzskij, M.D. Zoodinamika Barabinskoj stepi. *Trudy` Tomskogo gos. un-ta. Seriya biologicheskaya. Voprosy` zoologii*. T. 97. Tomsk: Izd-vo Tomskogo gos. un-ta, 1946. S. 17-68.
11. Starikov, V.P. (1986). Zemlerojki Yuzhnogo Zaural'ya. *4-j s`ezd Vsesoyuznogo Teriologicheskogo obshh-va: tez. dokladov*. M.: AN SSSR, T. 1. S. 140.
12. Starikov, V.P., Volodina, O.Yu., Kravchenko, V.N., Murtazin, D.I., & Yaly`mova, D.M. (2022). Naselenie melkix mlekopitayushhix podtajgi Yuzhnogo Zaural'ya. *Izvestiya Irkutskogo gos. un-ta. Seriya «Biologiya». «E`kologiya»*. T. 39. S. 47-59.
13. Tupikova, N.V., Zaklinskaya, V.P., & Evseeva, V.S. (1963). Uchyot chislennosti i massovy`j otlov melkix mlekopitayushhix pri pomoshhi zaborchikov. *Organizaciya i metody` uchyota pticz i vredny`x gry`zunov*. M.: Izd-vo AN SSSR, S. 231-236.
14. Jaccard, P. (1902) Lois de distribution florale dans la zone alpine. *Bull. Soc. Vaund. Sci. Nat*, (38), 69-130.

дата поступления: 20.11.2024

дата принятия: 30.01.2025

© Стариков В.П., Володина О.Ю., Кравченко В.Н., Тарикулиева С.Э., 2025

УДК 378.172

<https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-1/06>

E.Yu. Shalamova, I.A. Pogonysheva, V.V. Postnikova

**TRENDS IN PHYSICAL DEVELOPMENT OF STUDENTS IN NORTH:
LONG-TERM DYNAMICS**

Шаламова Е.Ю., Погоньшева И.А., Постникова В.В.

**ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ СТУДЕНТОВ
В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА: МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА**

Abstract. The aim of the study is to determine the main patterns of physical development (PD) of students of a northern university. The objectives included collecting data on somatic and physiometric parameters of first-year students of Nizhnevartovsk State University (young men and young women aged 17–18 years), retrospective analysis of the indicators obtained during annual examinations since 2003 (cumulative total: 1285 young women and 1065 young men). The study used standard methods for assessing the level of physical development and functional capabilities of the body. Statistical data processing was carried out using the Microsoft Excel, Statistica 10.0 software package. As a result of the analysis, the following features of PD were revealed: from 2003 to 2024, young men and young women showed an increase in somatometric indicators, such as body length and weight, which corresponds to the secular trend of increasing these parameters. Along with this, a decrease in muscle strength of the leading hand is noted in both young men and young women. A linear trend of decreasing vital capacity of the lungs is observed, correlating with the chest circumference indicators, which signals a negative trend in the decline in the functional capabilities of the respiratory system of the younger generation. A significant deterioration in strength capabilities among students in 2020 may be a consequence of a decrease in the level of physical activity during the COVID-19 pandemic. The results of the study emphasize the importance of continuous monitoring of the physical development of students and the use of comprehensive measures to maintain health and increase the physical activity of student youth.

Аннотация. Целью исследования является определение основных закономерностей физического развития (ФР) студентов северного вуза. Задачи включали сбор данных соматических и физиометрических параметров студентов-первокурсников Нижневартовского государственного университета (юноши и девушки в возрасте 17–18 лет), ретроспективный анализ показателей, полученных в ходе ежегодных обследований начиная с 2003 года (накопленный итог: 1285 девушек и 1065 юношей). В рамках исследования применялись стандартные методики оценки уровня физического развития и функциональных возможностей организма. Статистическая обработка данных осуществлялась с помощью пакета программ Microsoft Excel, Statistica 10.0. В результате проведенного анализа были выявлены следующие особенности ФР: с 2003 по 2024 гг. у юношей и девушек наблюдался рост соматометрических показателей, таких как длина и масса тела, что соответствует секулярному тренду увеличения данных параметров. Наряду с этим, отмечается снижение показателей мышечной силы кисти ведущей руки, как у юношей, так и у девушек. Прослеживается линейная тенденция уменьшения жизненной ёмкости лёгких, коррелирующая с показателями окружности грудной клетки, что сигнализирует о негативной динамике снижения функциональных возможностей дыхательной системы молодого поколения. Значимое ухудшение силовых возможностей у студентов в 2020 году может быть следствием уменьшения уровня физической активности в период пандемии COVID-19. Результаты исследования подчёркивают важность постоянного мониторинга физического развития обучающихся и применения комплексных мер сохранения здоровья и увеличения двигательной активности студенческой молодежи.

Keywords: students; long-term dynamics; physical development; somatic parameters; physiometric parameters.

About the authors: Elena Yu. Shalamova, ORCID: 0000-0001-5201-4496, Doctor of Biological Sciences, Khanty-Mansiysk State Medical Academy, Khanty-Mansiysk, Russia, selenzik@mail.ru; Irina A. Pogonyшева, ORCID: 0000-0002-5759-0270, Candidate of Biological Sciences, Nizhnevartovsk State University, Nizhnevartovsk, Russia, severina.i@bk.ru; Victoria V. Postnikova, ORCID: 0000-0001-7846-7864, Nizhnevartovsk State University, Nizhnevartovsk, Russia, missmadcon@mail.ru.

Ключевые слова: студенты; многолетняя динамика; физическое развитие; соматические параметры; физиометрические показатели.

Сведения об авторах: Шаламова Елена Юрьевна, ORCID: 0000-0001-5201-4496, д-р биол. наук, Ханты-Мансийская государственная медицинская академия, г. Ханты-Мансийск, Россия, selenzik@mail.ru; Погоньшева Ирина Александровна, ORCID: 0000-0002-5759-0270, канд. биол. наук, Нижневартровский государственный университет, г. Нижневартовск, Россия, severina.i@bk.ru; Постникова Виктория Владимировна, ORCID: 0000-0001-7846-7864, Нижневартровский государственный университет, г. Нижневартовск, Россия, missmadcon@mail.ru.

Shalamova E.Yu., Pogonyшева I.A., Postnikova V.V. Trends in Physical Development of Students in North: Long-Term Dynamics // Вестник Нижневартовского государственного университета. 2025. № 1(69). С. 65-75. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-1/06>

Shalamova E.Yu., Pogonyшева I.A., & Postnikova V.V. (2025). Trends in Physical Development of Students in North: Long-Term Dynamics. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 1(69), 65-75. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-1/06>

Introduction. The most important criteria for the level of health of the population are the indicators of physical development. The health of young students continues to maintain negative trends and requires attention from society [18]. Morphofunctional development, as well as the health of children and adolescents are determined not only by the gene pool, but also largely depend on various environmental factors [9], which is confirmed by long-term comprehensive studies [1; 3; 4; 10; 15; 18].

A comparative analysis of the median length and body weight of young men and women aged 17 to 21 years from different regions revealed not only regional specifics, which were characterized by accelerated PD of young people from megacities (Moscow, St. Petersburg) compared to peripheral regions, but also the influence of ethnic factors on the level of PD [11].

A study published in 2017 compared the morphofunctional parameters of the body of young people living in the North Caucasus and Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra. It was found that the functional state of the cardiorespiratory system of the subjects was due to the climatic and geophysical features of the regions of residence [12].

The territory of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Yugra is characterized by unfavorable climatic and geographical conditions, which allows it to be equated with the regions of the Far North. The features of the local climate include cold winters, short cool summers, lack of ultraviolet radiation, significant seasonal changes in the length of daylight hours, strong fluctuations in the magnetic field, as well as sharp daily changes in atmospheric pressure, which together have a rather negative effect on the health of the population [5; 6; 16].

Over the past few decades, there has been an increase in the number of children, adolescents and young people with physical developmental disabilities and deterioration in the functional state of the body [3; 7; 8; 13; 15]. Tendencies towards changes in the physical parameters of the younger generation, as well as acceleration processes that began at the end of the 19th century and continued until the beginning of the 21st century have been found throughout the world [10]. Health problems of the younger generation that arise during their studies can have many causes, one of which is insufficient physical activity.

According to the RF Government Resolution of December 29, 2001 N 916 “On the all-Russian system for monitoring the state of physical health of the population, physical development of children, adolescents and youth”, the study of the PD of young people is significant and contributes to the improvement of work to strengthen the health of the population. In this regard, the issue of improving the physical development of the younger generation, in particular, living in the harsh climatic conditions of the North, continues to be relevant [20].

The aim of the study: to determine the main patterns of physical development of students of a northern university based on long-term observations.

Methods and organization of the study. This study was initiated in 2003 and is ongoing. By September 2024, 1,285 girls and 1,065 boys aged 17–18, who are first-year students of Nizhnevartovsk State University (NVSU), took part in the study. The study was conducted in accordance with the generally accepted scientific principles of the Helsinki Declaration of the World Medical Association (2013 edition). Standard methods for assessing physical development were used in the study. Such parameters as body weight (kg), body length (cm) and chest circumference (cm) were analyzed; muscle strength of the leading hand (kg) and vital capacity of the lungs (VC, l) were measured. A spring hand dynamometer was used to assess muscle strength, and a portable dry spirometer was used to measure the vital capacity of the lungs. Statistical data processing was performed using the Microsoft Excel, Statistica 10.0 software package. The arithmetic mean (M) and the error of the mean (m) were calculated for key somatic and functional indicators; the significance of differences was assessed using Student's t-test.

Results and discussion.

Since 2003, the length and weight of the body of young men and young women has gradually increased (Fig. 1 and 2), with slight fluctuations relative to the trend line. Such positive dynamics correspond to the secular trend of increasing somatometric indicators of the PD of the younger generation [10].

The survey revealed statistically significant differences in growth rates among young women in 2024 (165.9±5.6 cm) compared to 2003 (159.2±2.4 cm), 2004 (160.4±2.7 cm), 2005 (159.3±2.6 cm), 2006 (160.8±2.9 cm), 2007 (161.5±2.8 cm), 2008 (162.0±2.5 cm), 2012 (169.3±2.1 cm), 2013 (168.9±2.5 cm), 2016 (162.5±2.4 cm), 2017 (160.7±2.3 cm), as well as 2022 (168.2±2.3 cm). Despite the fact that according to the measurement results, in 2012, 2013 also in 2022, the weight of young women was greater than in 2024, the trend line as a whole demonstrates the growing dynamics of this indicator over the past 22 years (Fig. 1).

In young men, statistically significant differences in body length indicators are observed for 2024 compared to 2003-2008, as well as in the period from 2015 to 2017. The lowest indicator was recorded in 2003 and amounted to 169.4 ± 2.2 cm. In general, males also show long-term dynamics in increasing height (Fig. 1).

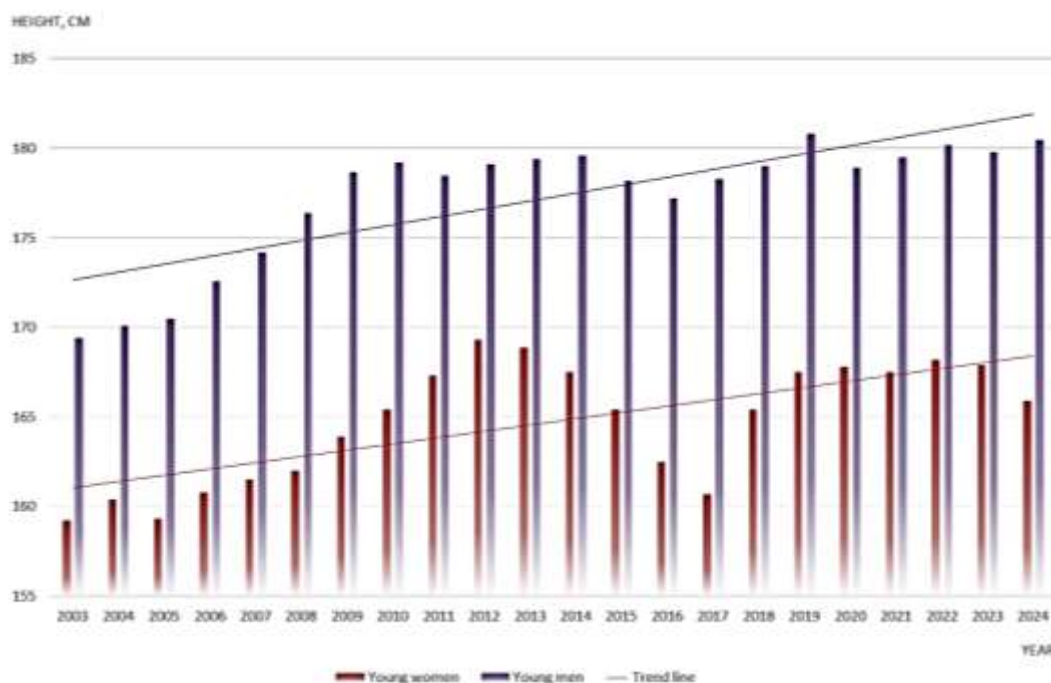


Fig. 1. Change in body length of young men and young women (cm)

When comparing the anthropometric data of students of the Voronezh State Medical University named after N.N. Burdenko for 2010 and 2020, a reflection of the general trend of growth acceleration was revealed. In 2010, above-average growth rates were observed in 6.5% of young men and 4% of young women, while in 2020 these figures increased to 38% and 22%, respectively [19].

Belarusian scientists S.A. Sidorovich and Zh.A. Shavel also identified long-term dynamics in the increase in average height, comparing the indicators of young people aged 17–25 years living in the Grodno region with data for 1978 [17].

A comparison of the average height values of Belarusian students for 1995–2002 with the height data of conscripts from Minsk 140th district for 1927, as well as with the indicators of young men of Minsk in the pre-war and post-war periods confirmed a similar trend. Data analysis demonstrated an increase in the body length of young men from Minsk from 1925 to 2002 [14].

Unlike young women, young men from NVGU show a pronounced long-term dynamics in increasing weight indicators (Fig. 2).

In the period from 2003 to 2024, the lowest value of weight indicators in young men was recorded in 2004 (65.4 ± 2.5 kg), and the maximum was 81.8 ± 2.1 kg in 2018. The second highest value is observed in 2020 (81.5 ± 2.7). The difference in body weight at the start of the study in

2003 (66.1 ± 1.9 kg) was statistically significant with the indicator obtained in 2024 (72.4 ± 16.9 kg), while the difference was 6.3 ± 15 kg (Fig. 2).

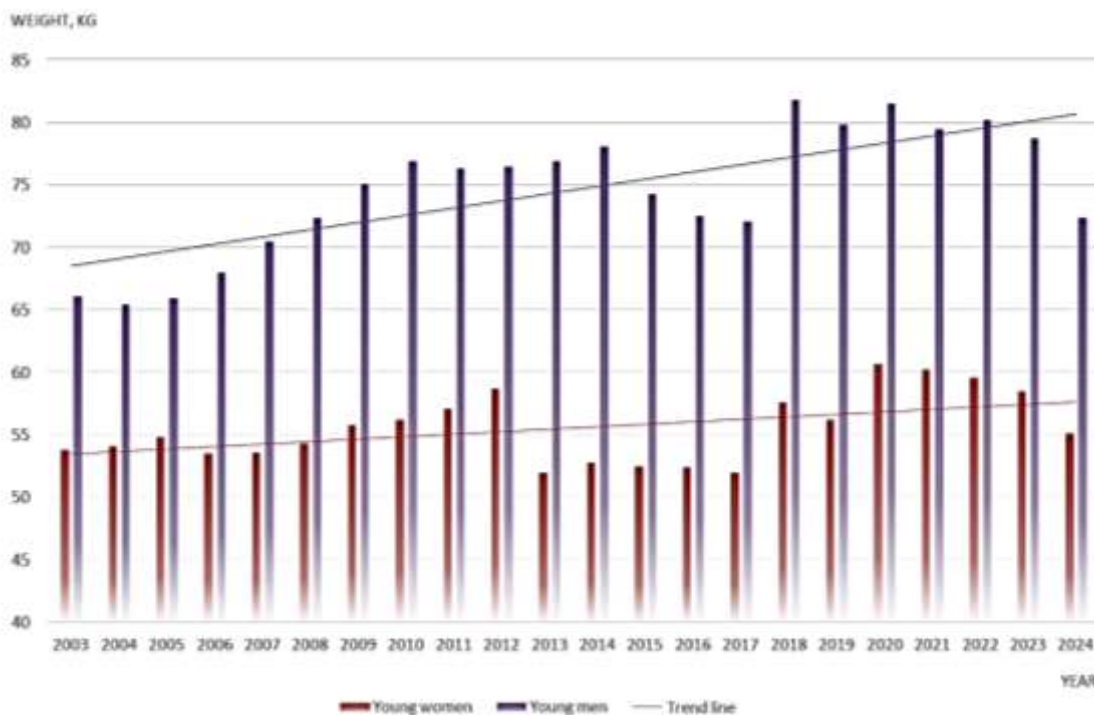


Fig. 2. Change in body weight of young men and young women (kg)

In females, the dynamics of body weight indicators over a 22-year period is not very pronounced. Statistically significant differences in weight indicators are noted only in the period from 2018 to 2022 compared to the data for 2024. The range of indicators from 2003 to 2024 is 8.7 ± 0.4 kg, with the lowest value observed in 2017 (52.0 ± 2.0 kg), and the highest in 2020 (60.7 ± 2.4 kg) (Fig. 2).

Presumably, the peak body weight of young men and young women in 2020 may be due to a decrease in physical activity during self-isolation and distance learning, which caused weight gain (Fig. 2).

Throughout the study period, chest circumference (CC) has been statistically decreasing annually in both young men and their peers significantly. This trend is clearly concerning, since the chest circumference indirectly characterizes respiratory function, and therefore, this trend may signal a deterioration in the respiratory system of modern youth (Fig. 3).

The dynamics of somatometric indicators of young men (17–21 years old) and young women (17–20 years old) of the Nizhny Novgorod region for the period from 1987 to 2018 has regional characteristics and reflects gender differences. Young women show an increase in body length and weight, as well as chest circumference, compared to their peers of the 20th century. At the same time, young men show a decrease in height against the background of an increase in body weight [2].

The linear trend of decreasing VC in NVSU students of both sexes reflects a deterioration in the function of external respiration and demonstrates a significant decrease in the indicators recorded in 2024, compared to the results of 2003 (Fig. 4).

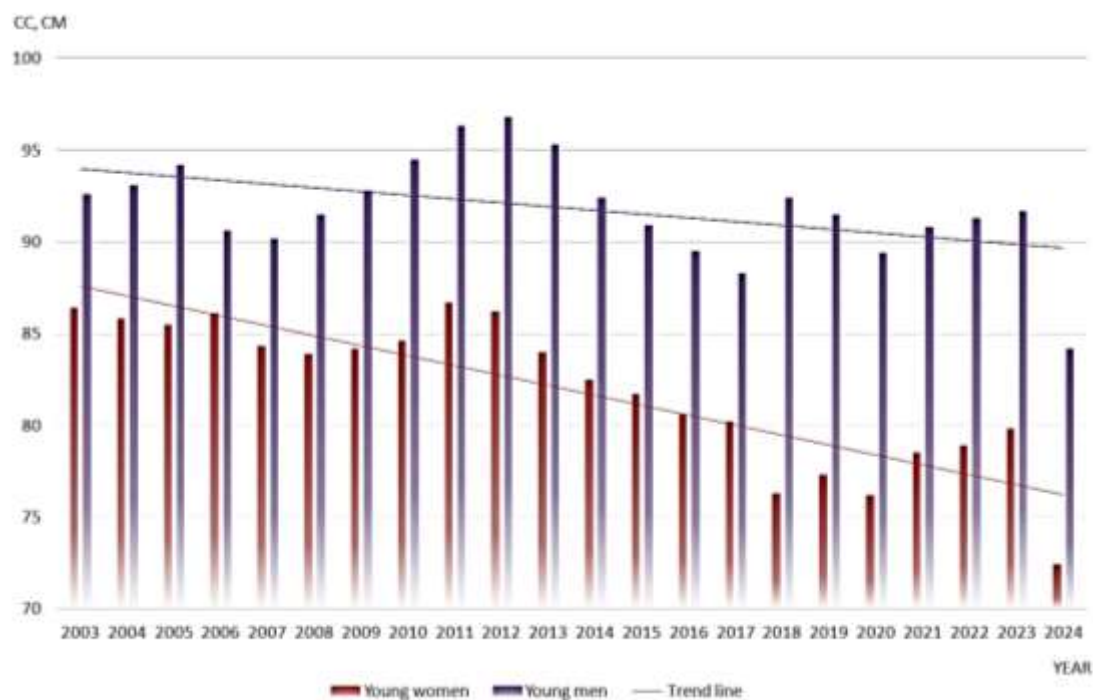


Fig. 3. Changes in CC of young men and young women (cm)

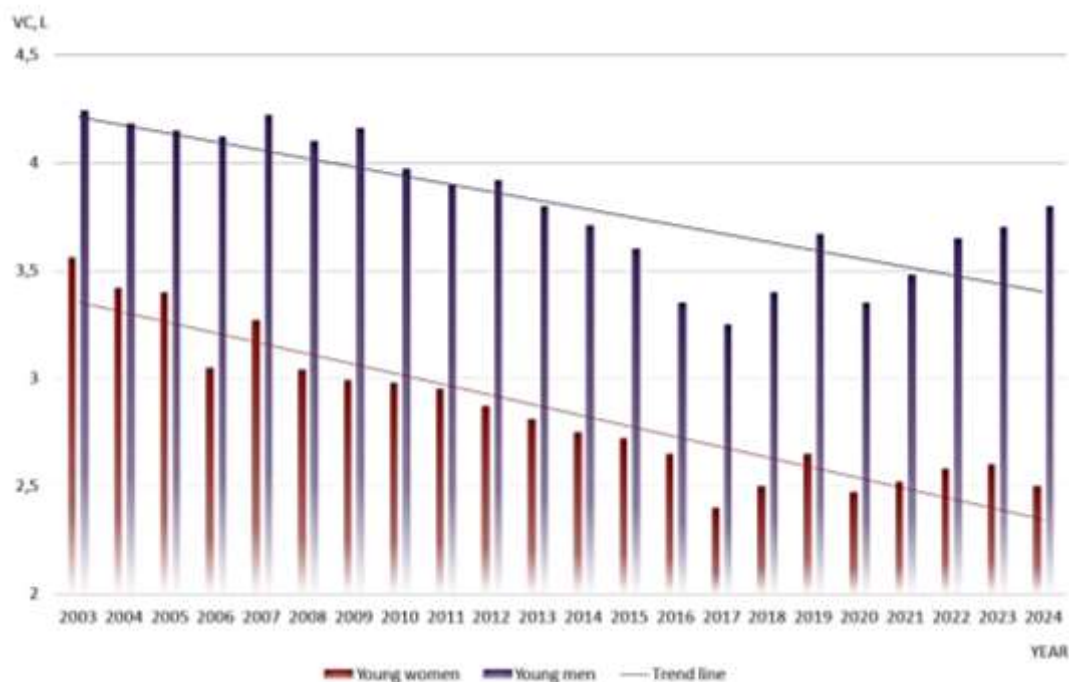


Fig. 4. Changes in vital capacity indicators of young men and young women (l)

Throughout the study period, two declines in indicators were noted, which occurred in 2017 and 2020. The second negative peak can be explained by a decrease in the level of physical activity during self-isolation (Fig. 4).

Somatic parameters of PD are associated with functional indicators, including the strength capabilities of the body. The dynamics of the values of muscle strength of the leading hand from 2003 to 2024 has a descending character (Fig. 5).

There were also two significant peaks in the decline in strength capabilities in both young men and young women during the study period. The first occurred in 2017, and the second decline was observed in 2020. In the second case, the reason is probably the reduction in usual physical activity due to the self-isolation regime introduced during that period (Fig. 5).

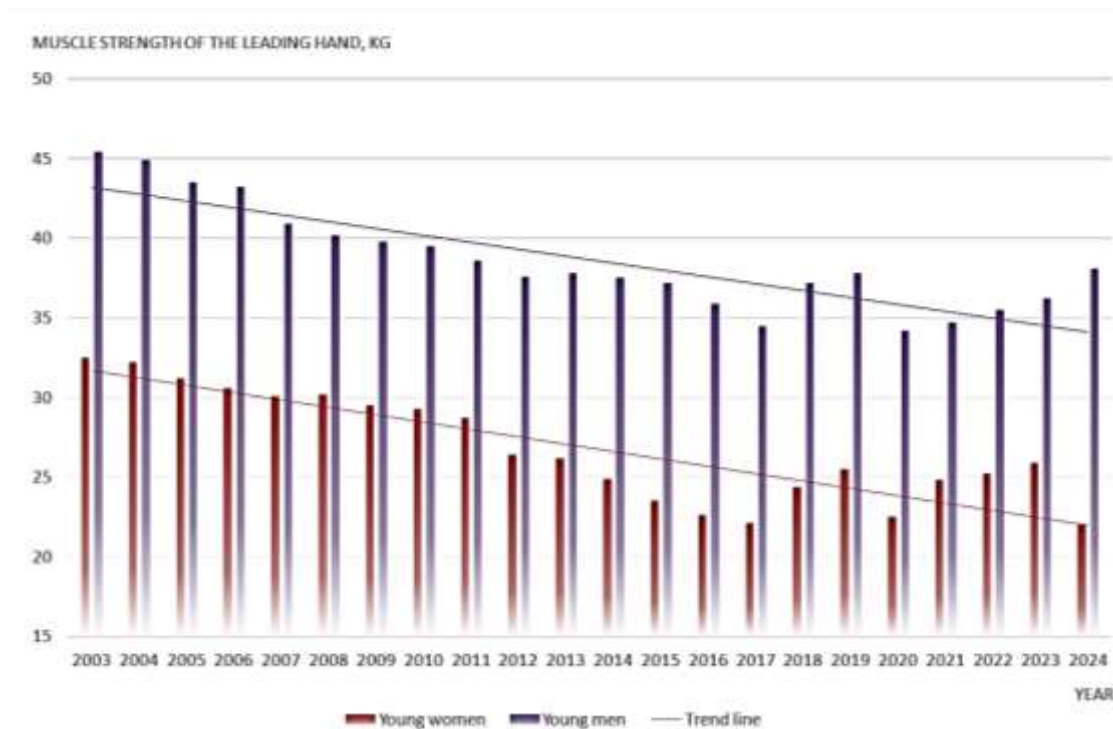


Fig. 5. Changes in muscle strength of the leading hand indicators of young men and young women (kg)

A similar trend in decreasing indicators was revealed as a result of a comparative analysis of the right hand dynamometry (RHD) in young men (17–21 years old) and young women (17–20 years old) of the Nizhny Novgorod region. A significant decrease in indicators was noted over the period from 1987 to 2018. Thus, in young men, the RHD values reliably decreased by 27.6%, while in young women – by 25.4% compared to measurements taken in 1987–1988 [2].

The results of hand dynamometry obtained during the examination of 569 students aged 20–22 years from Voronezh also show a noticeable decrease in functional indicators in 2020 compared to students who studied in 2010 [19].

Conclusion. The long-term dynamics of physical development of students at the northern university has been studied. Since 2003, young men and women have shown an increase in

somatometric indicators, which is consistent with the secular trend. The study revealed an aggravation of negative trends in the physical development of students. Along with an increase in body length and weight, there is a deterioration in the function of external respiration and a decrease in strength capabilities that indicates a reduction in body functional reserves. The indicated functional deviations have multiple causes, and one of the major risk factors is lack of physical activity. In the conditions of the North, this is especially important, where young people are often forced to spend a significant amount of time indoors due to adverse climatic conditions. The results obtained identified the need for the development and implementation of exercise complexes, including those suitable for independent performance aimed at maintaining the optimal functional state of students' respiratory system in the northern region, given the decrease in daily spontaneous motor activity due to extreme natural and climatic conditions and periodic distance learning.

References

1. Alekseeva, T.I. (1998). Adaptatsiya cheloveka v razlichny`x e`kologicheskix nishax Zemli (biologicheskie aspekty). Kurs lekcij. M.: Izd-vo MNE`PU, 280. (in Russ.).
2. Antonov, A.Ya., Boltacheva, E.A., Deryugina, A.V., Mikhailova, S.V., Sidorova, T.V., Syemova, S.G., & Khrycheva, T.V. (2018). Trends of physical development of students youth on the turn of countries (on the example of students in the Nizhny Novgorod region). *Fizicheskaya kul`tura. Sport. Turizm. Dvigatel`naya rekreaciya*, 3(4), 21–30. (in Russ.).
3. Berezina, N.O., Goncharova, G.A., Zvezdina, I.V., & dr. (2021). Fizicheskoe razvitiye i sostoyaniye zdorov`ya detej i podrostkov v shkol`nom ontogeneze (longitudinal`noe issledovanie). M.: Nauchnaya kniga, 350. (in Russ.).
4. Goodkova, L.K. (2013). Physiological anthropology. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 23. Antropologiya*, (1), 52-61. (in Russ.).
5. Kozy`reva, T.V. (2016). Klimatogeograficheskie i social`ny`e faktory`, vliyayushhie na sostoyaniye zdorov`ya naseleniya Xanty`-Mansijskogo avtonomnogo okruga – Yugry` (obzor publikacij). *Vestnik ugrovedeniya*, (4), 169–179. (in Russ.).
6. Krivoshhyokov, S.G., Osipovich, V.V., & Kvashina, S.I. (1994). Zdorov`e cheloveka v usloviyax vaxtovogo truda na Krajnem Severe. *Sociologicheskie issledovaniya*, (7), 79–82. (in Russ.).
7. Krikalo, I.N., Laptieva, L.N., & Xamlyuk E.E. (2016). Sostoyaniye zdorov`ya i fizicheskogo razvitiya studencheskoj molodezhi. *Vesnik MDPU imya I. P. Shamyakina*, (1), 42–46. (in Russ.).
8. Lebedev, A.V., Rubanovich, V.B., Aizman, N.I., & Aizman R.I. (2014). Morphofunctional features of first-year students of pedagogical university. *Vestnik NGPU*, (1), 128–141. (in Russ.).
9. Litovchenko, O.G. (2009). Osobennosti morfofunkcional`nogo i psixofiziologicheskogo razvitiya urozhencev Srednego Priob`ya v vozraste 7-20 let: dis. ... d-ra biol. nauk. Chelyabinsk, 285. (in Russ.).
10. Lyakh, V.I., Levushkin, S.P., Sonkin, V.D., & Skoblina, N.A. (2021). World young population's physical development progress analysis for late XX to early XXI century. *Teoriya i praktika fizicheskoy kultury*, (11), 56–59. (in Russ.).

11. Mikhajlova, S.V. (2022). Influence of temporary, regional and ethnic factors, learning conditions on the physical development of students. *Ucheny`e zapiski Kry`mskogo federal`nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Biologiya. Ximiya*, (2), 93–110. (in Russ.).
12. Pogonysheva, I.A., & Pogonyshev, D.A. (2017). Special characteristics of morphofunctional parameters of bodies of young adults living in climatically and geographically different environments. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, (1), 68–74. (in Russ.).
13. Pogonysheva, I.A., Pogonyshev, D.A., & Postnikova, V.V. (2019). Northern university student population health and physical progress profiling study. *Teoriya i praktika fizicheskoy kultury*, (8), 33–35. (in Russ.).
14. Polina, N.I., & Kriviczkij, V.V. (2016). *Fizicheskoe razvitie studencheskoj molodezhi Belarusi*. Minsk: Belaruskaya navuka, 232. (in Russ.).
15. Popov, V.I., Ushakov, I.B., Levushkin, S.P., Zhukov, O.F., & Scoblina, N.A. (2022). Long-term dynamics of the physical development of children in Russia. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*, 29(2), 19-128. (in Russ.). <https://doi.org/10.17816/humeco96734>.
16. Ragozin, O.N., Gudkov, A.B., Shalamova, E.J., Pogonysheva, I.A., Ragozina, O.V., Pogonyshev, D.A., & Simonov, V.N. (2022). Photoperiodic stability and distribution of chronotypes in young residents of the North with different organization of activities. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*, 29(9), 653-661. (in Russ.). <https://doi.org/10.17816/humeco106583>.
17. Sidorovich, S.A., & Shavel`, Zh.A. (2001). E`poxal`ny`e i konstitucional`ny`e izmeneniya antropometricheskix pokazatelej muzhchin i zhenshhin 17–25 let. *Molody`e ucheny`e – medicine XXI veka: materialy` mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii molody`x ucheny`x i studentov Grodnenskogo gosudarstvennogo medicinskogo universiteta, 12– 13 aprelya 2001 g, Grodno*, 146–148. (in Russ.).
18. *Fizicheskoe razvitie detej i podrostkov Rossijskoj Federacii. Sbornik materialov (vy`pusk VI)*. Pod red. akad. RAN i RAMN A.A. Baranova, chlen-korr. RAMN V.R. Kuchmy`. M.: Izdatel`stvo «Pediatr`», 2013, 192. (in Russ.).
19. Korotkova, S.B., Zelenina, M.T., Kel`ina, N.V., & Korotkov, A.B. (2023). Sravnitel`ny`j analiz antropometricheskix pokazatelej studentov medicinskogo universiteta (2010 i 2020 uchebnom godu). *Nauchny`j aspekt*, (12). URL: <https://clck.ru/3FNKQR> (data obrashheniya: 10.11.2024). (in Russ.).
20. Postanovlenie Pravitel`stva RF ot 29.12.2001 N 916 “Ob obshherossijskoj sisteme monitoringa sostoyaniya fizicheskogo zdorov`ya naseleniya, fizicheskogo razvitiya detej, podrostkov i molodezhi”. URL: <https://clck.ru/3FNKQz> (data obrashheniya: 01.11.2024). (in Russ.).

Литература

1. Алексеева Т.И. Адаптация человека в различных экологических нишах Земли (биологические аспекты). Курс лекций. М.: Изд-во МНЭПУ, 1998. 280 с.
2. Антонов А.Я., Болтачева Е.А., Дерюгина А.В., Михайлова С.В., Сидорова Т.В., Съёмова С. Г., Хрычева Т.В. Тенденции физического развития студенческой молодёжи на рубеже столетий (на примере студентов Нижегородской области) // *Физическая культура. Спорт. Туризм. Двигательная рекреация*. 2018. Т. 3. № 4. С. 21–30.

3. Берёзина Н.О., Гончарова Г.А., Звездина И.В. и др. Физическое развитие и состояние здоровья детей и подростков в школьном онтогенезе (лонгитудинальное исследование). М.: Научная книга, 2021. 350 с.
4. Гудкова Л.К. Физиологическая антропология // Вестник Московского университета. Серия 23. Антропология. 2013. № 1. С. 52–61.
5. Козырева Т.В. Климатогеографические и социальные факторы, влияющие на состояние здоровья населения Ханты-Мансийского автономного округа – Югры (обзор публикаций) // Вестник урovedения. 2016. № 4. С. 169–179.
6. Кривощёков С.Г., Осипович В.В., Квашина С.И. Здоровье человека в условиях вахтового труда на Крайнем Севере // Социологические исследования. 1994. № 7. С. 79–82.
7. Крикало И.Н., Лаптиева Л.Н., Хамлюк Е.Е. Состояние здоровья и физического развития студенческой молодежи // Веснік МДПУ імя І. П. Шамякіна. 2016. № 1. С. 42–46.
8. Лебедев А.В., Рубанович В.Б., Айзман Н.И., Айзман Р.И. Морфофункциональные особенности студентов первого курса педагогического вуза // Вестник НГПУ. 2014. № 1. С. 128–141.
9. Литовченко О.Г. Особенности морфофункционального и психофизиологического развития уроженцев Среднего Приобья в возрасте 7–20 лет: дис. ... д-ра биол. наук. Челябинск, 2009. 285 с.
10. Лях В.И., Левушкин С.П., Соськин В.Д., Скоблина Н.А. Тенденции изменений показателей физического развития детей, подростков и молодежи в конце XX века и начале XXI века (обзор) // Теория и практика физической культуры. 2021. № 11. С. 56–59.
11. Михайлова С.В. Влияние временных, региональных и этнических факторов, условий обучения на физическое развитие студентов // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия. 2022. № 2. С. 93–110.
12. Погоньшева И.А., Погоньшев Д.А. Особенности морфофункциональных параметров организма молодых людей, проживающих в разных климатогеофизических условиях окружающей среды // Вестник Нижневартковского государственного университета. 2017. № 1. С. 68–74.
13. Погоньшева И.А., Погоньшев Д.А., Постникова В.В. Динамика основных показателей физического развития студентов северного вуза // Теория и практика физической культуры. 2019. № 8. С. 33–35.
14. Полина Н.И., Кривицкий В.В. Физическое развитие студенческой молодежи Беларуси. Минск: Беларуская навука, 2016. 232 с.
15. Попов В.И., Ушаков И.Б., Левушкин С.П., Жуков О.Ф., Скоблина Н.А. Многолетняя динамика физического развития детей в России // Экология человека. 2022. Т. 29. № 2. С. 119–128. <https://doi.org/10.17816/humeco96734>.
16. Рагозин О.Н., Гудков А.Б., Шаламова Е.Ю., Погоньшева И.А., Рагозина О.В., Погоньшев Д.А., Симонов В.Н. Фотопериодическая устойчивость и распределение хронотипов у молодых жителей Севера при разной организации деятельности // Экология человека. 2022. Т. 29. № 9. С. 653–661. <https://doi.org/10.17816/humeco106583>.
17. Сидорович С.А., Шавель Ж.А. Эпохальные и конституциональные изменения антропометрических показателей мужчин и женщин 17–25 лет // Молодые ученые – медицине XXI

века: материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов Гродненского государственного медицинского университета, 12–13 апреля 2001 г. Гродно. 2001. С. 146–148.

18. Физическое развитие детей и подростков Российской Федерации. Сборник материалов (выпуск VI). Под ред. акад. РАН и РАМН А.А. Баранова, член-корр. РАМН В.Р. Кучмы. М.: Издательство «ПедиатрЪ», 2013. 192 с.

19. Короткова С.Б., Зеленина М.Т., Кельина Н.В., Коротков А.Б. Сравнительный анализ антропометрических показателей студентов медицинского университета (2010 и 2020 учебном году) // Научный аспект. 2023. № 12. URL: <https://clck.ru/3FNKQR> (дата обращения: 10.11.2024).

20. Постановление Правительства РФ от 29.12.2001 N 916 «Об общероссийской системе мониторинга состояния физического здоровья населения, физического развития детей, подростков и молодежи». URL: <https://clck.ru/3FNKQz> (дата обращения: 01.11.2024).

дата поступления: 28.12.2024

дата принятия: 30.01.2025

© Shalamova E.Yu., Pogonysheva I.A., Postnikova V.V., 2025

Коркина Е.А., Москвина Н.В., Штогрин А.В., Середовских Б.А.

**РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ СИБИРСКИХ УВАЛОВ**

Е.А. Korkina, N.V. Moskvina, A.V. Shtogrina, B.A. Seredovskikh

**THE REGIONAL FEATURES OF THE GEOECOLOGICAL STATUS OF THE SOIL COVER
IN THE EASTERN PART OF THE SIBERIAN UVALY REGION**

Аннотация. Выявлены региональные геохимические особенности почвенного покрова территории природного парка (ПП) «Сибирские увалы». Проведён сравнительный анализ свойств фоновых почв Сибирских увалов (подзол языковатый криометаморфический, олиготрофная торфяная почва, аллювиальная дерновая почва) и техногенных поверхностных образований (ТПО), сконструированных на месторождениях добычи нефти и газа. Традиционными аналитическими методами экологического мониторинга изучены химические свойства основных типов почв и ТПО: реакция среды, содержание органического вещества, подвижных соединений фосфора, содержание основных засоляющих сульфатов- и ионов-хлоридов в водной вытяжке. Установлены концентрации подвижных форм некоторых тяжёлых металлов (Pb, Ni, Cr, Cu, Mn) и содержание нефтепродуктов в основных типах почв исследуемой территории. Определены региональные особенности геохимического фона природного парка: повышенное содержание нефтепродуктов, подвижных форм марганца и цинка в органогенных горизонтах естественных фоновых почв, находящиеся на территории особо охраняемых природных территорий, которые являются своеобразным резерватом с фоновым состоянием природной среды. Наличие засоляющих веществ, могут быть проявлением переноса морских солей южными ветрами, с осаднением на возвышенности Сибирских увалов, а также могут быть результатом мерзлотных процессов при выпучивании солей из отложений морского генезиса. Результаты исследований могут быть использованы предприятиями нефтегазового комплекса для сравнения исходной загрязнённости лицензионных участков с фоновыми показателями при

Abstract. The regional geochemical characteristics of the soil cover of the “Siberian Uvaly” natural park’s territory have been revealed. The comparative analysis of the background soils properties in Siberian Uvals (Podzol Arenic Turbic, Histosols Gelic and Fluvisols) and technogenic surface formations (TSF) constructed at oil and gas production fields was conducted. The chemical properties of the main types of soils were studied using traditional analytical methods of environmental monitoring: reaction of the medium, content of organic matter, mobile phosphorus compounds, content of the main salinizing sulfates and chloride ions in the water extract. Concentrations of mobile forms of some heavy metals (Pb, Ni, Cr, Cu and Mn) and the content of petroleum products in the main types of soils of the study area were also determined. Regional peculiarities of the geochemical background of the natural park were identified: increased content of oil products, manganese and zinc in organogenic horizons of natural background soils, located within the territory of specially protected natural areas, which act as a kind of reserve for maintaining the natural environment in its natural state. The presence of saline substances in the area may be a consequence of sea salt being transported by southern winds and with deposited on the uplands of the Siberian Uvaly. It could also be due permafrost processes in the process, which release salt from marine sediments. Oil and gas companies can use the research results to compare the initial contamination of licensed areas with background indicators when planning field

проектировании обустройства месторождений. Интенсивное нефтегазовое освоение территорий, сопровождающееся воздействием на геосистемы, требует проведения систематического мониторинга состояния окружающей среды.

Ключевые слова: ХМАО-Югра; возвышенность Сибирские увалы; техногенное загрязнение почв; нефтепродукты; хлориды и сульфаты; подзолы; торфяные олиготрофные почвы.

Сведения об авторах. Коркина Елена Александровна, ORCID: 0000-0001-8578-4112, канд. геогр. наук, доцент, Нижневартковский государственный университет, г. Нижневартовск, Россия, lenaknv@gmail.com; Москвина Наталья Викторовна, ORCID: 0000-0001-6749-148X, канд. биол. наук, доцент, Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия, nvmoskvina@mail.ru; Штогринина Алена Викторовна, ORCID: 0009-0005-5743-9131, Нижневартковский государственный университет, г. Нижневартовск, Россия, alenashtogrina@bk.ru; Середовских Борис Анатольевич, ORCID: 0000-0003-2715-2146, канд. геогр. наук, доцент кафедры географии, Нижневартковский государственный университет, г. Нижневартовск, Россия, geoboris@mail.ru.

development. Intensive oil and gas development of territories, accompanied by the impact on geosystems, requires systematic monitoring of the environment.

Keywords: Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug-Yugra; Siberian Uvaly uplands; anthropogenic soil pollution; petroleum products; chlorides and sulfates; podzols; peat oligotrophic soils.

About the authors: Elena A. Korkina, ORCID: 0000-0001-8578-4112, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Nizhnevartovsk State University, Nizhnevartovsk, Russia, lenaknv@gmail.com; Natalia V. Moskvina, ORCID: 0000-0001-6749-148X, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Perm State National Research University, Perm, Russia, nvmoskvina@mail.ru; Alena V. Shtogrina, ORCID: 0009-0005-5743-9131, Nizhnevartovsk State University, Nizhnevartovsk, Russia, alenashtogrina@bk.ru; Boris A. Seredovskikh, ORCID: 0000-0003-2715-2146, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Nizhnevartovsk State University, Nizhnevartovsk, Russia, geoboris@mail.ru.

Коркина Е.А., Москвина Н.В., Штогринина А.В., Середовских Б.А. Региональные особенности геоэкологического состояния почвенного покрова восточной части Сибирских увалов // Вестник Нижневартковского государственного университета. 2025. № 1(69). С. 76-99. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-1/07>

Korkina, E.A., Moskvina, N.V., Shtogrina, A.V., & Seredovskikh, B.A. (2025). The Regional Features of the Geoeological Status of the Soil Cover in the Eastern Part of the Siberian Uvaly region. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 1(69), 76-99. (in Russ.). <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-1/07>

Введение

В условиях увеличения антропогенной нагрузки на северотаёжные экосистемы, определение региональных допустимых уровней загрязнителей для почв является актуальной задачей. Региональные нормативы качества почв должны учитываться исходя из методических рекомендаций, установленных Министерством природных ресурсов и экологии Российской Федерации, а также исходя из типов и свойств почв, которые могут значительно варьировать в зависимости от географического положения и климатических условий. В этом контексте важным является подход, основанный на комплексной оценке состояния окружающей среды, который позволит учитывать взаимодействие между различными компонентами экосистемы.

Природно-климатические условия северотаёжной зоны и широкий спектр загрязняющих веществ затрудняют проведение геоэкологической оценки почвенного

покрова. В связи с интенсивностью и своеобразием техногенных загрязнений на обширной территории Севера Западной Сибири возникают сложности с выявлением ответной реакции природных комплексов различного ранга на техногенное воздействие. Очевидно, что техногенное воздействие приводит к деградации геосистем, в том числе их почвенной составляющей.

К настоящему времени на региональном уровне достигнут значительный уровень знаний, накопленный при изучении эколого-геохимических параметров природных и техногенно-измененных ландшафтов нефтегазодобывающих районов Западной Сибири. Однако, не все региональные особенности геохимического фона Ханты-Мансийского автономного округа – Югры представлены в работах исследователей; работа в данном направлении продолжается. Известно, что геохимический фон зависит от ландшафтообразующих факторов, и эти особенности необходимо учитывать при региональном мониторинге.

Исследования влияния техногенеза на почвы Западной Сибири, в основном касались воздействия техногенных потоков [23; 31]. Наличие в добываемом сырье, в технологических и сопутствующих выбросах, в отводимых водах, в образующихся твердых отходах широкого круга органических и неорганических поллютантов, коренным образом меняют химический состав почв [24; 34]. Н.П. Солнцева [30] исследовала влияние нефтедобывающей промышленности на почвы Среднеобской низменности. Однако, в её исследованиях не охвачена территория возвышенности Сибирских увалов. Также не охвачена исследуемая территория в работах Л.А. Изерской и Т.Е. Воробьёвой [11], Д.В. Московченко и А.Г. Бабушкина [19]. Изучив содержание подвижных форм Pb, Cu, Zn, Ni, Cr, Mn, Fe, авторы выявили, что случаи превышения ПДК таких элементов, как Pb, Zn, Cu, Mn и Ni чаще отмечаются для почв с высоким накоплением органического вещества – аллювиальных и торфяных почв. В своей монографии Д.В. Московченко [18] акцентирует внимание на особенностях радиальной дифференциации микроэлементов Mn, Pb, Zn в почвенном покрове возвышенности Сибирских увалов. Вместе с этими исследованиями недостаточно изучены соотношения нефтепродуктов, как называет А.Н. Геннадиев [4] различных групп углеводов в почвах с фоновыми почвами зонального ряда. В научной литературе очень мало работ, где присутствуют данные об уровнях содержания, составе и генезисе углеводов в почве и нет межзональных сопоставлений и оценки значения зональных условий для формирования состава углеводов в почвах.

В то же время, вопросы, связанные с миграцией и концентрацией в почвах нефтепродуктов, микроэлементов, тяжёлых металлов и биогенных элементов изучены слабо, особенно в зонах локального и опосредованного влияния объектов нефтегазодобывающей промышленности [6; 8; 27]. Основное количество нефти сосредотачивается в подстилке и верхнем минеральном горизонте почвы. Загрязнение подстилки вызывает необратимые последствия: уничтожение банка семян и зачатков, практически полную гибель почвенного микробного и животного населения, выпадение

мохово-лишайникового яруса [5; 24; 31]. В условиях северотаёжных районов Западной Сибири техногенное воздействие вызывает резкое изменение таких морфологических признаков почвы, как окраска, структура и сложение. В частности, заметно ухудшаются структура и сложение почв, усиливаются признаки процесса оглеения, проявляющиеся в обильном появлении сизых пятен в верхней зоне профиля, в наибольшей степени подвергнувшейся загрязнению нефтью.

Степень нарушения природных экосистем зависит как от интенсивности техногенных воздействий, так и от устойчивости системы, т. е. её способности сохранять свои свойства и параметры режимов в условиях интенсивных антропогенных воздействий. Все это определяет особую актуальность детального комплексного исследования, нацеленного на получение объективной оценки эколого-геохимических особенностей территории, находящейся под техногенным воздействием нефтедобычи. Сравнительная характеристика идентичных типов почв и почвогрунтов, сформированных в одинаковых геоэкологических условиях, необходима для понимания региональных особенностей физико-химических и химических свойств почв.

Целью исследования является выявление региональных особенностей основных типов почв восточной части природного парка «Сибирские увалы». В качестве информационной базы исследования использованы фондовые материалы по геоэкологическому мониторингу с 2001 по 2023 гг., размещенные в архиве научного отдела природного парка «Сибирские увалы», а также результаты полевых и камеральных исследований почв [9; 13]. Мониторинг почвенного покрова на территории восточной части Сибирских увалов проводился с целью установления основных фоновых свойств почв и оценки степени загрязнения почвенного покрова охраняемой территории.

Объект исследования

Почвенный покров Сибирских увалов сформировался в холодных и сухих континентальных условиях в конце плейстоцена – начале голоцена [1; 24]. Система возвышенностей Сибирские увалы, состоящая из восточной и западной частей, располагается между параллелями 62° и 65° с.ш. и относится к северотаёжной подзоне Западно-Сибирской равнины (рис. 1).

Сибирские увалы сформированы среди чашеобразных заболоченных впадин и простираются от р. Енисей до р. Обь на 1000 км. Абсолютная высота возвышенностей определяется от 90 до 175 м БС. Здесь сформированы уникальные по своей эстетике ландшафты, встречаются виды растений и животных, занесенные в Красную книгу Ханты-Мансийского автономного округа – Югры. Для сохранения уникальности природных объектов в 1998 году была создана особо охраняемая природная территория – природный парк «Сибирские увалы» (далее – ПП).



Рис. 1. Местоположение точек отбора проб на территории восточной части Сибирских увалов

Растительные ассоциации в основном представлены сосновыми бруснично-лишайниковыми и бруснично-лишайниково-зеленомошными лесами на подзолах с признаками криогенеза (рис. 2). Особое значение в природоохранной деятельности отводится мохообразным: антоцеротовидным и листостебельным мхам, распространенным, в том числе на олиготрофных и мезотрофных сфагновых болотах. Часть видов являются редкими на всей территории ХМАО-Югры. Например, такие как: *Bryum cyclophyllum* Schwaegr., *Polytrichum jensenii* Hag., *Sphagnum aongstroemii* Hartm. [17]. В зрелых сообществах среднего уровня пойм рек на аллювиальных слоистых почвах (рис. 2) травостой состоит из *Calamagrostidetum langsdorffii purum* (Link) Tzvelev, *Calamagrostidetum langsdorffii filipendulosum ulmariae*, *Equisetum arvense* L., *Tanacetum bipinnatum* (L.) Sch. Bip., *Artemisia vulgaris*, *Senecio vulgaris* L., *Solidago virgaurea* L., *Galium trifidum* L., *Cerastium jenisejense* Hult., *Hieracium subarctoum* Norrl., *Rumex thyrsoiflorus* L. [15]. Недоступность территории определяет сохранность уникальных ландшафтов. Однако интенсивно развивающаяся добыча нефти приближается к границам НП и располагается в 60 км к западу от естественных границ НП «Сибирские увалы» (рис. 1).

Автоморфные позиции обладают хорошим дренажом, промывным типом водного режима. Потоки влаги и мигрирующие с ней химические элементы и соединения оказывают влияние на дифференцированность горизонтов почвенного профиля. Под влиянием органических кислот хвойно-лишайникового опада идёт образование подзолистого горизонта [28]. Основным элементарным почвообразовательным процессом является альфегумусовый. Региональная особенность отмечена в морфологическом строении подзолов. Подзолы (точка 1-П) формируются под воздействием криогенных процессов, их

минеральный скелет состоит из почвообразующих пород флювиогляциального генезиса, местами с моренным материалом [26]. Бугристо-западинный рельеф, залегающие в нижней части почвенного профиля грунтовые воды и криогенные процессы формируют морфологическое строение данного типа почв (рис. 2). Почвенный профиль подзола языковатого криометаморфического имеет четыре основных горизонта и один переходный горизонт с псевдофибрами от иллювиально-железистого к материнской породе.

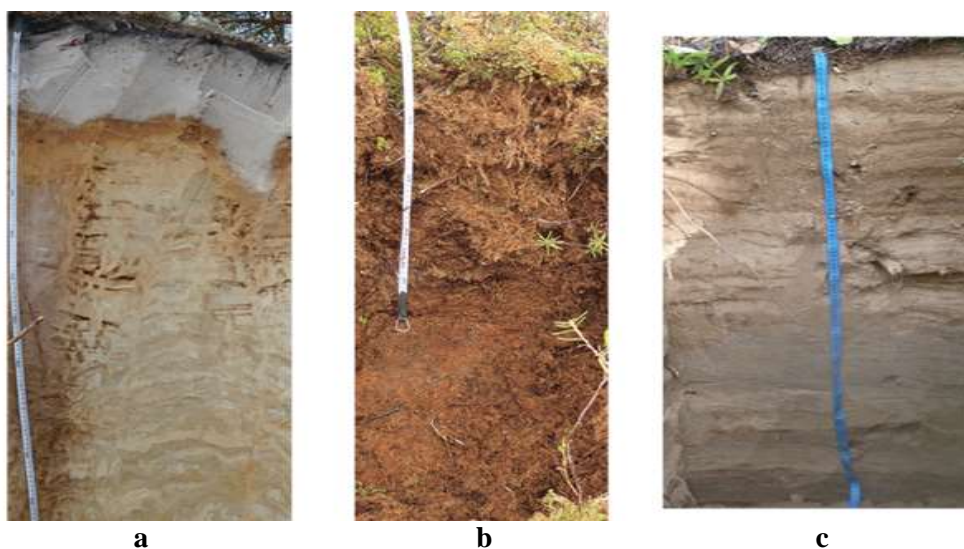


Рис. 2. Основные типы почв Сибирских увалов: а) подзол языковатый криометаморфический (точки 1-П, 44-Ф, 97-Ф); б) олиготрофная торфяная почва (точки 5-П, 57-Ф); с) аллювиальная дерновая почва (точки 3-П, 49-Ф)

Притеррасные повышения слабо приподняты и всхолмлены, заняты сосновыми лесами с примесью кедра и лиственницы. На притеррасных поверхностях процесс подзолообразования выражен слабо, элементарным почвообразовательным процессом является элювиально-глеевый [7]. В центральных частях плоских водоразделов, где сток поверхностных вод ослаблен, появляется переувлажнение, способствующее развитию болотного процесса и формированию почв с оторфованным поверхностным горизонтом. Уменьшение степени расчлененности рельефа, близкое залегание грунтовых вод способствует торфообразовательному почвенному процессу и формированию торфяных олиготрофных почв.

Разрез торфяной олиготрофной почвы (точка 5-П) заложен на гряде олиготрофного болота долины реки Глубокий Сабун (рис. 2). Гряды представляют собой повышения относительно среднего уровня болота, высотой 0,5–1,0 м, которые покрыты сосново-кустарничково-сфагновыми или кустарничково-сфагновыми сообществами. Древесный ярус редкий, образован сосной, высота которой не более 5 м. Возраст сосны не превышает 180 лет, средний возраст порядка 90–100 лет. Кустарничковый ярус представлен в основном *Ledum palustre* L., *Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench, *Andromeda polifolia* L. *Vaccinium vitis-idaea* L.. Моховой ярус почти сплошь образован *Sphagnum fuscum* (Schimp.) Klinggr.. В

моховом покрове незначительная примесь *Sphagnum magellanicum* Brid. и *S. balticum*. (Russ.) Russ. ex C.Jens. Мочажины заняты осоково-сфагновыми сообществами. Среди таких осок, как *Carex rostrata* Stokes, *C. lasiocarpa* Ehrh., *C. pauciflora* Lightf., *C. limosa* L., *Eriophorum vaginatum* L., *E. russeolum* Fries, *E. polystachion* L.. В моховом ярусе – сплошной покров образуют *Sphagnum angustifolium* (L.) Holub и *S. riparium* Aongst. [14]. Торфяная олиготрофная почва имеет следующую морфологическую характеристику. Очёс, мощностью 20 см, представлен мокрым сфагнумом светло-коричневого цвета, на глубине 20–80 см верхний торфяной горизонт представлен мокрым, слабо разложенным, светло-коричневым торфом, в горизонте включения корневой системы кустарничковой и травянистой растительности – 60%, на глубине 80–250 см торф сырой, средней степени разложенности, бурый с видимыми остатками стеблей мхов. Торфяная залежь сформирована на сизых песчаных отложениях.

В поймах реки Глубокий Сабун и его притоков развиваются аллювиальные дерново-слоистые почвы (точка 3-П) (рис. 2) под лиственнично-кедровым зеленомошно-мелкотравным лесом [7; 15]. Низкие поймы р. Глубокий Сабун развиты слабо и представляют собой тёмные песчаные пляжи с включением диабаз-базальтового состава, состоящие из основного плагиоклаза, пироксена, магнезиального оливина [13]. Зрелая пойма р. Глубокий Сабун имеет абсолютную высоту 110 м. Поверхность изрезана старичными ложбинами до 1,5 м. Микрорельеф представлен биогенной бугристостью. В подросте: *Pinus sibirica* L., *Abies sibirica* Ledeb. Живой надпочвенный покров представлен: гипновыми мхами, *Linnaea borealis* L., *Equisetum sylvaticum*. Почвенный профиль представлен маломощным серогумусовым горизонтом – АУ, его средняя мощность составляет 5 см. Окраска однородная, цвет буровато-коричнево-серый. Горизонт густо пронизан корнями растений. Серый цвет горизонту придает минеральная основа пойменного аллювия, представленная супесью диабаз-базальтового состава. Сложение рыхлое. Пачка пойменного аллювия (горизонт С⁻) представлена прослойками песка бежевого цвета и серовато-темнобежевого цвета. Полосы располагаются примерно через 10 см. На глубине 66, 78 и 85 см фиксируются слои погребенных гумусовых горизонтов мощностью до 1 см. Корнеобитаемый слой до 60 см. Аллювиальная дерновая почва сформирована в центральной пойме р. Глубокий Сабун.

В зоне техногенеза были обследованы фоновые зональные почвы: подзолы иллювиально-железистые на флювиогляциальных песках – точки 44-Ф и 97-Ф; торфяная олиготрофная почва – точка 57-Ф; аллювиальная оторфованная дерновая – точка 49-Ф. Почвы фона сравнивались с идентичными типами почв на территории ООПТ. Также, естественный геохимический фон исследуемых почв сравнивали с техногенными поверхностными образованиями (ТПО): нефтезагрязненный подзол – точка 96-Т; нефтезагрязненный торф верхового болота – точка 56-Т; рекультивированный участок – точка 98-Т; песчаная отсыпка инженерных конструкций – точки 52-Т, 45-Т.

Материалы и методы исследования

Геоэкологический мониторинг почвенного покрова на территории ПП «Сибирские увалы» проводится регулярно с целью установления фоновых концентраций основных химических веществ на территории, не отягощенной антропогенным и техногенным воздействием. Почва является консервативной, длительно формирующейся средой обитания, поэтому геоэкологический мониторинг на фоновой территории ПП проводится с периодичностью 1 раз в 3 года. Мониторинг почв на территории ПП «Сибирские увалы» для определения геохимического фона ведется по 3 основным типам почв: подзолы иллювиально-железистые, аллювиальные почвы р. Глубокий Сабун, торфяные олиготрофные. В нашем исследовании проанализированы данные мониторинга за 2007, 2011 и 2023 гг.

Почвенные пробы отобраны в соответствии с Программой (проектом) комплексного экологического мониторинга в границе ПП «Сибирские увалы» [21].

В зоне техногенеза были отобраны пробы типичных зональных почв, находящиеся непосредственно на месторождениях, и грунты с нарушенных участков, где осуществляется нефтедобыча. Отбор проб для геоэкологического мониторинга является одним из значимых факторов для сравнения показателей. При сравнении свойств почв необходимо учитывать, что верхние органогенные горизонты будут различны у разных типов почв. У подзолов формируется, как правило, маломощная лесная подстилка (1–5 см), возможно, подстилающая снизу прослойку угля, имеющую пирогенное происхождение. У торфяной олиготрофной почвы органогенный слой – торфяные горизонты, как правило, имеют мощность более 70 см.

С целью выявления региональных особенностей были отобраны образцы почв из всех генетических горизонтов. Так как техногенные грунты представляют собой, как правило, песчаные замазученные насыпи или рекультивированные торфяной крошкой площадки, сравнивать такие объекты с естественными почвами необходимо с пониманием конструкции ТПО. Отбор проб производился послойно. Сложности анализа вещественного состава определяются многими региональными особенностями почв. Например, при отборе торфяной пробы от 0–25 см, в пробу может попасть больше корней, угольки или остаток древесных пород, что в итоге даст в пробе больший процент углерода, чем чисто отобранный моховый очес.

Методы отбора и подготовки проб использовались в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-84. Анализ проб почв и ТПО проводился по методикам, аккредитованным в Нижневарттовском отделе филиала Федерального государственного учреждения «Центр лабораторного анализа и технических измерений по Уральскому Федеральному округу» по Ханты-Мансийскому автономному округу. Определяли рН водной вытяжки, удельную электропроводность, содержание хлоридов и сульфатов в водной вытяжке – ГОСТ 26423-85, обменный аммоний – ГОСТ 26489-85, нитраты – ГОСТ 26488-85, фосфор подвижный в вытяжке по Кирсанову – ГОСТ 26207-91, органическое вещество гравиметрическим

методом – ГОСТ 26213-91, содержание нефтепродуктов – РД 52.18.647-2003, содержание подвижных форм свинца, цинка, меди – МУ 08-47/152, подвижного марганца – ПНД Ф 16.1:2.2.263-09, подвижного никеля – ПНД Ф 16.1:2.2.263-10, хрома – ПНД Ф 16.1:2.2.263-11.

Геохимические показатели почв фоновой территории ПП сравнивали по годам и по типам почв с показателями, полученными в почвогрунтах в зоне техногенеза восточной части Сибирских увалов. Анализ данных позволяет определить направленность почвенных процессов, уровень воздействия техногенеза и оценить экологическое состояние экосистем.

Результаты исследования

Присутствие нефтепродуктов в органогенных (преимущественно торфяных) горизонтах почв ПП Сибирские увалы, по-видимому, является региональной особенностью. Торфяные олиготрофные почвы в ХМАО – Югре являются самыми распространенными типами почв. Это основной тип почв на месторождениях, и он же наиболее часто подвергается рекультивации после техногенных воздействий.

Существует проблема корректного определения нефтепродуктов в торфяных и органогенных пробах. Гетерогенность органического вещества не позволяет определить гравиметрическим методом загрязняющие вещества – ароматические углеводороды в органогенных пробах. Для получения оценок многолетнего тренда изменения Сорг требуются соблюдение условий к отбору проб и методов Сорг определения [37]. В одной пробе возможен сильно разнящийся градиент результата, зависящий от ботанического состава органогенной пробы [25]. Поэтому, одной из региональных проблем является определение реального количества Сорг и нефтепродуктов в почвах с высоким содержанием органического вещества (в-ва), к ним относятся торфяные почвы, включая олиготрофные, эуротрофные подтипы почв.

Необходимо понимать, что фоновые почвы ПП «Сибирские увалы» не имеют источника загрязнения нефтепродуктами. Месторождения находятся ниже по рельефу и по территориям, освоенным гидрографической сетью, поэтому исключается перенос загрязнителя. Однако, в пробах почв ПП фиксируется содержание нефтепродуктов, в незначительном объеме для минеральных почв и значительное – для органогенных горизонтов торфяных почв. Примером может быть точка 5-П – торфяная олиготрофная почва с содержанием нефтепродуктов, варьирующим от 1409 до 3790 мг/кг в разные годы исследования. Результаты определения содержания нефтепродуктов и органического вещества в почвах отражены на графике (рис. 3). Здесь просматривается взаимосвязь содержания органического вещества и нефтепродуктов в фоновых торфяных олиготрофных почвах (57-Ф).

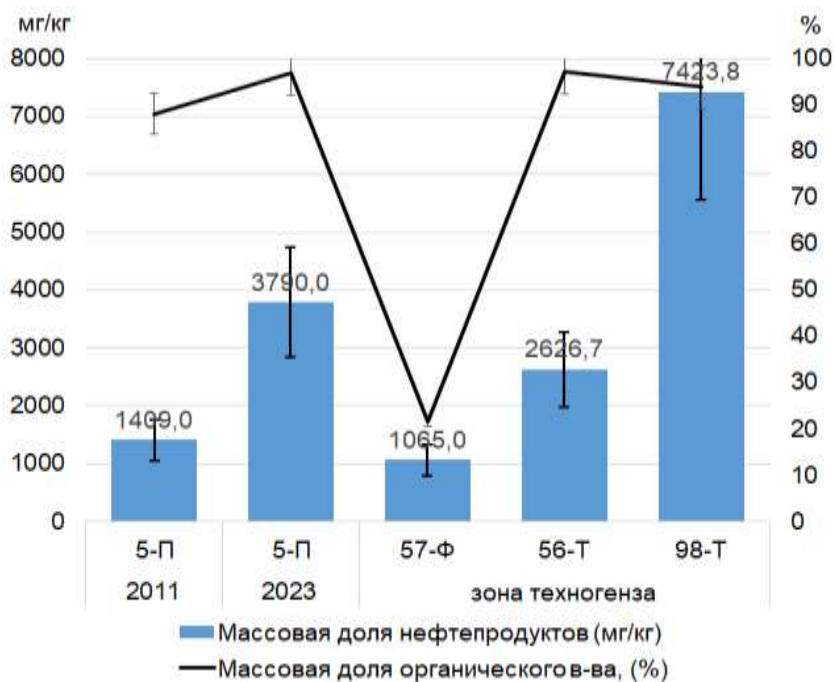


Рис. 3. Среднее содержание органического вещества и нефтепродуктов в пробах фоновых торфяных олиготрофных почв и торфяных нефтезагрязнённых в зоне техногенеза

Результаты исследования почв ПП «Сибирские увалы» показали заметно более низкое содержание нефтепродуктов в минеральных горизонтах по сравнению с органогенными: в аллювиальных почвах (разрез 3-П) оно составляет 56,9–169 мг/кг в разные годы исследований; в минеральных горизонтах подзолов (1-П) – от 14,1 до 168 мг/кг. В зоне техногенеза органогенный горизонт аллювиальной почвы имеет высокое содержание органического вещества – 48,9% и нефтепродуктов – 1922,1 мг/кг. Прослеживается взаимосвязь между содержанием органического вещества и нефтепродуктов в органогенных горизонтах почв (рис. 4); отчасти это может быть связано с особенностями аналитического определения того и другого показателя.

При определении содержания нефтепродуктов в фоновых подзолах и техногенных поверхностных образованиях, сконструированных из литологического материала отложений, слагающих поверхность возвышенности Сибирских увалов и загрязненных в процессе нефтяного хозяйства, обнаружили, что в пробах песчаного состава низкое содержание органического вещества (от 0 до 2%); содержание нефтепродуктов сравнительно невысоко (от 50 до 56 мг/кг). Относительно высокое содержание нефтепродуктов определяется для нефтезагрязнённого подзола (96-Т) – 3069 мг/кг и рекультивированного участка (98-Т) – 7424 мг/кг.

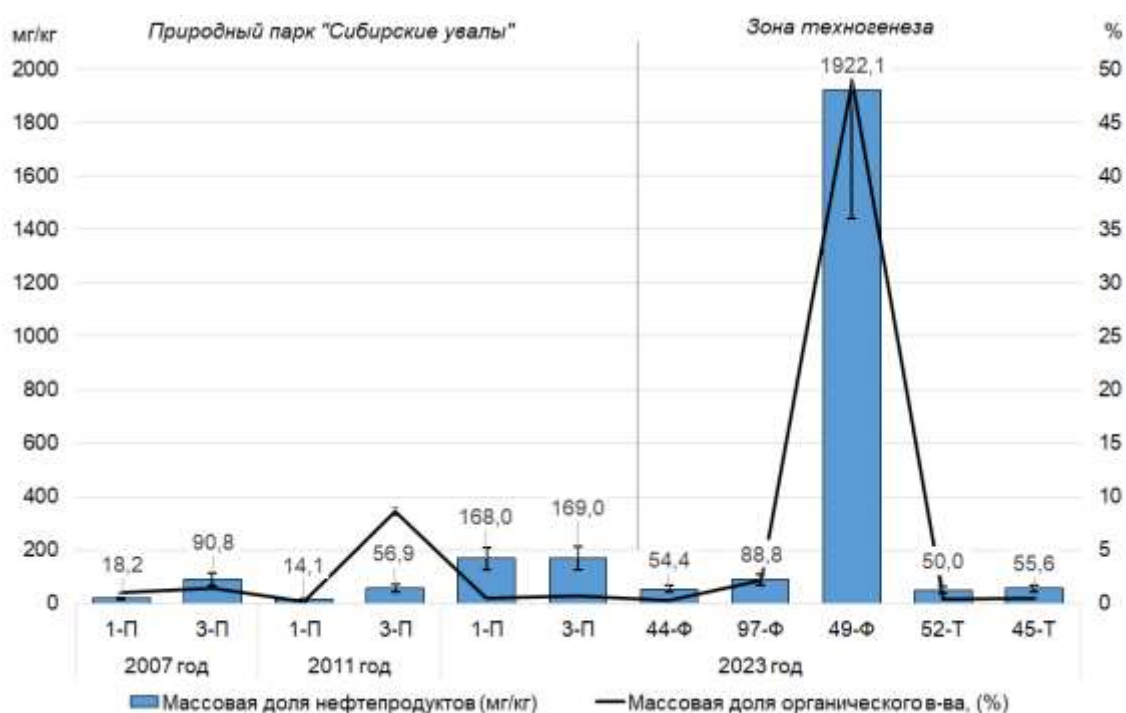


Рис. 4. Содержание органического вещества и нефтепродуктов в пробах подзолов, аллювиальных почв ПП «Сибирские увалы» и техногенных поверхностных образований месторождений нефти и газа

Нефтепродукты являются основным загрязнителем в зоне техногенеза северотаёжной зоны. Попутными загрязнителями, нарушающими биологические процессы в почве, являются сульфаты, хлориды, которые используются в буровых растворах при добыче нефти и капитальном ремонте скважин, а также могут содержаться в минерализованных подземных водах, используемых для поддержания пластового давления в скважинах. В результате проведения рекультивационных работ традиционно добавляются калийно-фосфорно-азотные удобрения. Таким образом, при сочетании техногенных и естественных процессов в почвах изменяется баланс таких элементов и их соединений как калий, азот, фосфор, хлор, сера и пр. Знать фоновую концентрацию этих элементов важно для понимания вклада техногенных процессов. Результаты определения хлоридов и сульфатов в водной вытяжке фоновых почв и ТПО нефтяных месторождений показаны на рисунке 5.

Региональный аспект для территории возвышенности Сибирские увалы – присутствие ионов хлоридов и сульфатов в поверхностных горизонтах почв и ТПО. В почвах с промывным водным режимом легкорастворимые соли, в частности хлориды и сульфаты натрия, калия и магния, выносятся за пределы профиля с током почвенной влаги. В большинстве проб почв с фоновых территорий ПП «Сибирские увалы» отмечено крайне незначительное содержание хлоридов и сульфатов в водной вытяжке. Исключение отмечено в поверхностном торфяном горизонте олиготрофной торфяной почвы разреза 5-П (рис. 5) – суммарное содержание ионов хлоридов и сульфатов в пробе составило более 400 мг/кг, что сравнимо с аналогичными показателями некоторых проб ТПО из зоны техногенеза.

Поскольку на территории ПП «Сибирские увалы» лишь в одной почве, из всех исследованных обнаружено заметное повышение содержания ионов легкорастворимых солей в водной вытяжке, необходимо провести дополнительные исследования, возможно, данный факт связан с гидрогеологическими и криологическими процессами.

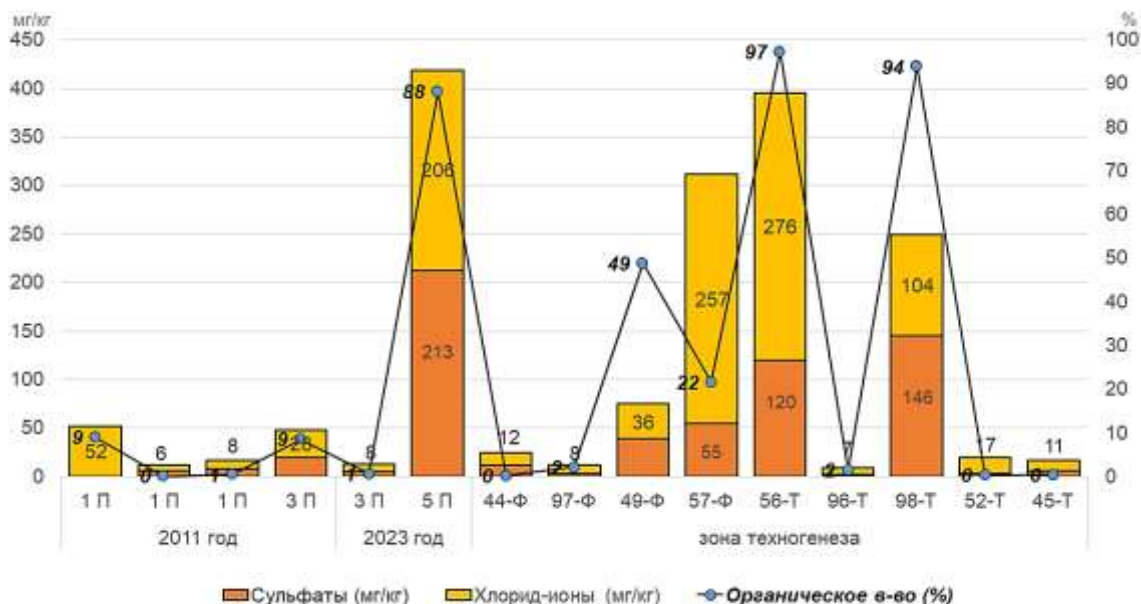


Рис. 5. Содержание ионов сульфатов, хлоридов и органического вещества в пробах почв ПП и техногенной зоны возвышенности Сибирские увалы

Соединения фосфора входят в состав органического вещества почв; часть фосфора в почве входит в кристаллическую решетку минералов (вивианит, апатит) и находится в почве в обменном состоянии. Фосфор органических соединений переходит в доступную форму после минерализации их микрофлорой. В минеральных почвах, в подзолах, его содержание низкое, составляет в среднем 20 мг/кг, в органических горизонтах аллювиальных почв – в среднем 50 мг/кг, в торфяных почвах – 70 мг/кг. Содержание подвижных форм фосфора остается низким для питания растений и показывает низкое плодородие, особенно для подзолов иллювиально-железистых. Отмечается наиболее высокое содержание определяемых элементов в почвах с высоким содержанием органического вещества в почве.

Постоянный контроль над фоновым состоянием естественных почв является важным звеном в общей оценке геохимического фона природной среды. Результаты определения содержания подвижных форм тяжёлых металлов в почвах фоновых территорий и в пробах техногенных поверхностных образований резко отличаются (табл.).

Таблица

Содержание подвижных форм свинца, цинка, никеля, хрома и меди в пробах почв и техногенных поверхностных образований территории «Сибирские увалы»

Наименование показателей	Мониторинговые точки природного парка «Сибирские увалы» по годам									Зона техногенеза точки располагаются на возвышенности Сибирские увалы								
	2007	2007	2011*	2011*	2011*	2023	2023	2023										
	1 П	3 П	1 П	3 П	5 П	1 П	3 П	5 П	44-Ф	97-Ф	49-Ф	57-Ф	56-Т	96-Т	98-Т	52-Т	45-Т	
Свинец, мг/кг	4,6	3,9	0,3±0,1	0,8±0,3	1,5±0,5	<2	<2	3,2±1,2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	13,8±4,1	18,0	1,0	
Цинк, мг/кг	0,5	5,1	7,4±3,3	9,7±4,4	48,3±22	<1	<1	13±6	1,0	1,0	1,8±0,5	11,3±3,4	34,7±10,4	1,0	15,5±4,6	1,0	1,0	
Марганец, мг/кг	21,1	399,7	6,5±1,6	5,7±1,4	6,5±1,6	<2	6,6±2	92±28	1,0	1,0	1,5±0,4	33,2±10	121,1±36,3	1,0	22,4±6,7	18,0±5,4	12,7±3,8	
Никель, мг/кг	2,0	5,3	4,8±1,1	3,0±0,7	1,9±0,5	<2	<2	<2	1,0	1,0	1,3±0,4	5,8±1,8	5,9±1,8	1,1	1,0	1,3±0,4	1,0	
Хром, мг/кг	4,7	17,0	1,5±0,4	3,1±0,7	2,0±0,5	<2	<2	<2	1,0	1,0	1,0	1,0	5,9	1,0	1,0	1,0	1,0	
Медь, мг/кг	-	-	1,5±0,7	2,3±1,0	3,6±1,6	<2	<2	<2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,2±0,4	1,0	1,0	1,0	1,0	

Примечание: *Валовое содержание показателей в пробах почв и ТПО.

В зоне техногенеза фиксируется высокое содержание свинца, но не выходящее за пределы ПДК. Для рекультивированного участка 98-Т – 13,8 мг/кг, для отсыпной площадки под инженерные конструкции 52-Т – 18,0 мг/кг. Незначительное содержание меди – от 1,5 до 3,6 мг/кг фиксируется в естественных фоновых почвах, в зоне техногенеза ниже 1,2 мг/кг. Содержание никеля превышает нормы ОДК для почвы на верховом болоте, где торфяная почва подверглась загрязнению нефтью. Среднее валовое содержание цинка в почвах природного парка, зафиксированное в ходе мониторинга в 2011 г. (табл.), составляет 48,3 мг/кг для торфяных почв верховых болот Сибирских увалов, в минеральных почвах его содержание значительно меньше 0,5–9,7 мг/кг. Отмеченная закономерность сохраняется и

для подвижных форм цинка: в торфяной олиготрофной почве его содержание намного выше, чем в минеральных и почвах и составляет в среднем 13 мг/кг (табл.). В зоне техногенеза низкие значения содержания цинка – не более 1,0 мг/кг – имеют отсыпанные инженерные конструкции. Техногенные поверхностные образования с торфом показывают повышенное содержание цинка, практически в два раза.

Региональными особенностями геохимического фона в почвах является высокое содержание железа и марганца [29]. Для подзолов содержание подвижного железа 356,7 мг/кг, для торфяных олиготрофных почв – 11390 мг/кг. В техногенных поверхностных образованиях содержание подвижного железа низкое – 50 мг/кг, в нефтезагрязненном подзоле фиксируется 84 мг/кг. Содержание подвижных форм марганца для подзолов от 1,1 до 5,67 мг/кг, для аллювиальных дерновых почв – 399,7 мг/кг, для торфяных олиготрофных почв 5,49–6,46 мг/кг, повышенное содержание марганца фиксируется для нефтезагрязненных торфяных грунтов 33,1–34,7 мг/кг.

Обсуждение результатов исследования

Почвенные комбинации возвышенности Сибирские увалы зависят от орографических особенностей и подчиняются гидротермическим режимам [28]. Здесь сформированы на флювиогляциальных песчаных отложениях подзолы языковатые криометаморфические. В междуречьях, где изменяется водно-миграционное направление и происходит интенсивное торфообразование, формируются торфяные олиготрофные почвы. В интразональных ландшафтах подчиненных пойм рек формируются аллювиальные дерновые почвы; в зависимости от пойменного режима и других факторов аллювиальные почвы могут быть с более оторфованными органогенными горизонтами и с более оглееными минеральными горизонтами. Данные факторы необходимо понимать в ходе отбора почвенных проб для целей экологического мониторинга. Геохимический фон зональных почв будет отличаться для разных ландшафтных провинций в зависимости от состава и генезиса.

Углеводороды – основной компонент нефти и нефтепродуктов, но необходимо учитывать, что они входят в состав веществ, содержащиеся в почвенном гумусе и растительных остатках [25; 37]. Результаты исследований показали, что на фоновой территории ПП нефтепродукты определяются в почвах с высоким содержанием органического вещества (торфяные олиготрофные почвы), поэтому региональным аспектом являются определяемые нефтепродукты в почвах, незатронутых техногенным воздействием и нефтяным хозяйством. В ХМАО-Югре действует Постановление Правительства округа №446-П от 10 декабря 2004 г, которым установлен региональный норматив «Допустимое остаточное содержание нефти и нефтепродуктов в почвах после проведения рекультивационных и иных восстановительных работ». Для верхних торфяных горизонтов максимальные значения допускаются до 10000 мг/кг. При мониторинге почвенного покрова в границах ПП определяются нефтепродукты для торфяных олиготрофных почв в количестве от 1224,7 до 3790,0 мг/кг, что не выходит за допустимые пределы регионального норматива. Также, высокие концентрации нефтепродуктов на территории округа

отмечаются исследователями в торфяных олиготрофных почвах Сургутского Полесья – от 1540 до 12882 мг/кг [27]. Градиент величин органического вещества в торфяных олиготрофных почвах и его влияние на содержание нефтепродуктов еще предстоит определить в дальнейших детальном исследованиях. К сожалению, до сих пор не определены особенности торфообразования и элементный состав торфа. На сегодняшний день методики по определению нефтепродуктов показывают их наличие в торфяных почвах, не затронутых техногенным воздействием [12], также это просматривается на графике (рис. 3). Очевидно существует необходимость корректных оценок и сбора достоверной региональной информации для определения содержания нефтепродуктов в органогенных пробах [22].

В отличие от органогенных проб, в пробах песчаного состава низкое содержание органического вещества (от 0 до 2%) и содержание нефтепродуктов сравнительно невысоко (от 50 до 56 мг/кг). Техногенное загрязнение определяется для нефтезагрязненного подзола (96-Т) – 3069 мг/кг и рекультивированного участка (98-Т) – 7424 мг/кг.

Исследователи показывают, что загрязнение нефтепродуктами почв и ТПО приводит к увеличению содержания тяжёлых металлов [2; 3; 13; 16; 18; 32]. Для торфяных почв Архангельской области наблюдается снижение концентрации для элементов Mn, Tl, Co, Ni, Pb после глубины в 5 см и выравнивание содержания в последующих слоях. На фоне всех элементов сильно выделяется Cd: его концентрация стабильна первые четыре слоя торфа, а затем убывает. Остальные металлы распределены в слоях торфа неравномерно и не имеют выраженной зависимости [32].

Результаты нашего исследования не позволяют сделать однозначных выводов о распределении элементов по почвенному профилю. Геохимический анализ поверхностных горизонтов восточной части Сибирских увалов показывает региональные особенности почвенного покрова. Нормативное содержание подвижных форм никеля, цинка, марганца и железа может меняться в зависимости от минералогического состава почвы, pH и климатических особенностей периода отбора проб. Так, содержание подвижных форм никеля во всех трех типах почв за период наблюдений уменьшалось, а в 2023 году вообще не зафиксировано, что требует проведения более глубокого анализа причин. В зоне техногенеза содержание никеля напротив относительно высоко, в особенности для нефтезагрязненных участков.

Цинк является одним из восьми микроэлементов, необходимых для нормального здорового роста и размножения растений. Основным источником цинка в почве являются материнские породы, включающие в свой минералогический состав акцессорные минералы – ильменит, магнетит (особо характерен для поймы р. Глубокий Сабун. Наиболее активным накоплением большинства элементов отличается *Betula nana* L., в которой отмечено максимальное содержание Ca, K, P, Mg, Zn, Ni. Интенсивное накопление элементов кустарниками (карликовой берёзкой и ивой) было ранее отмечено для тундр Ямала [19; 20]. Сфагновые мхи отличаются слабым накоплением катионогенных щелочных и

щелочноземельных элементов, мигрирующих в основном в виде простых катионов (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}). Кроме того, отмечено биогенное накопление микроэлементов (в т.ч. цинка) растениями болот. Цинк является важнейшим элементом, участвующим в активации ферментов фотосинтеза и регуляции транспирации у растений.

Высокое содержание подвижных форм цинка показывают пробы ключевой точки 3-П (поймы р. Глубокий Сабун). В процессе выветривания магнетитов в кислых окислительных средах при растворении минералов образуется подвижный ион Zn^{2+} . В осадочных отложениях Сибирских увалов изученные элементы закреплены в разных формах химических соединений (оксиды, гидроксиды, и др.). В форме оксидов и гидроксидов в породах присутствует Fe (гематит, гетит, магнетит) [33].

Также нами выявлено присутствие хлорида-иона и нитрат-ионов ионов Cl^- и NO_3^- в количестве 28 мг/кг и 118 мг/кг соответственно в поверхностном органогенном горизонте аллювиальной дерновой почве р. Глубокий Сабун и соответственно высокие уровни удельной электропроводности почвенного раствора в изучаемом разрезе. Содержание нитратов в таких количествах может быть связано с процессами преобразования органического вещества в органогенных горизонтах аллювиальных почв. Присутствие хлорид-ионов в поверхностных горизонтах почв в целом не характерно для почв таежной зоны с промывным водным режимом.

В особенности выделяются по наличию хлорид-иона и сульфат-иона фоновые торфяные олиготрофные почвы на территории ПП и в зоне техногенеза возвышенности Сибирские увалы. Как известно, нефтяное хозяйство сопровождается применением легкорастворимых солей в качестве компонентов буровых растворов [12]. Однако, природный парк «Сибирские увалы» является уникальным местом для сохранения эталонных геохимических свойств природных объектов. Миграция хлоридов и сульфатов в торфяные олиготрофные почвы маловозможна. Солевое загрязнение в ХМАО-Югре в чистом виде встречается в среднем в 7–10 раз реже по сравнению с нефтесолевым и нефтяным [5]. Общая минерализация подтоварных вод в среднем составляет от 9 до 15 г/л, основные агенты – хлориды натрия и калия, значительно меньше доля кальция и магния, отмечаются весьма малое содержание карбонатов и полное отсутствие сульфатов. Для таких вод характерна высокая жесткость, обусловленная содержанием ионов кальция и магния, превышающим 8 ммоль/л [34]. Поэтому, здесь необходимо рассматривать наличие солей в естественном геохимическом фоне осадочных пород. Одновременное наличие сульфат-иона и хлорид-иона являются индикаторами участия морской воды в формировании осадочных пород четвертичного периода [35]. Ранее, в наших исследованиях для территории Сибирских увалов описывались торфяные палеопочвы, в составе которых определялось большое количество органического вещества, с преобладанием гуминовых кислот, а также гипс, образованный в анаэробных условиях и сульфиды [1]. Так как территория Сибирских увалов относится к зоне перелетков и участков с распространением многолетнемерзлых пород, с участием бугров пучения, особенно в торфяных олиготрофных болотных системах

(рис. 1), необходимо понимать, что на формирование химизма почв могут оказывать влияние мерзлотные процессы и выдавливание растворов мерзлотой, а также стягивание сезонной мерзлоты и многолетнемерзлых пород в зимний период. Дальнейший мониторинг на территории позволит проверить данную гипотезу.

Повышенные концентрации цинка, сульфат-ионов и хлорид-ионов можно объяснить еще одной гипотезой, связанной с поступлением этих элементов на территорию Сибирских увалов с севера. На это указывают результаты изучения химического состава аэрозолей на севере Западно-Сибирской равнины. Выявлено увеличение содержания цинка в атмосферных аэрозолях от северной тайги к Пурской низменности. Повышенное содержание исследуемых элементов может быть следствием поступления их в атмосферу с морских и континентальных поверхностей. Д.В. Московченко установил, что почвы тундры на полуострове Ямал, формирующиеся на морских отложениях, богаты многими химическими элементами, в том числе такими как бор, фосфор, цинк и даже легкорастворимыми солями [20]. Таким образом, возможен аэральный перенос некоторых веществ на территории наших исследований. Возможно, северо-западные ветры, преобладающие на севере Западной Сибири в теплое время года, переносят морские соли и экзогенные почвенные частицы и соли на юг, обогащая почвы Сибирских увалов макро- и микроэлементами. Результаты исследования позволяют сделать вывод о необходимости изучения данного вопроса, для доказательства гипотезы.

Лидером по содержанию органического вещества является торфяная олиготрофная почва, по наличию гумуса – аллювиальная дерновая почва. Содержание аммонийного азота в почвах ПП «Сибирские увалы» колеблется от 114,1 мг/кг в торфяной олиготрофной почве до 412,3 мг/кг в подзоле; в пробах ТПО из зоны техногенеза оно составляет от 5 до 88 мг/кг. Содержание нитратов варьирует от 2,4 мг/кг в аллювиальных почвах до 5,3 мг/кг в подзоле мг/кг в почвах ПП и от 1 до 146 мг/кг в ТПО соответственно. Естественные фоновые почвы с мощными органомными горизонтами на территории ПП имеют очень высокую степень обеспеченности минеральным азотом.

Марганец связан с избирательным поглощением древесными растениями и концентрацией в органическом веществе. Проведенные на территории ХМАО-Югры исследования показали, что в хвое ели и сосны среднее содержание марганца составляет 244 мг/кг [10]. Высокое содержание кислоторастворимого марганца также в подзолах иллювиально-железистых диагностирует окислительно-восстановительные условия, где в условиях кислой реакции среды ионная форма марганца переходит в оксид MnO_2 . В нефтезагрязнённых техногенных грунтах содержание марганца может быть высоко и может доходить до естественных пределов 1200 мг/кг, поэтому при мониторинге почвенного покрова необходимо четкое понимание типовой принадлежности к почвам, их фоновому содержанию марганца и возможному техногенному загрязнению [30]. Марганец связан с избирательным поглощением древесными растениями и концентрацией в органическом веществе.

Заключение

Естественный геохимический фон почв особо охраняемых природных территорий является эталоном при изучении почвенного покрова, подвергающегося разного рода техногенным воздействиям, в том числе возникшим вследствие ведения нефтяного хозяйства. Изучение фоновых почв лежит в основе экологического нормирования и позволяет объяснить некоторые региональные особенности превышения допустимых концентраций и веществ в почвах и техногенных поверхностных образованиях месторождений добычи нефти и газа.

До сих пор сложными при мониторинге почв и геохимическом анализе, в методическом плане, остаются торфяные почвы, содержащие значительные количества органического вещества в органогенных горизонтах. Биогеохимические процессы, протекающие в болотных системах, постоянное накопление органического вещества и слабая гумификация и др. процессы являются основанием для накопления биофильных элементов – марганца, фосфора, цинка, хрома. В почвах северотаёжной зоны прослеживается связь высокого содержания органического вещества в торфяных почвах и повышенного содержания биофильных элементов. Содержание P, Zn, Cr в подзолах значительно меньше, чем в других типах исследуемых почв.

Повышенное содержание хлоридов и сульфатов в торфяных почвах на территории возвышенности Сибирские увалы могут быть связаны с особенностью формирования осадочных пород в эпоху плейстоцена и мерзлотными процессами, а также влиянием аэрации и переносом морских солей на юг с севера.

Подзолы обладают слабой гумусированностью и высокой ненасыщенностью основаниями. Относительно высокое содержание обменного аммония и нитратов в органогенных горизонтах олиготрофных торфяных почв, может быть связано с высоким содержанием органического вещества. Региональной особенностью фоновых почв является присутствие нефтепродуктов в поверхностных горизонтах с высоким содержанием органического вещества, определяемое аналитически. Необходимо усовершенствование методик пробоотбора для торфяных почв и органогенных горизонтов и определения Сорг и нефтепродуктов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках проекта № 22-17-20011 «Оценка трансформации ландшафтов в условиях изменения климата на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры».

Литературы

1. Sheinkman V., Sedov S., Shumilovskikh L, Korkina E, Korkin S, Zinovyev E., Golyeva A. First results from the Late Pleistocene paleosols in northern Western Siberia: Implications for pedogenesis and landscape evolution at the end of MIS3 // Quaternary International. 2016. Vol. 418. P. 132-146.

2. Бурнашова Е.Н., Харанжевская Ю.А. Эколого-геохимические исследования заболоченной территории Западной Сибири // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15, № 3-3. С. 900-905.
3. Водяницкий Ю.Н., Ладонин Д.В., Савичев А.Т. Загрязнение почв тяжёлыми металлами. – М., 2012.
4. Геннадиев А.Н., Пиковский Ю.И., Цибарт А.С., Смирнова М.А. Углеводороды в почвах: происхождение, состав, поведение (обзор) // Почвоведение. 2015. № 10. С. 1195–1209.
5. Гертер О.В., Соромотин А.В. Каркас экологической устойчивости территорий нефтегазовых месторождений таежной зоны Западной Сибири как основа системы экологического мониторинга (на примере Еты-Пуровского месторождения) // Проблемы региональной экологии. 2010. № 1. С. 201-207.
6. Гусейнов А.Н., Слащёва А.В. Почвенно-геохимические условия миграции и накопления нефтепродуктов и тяжёлых металлов на нефтяных месторождениях Среднего Приобья // Инженерные изыскания. 2011. №6. С. 31-38.
7. Дитц Л.Ю., Смоленцев Б.А. Аллювиальное почвообразование таежных экосистем южного мезосклона Сибирских увалов // Экологические исследования восточной части Сибирских увалов: Сборник научных трудов ЗПП «Сибирские увалы» /Отв. ред. Е.Л. Шор. Нижневартовск: Изд-во «Приобье», Вып. 2. 2003. 144 с.
8. Журавлева А.С., Лабутова Н.М., Андронов Е.Е. Влияние нефтезагрязнения на микробиоценоз почв, прилегающих к нефтехранилищу // Экологическая генетика. 2017. Т. 15. № 4. С. 60-68.
9. Зятева И.Г., Кузьмина Т.А. Результаты количественного химического анализа и биотестирования проб почвогрунтов на территории ЗПП «Сибирские увалы» / Отчет по результатам химических анализов проб воды, почвы, донных отложений на территории Заповедно-природного парка «Сибирские увалы» // Фонды БУ ХМАО – Югры «Природный парк «Сибирские увалы». Нижневартовск, 2001. 76 с.
10. Иванова Н.А., Юмагулова Э.Р. Эколого-физиологические механизмы адаптации и типы стратегии сосудистых растений верховых болот: монография. Ханты-Мансийск: Печатное дело, 2010. 165 с.
11. Изерская Л.А., Воробьева Т.Е. Формы соединений тяжёлых металлов в аллювиальных почвах Средней Оби Почвоведение, 2000, № 1. С. 56-62.
12. Ковалева Е.И., Яковлев А.С., Розанова М.С., Яковлев С.А. Экологические аспекты антропогенного воздействия на земли водного фонда в районе нефтедобычи // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. №3-3. С. 981-984.
13. Коркин С.Е., Коркина Е.А., Сторчак Т.В., Ходжаева Г.К. Геоэкологический мониторинг на территории природного парка «Сибирские увалы»: Коллективная монография. Нижневартовск: Изд-во Нижневарт. гос. ун-та, 2014. 175 с. (Региональная география. Серия научных трудов и монографий. Вып. 6).
14. Косых Н.П., Миронычева-Токарева Н.П. Среднемасштабное ландшафтное картографирование территории природного парка «Сибирские увалы» // Гео-Сибирь. 2008. Т. 3, № 2. С. 50-54.

15. Кукуричкин Г.М. Ландшафтно-геоботаническая характеристика поймы реки Сабун: специальность 03.02.01 «Ботаника»: диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук. Сургут, 2004. 231 с.
16. Куршева А.В., Моргунова И.П., Петрова В.И., Литвиненко И.В. Углеводороды в литоральных осадках и маршевых почвах юго-западного побережья Баренцева моря // Геохимия. 2023. Т. 68, № 9. С. 964-981.
17. Лапшина Е.Д., Коротких Н.Н., Беспалова Т.Л. Редкие виды мхов природного парка «Кондинские озера» им. Л.Ф. Сташкевича // Вестник Нижневартковского государственного университета. 2020. №1. С. 74-80.
18. Московченко Д.В. Экогеохимия нефтегазодобывающих районов Западной Сибири. Рос.акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т проблем освоения Севера. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2013. 259 с.
19. Московченко Д.В., Бабушкин А.Г. Фоновое содержание подвижных форм металлов в почвах Севера Западной Сибири // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование. 2015. Т. 1, № 3. С. 163-174.
20. Московченко Д.В., Романенко Е.А. Биогеохимические особенности ландшафтов Надымского района ЯНАО // Вестник Нижневартковского государственного университета. 2022. № 4(60). С. 122-136.
21. Овечкин Ф.Ю. Проект комплексного экологического мониторинга в границах ПП «Сибирские увалы». Нижневартовск: ООО «СибНИПИРП» // Фонды БУ ХМАО-Югры «Природный парк «Сибирские увалы». Нижневартовск, 2007. 128 с.
22. Околелова А.А. Принципы нормирования нефтепродуктов в почве // Естественно-гуманитарные исследования. 2017. 3 (17). С. 6-16.
23. Пиковский Ю. И. Природные и техногенные потоки углеводородов в окружающей среде. Москва: Изд-во МГУ, 1993. 206 с.
24. Пиковский Ю.И., Геннадиев А.Н., Краснопеева А.А., Пузанова Т.А. Углеводородные геохимические поля в почвах района нефтяного промысла // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2009. №5. С. 28-34.
25. Попов А.И., Цивка К.И., Сазанова Е.В. Холостов Г.Д., Жилкибаев О.Т., Шалунова Е.П., Леонтьев А.А., Борисова В.П., Симонова Ю.В., Романов О.В., Ошмарина А.К., Кызин А.А. К вопросу о качественном составе органического вещества природных объектов // Грунтоведение. 2023. № 2(21). С. 44-51.
26. Сизов О.С. Дистанционное картографирование ледниковых и водно-ледниковых форм рельефа бассейна реки Надым (север Западной Сибири) // Географический вестник. 2020. № 2 (53). С. 6-23.
27. Слащева А.В. Эколого-геохимическая оценка территории Сургутской низменности // Проблемы региональной экологии. 2011. № 3. С. 35-44.
28. Смоленцев Б.А. Структура почвенного покрова Сибирских увалов (северотаёжная подзона Западной Сибири). Новосибирск: Издательство Сибирского отделения РАН, 2002. 118 с.
29. Смоленцев Б.А., Сысо А.И., Шор Е.Л. Территория ПП «Сибирские увалы» как фоновая при мониторинге природных ресурсов в регионе интенсивной нефтедобычи // Экологические

исследования восточной части Сибирских увалов. Нижневартовск: Изд-во «Приобье», 2004. Вып. 3. С. 69–97.

30. Солдатова А.В., Коркина Е.А. Сравнительная характеристика марганца в лесных и нарушенных почвах таёжной зоны Западно-Сибирской равнины // Информационные технологии в экологии. 2018. С. 67-70.

31. Солнцева Н.П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. М.: Изд-во МГУ, 1998. 376 с.

32. Сыпалов С.А., Кожевников А.Ю., Иванченко Н.Л., Попова Ю.А. Соболев Н.А. Оценка загрязнения торфа некоторыми тяжёлыми металлами в зависимости от глубины залегания // Химия твердого топлива, 2020. № 1. С. 38-42.

33. Сысо А.И. Закономерности распределения химических элементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. 274 с.

34. Терехова В.А., Шоба С.А. Функционирование почв в меняющихся условиях окружающей среды. ГЕОС М., 2015. 164 с.

35. Тимофеев П.Л., Боголюбова Л.И., Кизильтейн Л.Я. Сульфидообразование в области современного торфонакопления Рионского межгорного прогиба // Литология и полезные ископаемые. 1994. Вып.2. С. 3-16.

36. Трофимов С.Я., Ковалева Е.И., Аветов Н.А., Толпешта И.И. Исследования нефтезагрязненных почв и перспективные подходы к их ремедиации // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2023. № 4. С. 83-93.

37. Хитров Н.Б., Никитин Д.А., Иванова Е.А., Семенов М.В. Пространственно-временная изменчивость содержания и запасов органического вещества почвы: аналитический обзор // Почвоведение. 2023. №12. С. 1493-1521.

References

1. Sheinkman, V., Sedov, S., Shumilovskikh, L, Korkina, E, Korkin, S, Zinovyev, E., & Golyeva, A. (2016). First results from the Late Pleistocene paleosols in northern Western Siberia: Implications for pedogenesis and landscape evolution at the end of MIS3. *Quaternary International*, (418), 132-146.

2. Burnashova, E.N., & Harangevskaya, Yu.A. (2013). Ecological and geochemical studies of the wetland area of Western Siberia. *Izvestia Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 900-905. (in Russ.).

3. Vodyanitsky, Y.N., Ladonin, D.V., & Savichev, A.T. (2012). Soil pollution by heavy metals. (in Russ.).

4. Gennadiev, A.N., Pikovsky, Yu.I., Tsibart, A.S., & Smirnova, M.A. (2015). Hydrocarbons in soils: origin, composition, behavior (review). *Soil Science*, 1195-1209. (in Russ.).

5. Herter, O.V., & Soromotin, A.V. (2010). Environmental sustainability framework of the territories of oil and gas fields in the taiga zone of Western Siberia as the basis of the environmental monitoring system (by the example of the Ety-Purovskoye field). *Problems of regional ecology*, 201-207. (in Russ.).

6. Guseinov, A.N., & Slascheva, A.V. (2011). Soil-geochemical conditions of migration and accumulation of oil products and heavy metals at oil fields of Middle Priobie. *Engineering surveys*, 31-38. (in Russ.).

7. Dietz, L.Yu., & Smolentsev, B.A. (2003). Alluvial soil formation of taiga ecosystems of the southern mesoslope of the Siberian Uvals. *Ecological studies of the eastern part of the Siberian Uvals*. Collection of scientific papers of the ZPP "Siberian Uvals". Nizhnevartovsk. Priobie, (2), 144. (in Russ.).
8. Zhuravleva, A.S., Labutova, N.M., & Andronov, E.E. (2017). Influence of oil pollution on the microbiocenosis of soils adjacent to oil storage. *Ecological Genetics*, 15(4), 60-68. (in Russ.).
9. Zyateva, I.G., & Kuzmina, T.A. (2001). Results of quantitative chemical analysis and biotesting of soil samples on the territory of the ZPP "Siberian Uvals". Report on the results of chemical analyses of water, soil, bottom sediments samples on the territory of the Nature Reserve Park "Siberian Uvals". *Fonds of BU Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra "Nature Park 'Siberian Uvals'". Nizhnevartovsk*, 76. (in Russ.).
10. Ivanova, N.A., & Yumagulova, E.R. (2010). Ecological and physiological mechanisms of adaptation and types of strategy of vascular plants of upland bogs: monograph. Khanty-Mansiysk. Pechatnoe Delo. 65. (in Russ.).
11. Izerskaya, L.A., & Vorobyeva, T.E. (2000). Forms of heavy metal compounds in alluvial soils of the Middle Ob Soil Science, (1), 56-62. (in Russ.).
12. Kovaleva, E.I., Yakovlev, A.S., Rozanova, M.S., & Yakovlev, S.A. (2013). Ecological aspects of anthropogenic impact on the water fund lands in the area of oil production. *Izvestia Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 3(3), 981-984. (in Russ.).
13. Korkin, S.E., Korkina, E.A., Storchak, T.V., & Hodjaeva, G.K. (2014). Geocological monitoring on the territory of the natural park "Siberian Uvaly". Collective monograph. Nizhnevartovsk. Izd-vo Nizhnevart, 175. (in Russ.).
14. Kosykh, N.P., & Mironicheva-Tokareva, N.P. (2008). Medium-scale landscape mapping of the territory of the natural park "Siberian Uvals". *Geo-Sibir*. (2), 50-54. (in Russian)
15. Kukurichkin, G.M. (2005). Landscape-geobotanical characteristics of the Sabun River floodplain: specialty 03.02.01 "Botany". Dissertation for the degree of Candidate of Biological Sciences. Surgut, 231. (in Russ.).
16. Kursheva, A.V., Morgunova, I.P., Petrova, V.I., & Litvinenko, I.V. (2023). Hydrocarbons in littoral sediments and marsh soils of the southwestern coast of the Barents Sea. *Geochemistry*, 68(9), 964-981. (in Russ.).
17. Lapshina, Y.D., Korotkikh, N.N., & Bespalova, T.L. (2020). Rare mosses of the Kondinskies lakes natural park named after L. F. Stashkevich. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, (1), 74-80. (in Russ.).
18. Moskovchenko, D.V. (2013). Ecogeochemistry of oil and gas producing areas of Western Siberia. Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, Institute of Problems of the North Development. Novosibirsk. Academic Publishing House "Geo", 259. (in Russ.).
19. Moskovchenko, D.V., & Babushkin, A.G. (2015). Background content of mobile forms of metals in the soils of the North of Western Siberia. *Bulletin of Tyumen State University. Ecology and Nature Management*, 1(3), 163-174. (in Russ.).
20. Moskovchenko, D.V., & Romanenko, E.A. (2022). Biogeochemical features of landscapes of the Nadym district of YNAO. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 4(60), 122-136. (in Russ.).
21. Ovechkin, F.Yu. (2007). Project of complex ecological monitoring within the boundaries of PP "Sibirskie uvali". Nizhnevartovsk. LLC "SibNIPiRP", 128. (in Russ.).

22. Okolelova, A.A. (2017). Principles of oil products normalization in soil. *Naturally-humanitarian researches*, 3 (17), 6-16. (in Russ.).
23. Pikovsky, Y.I. (1993). Natural and technogenic flows of hydrocarbons in the environment. Moscow. Izd-vo MSU, 206. (in Russ.).
24. Pikovsky, Yu.I., Gennadiev, A.N., Krasnopeeveva, A.A., & Puzanova, T.A. (2009). Hydrocarbon geochemical fields in the soils of the oil field area. *Bulletin of Moscow University. Geography*, (5), 28-34. (in Russ.).
25. Popov, A.I., Tsivka, K.I., Sazanova, E.V. Holostov, G.D., Zhilkibaev, O.T., Shalunova, E.P., Leontiev, A.A., Borisova, V.P., Simonova, Y.V., Romanov, O.V., Oshmarina, A.K., & Kyzin, A.A. (2023). To the question of the qualitative composition of organic matter of natural objects. *Soil Science*, 2(21), 44-51. (in Russ.).
26. Sizov, O.S. (2020). Remote mapping of glacial and water-glacial landforms in the Nadym River basin (north of Western Siberia). *Geographical Bulletin*, 2 (53), 6-23. (in Russ.).
27. Slascheva, A.V. (2011). Ecological and geochemical assessment of the territory of Surgut lowland. *Problems of regional ecology*, (3), 35-44. (in Russ.).
28. Smolentsev, B.A. (2002). Structure of soil cover of Siberian Uvals (North taiga subzone of Western Siberia). Novosibirsk. Publishing house of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 118. (in Russ.).
29. Smolentsev, B.A., Syso, A.I., & Shor, E.L. (2004). The territory of the PP "Siberian Uvals" as a background for monitoring of natural resources in the region of intensive oil production. *Ecological studies of the eastern part of the Siberian Uvals*. Collection of scientific papers of the PP "Siberian Uvals". Nizhnevartovsk. Priobie Publishing House, (3), 69-97. (in Russ.).
30. Soldatova, A.V., & Korkina, E.A. (2017). Comparative characteristics of manganese in forest and disturbed soils of the taiga zone of the West Siberian Plain. Nizhnevartovsk. *Information Technology in Ecology: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference on the Year of Ecology in Russia*, Nizhnevartovsk State University, 67-70. (in Russ.).
31. Solntseva, N.P. (1998). Oil production and geochemistry of natural landscapes. Moscow. Izd-vo MSU, 376. (in Russ.).
32. Sypalov, S.A., Kozhevnikov, A.Y., Ivanchenko, N.L., Popova, Y.A., & Sobolev, N.A. (2020). Assessment of peat contamination by some heavy metals depending on the depth of occurrence. *Solid Fuel Chemistry*, 38-42. (in Russ.).
33. Syso, A.I. (2007). Regularities of chemical elements distribution in soil-forming rocks and soils of Western Siberia. Novosibirsk. Izd-vo SO RAS, 274. (in Russ.).
34. Terekhova, V.A., Shoba, S.A. (2015). Functioning of soils in changing environmental conditions. *GEOS M.*, 164. (in Russ.).
35. Timofeev, P.L., Bogolyubova, L I., & Kizilyitein, L.Я. (1994). Sulfide formation in the area of modern peat accumulation of the Rion intermountain trough. *Lithology and Mineral Resources*, (2), 3-16. (in Russ.).
36. Trofimov, S.Ya., Kovaleva E.I., Avetov N.A., & Tolpeshta I.I. (2023). Studies of oil-contaminated soils and promising approaches to their remediation. *Bulletin of Moscow University. Soil Science*, 17 (4), 83-93. (in Russ.).

37. Khitrov, N.B., Nikitin, D.A., Ivanova, E.A., & Semenov, M.V. (2023). Spatial and temporal variability of the content and reserves of soil organic matter: an analytical review. *Soil Science*, (12), 1493-1521. (in Russ.).

дата поступления: 21.12.2024

дата принятия: 06.02.2025

© Коркина Е.А., Москвина Н.В., Штогрин А.В., Середовских Б.А. 2025

УДК 635.914

<https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-1/08>

Шевцов Д.А., Иванцова Е.А., Новочадов В.В.

ОЦЕНКА ФИТОТОКСИЧНОСТИ СВЕТЛО-КАШТАНОВОЙ ПОЧВЫ ПРИ ЕЁ ЗАГРЯЗНЕНИИ СЫРОЙ НЕФТЬЮ И ИСПОЛЬЗОВАНИИ БИОПРЕПАРАТОВ-НЕФТЕДЕСТРУКТОРОВ

D.A. Shevtsov, E.A. Ivantsova, V.V. Novochadov

ASSESSMENT OF LIGHT CHESTNUT SOIL PHYTOTOXICITY AFTER CRUDE OIL POLLUTION AND THE USE OF BIOLOGICS-PETRODESTRICTORS

Аннотация. Светло-каштановая почва обладает специфической структурной организацией и химическим составом, позволяющими предполагать особенности её негативного влияния на растения (фитотоксичности) при различных загрязнениях, в частности, сырой нефтью. Рассмотрены и обсуждены результаты модельных экспериментов при искусственном загрязнении образцов светло-каштановой почвы нефтью, а также при использовании для её очистки биопрепаратов на основе ассоциаций углеводородокисляющих бактерий (нефтедеструкторов). Для определения содержания нефти в почве использована инфракрасная спектрометрия, pH почвы – кондуктометрия, для анализа фитотоксичности – тест-система, основанная на проращивании семян *Raphanus sativus* L. Показано, что биопрепараты Multibac Active и DOP-UNI эффективно удаляют из почвы за 15 суток свыше 50% сырой нефти, тем больше, чем выше её исходная концентрация. Этот процесс сопровождается уменьшением pH почвы с 6,12 до 4,55–4,94. Без использования биопрепаратов содержание нефти в почве уменьшается при её высоких концентрациях в почве в среднем 7,5%, при низких – не более чем на 4%. Биопрепараты обладают умеренной, а нефть – значительной фитотоксической активностью. Показано, что при сравнении двух биопрепаратов Multibac Active обладает сравнительно большей фитотоксичностью: он уменьшает лабораторную всхожесть семян на 12%, DOP-UNI – только на 4%. Сырая нефть снижает всхожесть в концентрации 2,0 г/кг на 56%, а в концентрации 4,0 г/кг полностью подавляет прорастание семян *R. sativus*. Использование биопрепаратов с целью очистки почвы от нефти усиливает её фитотоксические свойства. Полученные результаты имеют практическое значение для разработки и оптимизации технологий и стратегий биоремедиации почв, загрязненных нефтью и нефтепродуктами.

Abstract. Light chestnut soil has specific structural organization and chemical composition, suggesting the features of its negative effects on plants (phytotoxicity) in various pollutants, in particular crude oil. The article aimed to consider and discuss results of model experiments with artificial contamination of light chestnut soil with oil and attempts of its purification using modern biological products based on associations of hydrocarbon-oxidizing bacteria (oil degraders). One used infrared spectrometry to determine the content of petroleum products in the soil, and conductometry to measure soil pH. To analyze soil phytotoxicity we used the test system based on germination of *Raphanus sativus* seeds. It has been shown for Multibac Active and DOP-UNI to remove effectively over 50% of crude oil from soil in 15 days, the higher its initial concentration. This process is accompanied by a decrease in the pH of the soil to 4.55–4.94. Spontaneous utilization of oil is 7.5% at high oil concentrations of in the soil, and it is no more than 4% at low concentrations. Biological products have moderate phytotoxicity, and oil has significant one. Comparing two biologics, we show that Multibac Active has a comparatively higher phytotoxicity, it reduces laboratory germination of seeds by 12%, and DOP-UNI reduced laboratory germination by only 4%. Crude oil reduces germination at a concentration of 2.0 g/kg by 56%, and at a concentration of 4.0 g/kg, it completely suppresses germination of *R. sativus* seeds. The use of biological products for the purpose of soil purification from oil pollution enhances its phytotoxic properties. These results and findings are of practical importance for the development and optimization of technologies and strategies for bioremediation of soils

Ключевые слова: почва; фитотоксичность; загрязнение нефтепродуктами; углеводородокисляющие микроорганизмы; биоремедиация; *Raphanus sativus*.

Сведения об авторах: Шевцов Денис Александрович, ФГАОУ ВО «Волгоградский государственный университет», г. Волгоград, Россия, den14is88@mail.ru; Иванцова Елена Анатольевна, ORCID: 0000-0003-4265-9703, д-р. с.-х. наук, ФГАОУ ВО «Волгоградский государственный университет», г. Волгоград, Россия, ivantsova@volsu.ru; Новочадов Валерий Валерьевич, ORCID: 0000-0001-6317-7418, д-р. мед. наук, ФГАОУ ВО «Волгоградский государственный университет», г. Волгоград, Россия, novochadov.valeriy@volsu.ru

contaminated with oil and petroleum products. **Keywords:** soil; phytotoxicity; oil pollution; hydrocarbon-oxidizing microorganisms; bioremediation; *Raphanus sativus*.

About the authors: Denis A. Shevtsov, Volgograd State University (Volgograd, Russian Federation). E-mail: den14is88@mail.ru. Elena A. Ivantsova, ORCID: 0000-0003-4265-9703, Doctor of Agriculture Sciences, Volgograd State University, ivantsova@volsu.ru, Volgograd, Russia; Valery V. Novochadov, ORCID: 0000-0001-6317-7418, Doctor of Medical Sciences, Volgograd State University, Volgograd, Russia, novochadov.valeriy@volsu.ru

Шевцов Д.А., Иванцова Е.А., Новочадов В.В. Оценка фитотоксичности светло-каштановой почвы при её загрязнении сырой нефтью и использовании биопрепаратов-нефтедеструкторов // Вестник Нижневартковского государственного университета. 2025. № 1(69). С. 100-110. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-1/08>

Shevtsov D.A., Ivantsova E.A., & Novochadov V.V. (2025). Assessment of Light Chestnut Soil Phytotoxicity After Crude Oil Pollution and the Use Of Biologics-Petrodestructors. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 1(69), 100-110. (in Russ.). <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-1/08>

Введение

Современный технологический уклад неизбежно приводит к постоянному росту вмешательства человека в природную среду и нарушением экосистем планеты. Закономерным следствием этого является все возрастающая активность в направлении минимизации негативного антропогенного воздействия и восстановления нарушенных структур и связей. В этом формате загрязнения воды и почвы нефтью и нефтепродуктами входят в тройку наиболее актуальных экологических проблем современного мира [3; 17].

Небольшие, но повторяющиеся поступления нефти и нефтепродуктов в почву, связанные с хозяйственной деятельностью человека (промышленные, транспортные, агроиндустриальные), а, тем более, аварийные разливы, крайне негативно влияют на её качество, снижают плодородие, ухудшают состояние растений и биоразнообразие, могут представлять угрозу для здоровья человека. Все эти процессы имеют комплексный характер и требуют, соответственно, разностороннего вмешательства для их устранения [4; 11; 13].

Один из подходов, постепенно занимающий основополагающие позиции при устранении последствий попадания в почву нефти и нефтепродуктов – биоремедиация, которая сочетает в себе методики оптимизации условий для роста и размножения аборигенной микрофлоры и внесения в почву целевых биопрепаратов, содержащих углеводородокисляющие микроорганизмы (УОМ). В настоящее время известны десятки бактерий и грибов с таким эффектом, на их основе созданы сотни коммерческих биопрепаратов [16; 17; 22].

Результатом деятельности УОМ является возвращение углерода и водорода в естественные биогеохимические циклы, восстановление химического состава, микрофлоры почвы и её основополагающих свойств в составе экосистем. Эти способности в значительной степени зависят от исходного состава почвы, а также климатических условий, в которых производится биоремедиация [12, 18].

На практике довольно быстро стало понятно, что монокультура УОМ при поступлении её в почву, по определению, не в состоянии решить комплексную задачу биоремедиации, так что все современные биопрепараты, используемые для этих целей, представляют собой консорциумы нескольких штаммов различных УОМ, каждый из которых выполняет свою задачу по устранению нефтепродуктов из почвы [8, 10].

УОМ в состоянии частично или полностью удалить из почвы все компоненты нефти и нефтепродуктов: легкие алифатические окисляются до углекислого газа и воды, более тяжёлые фракции используются для синтеза собственной биомассы. Лидирующими в составе консорциумов коммерческих биопрепаратов являются бактерии родов *Pseudomonas*, *Acinetobacter* и *Bacillus* [3, 19, 22].

При проведении биоремедиации почвы специалисты отмечают такое явление, как вторичная фитотоксическая активность (ФТА) биопрепаратов. В отношении одно- и двулетних растений последствия их применения могут выявляться на месте произошедшего загрязнения до десяти и более лет, а у древесно-кустарниковых растений она может стать основой для необратимого повреждения, вторичного поражения фитопатогенами и привести к гибели [15]. В то же время, до полной ясности в этом вопросе еще далеко, и требуется детализировать еще многие вопросы ФТА применяемых биопрепаратов в зависимости от их состава, вида и объема нефтяных загрязнений, а также местных почвенных и климатических особенностей. В рамках настоящей работы мы будем понимать под фитотоксичностью свойство почвы в отношении растений, а под ФТА – свойство различных химических веществ влиять на это свойство при поступлении в почву.

Цель исследования – оценить в эксперименте фитотоксический потенциал светло-каштановой почвы при введении различных концентраций сырой нефти и использовании для её удаления двух биопрепаратов, содержащих ассоциации углеводородоксилирующих микроорганизмов.

Материалы и методы

Объектом для моделирования влияния загрязнений на ФТА были выбраны пять случайных образцов светло-каштановой почвы, взятых сотрудниками ФНЦ агроэкологии РАН в июне 2024 года на территории Кировского селекционно-семеноводческого комплекса г. Волгограда (48.617218 N, 44.374706 E). Переданные для работы образцы были получены в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-2017 и ГОСТ 11464–2011 [1, 2] и аннотированы с точки зрения химического состава, определенного в соответствии с нормативными документами, используемыми в лаборатории анализа ФНЦ агроэкологии РАН: $pH_{\text{вод}} 6,80 \pm 0,07$; натрий $13,2 \pm 1,5$ мг/кг; калий $17,4 \pm 2,8$ мг/кг; кальций $114,8 \pm 13,2$ мг/кг; магний

18,5±2,1 мг/кг; хлориды 18,1±2,0 мг/кг; фосфаты менее 3,0 мг/кг; сульфаты 27,1±2,8 мг/кг; карбонаты 0,06±0,03 ммоль/100 г; бикарбонаты 0,41±0,05 ммоль/100 г; органическое вещество 1,14±0,16%; азот общий 0,23±0,05%; нитраты 70,5±7,9 мг/кг. Перед началом образцы объединили, тщательно перемешали и поместили в стеклянные сосуды из расчета 100 г сухой почвы на каждую пробу.

При формировании опытных проб в качестве поллютанта применяли сырую нефть Арчединского месторождения, находящегося в Фроловском районе Волгоградской области, исходной плотности 0,852 г/см³ в виде 3%-ной эмульсии, для очистки – два коммерческих биопрепарата: Multibac Active (Ecological Laboratories Inc., США), содержащий сообщество природных штаммов УОМ преимущественно рода *Acinetobacter* [23], и DOP-UNI (ООО «Лаборатория микробных технологий», Россия), представляющий собой консорциум УОМ родов *Candida*, *Dietzia*, *Rhodococcus*, *Pseudomonas* и *Acinetobacter*. Рабочий раствор этого биопрепарата готовили из расчета 40 мг сухого вещества на 1 мл дистиллированной воды [24].

Чтобы обеспечить разностороннее изучение влияния нефти и УОМ на ФТА было сформировано 12 различных серий, что с учетом шести повторностей в каждой составило в совокупности 72 опытных пробы (табл. 1).

Таблица 1

Моделирование и состав проб в экспериментальных сериях

Серия	Добавление в опытную пробу	
	Нефть	Биопрепарат
Контрольная	–	–
Multibac Active	–	1 мл
DOP-UNI	–	1 мл
Нефть 1	100 мг	–
Нефть 1 + Multibac Active	100 мг	1 мл
Нефть 1 + DOP-UNI	100 мг	1 мл
Нефть 2	200 мг	–
Нефть 2 + Multibac Active	200 мг	1 мл
Нефть 2 + DOP-UNI	200 мг	1 мл
Нефть 4	400 мг	–
Нефть 4 + Multibac Active	400 мг	1 мл
Нефть 4 + DOP-UNI	400 мг	1 мл

Перед началом следующего этапа испытаний все пробы инкубировали в течение 15 суток при температуре 24 °С, увлажняя каждые трое суток из расчета 5 мл дистиллированной воды на 1 сосуд.

Содержание в подготовленных пробах почвы нефти и нефтепродуктов определяли методом инфракрасной Фурье-спектроскопии на аппарате ФСМ-1202 (Инфраспек, Россия) согласно ПНД Ф 16.1:2.2.22-98 [6]. Величины менее 1,5 г/кг соответствовали низкому уровню загрязнения, между 1,5 г/кг и 3,0 г/кг – умеренному, свыше 3,0 г/кг – высокому уровню загрязнения почвы нефтью. Результаты представляли в мг/кг сухой почвы.

Водородный показатель (рН) определяли согласно ГОСТ 26423–85 с использованием рН-метра Hanna HI 2211 (США).

ФТА почвы оценивали с помощью универсальной модельной тест-системы, основанной на анализе всхожести редиса посевного (*Raphanus sativus* L.) [7, 9].

Использовали семена *R. sativus* сорта «Ранний красный», которые помещали по 5 шт. в каждый сосуд с пробой почвы (25 шт. в каждой серии). К нормально проросшим относили семена, развившие здоровый корешок не менее длины семени без признаков инфицирования и гниения. Энергией прорастания считали процент семян, проросших на третьи сутки, лабораторной всхожестью – на 10-е сутки. Исследование завершали на 21-е сутки, оценивали высоту сохранившихся проростков в см.

Для статистической обработки и визуализации результатов использовали программу Statistica 12.0 (StatSoft Inc., США). После исключения нормального характера распределения в выборках по критерию Колмогорова рассчитывали медианы, разброс между первым и третьим квартилем (Me, Q1÷Q3) и показатель статистической значимости различий по критерию Манна-Уитни. Различия признавали статистически значимыми при уровне доверительной вероятности $p < 0,05$.

Результаты и их обсуждение

Перед началом основной части экспериментов содержание нефти в опытных пробах без воздействия биопрепаратов оказалось ниже исходного на 4,0–7,5%, что вполне объяснимо окислением углеводов, происходящим в любой почве. Биопрепарат Multibac Active удалял из почвы от 51,1% до 57,3% сырой нефти, в зависимости от её исходной концентрации, DOP-UNI – от 54,3% до 61,5%. Добавление в почву нефти сопровождалось уменьшением рН, использование биопрепаратов приводило к дополнительному закислению почвы, являющемуся компонентом ФТА и значительно более заметному для Multibac Active (табл. 2).

Таблица 2

Содержание нефтепродуктов и рН почвы в модельных сериях, Me (Q1÷Q3)

Серия	Среднее содержание нефтепродуктов, г/кг	Среднее рН _{вод}
Контрольная	0,08 (0,05÷0,11)	6,12 (5,95÷6,18)
Multibac Active	0,06 (0,04÷0,10)	6,15 (5,98÷6,22)
DOP-UNI	0,06 (0,04÷0,09)	6,21 (6,06÷6,37)
Нефть 1,0 г/кг	0,96 (0,91÷1,00) *	5,80 (5,72÷5,91) *
Нефть 1,0 г/кг + Multibac Active	0,41 (0,37÷0,45) *#	5,17 (5,09÷5,32) *#
Нефть 1,0 г/кг + DOP-UNI	0,37 (0,33÷0,42) *#	5,71 (5,57÷5,90) *
Нефть 2,0 г/кг	1,85 (1,77÷1,97) *	5,72 (5,60÷5,82) *
Нефть 2,0 г/кг + Multibac Active	0,89 (0,78÷0,98) *#	5,04 (4,86÷5,23) *#
Нефть 2,0 г/кг + DOP-UNI	0,80 (0,69÷0,89) *#	5,65 (5,45÷5,74) *
Нефть 4,0 г/кг	3,78 (3,62÷3,91) *	5,11 (4,97÷5,26) *
Нефть 4,0 г/кг + Multibac Active	1,85 (1,66÷2,09) *#	4,55 (4,38÷4,70) *#
Нефть 4,0 г/кг + DOP-UNI	1,73 (1,57÷1,90) *#	4,94 (4,68÷5,13) *

Примечание: здесь и далее знаком * отмечены статистически значимые различия с величинами в контрольной серии, знаком # – различия между сериями без биопрепарата и с использованием биопрепарата.

Тестируемые биопрепараты в умеренной степени снижали энергию прорастания и лабораторную всхожесть семян *R. sativus*. Нефть оказывала более серьезное воздействие на эти процессы: при концентрациях 2,0 г/кг на третьи сутки проросших семян не обнаруживали, а при концентрации 4,0 г/кг семена вообще не прорастали. Внесение биопрепаратов в нефтезагрязненную почву, в большей степени Multibac Active, дополнительно уменьшало энергию роста и лабораторную всхожесть семян, так что максимальное торможение всхожести, как результат суммарной ФТА сырой нефти и биопрепарата, составило для Multibac Active 80%, для DOP-UNI – 72%.

Как биопрепараты, так и, в большей степени, сырая нефть вызывали уменьшение высоты растений на 21-е сутки эксперимента. Уменьшение этой величины от воздействия Multibac Active составило 16,7%, от DOP-UNI – 7,7%. Присутствие нефти в концентрации 1 г/кг приводило к снижению высоты проростков *R. sativus* в 1,43 раза, в концентрации 2 г/кг – в 1,53 раза, при концентрации 4 г/кг проростков получено не было. Использование биопрепаратов для очистки почвы в еще большей степени снижали величину этого показателя (табл. 3).

Проведенные исследования подтвердили эффективность выбранных коммерческих биопрепаратов в отношении очистки почвы от сырой нефти, которая, безусловно является только частью комплекса биоремедиации после произошедшего загрязнения [5, 20].

Тем не менее, была выявлена их собственная ФТА, которая наслаивалась на еще более выраженную ФТА сырой нефти в процессе ее деструкции. При сравнении двух биопрепаратов ФТА DOP-UNI оказывалась явно меньше, чем Multibac Active.

Таблица 3

Всхожесть семян и средняя высота растений в модельных сериях, Ме (Q1 ÷ Q3)

Серия	Средняя энергия роста, %	Средняя лабораторная всхожесть, %	Средняя высота растений, см
Контрольная	44	84	4,68 (4,19÷5,03)
Multibac Active	36	72	3,90 (3,57÷4,15) *
DOP-UNI	40	80	4,32 (4,04÷4,55)
Нефть 1,0 г/кг	24	60	3,28 (3,02÷3,63) *
Нефть 1,0 г/кг + Multibac Active	16	48	2,71 (2,44÷3,10) *
Нефть 1,0 г/кг + DOP-UNI	20	56	3,42 (3,09÷3,98) *
Нефть 2,0 г/кг	0	28	3,05 (2,69÷3,38) *
Нефть 2,0 г/кг + Multibac Active	0	16	2,89 (2,57÷3,08) *
Нефть 2,0 г/кг + DOP-UNI	0	24	3,15 (2,80÷3,42) *
Нефть 4,0 г/кг	0	0	–
Нефть 4,0 г/кг + Multibac Active	0	4	–
Нефть 4,0 г/кг + DOP-UNI	0	12	2,51 (2,30÷2,68) *

Примечание: прочерки в таблице означают отсутствие растений для анализа

Новые подходы в обеспечении полноты биоремедиации почв, в особенности бедных и при массивных загрязнениях, видятся в возвращении к старому правилу: необходимо активировать собственные резервы почвы, вводить в неё не только ассоциации бактерий-

нефтедеструкторов, но и питательную массу для стимуляции аборигенной и адаптации внесённой микрофлоры в составе комплексной почвенной микробиоты [10, 14, 21].

Во всех случаях феномен ФТА почвы и закономерности её динамики под действием биопрепаратов, а также в зависимости от состава почвы и климатических условий необходимо учитывать в процессе планирования комплекса биоремедиации.

Заключение

Биопрепараты Multibac Active и DOP-UNI в модельных экспериментах эффективно удаляют из светло-каштановой почвы за 15 суток свыше 50% сырой нефти, этот процесс сопровождается уменьшением рН среды. Уменьшение содержания нефти в почве в отсутствие применения биопрепаратов составляет не более 7,5%, и тем меньше, чем меньше концентрация нефти в почве. Биопрепараты обладают умеренной, а нефть – значительной ФТА. Multibac Active уменьшает лабораторную всхожесть семян на 12%, DOP-UNI – на 4%, сырая нефть в концентрации 2,0 г/кг – на 56%, а в концентрации 4,0 г/кг – полностью подавляет прорастание семян *Raphanus sativus*. Использование биопрепаратов, уменьшая концентрации нефти в почве, одновременно усиливает её фитотоксические свойства. Полученные результаты имеют практическое значение для разработки и оптимизации технологий и стратегий биоремедиации почв, загрязненных нефтью и нефтепродуктами.

Литература

1. ГОСТ 17.4.4.02-2017. Охрана природы (ССОП). Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. М.: Стандартинформ, 2018. 9 с.
2. ГОСТ Р ИСО 11464–2011. Качество почвы. Предварительная подготовка проб для физико-химического анализа. М.: Стандартинформ, 2012. 11 с.
3. Коршунова Т.Ю., Кузина Е.В., Рафикова Г.Ф., Логинов О.Н. Бактерии рода *Pseudomonas* для очистки окружающей среды от нефтяного загрязнения // Экобиотех. 2020. Т. 3, №1. С. 18–32. <https://doi.org/10.31163/2618-964X-2020-3-1-18-32>
4. Михедова Е.Е., Абашина Т.Н. Применение биопрепаратов в задачах рекультивации нефтезагрязнений почвенного покрова // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2020. №4(295). С. 10–14. [https://doi.org/10.33285/2411-7013-2020-4\(295\)-10-14](https://doi.org/10.33285/2411-7013-2020-4(295)-10-14)
5. Околелова А.А., Капля В.Н., Лапченков А.Г. Оценка содержания нефтепродуктов в почвах // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. 2019. Т. 43, №1. С. 76–86. <https://doi.org/10.18413/2075-4671-2019-43-1-76-86>
6. ПНД Ф 16.1:2.2.22-98. Методика выполнения измерений массовой доли нефтепродуктов в минеральных, органоминеральных, органических почвах и донных отложениях методом ИК-спектроскопии. М.: ФГБУ «ФЦАО», 2005. 21 с.
7. Свистова И.Д. Методические подходы к определению фитотоксической активности почвы и почвенных микроорганизмов // Лесотехнический журнал. 2019. №2(34). С. 40–46. <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.2/5>
8. Созина И.Д., Данилов А.С. Микробиологическая ремедиация нефтезагрязненных почв // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 297–312. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.8>

9. Тишин А.С. Фитотестирование почв, загрязненных нефтепродуктами // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2020. №12–2(102). С. 78–83. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.102.12.048>.
10. Ali N., Khanafer M., Al-Awadhi H. Indigenous oil-degrading bacteria more efficient in soil bioremediation than microbial consortium and active even in super oil-saturated soils // *Front Microbiol*. 2022. Vol. 13. e950051. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.950051>.
11. da Silva Correa H., Blum C.T., Galvão F., Maranhão L.T. Effects of oil contamination on plant growth and development: a review // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2022. Vol. 29, No 29. P. 43501–43515. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19939-9>.
12. Funtikova T.V., Akhmetov L.I., Puntus I.F., Mikhailov P.A., Appazov N.O., Narmanova R.A., Filonov A.E., Solyanikova I.P. Bioremediation of oil-contaminated soil of the Republic of Kazakhstan using a new biopreparation // *Microorganisms*. 2023. Vol. 11, No 2. e522. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11020522>.
13. Hunt L.J., Duca D., Dan T., Knopper L.D. Petroleum hydrocarbon (PHC) uptake in plants: A literature review // *Environ. Pollut.* 2019. Vol. 245. P. 472–484. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.11.012>.
14. Igun O.T., Russell P.M., Davenport J., Werner D. Impacts of activated carbon amendments, added from the start or after five months, on the microbiology and outcomes of crude oil bioremediation in soil // *Int. Biodeter. Biodegr.* 2019. Vol. 142. P. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2019.04.008>.
15. Kulikova P.A., Mazlova E.A., Terekhova V.A., Agadzhanian M.V., Uchanov P.V. Evaluation of the acute and chronic toxicity of reagents for the treatment of oil-contaminated soils and sludge // *Chem. Sustain. Dev.* 2019. Vol. 27. P. 336–342. <https://doi.org/10.15372/CSD2019148>.
16. Kuzina E., Rafikova G., Vysotskaya L., Arkhipova T., Bakaeva M., Chetverikova D., Kudoyarova G., Korshunova T., Chetverikov S. Influence of hydrocarbon-oxidizing bacteria on the growth, biochemical characteristics, and hormonal status of barley plants and the content of petroleum hydrocarbons in the soil // *Plants (Basel)*. 2021. Vol. 10, No 8. e1745. <https://doi.org/10.3390/plants10081745>.
17. Ławniczak Ł., Woźniak-Karczewska M., Loibner A.P., Heipieper H.J., Chrzanowski Ł. Microbial degradation of hydrocarbons-basic principles for bioremediation: a review // *Molecules*. 2020. Vol. 25, No 4. e856. <https://doi.org/10.3390/molecules25040856>.
18. Myazin V.A., Korneykova M.V., Chaporgina A.A., Fokina N.V., Vasilyeva G.K. The effectiveness of biostimulation, bioaugmentation and sorption-biological treatment of soil contaminated with petroleum products in the Russian Subarctic // *Microorganisms*. 2021. Vol. 9, No 8. e1722. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9081722>.
19. Ravi A., Ravuri M., Krishnan R., Narenkumar J., Anu K., Alsalhi M.S., Devanesan S., Kamala-Kannan S., Rajasekar A. Characterization of petroleum degrading bacteria and its optimization conditions on effective utilization of petroleum hydrocarbons // *Microbiol. Res.* 2022. Vol. 265. e127184. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2022.127184>.
20. Sui X., Wang X., Li Y., Ji H. Remediation of petroleum-contaminated soils with microbial and microbial combined methods: Advances, mechanisms, and challenges // *Sustainability*. 2021. Vol. 13, No 16. e9267. <https://doi.org/10.3390/su13169267>.

21. Xia M., Fu D., Chakraborty R., Singh R.P., Terry N. Enhanced crude oil depletion by constructed bacterial consortium comprising bioemulsifier producer and petroleum hydrocarbon degraders // *Bioresour. Technol.* 2019. Vol. 282. P. 456–463. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.01.131>.
22. Xu X., Liu W., Tian S., Wang W., Qi Q., Jiang P., Gao X., Li F., Li H., Yu H. Petroleum hydrocarbon-degrading bacteria for the remediation of oil pollution under aerobic conditions: A perspective analysis // *Front. Microbiol.* 2018. Vol. 9. e2885. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02885>.
23. Универсальный биопрепарат «DOP-UNI» // Лаборатория микробных технологий https://dop-uni.ru/destructor_of_oil_pollution (дата обращения: 15.02.2024).
24. Биопрепарат Multibac Active // Терра Экология. URL: <https://clck.ru/3HPag4> (дата обращения: 15.02.2024).

References

1. GOST 17.4.4.02-2017 (2018). Okhrana prorody (SSOP). Pochvy. Metody otborra i podgotovki prob dlya khimicheskogo, bakteriologicheskogo i gel'mintologicheskogo analiza [Nature protection. Soils. Methods for sampling and preparation of soil for chemical, bacteriological, helminthological analysis]. Moscow: *Standartinform*, 9 p.
2. GOST R ISO 11464–2011 (2012). Kachestvo pochvy. Predvaritel'naya podgotovka prob dlya fiziko-khimicheskogo analiza [Soil quality. Pretreatment of samples for physico-chemical analysis]. Moscow: *Standartinform*, 11 p.
3. Korshunova, T.Yu., Kuzina, E.V., Rafikova, G.F., & Loginov, O.N. (2020). Bakterii roda *Pseudomonas* dlya ochistki okruzhayushej sredy ot neftyanogo zagryazneniya [Bacteria of the genus *Pseudomonas* for environmental purification from oil pollution]. *Ekobiotech*, 3(1), 18–32. <https://doi.org/10.31163/2618-964X-2020-3-1-18-32> (in Russ.).
4. Mikhedova, E.E., & Abashina, T.N. (2020). Primenenie biopreparatov v zadachakh rekul'tivatsii neftezagryaznenij pochvennogo pokrova [Application of biopreparations to solve the problems of oil pollution remediation of soil cover]. *Zaschita okruzhayushej sredy v neftegazovom komplekse*, 4(295), 11–14. [https://doi.org/10.33285/2411-7013-2020-4\(295\)-10-14](https://doi.org/10.33285/2411-7013-2020-4(295)-10-14) (in Russ.).
5. Okolelova, A.A., Kaplya, V.N., & Lapchenkov, A.G. (2019). Otsenka sodержaniya nefteproduktov v pochvakh [Evaluation of oil content in soils]. *Nauchye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki*, 43(1), 76–86. <https://doi.org/10.18413/2075-4671-2019-43-1-76-86> (in Russ.).
6. Metodika vyponeniya izmerenij massovoj doli nefteproduktov v mineral'nykh, organogennykh, organo-mineral'nykh pochvakh i donnykh otlozheniyakh metodom IK-spektrometrii [The method of measuring the mass fraction of petroleum products in mineral, organogenic, organo-mineral soils and bottom sediments by IR spectrometry]. MON F 16.1:2.2.22-98. Moscow, FCAO, 2005. 21 p. (in Russ.).
7. Svistova I.D. (2019). Metodicheskie podkhody k opredeleniyu fitotoksicheskoy aktivnosti pochvy i pochvennykh mikroorganizmov ых микроорганизмов [Methodological approaches to the determination of phytotoxic activity of soil and soil microorganisms]. *Lesotekhnicheskij zhurnal*, 9 (2), 40–46. <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.2/5> (in Russ.).
8. Sozina, I.D., & Danilov, A.S. (2023). Mikrobiologicheskaya remediatsiya neftezagryaznennykh pochv [Microbiological remediation of oil-contaminated soils]. *Zapiski Gornogo instituta*, 260, 297–312. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.8> (in Russ.).

9. Tishin, A.S. (2020). Fitotestirovanie pochv, zagryaznennykh nefteproduktami [Phytotesting of soils contaminated with petroleum products]. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*, (12–2), 78–83. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.102.12.048> (in Russ.).
10. Ali, N., Khanafer, M., & Al-Awadhi, H. (2022). Indigenous oil-degrading bacteria more efficient in soil bioremediation than microbial consortium and active even in super oil-saturated soils. *Frontiers in Microbiology*, 13, 950051. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.950051>.
11. da Silva Correa, H., Blum, C.T., Galvão, F., & Maranhão, L.T. (2022). Effects of oil contamination on plant growth and development: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(29), 43501–43515. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19939-9>.
12. Funtikova, T.V., Akhmetov, L.I., Puntus, I.F., Mikhailov, P.A., Appazov, N.O., Narmanova, R.A., Filonov, A.E., & Solyanikova, I.P. (2023). Bioremediation of oil-contaminated soil of the Republic of Kazakhstan using a new biopreparation. *Microorganisms*, 11(2):522. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11020522>.
13. Hunt, L.J., Duca, D., Dan, T., & Knopper L.D. (2019). Petroleum hydrocarbon (PHC) uptake in plants: A literature review. *Environmental Pollution*, 245, 472–484. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.11.012>.
14. Igun, O.T., Russell, P.M., Davenport, J., & Werner, D. (2019). Impacts of activated carbon amendments, added from the start or after five months, on the microbiology and outcomes of crude oil bioremediation in soil. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 142, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2019.04.008>.
15. Kulikova, P.A., Mazlova, E.A., Terekhova, V.A., Agadzhanian, M.V., & Uchanov, P.V. (2019). Evaluation of the acute and chronic toxicity of reagents for the treatment of oil-contaminated soils and sludge. *Chemistry for Sustainable Development*, 27, 336–342. <https://doi.org/10.15372/CSD2019148>.
16. Kuzina, E., Rafikova, G., Vysotskaya, L., Arkhipova, T., Bakaeva, M., Chetverikova, D., Kudoyarova, G., Korshunova, T., & Chetverikov, S. (2021). Influence of hydrocarbon-oxidizing bacteria on the growth, biochemical characteristics, and hormonal status of barley plants and the content of petroleum hydrocarbons in the soil. *Plants (Basel)*, 10(8), 1745. <https://doi.org/10.3390/plants10081745>.
17. Ławniczak, Ł., Woźniak-Karczewska, M., Loibner, A.P., Heipieper, H.J., & Chrzanowski, Ł. (2020). Microbial degradation of hydrocarbons-basic principles for bioremediation: a review. *Molecules*, 25(4), e856. <https://doi.org/10.3390/molecules25040856>.
18. Myazin, V.A., Korneykova, M.V., Chaporgina, A.A., Fokina, N.V., & Vasilyeva, G.K. (2021). The effectiveness of biostimulation, bioaugmentation and sorption-biological treatment of soil contaminated with petroleum products in the Russian Subarctic. *Microorganisms*, 9(8), 1722. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9081722>.
19. Ravi, A., Ravuri, M., Krishnan, R., Narenkumar, J., Anu, K., Alsalhi, M.S., Devanesan, S., Kamala-Kannan, S., & Rajasekar, A. (2022). Characterization of petroleum degrading bacteria and its optimization conditions on effective utilization of petroleum hydrocarbons. *Microbiological research*, 265, 127184. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2022.127184>.
20. Sui, X., Wang, X., Li, Y., & Ji, H. (2021). Remediation of petroleum-contaminated soils with microbial and microbial combined methods: Advances, mechanisms, and challenges. *Sustainability*, 13(16), 9267. <https://doi.org/10.3390/su13169267>.

21. Xia, M., Fu, D., Chakraborty, R., Singh, R.P., & Terry N. (2019). Enhanced crude oil depletion by constructed bacterial consortium comprising bioemulsifier producer and petroleum hydrocarbon degraders. *Bioresource Technology*, 282, 456–463. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.01.131>.

22. Xu, X., Liu, W., Tian, S., Wang, W., Qi, Q., Jiang, P., Gao, X., Li, F., Li, H., & Yu, H. (2018). Petroleum hydrocarbon-degrading bacteria for the remediation of oil pollution under aerobic conditions: A perspective analysis. *Frontiers in Microbiology*, 9, 2885. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02885>.

23. Universal biopreparation DOP-UNI. Laboratory of microbial technologies. https://dop-uni.ru/destructor_of_oil_pollution (access date Feb 02, 2024).

24. Biopreparation Multibac Active. Terra Ecology. URL: <https://clck.ru/3HPag4> (access date Feb 02, 2024).

дата поступления: 24.12.2024

дата принятия: 06.02.2025

© Шевцов Д.А., Иванцова Е.А., Новочадов В.В., 2025

A.S. Tomilov, T.V. Storchak, S.B. Gogoi, M.I. Bitner, N.A. Didenko

MICROPLASTICS IN FRESHWATER ECOSYSTEMS: SOURCES, RESEARCH METHODS AND ENVIRONMENTAL CONSEQUENCES. EXPERIENCE OF RUSSIAN RESEARCHERS AND PROSPECTS FOR POLLUTION CONTROL IN KHANTY-MANSIYSK AUTONOMOUS OKRUG – YUGRA

Томилов А.С., Сторчак Т.В., Гогои С.Б., Битнер М.И., Диденко Н.А.

МИКРОПЛАСТИК В ПРЕСНОВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ: ИСТОЧНИКИ, МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ. ОПЫТ РОССИЙСКИХ ИССЛЕДОВАТЕЛЕЙ И ПЕРСПЕКТИВЫ КОНТРОЛЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ В ХМАО-ЮГРЕ

Abstract. This article presents an analytical review of scientific studies focusing on the issue of microplastic pollution in freshwater bodies in Russia. The study examines in detail the primary sources of microplastic particles entering aquatic environments, including domestic and industrial wastewater, rainwater runoff, urban dust, and diffuse sources such as the decomposition of plastic waste in landfills and natural environments. Special attention is given to the methods of collecting water and sediment samples employed by various research groups. Contemporary approaches to microplastic detection and identification are described, including visual methods using optical and electron microscopy, Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy, and Raman spectroscopy. The review presents data on the impact of microplastics on biological organisms and ecosystems, including disruptions in trophic networks and impairments in the functioning of the endocrine, reproductive, and immune systems. Aspects of the mechanical and toxicological effects of microplastics are considered, as well as the processes of contaminant sorption onto their surfaces. The conclusion highlights the need for further standardization of research methodologies and additional investigations to gain a deeper understanding of the extent of microplastic distribution in freshwater ecosystems, particularly in regions with insufficient empirical data. The importance of developing comprehensive strategies to minimize microplastic pollution in freshwaters is emphasized.

Аннотация. В статье представлен аналитический обзор научных исследований, направленных на изучение проблем загрязнения пресноводных водоёмов России микропластиком. В исследовании подробно рассматриваются основные источники поступления частиц микропластика в водную среду, включая бытовые и промышленные сточные воды, дождевые стоки, городскую пыль, а также диффузионные источники, такие как разложение пластиковых отходов на полигонах и в природной среде. Особое внимание уделено методам сбора образцов воды и донных отложений, используемым различными исследовательскими группами. Описаны современные подходы к обнаружению и идентификации микропластика, в том числе визуальные методы с применением оптической и электронной микроскопии, Фурье-ИК-спектроскопии (FTIR), а также рамановской спектроскопии. В обзоре представлены данные о влиянии микропластика на биологические организмы и экосистемы в целом, включая нарушения трофических сетей, сбои в функционировании эндокринной, репродуктивной и иммунной систем. Рассмотрены аспекты механического и токсикологического воздействия микропластика, а также процессы сорбции загрязняющих веществ на его поверхности. В заключении подчеркивается необходимость дальнейшей унификации методик исследования и проведения дополнительных изысканий для углубленного понимания масштабов распространения микропластика в пресноводных экосистемах, особенно в регионах с недостаточным количеством эмпирических данных. Подчеркивается важность разработки комплексных стратегий по минимизации загрязнения пресных вод частицами микропластика.

Key words: microplastics; pollution; surface waters; control methods; Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug-Yugra.

About the authors: Andrej S. Tomilov, SPIN-code: 8687-8307, ORCID: 0009-0009-0057-6898, Nizhnevartovsk State University Nizhnevartovsk, Russia, andrew.istomin400@gmail.com; Tatyana V. Storchak, ORCID: 0000-0002-5926-433X, Candidate of Biological Sciences, Nizhnevartovsk State University, Nizhnevartovsk, Russia, tatyana.storchak@yandex.ru; Dr. Subrata Borgohain Gogoi, ORCID: 0000-0001-6347-5853, Professor, Department of Petroleum Technology Dibrugarh University, Assam-786004, India, subrata@dibru.ac.in; Maria I. Bitner, SPIN-code: 5062-9728, ORCID: 0000-0002-6942-5838, Nizhnevartovsk State University, Nizhnevartovsk, Russia, m.i.sid@yandex.ru; Nadezhda A. Didenko, SPIN-code: 9525-0364, ORCID: 0000-0002-0206-437X, Nizhnevartovsk State University, Nizhnevartovsk, Russia, didenkona@yandex.ru.

Ключевые слова: микропластик; загрязнение; поверхностные воды; методы контроля; ХМАО-Югра.

Сведения об авторах: Томилов Андрей Сергеевич, SPIN-код: 8687-8307, ORCID: 0009-0009-0057-6898, Нижневартровский государственный университет, Нижневартовск, Россия, andrew.istomin400@gmail.com; Сторчак Татьяна Викторовна, ORCID: 0000-0002-5926-433X, канд. биол. наук, Нижневартровский государственный университет, Нижневартовск, Россия, tatyana.storchak@yandex.ru; Д-р Гогои Субрата Боргохайн, ORCID: 0000-0001-6347-5853, профессор, факультет нефтяных технологий Университета Дибругарх, Ассам-786004, Индия, subrata@dibru.ac.in; Битнер Мария Ивановна, SPIN-код: 5062-9728, ORCID: 0000-0002-6942-5838, Нижневартровский государственный университет, Нижневартовск, Россия, m.i.sid@yandex.ru; Диденко Надежда Алексеевна, SPIN-код: 9525-0364, ORCID: 0000-0002-0206-437X, Нижневартровский государственный университет, Нижневартовск, Россия, didenkona@yandex.ru.

Tomilov A.S., Storchak T.V., Gogoi S.B., Bitner M.I., Didenko N.A. Microplastics in Freshwater Ecosystems: Sources, Research Methods and Environmental Consequences. Experience of Russian Researchers and Prospects for Pollution Control in Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Yugra // Вестник Нижневартовского государственного университета. 2025. № 1(69). С. 111-135. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-1/09>

Tomilov, A.S., Storchak, T.V., Gogoi, S. B., Bitner, M.I., & Didenko, N.A. (2025). Microplastics in Freshwater Ecosystems: Sources, Research Methods and Environmental Consequences. Experience of Russian Researchers and Prospects for Pollution Control in Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Yugra. *Bulletin of Nizhnevartovsk State University*, 1(69), 111-135. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-1/09>

Introduction

The history of plastics began in 1862, when A. Parkes patented his invention – Parkesine, which became the first artificial plastic and a cheap and colorful substitute for ivory [42]. Since then, humanity has produced about 9 billion tons of plastic, and only 9% of it has been recycled [33]. A substantial proportion of polymeric waste is directed to municipal solid waste landfills, while a fraction becomes dispersed within the environment. It is estimated that approximately 13 million tons of plastic enter the world's ocean basins annually [33]. The propensity of plastic fragments to remain buoyant in aquatic environments is attributable to the low density of the material, which approximates that of water. This characteristic increases the likelihood of their presence both within the water column and at the water's surface. The degradation and fragmentation of plastics into smaller particles increases the probability of their ingestion by aquatic organisms [3]. Of particular concern is the ability of plastic particles to accumulate metals

and other contaminants on their surface directly from the water column or the surface microlayer [1; 17; 39], thereby transforming microplastics into a secondary source of various pollutants. It is important to note that microplastics represent an extremely heterogeneous group of particles, exhibiting variations in shape, size, color, density, and chemical composition. Due to this heterogeneity, researchers face a major challenge in quantifying microplastics in the environment: the lack of reliable and standardized methodologies for sampling, preparation, and detection [39].

In this study, we attempted to consider the sources of microplastic in surface waters and its impact on individual organisms and ecosystems. An analysis and generalization of scientific publications on the presence of microplastic particles in surface waters of Russia and the Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra were conducted. A review of existing methods and approaches to sampling and identifying microplastic in freshwater bodies and watercourses is also presented.

Classification. Sources of microplastic input into surface waters

Microplastics are a heterogeneous group of plastic fragments, characterized by a size of less than 5 millimeters, that are found in various environmental matrices [41]. From the perspective of ecological research, microplastics are considered a complex stressor capable of eliciting a wide range of adverse effects in the environment. While a universally accepted classification system for microplastics does not exist, a convenient differentiation based on ten size classes is commonly employed: class 1 (<20 μm); class 2 (20–40 μm); class 3 (40–60 μm); class 4 (60–80 μm); class 5 (80–100 μm); class 6 (100–500 μm); class 7 (500–1000 μm); class 8 (1000–2000 μm); class 9 (2000–5000 μm); and class 10 (>5000 μm). Microplastics are also classified according to the shape of the particles, i.e., fibers, films, or granules [24; 41].

When considering the ways in which microplastics enter the surface waters of rivers and water bodies, the following should be highlighted:

1. Domestic Wastewater (Household Sewage). The reasons for the appearance of microplastics in domestic wastewater are:

- cosmetic products with microplastic granules that have replaced natural exfoliating agents and toothpastes with plastic microbeads for removing plaque and stains [27];
- washing synthetic textiles in industrial laundries and households creates microplastics as a result of wear and tear and fiber separation [4; 28; 50]. It is estimated that about 35% of microplastics in oceans are fibers from synthetic textiles [6];
- other consumer products that can release microplastics into sewage systems include glitter and contact lens cleaning agents [27].

2. Stormwater Runoff. The reasons for the appearance of microplastics in stormwater runoff are:

- wear and tear of road markings (paint, thermoplastic, polymer tape, and epoxy resin) [5];
- wear and tear of vehicle tires during movement (tire particles consist of a matrix of synthetic polymers, specifically styrene-butadiene rubber (approximately 60%), mixed with natural rubber and many other additives) [5].

3. Urban Dust. The reasons for the appearance of microplastics in urban infrastructure (with subsequent entry into stormwater runoff) are:

– wear and tear of infrastructure (household dust, urban dust, artificial turf, paint and plastic coatings) and high-pressure washing with abrasive particles [4].

In addition to the aforementioned factors, it is important to emphasize the significant contribution of diffuse sources of plastic pollution, which represent the direct entry of polymeric materials (such as packaging, disposable tableware, household items, etc.) into aquatic environments and hydrological systems in the form of domestic waste. These materials can enter not only directly into water bodies, but also accumulate in coastal zones, spreading over significant areas. As a result of abiotic and biotic factors, the polymers undergo degradation and fragmentation, leading to the formation of microplastic particles [49].

Microplastics can penetrate aquatic ecosystems through a multitude of diverse sources, and researching the pathways of entry is an essential aspect for assessing the scale of this environmental threat.

The impact of microplastics on organisms and ecosystems

Currently, the study of the impact of microplastics on biological organisms and ecosystems is becoming important and relevant in the field of scientific research. Microplastics can affect a wide range of biological species, from microscopic life forms such as phyto- and zooplankton to larger representatives of the fauna, including fish and mammals [9]. Research results indicate that exposure to microplastics can lead to mechanical damage, toxic reactions and reproductive dysfunction in organisms [19]. Microplastics have been found to exert effects on various systems in animals and humans, namely:

– digestive system: microplastics can induce alterations in the gut microbiome, leading to an imbalance between beneficial and detrimental bacteria.

– respiratory system: inhalation of microplastics can induce oxidative stress in the respiratory tract and lungs, with observed effects including coughing, sneezing, and dyspnea due to inflammation and damage.

– endocrine system: microplastic particles can interfere with the production, release, transport, metabolism, and excretion of hormones.

– reproductive system: various endocrine disorders, including metabolic disorders, can lead to changes in fetal development or reproductive disorders (such as infertility, miscarriage, and congenital malformations).

– complex immunological effects: cumulative exposure to microplastics has induced chronic inflammation and changes in homeostasis in animal experiments, and a study on human lung cells showed that microplastics can regulate the expression of genes and proteins involved in the immune response [19].

Microplastics have been shown to alter the composition of the gut microbiome, increasing the diversity and abundance of microorganisms [20, 30]. Microplastics can disrupt the intestinal barrier, inducing inflammation and allowing translocation into the bloodstream [30, 36].

Furthermore, studies using digestion models have demonstrated that polyethylene terephthalate particles undergo biotransformation, altering the composition of the microbial community in the large intestine and forming biofilms [32]. Microplastic particles are capable of accumulating in the lumen of the gastrointestinal tract, causing disruption of the intestinal microbiocenosis, leading to dysbiosis. This process can trigger the development of systemic inflammation and serve as a trigger for a range of chronic pathologies, including conditions such as obesity, diabetes mellitus, cardiovascular diseases, and autoimmune disorders [4].

Microplastics affect not only individual species, but can also impact the ecosystem as a whole. Changes in the population size of some species can lead to destabilization of food chains and thus cause an imbalance in the structure of ecosystems. [9].

Microplastics exert an influence on “soil-plant” and “water-plant” ecosystems. The incorporation of microplastics into the soil matrix can substantially modify the physicochemical properties of the soil, such as particle aggregation, bulk density, and water-holding capacity. Furthermore, the presence of microplastic particles in the aquatic environment is capable of altering water quality parameters, including the total concentration of dissolved and suspended solids, pH level, and dissolved oxygen content [9].

The accumulation of microplastic particles on the water surface is capable of modifying the concentration of organic compounds and the rate of oxygen consumption, which potentially impacts biological processes [14]. Zooplankton that consume microplastics can exacerbate the decline in dissolved oxygen levels in the ocean through a number of mechanisms. These include a reduction in the assimilation of primary production, an increase in the export of organic matter, and enhanced remineralization processes, ultimately leading to a decrease in the oxygen content of the aquatic environment [18].

Microplastics can adsorb toxic substances from the surrounding environment onto their surface, increasing their potential hazard to organisms. Investigating these effects is crucial for assessing the risk to ecosystem health [1; 17].

A comprehensive analysis of the impact of microplastics on biological organisms and ecosystems requires an integrated approach, incorporating knowledge from fields such as biology, ecology, toxicology, and even sociology.

Microplastic in freshwater bodies and watercourses of Russia

Research on microplastics in freshwater bodies and watercourses of the Russian Federation deserves special attention. Within this analysis, publications both in domestic and foreign scientific journals have been considered.

Ivanova E.V. and Tikhonov D.A. (2022) studied the content of microplastics in water and bottom sediments of Lake Ladoga [40]. Yasinets S.V. with colleagues (2021) determined the content of microplastics in water samples from the rivers Levinka, Kova, as well as springs and tunnels near Nizhny Novgorod [34]. Pozdnyakov Sh.R. et al. (2020) studied the spatial distribution of microplastic particles in water, bottom sediments, and soils of the coastal zone of Neva Bay of the Gulf of Finland and the mouth of the Neva River [25]. Kaurova Z.G. (2021) in her work

assessed the content of microplastic particles in the upper and middle reaches of the Neva River, as well as in the Mga, Tosna, and Izhora rivers [43]. Frank Yu.A. and colleagues (2021) studied the content of pollutants in water bodies in the Novosibirsk region and several populated areas of the Tomsk region, as well as in the Tom River near the cities of Kemerovo, Yurga, and Tomsk [12]. Another publication by Frank Yu.A. with colleagues (2021) is devoted to the study of water resources of the Ob-Irtysh basin, as well as the Volga and Pechora basins [49]. The presence of microplastics has been detected in the bottom sediments of the Kazanka River in Kazan [46]. Kolobov M.Yu. and Talanina E.B. focused their attention on analyzing the aquatic environment of Lake Baikal [44]. Tomsk scientists expanded the scope of their research to include the study of water and bottom sediments of the Tunguska River [50]. Subsequently, they continued this work, covering the Lower Tunguska and Yenisei rivers [11]. Finally, Lisitsyna A.A. and her colleagues undertook a large-scale project to study the water along the entire length of the Volga River, from Selizharovo to Astrakhan [21].



**Fig. Locations of microplastic studies in natural freshwaters within the territory of Russia.
Map constructed based on materials from scientific works by Russian researchers
[11; 12; 21; 25; 34; 37; 40; 43; 44; 46; 49; 50]**

Figure 1 presents a map of Russia, indicating the regions where studies on the detection of microplastic particles have been conducted. As can be seen, the rivers and water bodies of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug-Yugra (KhMAO-Yugra) have not, to date, been the subject of investigation regarding microplastic content. The hydrographic system of the district is characterized by the presence of approximately 290,000 lakes and more than 30,000 watercourses, predominantly small rivers. The fundamental element of the hydrographic network is the Ob River, which receives a number of large tributaries, such as the Irtysh, Vakh, Agan, Bolshoy Yugan,

Severnaya Sosva, and Kazym. The total length of the hydrological network is approximately 172,000 km [45].

Given the paucity of research data regarding microplastic contamination in the aquatic ecosystems of KhMAO-Yugra, and considering the significant number of surface water bodies and watercourses characterized by substantial volumes of water mass, it is necessary to emphasize the high degree of relevance of investigating this problem.

Methods and techniques for detecting microplastics in freshwater

One of the major challenges in quantifying microplastic particles in the environment is the lack of reliable and standardized methodologies [39].

This review presents various techniques for the detection, identification, and classification of microplastic particles in freshwater ecosystems. Particular attention will be paid to methods of sampling and sample preparation of water samples, as well as soil samples, both benthic and shoreline.

Let us consider the sampling methods used and described by researchers in their studies. When sampling water from water bodies and watercourses, two approaches can be distinguished: water samples are collected from the surface (depth 0–20 cm); and from the water column at different levels (typically using a pump or submersible nets). For the collection of bottom sediments, dredges of various designs are typically used. The collection of surface (shoreline) sediments is carried out by collecting soil from the shoreline in different areas, taking into account the area and depth.

For the extraction of microplastic samples from surface waters, the most frequently used method is trawling with plankton nets. This approach involves the use of net structures of fixed dimensions (e.g., 50 cm × 100 cm [35]), with specific mesh size parameters (e.g., 55 µm [28]). The net is dragged across the surface of the water body at a constant speed, with regular rinsing of the net with the analyzed water at equal intervals of time (or distance) [22; 28; 35]. In some studies, a specialized “Manta” trawl is used for these purposes [8]. Another common method is the collection of specific volumes of water using glass samplers, after which the water is filtered through stainless steel sampling probes and nylon plankton nets with defined mesh sizes [10; 16; 29]. Sampling is carried out manually using a stainless steel beaker with a diameter of 20 cm [10]. Collected samples are placed in glass containers [28; 29], which are further protected from light exposure [10; 16]. Some researchers employ methods of sample preservation using 70% ethanol solution or 5% metaldehyde [8; 35]. Water sampling from various levels of the water column is performed using a submersible pump; before the start of each sampling event, the pump itself and the hose are pre-rinsed with the water being investigated. The water obtained in this way is passed through a portable plankton net [10].

It is worth noting that in most studies, researchers have strived to use plankton (nylon) nets with a mesh size of approximately 300 µm or less. Also, when discussing water sampling, it is important to note that, at present, expert groups from AMAP (Arctic Monitoring and Assessment Programme), GESAMP (Group of Experts on Scientific Aspects of Marine Environmental

Protection), and HELCOM (Baltic Marine Environment Protection Commission) have recommended only two methods of water sampling for monitoring microplastic pollution: from the surface (0–20 cm) – using nets (neuston net, “Manta” trawl); from the subsurface layer (from a depth of 1–6 m) – using a pump or a ship’s flow-through system with a filter system or cascade of filters [47].

Sampling of bottom sediments was typically carried out using dredges of various designs. In a number of studies, samples were collected using a Van Veen grab and placed in glass bottles using a stainless steel spoon [10; 28]. In the work of our compatriots studying microplastics in Lake Ladoga, an Ekman dredge was used. With its help, the surface layer of soil with a thickness of 5–10 cm was removed, after which, using a metal spoon, the soil was placed in glass jars [40].

Sampling of surface (shoreline) sediments was carried out by collecting soil at different sections of the riverbank, within a predetermined sampling area, by removing and transferring the soil to glass samplers using steel spatulas or spoons [13].

The Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection (GESAMP) proposes the following protocol for sampling from the shoreline of a water body: the sampling site should be chosen randomly; the size of the site is determined by the researchers and may be, for example, one square meter; the depth of soil extraction is 50 mm. It is recommended to collect five samples, with a distance of at least five meters between sampling points [15].

Extraction of microplastics: sample preparation for analysis

When considering methods for extracting microplastics and preparing samples for analysis, two approaches to sample preparation can be distinguished: preparation of water samples and preparation of sediment samples (both bottom and shoreline).

Most researchers [2; 28; 29; 48; 49] utilize the methodology established by the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) [23] for preparing water samples, as detailed translations and overviews of this method have been provided by our compatriots from the P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences [39]. However, in some cases, this methodology is slightly modified [16; 22; 48]. In brief, the common features of the applied methodologies can be summarized into three main stages of sample preparation: sequential sieving (samples are initially passed through a series of sieves or a cascade of sieves and thoroughly rinsed with distilled water), oxidation of organic matter using peroxide (the collected fraction undergoes decomposition of organic material using hydrogen peroxide (30%) in the presence of Fe^{2+} ions), and density separation (conducted in a NaCl solution in a separating funnel). Subsequently, particles are collected on membrane filters, which are then dried [2; 39; 49].

For the preparation of sediment samples, researchers employ similar methods that represent a modification of the methodology developed by the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) [28; 40; 48]. The aforementioned NOAA methodology proposes slightly different approaches to the preparation of bottom and shoreline sediment samples. The preparation of shoreline sediment samples begins with drying the sample, followed by density separation

(which involves the collection and filtration of the surface layer of liquid). Subsequently, liquid oxidation of the collected filtrate is performed to remove organic material, after which a second density separation is conducted [23; 39].

The preparation of bottom sediment samples also begins with drying the sample, followed by mixing and softening the dried sediment. The next step involves sieving the sample, after which density separation is performed, followed by liquid oxidation using hydrogen peroxide, and the collected material undergoes a final density separation [23; 39]. It is important to note that in either case (regardless of whether it is bottom or shoreline sediment), the resulting sample is weighed and subjected to visual analysis using a microscope [23; 39].

When discussing the difficulties associated with the preparation of water or sediment samples, it should be noted that researchers face the problem of extracting microplastics from these samples due to the presence on their surface of particles that can be mistakenly identified as calcite, quartz, clay materials, or even diatoms. In this regard, the development of methods for the destruction of biological material and the complete removal of mineral components from the surface of particles without damaging the microplastic fragments themselves is required [29; 43].

Thus, despite the widespread use of the NOAA method, in a number of studies, it is applied with certain modifications [28; 39; 48]. A critical analysis of the methods of sampling, preparation, and analysis of samples used by various research groups around the world was presented in the work of J.C. Prata et al. [26].

Detection and identification of microplastic particles

The method of visual detection is effective when working with relatively large particles (300 µm and above). It is often used as a preliminary stage of investigation. Various types of microscopes are employed for this purpose, including optical, digital, and fluorescent models equipped with high-resolution digital cameras. Additionally, specialized software for image analysis and data processing may be utilized [31]. Domestic researchers [11-13; 21; 25; 34; 37; 40; 43; 44; 46; 48-50] and foreign researchers [2; 8; 16; 29; 35] have resorted to visual detection methods. In several studies, scanning electron microscopy was used to obtain images of the surface structures of microplastics [28; 29].

Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy is based on the interaction of infrared radiation with molecules. Synthetic polymers, characterized by a regular repetition of monomeric units in their structure, exhibit infrared spectra with distinctly defined absorption bands. This property makes FTIR an effective method for investigating microplastics. Polymer identification is performed by comparing the obtained absorption spectrum of the sample with reference spectra [31; 38]. This method has been actively utilized by both foreign and domestic researchers [8; 10; 13; 25; 29; 35; 44].

Differential scanning calorimetry (DSC), which allows for the registration of phase transitions in polymer materials, has been used to identify microplastics in 34 samples from the Volga River [21].

Raman spectroscopy shares several similarities with infrared (IR) Fourier spectroscopy but differs in the mechanism of spectral band formation. In the case of Raman scattering, changes in the polarizability of molecules under the influence of electromagnetic radiation lead to the appearance of characteristic spectral lines, whereas in IR Fourier spectroscopy, the recorded absorption is associated with changes in the dipole moment of the molecules. Molecular vibrations in this method form observable bands (corresponding to energy transitions), and when the transition energies are represented as a spectrum, they can be used for molecular identification by comparing with reference spectra [31]. This method is actively used in both domestic research [25, 44] and international scientific literature [28; 29].

In addition to the previously discussed analytical approaches, it is important to note less common methods characterized by high costs, lengthy analysis times, and complex equipment and sample preparation [7; 31]:

- pyrolysis gas chromatography-mass spectrometry (Pyr-GC-MS);
- thermal extraction and desorption gas chromatography-mass spectrometry (TED-GC-MS);
- scanning electron microscopy combined with energy-dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDX);
- quantitative nuclear magnetic resonance spectroscopy.

Considering the diversity of methodological approaches employed in microplastic research, it seems possible to systematize the data. For this purpose, a table is presented containing information on sampling methods, identification, and types of polymer compounds detected in studies by both Russian and foreign authors. When presenting data on polymer types and their concentrations, it should be taken into account that the research results can vary significantly depending on factors such as the environment and object of study, sampling methods, particle identification methods, and the methodology of sample preparation. For example, the concentration, types, and sizes of microplastics can manifest differently in various aquatic environments, in bottom sediments, beach sands, and in body tissues. The choice of sampling method, such as net trawls with different mesh sizes, manual collection, and water filtration, influences which particles will be captured and, consequently, the results of the analysis. Different methods may be more or less effective for sampling particles of different sizes. Sample preparation steps, such as the removal of organic matter or individual particles by density, can introduce systematic errors and affect the final results.

Most researchers prefer three main methods for the identification and chemical analysis of microplastics: the visual method, Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy, and Raman spectroscopy. Other approaches are used less frequently or are practically not used due to the significant costs of equipment, as well as the complexity and duration of the analysis. Some methods allow only the determination of polymer type classes or have limitations on particle size.

Among the detected types of polymers, polyethylene (PE), polypropylene (PP), polystyrene (PS), polyethylene terephthalate (PET), and polyvinyl chloride (PVC) are most often encountered, which reflects their widespread use as materials for the production of plastic products.

The conducted review of scientific studies presented in this article has allowed for the systematization of current knowledge on the problem of microplastic pollution of freshwater ecosystems in Russia. It has been established that the main sources of microplastic input into the aquatic environment are domestic and industrial wastewater, storm water, urban dust, and also the processes of plastic waste decomposition in landfills and the natural environment. However, the absence of models describing the dynamics of microplastic input and distribution indicates the need for further research in this direction.

The article considers modern methods of sampling water and bottom sediments, as well as approaches to the identification and quantitative analysis of microplastics. Despite significant progress in the development of methods, the need for the unification of approaches remains to ensure the comparability of data obtained by various research groups.

Particular attention is paid to the ecological consequences of plastic pollution, including its impact on biological organisms and the functioning of ecosystems. It has been established that microplastics can cause disruptions in trophic networks, as well as have a negative impact on the endocrine, reproductive, and immune systems of aquatic organisms. Furthermore, the sorption of pollutants on the surface of microplastics enhances its toxicological potential.

In the context of Yugra, where the volume of surface waters is significant and data on microplastic pollution are absent, the conduct of comprehensive studies appears to be extremely relevant. This will allow for the assessment of the scale of the environmental threat and the development of strategies to minimize the pollution of freshwater ecosystems. Overall, the article emphasizes the need for further study of the microplastic problem, including the development of methodological approaches, the conduct of monitoring, and the creation of effective pollution control measures.

Table

**Identification and analysis of polymer types in microplastics:
a review of scientific studies and their results**

No	Research Object	Source Link	Sampling Method (and Mesh Size)	Result (Concentrations, Form)	Particle Identification Method	Detected Polymer Types
1.	Twelve beaches along a 40 km stretch of coastline in southwest England	[1]	Manual collection from beaches	Metals associated with granules have been detected. Metal concentrations vary. Shape: granules.	Inductively coupled plasma-mass spectrometry, Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy	No specific polymer types were specified. The work is devoted to the analysis of metals on the surface of microplastic particles
2.	Water from 29 tributaries of the Great Lakes, North America	[2]	Use of trawl nets with a 333 μm mesh.	Concentration: 0.05–32 particles/ m^3 , with a mean of 4.2 particles/ m^3 . Particle Size: Particle sizes ranged from 0.33 mm to 20 mm. Shape: fibers (mean 71% of particles) were the predominant shape, followed by fragments (mean 17%).	Visual identification, microscopy	Specific polymer types not identified
3.	Microplastic accumulation on shorelines worldwide	[6]	Collection of samples from surface sediments on beaches	Concentrations varied. Fragments and fibers were detected; particle size < 1 mm.	Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy	PE, PP, PS, PET and others
4.	Microplastic pollution in surface water of Lake Victoria, Africa	[8]	Surface water sampling using a Manta trawl net with a 300 μm mesh size.	Concentration: 0.02–2.19 particles/ m^3 . Particle size: 0.3–4.9 mm. Shape: microspheres, fibers, and fragments.	Microscopy and Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy	PE, PP, PS, LDPE, HDPE and others

5.	Spatiotemporal distribution of microplastics in the Nakdong River, South Korea	[10]	Surface water sampling using a beaker, subsurface water sampling (1-meter depth) using a pump, and bottom sediment sampling using a Van Veen grab	Concentration: – Water: concentrations ranged from 293 to 4760 particles/m ³ . – Sediment: 1971 particles/kg dry weight. Particle shape distribution: – Water: fragments (69%), fibers (30%), spheres and films (< 1%). – Sediment: fragments (84%), fibers (15%), spheres and films (1%).	Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy	PE, PP, PS, PET, PA
6.	The Lower Tunguska River (also known as the Katanga River), a right tributary of the Yenisey River, Siberia, Russia	[11]	Surface water sampling using a Manta trawl net with a 330 µm mesh size. Bottom sediments were collected using a steel spoon	Concentration: – Water: 1.20 ± 0.70 to 4.53 ± 2.04 particles/m ³ – Sediment: 235 ± 83.0 to 543 ± 94.1 particles/kg dry weight Particle shape: irregular microfragments, microfibers, microfilms, microspheres.	Visual identification, microscopy	Specific polymer types were not identified
7.	Surface waters of the Ob and Tom Rivers, Siberia, Russia	[12]	Surface water sampling using a Manta trawl net with a 330 µm mesh size	Concentration: The mean concentration for both rivers ranged from 44.2 to 51.2 particles/m ³ . Particle shape: microfibers, microfilms, and microspheres.	Visual identification, microscopy	Specific polymer types were not identified
8.	Beach sands of the Ob River, Western Siberia, Russia	[13]	Sand was collected using a clean stainless steel scoop within a 625 cm ² (25 × 25 cm) stainless steel frame	Concentration: Microplastic concentration in the sand samples ranged from 480 ± 413 to 2080 ± 924 particles/m ³ (mean 1067 ± 929) by volume. Particle shape: irregular fragments, fibers, and films.	Microscopy, Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy, Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS)	PE, PP, PS, PET, PA, PU

9.	Поверхностные воды реки Вэй, Китай Surface waters of the Wei River, China	[16]	Water samples were collected using glass samplers and subsequently filtered through a plankton net with a 64 µm mesh size	Concentration: Microplastic concentration ranged from 0.40 to 1.20 particles/L. Particle shape: fibers were the dominant type (83.4%).	Microscopy	Specific polymer types were not identified
10.	Volga River, Russia	[21]	Surface water sampling using a Manta trawl net with a 300 µm mesh size	Concentration: Microplastic concentration ranged from 0.16 to 4.10 particles/m ³ . Particle shape distribution: Fragments (41%) and films (37%) were the most prevalent, while fibers accounted for 22%.	Microscopy, Differential scanning calorimetry (DSC)	PVC, PE, PS, PP
11.	Haihe River, China	[22]	Surface water sampling using a Manta trawl net with a 333 µm mesh size	Concentration: Microplastic concentration ranged from 0.69 to 74.95 particles/m ³ . Particle shape: fibers, films, foam, fragments, and spheres.	Scanning electron microscopy (SEM), Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy	PE, EPS, PA, PP
12.	Coastal mangrove ecosystems of Singapore	[24]	During low tide, the top 3–4 cm of sediment were collected using a clean stainless steel spatula within a 1.5 m sided square	Concentration: The mean microplastic concentration across seven sites was 36.8 ± 23.6 particles/kg dry sediment. Fibers were the most abundant type of microplastic, followed by films and granules.	Microscopy, Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy	Various polymer types: PE, PP, PA6, PVC
13.	Surface waters and sediments of the Vaal River, South Africa	[28]	Surface water was sampled using a plankton net with a 55 µm mesh size. Sediment samples were collected using a 500 mL Van Veen grab	Concentration: Mean concentrations were 0.61 ± 0.57 particles/m ³ in surface water and 4.6 × 10 ² ± 2.8 × 10 ² particles/kg dry weight in sediments. Particle composition: fragments and fibers comprised over 80% of the microplastics in both water and sediment samples.	Scanning electron microscopy (SEM), Raman spectroscopy	PE, PP, LDPE, HDPE and others

14.	Surface waters and sediments of the Vistula River, Poland	[29]	Sediment samples were collected from the riverbanks at a depth of approximately 0.5 m using a stainless steel shovel within an area of approximately 100 cm ² (4–5 cm deep). Water was filtered through a stainless steel probe equipped with a plankton net with a 55 µm mesh size	Concentration: Microplastic concentrations ranged from 1.6 particles/L to 2.55 particles/L in water and from 190 particles/kg to 580 particles/kg in sediment. Particle composition: fibers constituted 97% and 93% of all particle types in the water and sediment samples, respectively.	Visual identification, Raman spectroscopy	PE, PP and others
15.	Water in the Three Gorges Dam reservoir, China	[35]	Surface water was sampled using a plankton net with a 112 µm mesh size	Concentration: Microplastic concentrations ranged from 3407.7×10^3 to 13617.5×10^3 units per square kilometer in the main stream of the Yangtze River, and from 192.5×10^3 to 11889.7×10^3 units per square kilometer in the estuary. Particle shape: spherical particles were the most abundant.	Scanning electron microscopy (SEM), Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy	PE, PS, PP
16.	Intra-annual dynamics of microplastic pollution in the surface waters of the Tom River, Russia	[37]	Surface water sampling using a Manta trawl net with a 330 µm mesh size	Concentration: Microplastic concentrations ranged from 0.70 ± 0.20 units/m ³ to 8.67 ± 4.80 units/m ³ . Particle composition: particles were primarily composed of irregular microfragments (10–35%), fibers, and spheres. In April, spheres were the predominant particle type, constituting >63% of the total.	Microscopy	Specific polymer types were not identified

17.	Assessment of microplastic particle content in Lake Ladoga	[40]	Water samples were filtered through a system with a metallic sieve with a 60 μm mesh size. Sediment samples were collected using an Ekman grab sampler	Concentration: The mean microplastic concentration in the surface layer of the water column was 83 ± 86 particles/ m^3 , and in the bottom sediments, 30 ± 18 particles/kg dry weight. Particle composition: fibers were the predominant particle type, accounting for 98% of all microplastics.	Visual identification, Raman spectroscopy	PE, PP, PET
18.	Water in the upper and middle reaches of the Neva River, Russia	[43]	Microplastic samples were collected from the water using a Juday plankton net with a 35 μm mesh size	Concentration: Microplastic concentration in the water ranged from 0.23 ± 0.04 units/L to 7.58 ± 0.8 units/L. Particle composition: microplastics were predominantly composed of thin filaments, granules, irregular plastic fragments, and fragments	Microscopy	Specific polymer types were not identified
19.	Multi-year dynamics of microplastic content in the surface waters of Lake Baikal, Russia	[44]	Specialized nets with a 300 μm mesh size were used	Concentration: The average microplastic concentration was 61,000 particles/ km^2 during the period from 2017 to 2020. Particle composition: fibers were the predominant type.	Microscopy, Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy	PE, PS, PP
20.	Waters and tributaries of Lake Ladoga, Russia	[48]	A filtration system with a metallic sieve with a 60 μm mesh size was used. Sediment samples were collected using an Ekman grab sampler	Concentration: The highest microplastic concentration in water was recorded in Pitkyaranta Bay (353 particles/ m^3). The highest concentrations in sediments were observed in the Volkhov River (160 particles/kg). Particle composition: particles were mainly composed of fibers, fragments, and films.	Visual identification, Raman spectroscopy	PE, PET, PC

21.	Screening for microplastic content in the surface waters of Russian rivers	[49]	A Manta trawl net with a 330 µm mesh size was used for sampling	Concentration: The mean microplastic content ranged from 4.56 ± 0.86 units/m ³ in the Ishim River to 36.7 ± 9.44 units/m ³ in the Chusovaya River. Particle composition: microplastics were composed of irregular fragments, fibers, spheres, and films.	Microscopy	Specific polymer types were not identified
22.	River ecosystem of the Lower Tunguska River, a tributary of the Yenisey River, Russia	[50]	Manta trawl net with a 330 µm mesh size was used for water sampling. Sediment samples were manually collected using a metal spoon	Concentration: Microplastic concentration ranged from 1.20 ± 0.70 to 4.53 ± 2.04 units/m ³ in water, and from 235 ± 83.0 to 543 ± 94.1 units/kg in sediments. Particle composition: fibers were the predominant type.	Microscopy	Specific polymer types were not identified

Note: PE – polyethylene, PP – polypropylene, PS – polystyrene, PET – polyethylene terephthalate, PVC – polyvinyl chloride, LDPE – low-density polyethylene, HDPE – high-density polyethylene, EPS – expanded polystyrene, PU – polyurethane, PA6 – polyamide 6.

References

1. Ashton, K., Holmes, L., & Turner, A. (2010). Association of metals with plastic production pellets in the marine environment. *Marine pollution bulletin*, 60(11), 2050–2055. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.07.014>.
2. Baldwin, A. K., Corsi, S. R., & Mason, S. A. (2016). Plastic debris in 29 Great Lakes tributaries: relations to watershed attributes and hydrology. *Environmental science & technology*, 50(19), 10377–10385. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02917>.
3. Boerger, C.M., Lattin, G.L., Moore, S.L., & Moore, C.J. (2010). Plastic ingestion by planktivorous fishes in the North Pacific Central Gyre. *Marine Pollution Bulletin*, 60, 2275–2278. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.08.007>.
4. Bora, S.S., Gogoi, R., Sharma, M.R., Anshu, Borah, M.P., Deka, P., & Teli, A.B. (2024). Microplastics and human health: unveiling the gut microbiome disruption and chronic disease risks. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 14, 1492759. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2024.1492759>.
5. Boucher, J., & Friot, D. (2017). Primary Microplastics in the Oceans: A Global Evaluation of Sources. Gland, Switzerland: IUCN, 43. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2017.01.en>.
6. Browne, M.A., Crump, P., Niven, S.J., Teuten, E., Tonkin, A., Galloway, T., & Thompson, R. (2011). Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: sources and sinks. *Environmental science & technology*, 45(21), 9175-9179. <https://doi.org/10.1021/es201811s>.
7. Dümichen, E., Eisentraut, P., Celina, M., & Braun, U. (2019). Automated thermal extraction-desorption gas chromatography mass spectrometry: A multifunctional tool for comprehensive

characterization of polymers and their degradation products. *Journal of Chromatography A*, 1592, 133-142. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2019.01.033>.

8. Egessa, R., Nankabirwa, A., Ocaya, H., & Pabire, W.G. (2020). Microplastic pollution in surface water of Lake Victoria. *Science of the Total Environment*, 741, 140201. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140201>.

9. Enyoh, C.E., Shafea, L., Verla, A.W., Verla, E.N., Qingyue, W., Chowdhury, T., & Paredes, M. (2020). Microplastics exposure routes and toxicity studies to ecosystems: an overview. *Environmental analysis, health and toxicology*, 35(1). <https://doi.org/10.5620/eaht.e2020004>.

10. Eo Soeun, E.S., Hong SangHee, H.S., Song YoungKyoung, S.Y., Han GiMyung, H.G., & Shim WonJoon, S.W. (2019). Spatiotemporal distribution and annual load of microplastics in the Nakdong River, South Korea. *Water Research*, 160, 228-237. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.05.053>.

11. Frank, Y.A., Vorobiev, D.S., Kayler, O.A., Vorobiev, E.D., Kulinicheva, K.S., Trifonov, A.A., & Soliman Hunter, T. (2021). Evidence for microplastics contamination of the remote tributary of the Yenisei River, Siberia – The pilot study results. *Water*, 13(22), 3248. <https://doi.org/10.3390/w13223248>.

12. Frank, Y.A., Vorobiev, E.D., Vorobiev, D.S., Trifonov, A.A., Antsiferov, D.V., Soliman Hunter, T., & Strezov, V. (2020). Preliminary screening for microplastic concentrations in the surface water of the Ob and Tom Rivers in Siberia, Russia. *Sustainability*, 13(1), 80. <https://doi.org/10.3390/su13010080>.

13. Frank, Y.A., Sotnikova, Y.S., Tsygankov, V.Y., Rednikin, A.R., Donets, M.M., Karpova, E.V., & Vorobiev, D. S. (2024). Pollution of Beach Sands of the Ob River (Western Siberia) with Microplastics and Persistent Organic Pollutants. *Journal of Xenobiotics*, 14(3), 989-1002. <https://doi.org/10.3390/jox14030055>.

14. Galgani, L., & Loisel, S.A. (2019). Plastic accumulation in the sea surface microlayer: an experiment-based perspective for future studies. *Geosciences*, 9(2), 66. <https://doi.org/10.3390/GEOSCIENCES9020066>.

15. GESAMP (2019). Guidelines on the monitoring and assessment of plastic litter and microplastics in the ocean (Kershaw P.J., Turra A. and Galgani F. editors), (IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP/ISA Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection). *Rep. Stud. GESAMP*. 99, 130. URL: <http://gesamp.org>.

16. Jiao, J., Hu, H., Chen, G., & Yang, Z. (2021). Microplastics in surface waters of the Wei River, China. In *E3S Web of Conferences*, 251, 02090. EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125102090>.

17. Karapanagioti, H.K., & Klontza, I. (2008). Testing phenanthrene distribution properties of virgin plastic pellets and plastic eroded pellets found on Lesbos island beaches (Greece). *Marine environmental research*, 65(4), 283-290. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2007.11.005>

18. Kvale, K., Prowe, A.E., Chien, C.T., Landolfi, A., & Oschlies, A. (2021). Zooplankton grazing of microplastic can accelerate global loss of ocean oxygen. *Nat. Commun.*, 12, 2358. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22554-w>.

19. Lee, Y., Cho, J., Sohn, J., & Kim, C. (2023). Health effects of microplastic exposures: current issues and perspectives in South Korea. *Yonsei Medical Journal*, 64(5), 301. <https://doi.org/10.3349/ymj.2023.0048>.

20. Li, B., Ding, Y., Cheng, X., Sheng, D., Xu, Z., Rong, Q., & Zhang, Y. (2020). Polyethylene microplastics affect the distribution of gut microbiota and inflammation development in mice. *Chemosphere*, 244, 125492. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125492>.
21. Lisina, A.A., Platonov, M.M., Lomakov, O.I., Sazonov, A.A., Shishova, T.V., Berkovich, A.K., & Frolova, N.L. (2021). Microplastic abundance in Volga River: Results of a pilot study in summer 2020. *Geography, Environment, Sustainability*, 14(3), 82-93.
22. Liu, Y., Zhang, J., Cai, C., He, Y., Chen, L., Xiong, X., & Liu, W. (2020). Occurrence and characteristics of microplastics in the Haihe River: an investigation of a seagoing river flowing through a megacity in northern China. *Environmental Pollution*, 262, 114261. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114261>.
23. Masura, J., Baker, J., Foster, G., & Arthur, C. (2015). Laboratory Methods for the Analysis of Microplastics in the Marine Environment: Recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments. NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R-48. <http://dx.doi.org/10.25607/OBP-604>.
24. Nor, N.H.M., & Obbard, J.P. (2014). Microplastics in Singapore's coastal mangrove ecosystems. *Marine pollution bulletin*, 79(1-2), 278-283. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.11.025>.
25. Pozdnyakov, S.R., Ivanova, E.V., Guzeva, A.V., Shalunova, E.P., Martinson, K.D., & Tikhonova, D.A. (2020). Studying the concentration of microplastic particles in water, bottom sediments and subsoils in the coastal area of the Neva Bay, the Gulf of Finland. *Water resources*, 47, 599-607. <https://doi.org/10.1134/S0097807820040132>.
26. Prata, J.C., Da Costa, J.P., Duarte, A.C., & Rocha-Santos, T. (2019). Methods for sampling and detection of microplastics in water and sediment: A critical review. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 110, 150-159. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.10.029>.
27. Prata, J.C. (2018). Microplastics in wastewater: State of the knowledge on sources, fate and solutions. *Marine pollution bulletin*, 129(1), 262-265. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.02.046>.
28. Ramaremsa, G., Ndlovu, M., & Saad, D. (2022). Comparative assessment of microplastics in surface waters and sediments of the Vaal River, South Africa: abundance, composition, and sources. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 41(12), 3029-3040. <https://doi.org/10.1002/etc.5482>.
29. Sekudewicz, I., Dąbrowska, A.M., & Syczewski, M.D. (2021). Microplastic pollution in surface water and sediments in the urban section of the Vistula River (Poland). *Science of The Total Environment*, 762, 143111. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143111>.
30. Sheveleva, S.A., Markova, Y.M., Efimochkina, N.R., Minaeva, L.P., Bykova, I.B., Zinurova, E.E., & Khotimchenko, S.A. (2023). Microbial risks associated with microplastics in the food chain and possible control measures (literature review). Part 1. Dietary intake and influence on the gut microbiota. *Hygiene and Sanitation*, 102(12), 1334-1347. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-12-1334-1347>.
31. Stock, F., B. Narayana, V.K., Scherer, C., Löder, M.G., Brennholt, N., Laforsch, C., & Reifferscheid, G. (2020). Pitfalls and limitations in microplastic analyses. In *Plastics in the Aquatic Environment-Part I: Current Status and Challenges* (pp. 13-42). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20065-4_654.
32. Tamargo, A., Molinero, N., Reinoso, J.J., Alcolea-Rodriguez, V., Portela, R., Bañares, M.A., & Moreno-Arribas, M.V. (2022). PET microplastics affect human gut microbiota communities during

simulated gastrointestinal digestion, first evidence of plausible polymer biodegradation during human digestion. *Scientific Reports*, 12(1), 528. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04489-w>.

33. The UN Environment (UNEP). Annual Report. 2023. 24 p. URL: <https://clck.ru/3HPbPt> (дата обращения: 05.12.2024).

34. Yasinskii, S.V., Venitsianov, E.V., Kashutina, E.A., Sidorova, M.V., Ershova, A.A., & Makeeva, I.N. (2021). Contribution of microparticles to the transport of pollution by rivers and groundwaters in a large city. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 834 (1), 012047. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/834/1/012047>.

35. Zhang Kai, Z.K., Gong Wen, G.W., Lv JiZhong, L.J., Xiong Xiong, X.X., & Wu ChenXi, W.C. (2015). Accumulation of floating microplastics behind the Three Gorges Dam. *Environmental Pollution*, 204, 117-123. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.04.023>.

36. Besednova, N.N., Shchelkanov, M.Yu., Zaporozhets, T.S., Galkina, I.V., Gmoshinsky, I.V., & Tutelyan, V.A. (2023). The influence of micro and nanoplastics on the gastrointestinal mucosa and intestinal microbiome. *Nutrition Issues*, 6 (550), 6-17. (in Russ.). <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2023-92-6-6-17>.

37. Vorob`ev, E.D., Trifonov, A.A., Raxmatullina, S.N., Vorob`ev, D.S., Frank, Yu.A. Vnutrigodovaya dinamika sodержaniya mikroplastika v poverxnostny`x vodax reki Tomi. // Materialy` I Vserossijskoj konferencii s mezhdunarodny`m uchastiem po zagryazneniyu okruzhayushhej sredy` mikroplastikom «MicroPlasticsEnvironment-2022» (MRE-2022), 02–06 avgusta 2022 g., p. Shira, Xakasiya / obshh. red. Yu.A. Frank. 58–62. (in Russ.).

38. Efimova, A.I., Zajcev, V.B., Boldy`rev, N.Yu., & Koshkarev, P.K. (2008). Infrakrasnaya fur`e-spektrometriya: Uchebnoe posobie. M.: Fizicheskij fakul`tet MGU. 133 p. (in Russ.).

39. Zobkov, M.B., & Esyukova, E.E. (2018). Mikroplastik v morskoj srede: obzor metodov otbora, podgotovki i analiza prob vody`, donny`x otlozhenij i beregovy`x nanosov. *Okeanologiya*, 58(1), 149-157. (in Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0030157418010148>.

40. Ivanova, E.V., & Tixonova, D.A. (2022). Ocenka sodержaniya chasticz mikroplastika v Ladozhskom ozere. *Trudy` Karel`skogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*, (6), 58-67. (in Russ.). <https://doi.org/10.17076/lim1582>.

41. Kazmiruk, V.D., & Kazmiruk, T.N. (2017). Mikroplastik v donny`x otlozheniyax: metody` opredeleniya. *Voda: ximiya i e`kologiya*, (1), 87-92. (in Russ.).

42. Karimov, E.X., & Daminev, R.R. (2012). Razvitie polimerov: ot gevei k makromolekule. *Istoriya i pedagogika estestvoznaniya*, 4, 18-26. (in Russ.).

43. Kaurova, Z. (2021). Soderzhanie mikroplastikov`x chasticz v vode v verxnem i srednem techenii reki Neva. *Norwegian Journal of Development of the International Science*, (76-1), 3. (in Russ.).

44. Kolobov, M.Yu., & Talanina, E.B. (2022). Mnogoletnyaya dinamika sodержaniya mikroplastika v poverxnostny`x vodax ozera Bajkal // Materialy` I Vserossijskoj konferencii s mezhdunarodny`m uchastiem po zagryazneniyu okruzhayushhej sredy` mikroplastikom «MicroPlasticsEnvironment-2022» (MRE-2022), 02–06 avgusta 2022 g., p. Shira, Xakasiya / obshh. red. Yu.A. Frank. 53–57. (in Russ.).

45. Lezin V.A. (2011). Vodnye resursy rek i ozer Tjumenskoj oblasti. Vestnik Tjumenskogo gosudarstvennogo universiteta. *Jekologija I prirodnopol'zovanie*, 12, 62-69. (in Russ.).

46. Nikitin, O.V., Laty`pova, V.Z., Ashixmina, T.Ya., Kuz`min, R.S., Nasy`rova, E`.I., Xaripov, I.I., & Minnegulova, L.M. (2020). Granulometricheskij sostav i sodержanie mikroskopicheskix chasticz sinteticheskix polimerov v presnovodny`x e`kosistemax. In *Utilizaciya otxodov proizvodstva i potrebleniya: innovacionny`e podxody` i texnologii* (pp. 62-67). (in Russ.).

47. Paxomova, S.V., Ershova, A.A., Zhdanov, I.A., & Yakushev, E.V. (2024). Metody` issledovaniya zagryazneniya mikroplastikom prirodny`x vod: sovremennoe sostoyanie i rekomendacii. *Okeanologicheskie issledovaniya*, 52(1), 80-120. (in Russ.). [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52\(1\).5](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(1).5).

48. Pozdnyakov, Sh.R., Ivanova, E.V., & Tixonova, D.A. (2022). Issledovanie zagryazneniya mikroplastikom akvatorii i pritokov Ladozhskogo ozera // *Materialy` I Vserossijskoj konferencii s mezhdunarodny`m uchastiem po zagryazneniyu okruzhayushhej sredy` mikroplastikom «MicroPlasticsEnvironment-2022» (MRE-2022)*, 02–06 avgusta 2022 g., p. Shira, Xakasiya / obshh. red. Yu.A. Frank. 19–23. (in Russ.).

49. Frank, Yu.A., Vorob`ev, E.D., Raxmatullina, S.N., Trifonov, A.A., & Vorob`ev, D.S. (2022). Skrining sodержaniya mikroplastika v poverxnostny`x vodax rossijskix rek. *E`kologiya i promy`shlennost` Rossii*, 26(9), 67-71. (in Russ.). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-9-67-71>.

50. Frank, Yu.A., Vorob`ev, E.D., Trifonov, A.A., Lemeshko, Ya.R., & Vorob`ev, D.S. (2022). Zagryaznenie rechnoj e`kosistemy` mikroplastikom na primere pritoka Eniseya, r. Nizhnyaya Tunguska / *Materialy` I Vserossijskoj konferencii s mezhdunarodny`m uchastiem po zagryazneniyu okruzhayushhej sredy` mikroplastikom «MicroPlasticsEnvironment-2022» (MRE-2022)*, 02–06 avgusta 2022 g., p. Shira, Xakasiya / obshh. red. Yu.A. Frank. 95–100. (in Russ.).

Литература

1. Ashton K., Holmes L., Turner A. Association of metals with plastic production pellets in the marine environment // *Marine Pollution Bulletin*. 2010. Vol. 60. P. 2050–2055. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.07.014>.

2. Baldwin A.K., Corsi S.R., Mason S.A. Plastic debris in 29 Great Lakes tributaries: relations to watershed attributes and hydrology // *Environmental science & technology*. 2016. Vol. 50. № 19. P. 10377–10385. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02917>.

3. Boerger C.M., Lattin G.L., Moore S.L., Moore C.J. Plastic ingestion by planktivorous fishes in the North Pacific Central Gyre // *Marine Pollution Bulletin*. 2010. Vol. 60. P. 2275–2278. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.08.007>.

4. Bora S.S., Bora S.S., Gogoi R., Sharma M.R., Anshu Borah M.P., Deka P., Teli A.B. Microplastics and human health: unveiling the gut microbiome disruption and chronic disease risks // *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*. 2024. Vol. 14. P. 1492759. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2024.1492759>.

5. Boucher J., Friot D. Primary Microplastics in the Oceans: A Global Evaluation of Sources. Gland, Switzerland: IUCN, 2017. 43 p. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2017.01.en>.

6. Browne M.A., Crump P., Niven S.J., Teuten E., Tonkin A., Galloway T., Thompson R. Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: sources and sinks // *Environmental science & technology*. 2011. Vol. 45. № 21. P. 9175-9179. <https://doi.org/10.1021/es201811s>.

7. Dümichen E., Eisentraut P., Celina M., Braun U. Automated thermal extraction-desorption gas chromatography mass spectrometry: A multifunctional tool for comprehensive characterization of polymers and their degradation products // *Journal of Chromatography A*. 2019. Vol. 1592. P. 133-142. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2019.01.033>.
8. Egessa R., Nankabirwa A., Ocaya H., Pabire W.G. Microplastic pollution in surface water of Lake Victoria // *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 741. P. 140201. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140201>.
9. Enyoh C.E., Shafea L., Verla A.W., Verla E.N., Qingyue W., Chowdhury T., Paredes M. Microplastics exposure routes and toxicity studies to ecosystems: an overview // *Environmental analysis, health and toxicology*. 2020. Vol. 35. № 1. <https://doi.org/10.5620/eaht.e2020004>.
10. Eo S., Hong S.H., Song Y.K., Han G.M., Shim W.J. Spatiotemporal distribution and annual load of microplastics in the Nakdong River, South Korea // *Water Research*. 2019. Vol. 160. P. 228-237. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.05.053>.
11. Frank Y.A., Vorobiev D.S., Kayler O.A., Vorobiev E.D., Kulinicheva K.S., Trifonov A.A., Soliman Hunter T. Evidence for microplastics contamination of the remote tributary of the Yenisei River, Siberia – The pilot study results // *Water*. 2021. Vol. 13. №. 22. P. 3248. <https://doi.org/10.3390/w13223248>.
12. Frank Y.A., Vorobiev E.D., Vorobiev D.S., Trifonov A.A., Antsiferov D.V., Soliman Hunter T., Strezov V. Preliminary screening for microplastic concentrations in the surface water of the Ob and Tom Rivers in Siberia, Russia // *Sustainability*. 2020. Vol. 13. №. 1. P. 80. <https://doi.org/10.3390/su13010080>.
13. Frank Y.A., Sotnikova Y.S., Tsygankov V.Y., Rednikin A.R., Donets M.M., Karpova E.V., Belanov M.A., Rakhmatullina S., Borovkova A.D., Polovyanenko D.N., et al. Pollution of Beach Sands of the Ob River (Western Siberia) with Microplastics and Persistent Organic Pollutants // *Journal of Xenobiot*. 2024. Vol. 14. P. 989–1002. <https://doi.org/10.3390/jox14030055>.
14. Galgani L., Loisel S.A. Plastic accumulation in the sea surface microlayer: an experiment-based perspective for future studies // *Geosciences*. 2019. Vol. 9. №. 2. P. 66. <https://doi.org/10.3390/GEOSCIENCES9020066>.
15. Guidelines on the monitoring and assessment of plastic litter and microplastics in the ocean (Kershaw P.J., Turra A. and Galgani F. editors), (IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP/ISA Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection) // *Rep. Stud. GESAMP*. 2019. № 99, 130 p. URL: <http://gesamp.org>.
16. Jiao J., Hu H., Chen G., Yang Z. Microplastics in surface waters of the Wei River, China // *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences, 2021. Vol. 251. P. 02090. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125102090>.
17. Karapanagioti H.K., Klontza I. Testing phenanthrene distribution properties of virgin plastic pellets and plastic eroded pellets found on Lesvos island beaches (Greece) // *Mar. Environ. Res*. 2008. Vol. 65. P. 283–290. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2007.11.005>.
18. Kvale K., Prowe A.E., Chien C.T., Landolfi A., Oschlies A. Zooplankton grazing of microplastic can accelerate global loss of ocean oxygen // *Nat. Commun*. 2021. Vol. 12. P. 2358. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22554-w>.

19. Lee Y., Cho J., Sohn J., Kim C. Health effects of microplastic exposures: current issues and perspectives in South Korea // *Yonsei Medical Journal*. 2023. Vol. 64. № 5. P. 301. <https://doi.org/10.3349/yjmj.2023.0048>.
20. Li B., Ding Y., Cheng X., Sheng D., Xu Z., Rong Q., Zhang, Y. Polyethylene microplastics affect the distribution of gut microbiota and inflammation development in mice // *Chemosphere*. 2020. Vol. 244. C. 125492. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125492>.
21. Lisina A.A., Platonov M.M., Lomakov O.I., Sazonov A.A., Shishova T.V., Berkovich A.K., Frolova N.L. Microplastic abundance in Volga River: Results of a pilot study in summer 2020 // *Geography, Environment, Sustainability*. 2021. Vol. 14. № 3. P. 82-93. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2021-041>.
22. Liu Y., Zhang J., Cai C., He Y., Chen L., Xiong X., Liu W. Occurrence and characteristics of microplastics in the Haihe River: an investigation of a seagoing river flowing through a megacity in northern China // *Environmental Pollution*. 2020. Vol. 262. P. 114261. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114261>.
23. Masura J., Baker J., Foster G., Arthur C. Laboratory methods for the analysis of microplastics in the marine environment: Recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments. NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R-48. 2015. 39 p. <http://dx.doi.org/10.25607/OBP-604>.
24. Nor N.H., Obbard J.P. Microplastics in Singapore's coastal mangrove ecosystems // *Marine Pollution Bulletin*. 2014. Vol. 79(1-2). P. 278-283. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.11.025>.
25. Pozdnyakov S.R., Ivanova E.V., Guzeva A.V., Shalunova E.P., Martinson K.D., Tikhonova D.A. Studying the concentration of microplastic particles in water, bottom sediments and subsoils in the coastal area of the Neva Bay, the Gulf of Finland // *Water resources*. 2020. Vol. 47. № 4. P. 599-607. <https://doi.org/10.1134/S0097807820040132>.
26. Prata J.C., Da Costa J.P., Duarte A.C., Rocha-Santos T. Methods for sampling and detection of microplastics in water and sediment: A critical review // *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2019. Vol. 110. P. 150-159. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.10.029>.
27. Prata J.C. Microplastics in wastewater: State of the knowledge on sources, fate and solutions // *Marine Pollution Bulletin*. 2018. Vol. 129(1). P. 262-265. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.02.046>.
28. Ramaremsa G., Ndlovu M., Saad D. Comparative assessment of microplastics in surface waters and sediments of the Vaal River, South Africa: abundance, composition, and sources // *Environmental Toxicology and Chemistry*. 2022. Vol. 41. № 12. P. 3029-3040. <https://doi.org/10.1002/etc.5482>.
29. Sekudewicz I., Dąbrowska A. M., Syczewski M. D. Microplastic pollution in surface water and sediments in the urban section of the Vistula River (Poland) // *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 762. P. 143111. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143111>.
30. Sheveleva S.A., Markova Y.M., Efimochkina N.R., Minaeva L.P., Bykova I.B., Zinurova E.E., Khotimchenko S.A. Microbial risks associated with microplastics in the food chain and possible control measures (literature review). Part 1. Dietary intake and influence on the gut microbiota // *Hygiene and Sanitation*. 2023. Vol. 102. № 12. P. 1334-1347. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-12-1334-1347>.
31. Stock F.B., Narayana V.K., Scherer C., Löder M.G., Brennholt N., Laforsch C., Reifferscheid G. Pitfalls and limitations in microplastic analyses // *Plastics in the Aquatic Environment-Part I: Current Status and Challenges*. Cham: Springer International Publishing, 2020. P. 13-42. https://doi.org/10.1007/698_2020_654.

32. Tamargo A., Molinero N., Reinos J.J., Alcolea-Rodriguez V., Portela R., Bañares M.A., Moreno-Arribas M.V. PET microplastics affect human gut microbiota communities during simulated gastrointestinal digestion, first evidence of plausible polymer biodegradation during human digestion // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. №. 1. P. 528. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04489-w>.
33. The UN Environment (UNEP). Annual Report. 2023. 24 p. URL: <https://clck.ru/3HPbPt> (дата обращения: 05.12.2024).
34. Yasinskii S.V., Venitsianov E.V., Kashutina E.A., Sidorova M.V., Ershova A.A., Makeeva I.N. Contribution of microparticles to the transport of pollution by rivers and groundwaters in a large city // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2021. Vol. 834. № 1. P. 012047.
35. Zhang Kai Z.K., Gong Wen G.W., Lv JiZhong L.J., Xiong Xiong X.X., Wu ChenXi W.C. Accumulation of floating microplastics behind the Three Gorges Dam // *Environmental Pollution*. Vol. 204. 2015. P. 117-123. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.04.023>.
36. Беседнова Н.Н., Щелканов М.Ю., Запорожец Т.С., Галкина И.В., Гмошинский И.В., Тутельян В.А. Влияние микро и нанопластика на слизистую оболочку желудочно-кишечного тракта и кишечный микробиом // *Вопросы питания*. 2023. №6 (550). С. 6-17. <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2023-92-6-6-17>
37. Воробьев Е.Д., Трифонов А.А., Рахматуллина С.Н., Воробьев Д.С., Франк Ю.А. Внутригодовая динамика содержания микропластика в поверхностных водах реки Томи // *Материалы I Всероссийской конференции с международным участием по загрязнению окружающей среды микропластиком «MicroPlasticsEnvironment-2022» (МРЕ-2022), 02–06 августа 2022 г., п. Шира, Хакасия / общ. ред. Ю.А. Франк. Томск: Издательство Томского государственного университета, 2022. С. 58–62.*
38. Ефимова А.И., Зайцев В.Б., Болдырев Н.Ю., Кашкаров П.К. Инфракрасная фурье-спектрометрия: Учебное пособие. М.: Физический факультет МГУ, 2008. 133 с.
39. Зобков М.Б., Есюкова Е.Е. Микропластик в морской среде: обзор методов отбора, подготовки и анализа проб воды, донных отложений и береговых наносов // *Океанология*. 2018. Т. 58. № 1. С. 149-157. <https://doi.org/10.7868/S0030157418010148>.
40. Иванова Е.В., Тихонова Д.А. Оценка содержания частиц микропластика в Ладожском озере // *Труды Карельского научного центра РАН*. 2022. № 6. С. 58–67. <https://doi.org/10.17076/lim1582>.
41. Казмирук В.Д., Казмирук Т.Н. Микропластик в донных отложениях: методы определения // *Вода: химия и экология*. 2017. № 1(103). С. 87-92.
42. Каримов Э.Х., Даминев Р.Р. Развитие полимеров: от гевей к макромолекуле // *История и педагогика естествознания*. 2012. № 4. С. 18-26.
43. Каурова З.Г. Содержание микропластиковых частиц в воде в верхнем и среднем течении реки Нева // *Norwegian Journal of development of the International*. 2021. №. 76-1. С. 3.
44. Колобов М.Ю., Таланина Е.Б. Многолетняя динамика содержания микропластика в поверхностных водах озера Байкал // *Материалы I Всероссийской конференции с международным участием по загрязнению окружающей среды микропластиком «MicroPlasticsEnvironment-2022» (МРЕ-2022), 02–06 августа 2022 г., п. Шира, Хакасия / общ. ред. Ю.А. Франк. Томск: Издательство Томского государственного университета, 2022. С. 53–57.*

45. Лезин В.А. Водные ресурсы рек и озер Тюменской области. Вестник Тюменского государственного университета // Экология и природопользование. 2011. 12. С. 62-69.

46. Никитин О.В., Латыпова В.З., Ашихмина Т.Я., Кузьмин Р.С., Насырова Э.И., Харипов И.И., Миннегулова Л.М. Гранулометрический состав и содержание микроскопических частиц синтетических полимеров в пресноводных экосистемах // В сборнике: Утилизация отходов производства и потребления: инновационные подходы и технологии. Материалы II Всероссийской научно-практической конференции. (г. Киров 17 ноября 2020 г.) Киров, 2020. С. 62-67.

47. Пахомова С.В., Ершова А.А., Жданов И.А., Якушев Е.В. Методы исследования загрязнения микропластиком природных вод: современное состояние и рекомендации // Океанологические исследования. 2024. Т. 52. № 1. С. 80–120. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52\(1\).5](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(1).5).

48. Поздняков Ш.Р., Иванова Е.В., Тихонова Д.А. Исследование загрязнения микропластиком акватории и притоков Ладожского озера // Материалы I Всероссийской конференции с международным участием по загрязнению окружающей среды микропластиком «MicroPlasticsEnvironment-2022» (МРЕ-2022), 02–06 августа 2022 г., п. Шира, Хакасия / общ. ред. Ю.А. Франк. Томск: Издательство Томского государственного университета, 2022. С. 19–23.

49. Франк Ю.А., Воробьев Е.Д., Рахматуллина С.Н., Трифонов А.А., Воробьев Д.С. Скрининг содержания микропластика в поверхностных водах Российских рек // Экология и промышленность России. 2022. Т. 26. № 9. С. 67–71. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2022-9-67-71>.

50. Франк Ю.А., Воробьев Е.Д., Трифонов А.А., Лемешко Я.Р., Воробьев Д.С. Загрязнение речной экосистемы микропластиком на примере притока Енисея, р. Нижняя Тунгуска // Материалы I Всероссийской конференции с международным участием по загрязнению окружающей среды микропластиком «MicroPlasticsEnvironment-2022» (МРЕ-2022), 02–06 августа 2022 г., п. Шира, Хакасия / общ. ред. Ю.А. Франк. Томск: Издательство Томского государственного университета, 2022. С. 95–100.

дата поступления: 17.12.2024

дата принятия: 06.02.2025

© Tomilov A.S., Storchak T.V., Gogoi S.B., Bitner M.I., Didenko N.A., 2025