



ВЕСТНИК
ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА

ISSN 1998-8591
EISSN 2311-2077

БИОЛОГИЯ

2025 № 71



TOMSK STATE UNIVERSITY
Journal of Biology

ВЕСТНИК ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА БИОЛОГИЯ

Tomsk State University Journal of Biology

Научный журнал

2025

№ 71

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере
массовых коммуникаций, связи и охраны культурного наследия
(свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-29499 от 27 сентября 2007 г.)

Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» 44024

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» Высшей аттестационной комиссии

16+



Учредитель – Томский государственный университет

Научный журнал «Вестник Томского государственного университета. Биология» публикует результаты завершённых оригинальных исследований (теоретические и экспериментальные статьи) в различных областях современной биологии, ранее нигде не публиковавшиеся и не представленные к публикации в другом издании; публикуются описания принципиально новых методов исследования, обзорные статьи по отдельным проблемам. Основные требования к представляемым рукописям: новизна и обоснованность фактического материала, ясность, сжатость изложения, воспроизводимость экспериментальных данных. Решение о публикации принимается редколлегией после рецензирования, учитывая соответствие материала тематике журнала, актуальность проблемы, научную и практическую новизну и значимость, профессионализм выполнения работы. Принимаются статьи на русском и английском языках. Средний срок публикации 6–9 месяцев. Журнал выходит ежеквартально. Публикации осуществляются на некоммерческой основе. Все опубликованные материалы находятся в свободном доступе.

Индексируется: SCOPUS; Web of Science (Biological Abstracts, BIOSIS Previews, Emerging Sources Citation Index, Zoological Record, RSCI); Google Scholar; eLIBRARY.RU; CYBERLENINKA. Внесён в Ulrich's Periodicals Directory.

Адрес редакции: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Биологический институт; сайт: <http://journals.tsu.ru/biology/>

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Воробьев Д.С. – гл. редактор (Томский государственный университет, Томск, Россия)
Покровский О.С. – зам. гл. редактора (Национальный центр научных исследований, Тулуза, Франция)
Артемов Г.Н. – редактор (Томский государственный университет, Томск, Россия)
Баранова О.Г. – редактор (Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН, Санкт-Петербург, Россия)
Бобровский М.В. – редактор (Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пушкино, Россия)
Волокитина А.В. – редактор (Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия)
Горошкевич С.Н. – редактор (Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия)
Громоных Т.И. – редактор (Московский политехнический университет, Москва, Россия)
Денисов Е.В. – редактор (НИИ онкологии Томского НИМЦ РАН, Томск, Россия)
Дорогина О.В. – редактор (Центральный сибирский ботанический сад СО РАН, Новосибирск, Россия)
Зверев А.А. – редактор (Томский государственный университет, Томск, Россия)
Иванов Ю.В. – редактор (Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева РАН, Москва, Россия)
Кривец С.А. – редактор (Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Томск, Россия)
Кулижский С.П. – редактор (Томский государственный университет, Томск, Россия)
Лойко С.В. – редактор (Томский государственный университет, Томск, Россия)
Минеева Н.М. – редактор (Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанова РАН, пос. Борок, Россия)
Симакова А.В. – редактор (Томский государственный университет, Томск, Россия)
Тарасов В.В. – редактор (Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург, Россия)
Франк Ю.А. – редактор (Томский государственный университет, Томск, Россия)
Шефтель Б.И. – редактор (Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия)
Штерншис М.В. – редактор (Всероссийский научно-исследовательский институт биологической защиты растений, Краснодар, Россия)
Раудина Т.В. – отв. секретарь (Томский государственный университет, Томск, Россия), e-mail: biotsu@mail.ru

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Александровский А.Л. (Институт географии РАН, Москва, Россия); **Ананьева Н.Б.** (Зоологический институт РАН, Санкт-Петербург, Россия); **Афтанас Л.И.** (НИИ физиологии и экспериментальной медицины СО РАМН, Новосибирск, Россия); **Васильева Е.Д.** (Зоомузей МГУ, Москва, Россия); **Дюбуа А.** (Национальный музей естественной истории, Париж, Франция); **Зеллер Б.** (Национальный институт агрономических исследований, Нанси, Франция); **Зинченко Т.Д.** (Институт экологии Волжского бассейна РАН, Тольятти, Россия); **Кингма Г.** (Маастрихтский университет, Маастрихт, Нидерланды); **Крюков В.Ю.** (Институт систематики и экологии животных СО РАН, Новосибирск, Россия); **Кузнецов В.В.** (Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева РАН, Москва, Россия); **Лодыгин Е.Д.** (Институт биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия); **Лунашин В.В.** (Университет Арканзаса медицинских наук, Арканзас, США); **Максимов Т.Х.** (Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, Якутск, Россия); **Носов А.М.** (Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия); **Оленников Д.Н.** (Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН, Улан-Удэ, Россия); **Пердисс А.** (Национальный Музей естественных наук, Мадрид, Испания); **Смирнова О.В.** (Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, Россия); **Соколова Ю.Я.** (Университет Луизианы, Батон Руж, Луизиана, США); **Степанов В.А.** (НИИ медицинской генетики Томского НЦ СО РАМН, Томск, Россия); **Торчик В.И.** (Центральный ботанический сад НАН Беларуси, Минск, Беларусь); **Шарахов И.В.** (Политехнический университет Вирджинии, Вирджиния, США).

Издательство: Издательство Томского государственного университета. Редактор Е.В. Иванова; редактор-переводчик В.В. Воздвиженский; компьютерная верстка Е.В. Ивановой; дизайн обложки Л.Д. Кривцовой.

Подписано в печать 29.09.2025 г. Формат 70×108^{1/16}. Усл. печ. л. 21,7. Тираж 50 экз. Заказ № 6463. Цена свободная. Дата выхода в свет 14.10.2025 г.

Журнал отпечатан на полиграфическом оборудовании Издательства ТГУ.

пр. Ленина, 36, Томск, 634050, Россия. Тел. +7 (382 2) 52-98-49. Сайт: <http://publish.tsu.ru>. E-mail: rio.tsu@mail.ru

About *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Biologiya* = *Tomsk State University Journal of Biology*

Founder - Tomsk State University

Tomsk State University Journal of Biology is a quarterly international and peer-reviewed scientific journal publishing the results of the completed experimental research, reviews and novel methods of research in Biological Sciences on the basis of its originality, importance, scientific character, validity, precision and clarity. The Journal is intended for a broad range of scientists and experts in biology and ecology.

The editorial board of the *Tomsk State University Journal of Biology* commits to the internationally accepted principles of publication ethics expressed.

International standard serial edition number: EISSN 2311-2077, ISSN 1998-8591

Language: Russian, English

Publications are on non-commercial basis (FREE)

Open access

Publication timeframe: 6-9 months

All manuscripts are to be reviewed: double blind peer review (2-10-weeks)

Abstracting and Indexing: SCOPUS; Web of Science (Biological Abstracts, BIOSIS Previews, Emerging Sources Citation Index, Zoological Record, RSCI); Google Scholar; eLIBRARY.RU; CYBERLENINKA; Ulrich's Periodicals Directory

Contact the Journal

Tomsk State University, Institute of Biology, 36 Lenin Ave., Tomsk 634050, Russian Federation

e-mail: biotsu@mail.ru, <http://journals.tsu.ru/biology/en/>

Editor-in-Chief - Danil S. Vorobiev, Tomsk State University (Tomsk, Russia)

Co-Editor-in-Chief - Oleg S. Pokrovsky, National Centre for Scientific Research (Toulouse, France)

Associate Editor - Tatiana V. Raudina, Tomsk State University (Tomsk, Russia)

EDITORIAL BOARD

Danil S. Vorobiev - Editor-in-Chief, Tomsk State University, Tomsk, Russia

Oleg S. Pokrovsky - Co-Editor-in-Chief, National Centre for Scientific Research, Toulouse, France

Gleb N. Artemov - Editor, Tomsk State University, Tomsk, Russia

Olga G. Baranova - Editor, Komarov Botanical Institute, RAS, St. Petersburg, Russia

Maxim V. Bobrovsky - Editor, Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science, RAS, Pushchino, Russia

Alexandra V. Volokitina - Editor, Sukachev Institute of Forest, SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

Sergei N. Goroshkevich - Editor, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, SB RAS, Tomsk, Russia

Tatyana I. Gromovyykh - Editor, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

Evgeny V. Denisov - Editor, Cancer Research Institute of Tomsk NRC, Tomsk, Russia

Olga V. Dorogina - Editor, Central Siberian Botanical Garden, SB RAS, Novosibirsk, Russia

Andrei A. Zverev - Editor, Tomsk State University, Tomsk, Russia

Yury V. Ivanov - Editor, Timiryazev Institute of Plant Physiology, RAS, Moscow, Russia

Svetlana A. Krivets - Editor, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, SB RAS, Tomsk, Russia

Sergey P. Kulizhskiy - Editor, Tomsk State University, Tomsk, Russia

Sergey V. Loiko - Editor, Tomsk State University, Tomsk, Russia

Natalya M. Mineeva - Editor, Papanin Institute for Biology of Inland Waters, RAS, Borok, Russia

Anastasia V. Simakova - Editor, Tomsk State University, Tomsk, Russia

Vladimir V. Tarasov - Editor, Institute of Plant and Animal Ecology, RAS, Yekaterinburg, Russia

Yulia A. Frank - Editor, Tomsk State University, Tomsk, Russia

Boris I. Sheftel - Editor, Severtsov Institute of Ecology and Evolution, RAS, Moscow, Russia

Margarita V. Shternshis - Editor, All-Russian Research Institute of Biological Plant Protection, Krasnodar, Russia

Tatiana V. Raudina - Associate Editor, Tomsk State University, Tomsk, Russia, e-mail: biotsu@mail.ru

EDITORIAL COUNCIL

Alexandrovskiy AL, Institute of Geography, RAS (Moscow, Russia); **Ananjeva NB**, Zoological Institute, RAS (St. Petersburg, Russia); **Aftanas LI**, State Research Institute of Physiology, SB RAMS (Novosibirsk, Russia); **Vasil'eva ED**, Zoological Museum, MV Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia); **Dubois A**, French National Museum of Natural History (Paris, France); **Zeller B**, French National Institute for Agricultural Research (Nancy, France); **Zinchenko TD**, Institute of Ecology of the Volga River Basin, RAS (Togliatti, Russia); **Kingma H**, Maastricht University (Maastricht, Netherlands); **Kryukov VY**, Institute of Systematics and Ecology of Animals, SB RAS (Novosibirsk, Russia); **Kuznetsov VIV**, Timiryazev Institute of Plant Physiology, RAS (Moscow, Russia); **Lodygin ED**, Institute of Biology of Komi Scientific Centre, UB RAS (Syktyvkar, Russia); **Lupashin VV**, University of Arkansas for Medical Sciences (Arkansas, USA); **Maximov TC**, Institute for Biological Problems of the Cryolithosphere, SB RAS (Yakutsk, Russia); **Nosov AM**, MV Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia); **Oleennikov DN**, Institute of General and Experimental Biology, SB RAS (Ulan-Ude, Russia); **Perdices A**, National Museum of Natural Sciences (Madrid, Spain); **Smirnova OV**, Center of Ecology and Productivity of Forests, RAS (Moscow, Russia); **Sokolova YY**, Louisiana State University (Baton Rouge, Louisiana, USA); **Stepanov VA**, Research Institute of Medical Genetics, SB RAMS (Tomsk, Russia); **Torchyk VI**, Central Botanical Garden of the National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Republic of Belarus); **Sharakhov IV**, Virginia Polytechnic Institute and State University (Blacksburg, Virginia, USA)

PUBLISHER: TSU Publ. (Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation).

Editor EV Ivanova; Translator/Editor VV Vozdvizhenskij; computer layout by EV Ivanova; cover design by LD Krivtsova.

Passed for printing 29.09.2025. Format 70×108¹/₁₆. Conventional printed sheets 21,7. Circulation is 50 copies. Orders No. 6463. Open price. Date of publication 14.10.2025.

36 Lenin Ave., Tomsk 634050, Russian Federation. Tel. +7 (382 2) 52-98-49. <http://publish.tsu.ru>. E-mail: rio.tsu@mail.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ПОЧВОВЕДЕНИЕ

Васильева Т.И., Легостаева Я.Б. Трансформация минерального состава мерзлотных почв, сформированных на осадочных отложениях северной тайги Средней Сибири	8
Смирнова М.А., Чендев Ю.Г., Нарожняя А.Г. Локальное разнообразие непаханых черноземов лесостепи Среднерусской возвышенности (Европейская Россия)	32

БИОТЕХНОЛОГИЯ И МИКРОБИОЛОГИЯ

Королева О.В., Молканова О.И., Крахмалева И.Л., Орлова Н.Д. Влияние регуляторов роста на морфогенез и регенерацию сортов <i>Syringa vulgaris</i> в условиях <i>in vitro</i>	58
Сысоева А.Н., Ивасенко М.Д., Ивасенко Д.А., Герасимчук А.Л. Изучение потенциала штаммов <i>Pseudomonas protegens</i> A-CMC-05 и <i>Gordonia paraffinivorans</i> A-CMC-11 для использования в сельскохозяйственной биотехнологии	80

БОТАНИКА

Шерemet Н.В., Сафронова О.С., Ламанова Т.Г. Естественное восстановление растительного покрова на двадцатилетних отвалах угольного разреза «Черногорский» в Республике Хакасия	101
--	-----

ЗООЛОГИЯ

Ярцев В.В. Обращение к читателю	122
Бабкина И.Б., Симакова А.В., Бабкин А.М., Соловьев М.Я.А. Биологические особенности сибирского пескаря <i>Gobio sibiricus</i> (Cyprinidae) и его зараженность метацеркариями <i>Opisthorchis felineus</i> в бассейне реки Томь (Томская область, Россия)	123
Евсеева С.С., Ярцев В.В., Маслова И.В., Рогашевская Д.А. Морфологические приспособления кожи уссурийского когтистого тритона <i>Onychodactylus fischeri</i> и сибирского углозуба <i>Salamandrella keyserlingii</i> (Amphibia: Caudata, Hynobiidae) к водной среде	138
Ярцев В.В., Деридов Д.А., Соловьёва С.С., Батрагин А.В., Бабкина И.Б. Выделение лектотипа сибирской миноги <i>Lethenteron kessleri</i> (Anikin, 1905) (Petromyzontiformes: Petromyzontidae)	156
Katasonova P.A., Shapovalov A.A., Korobitsyn I.G. Current status of forest-steppe marmot <i>Marmota kastschenkoi</i> settlements on the northern periphery of its range (Tomsk Oblast) and problems of its protection	169
Kuranova V.N., Zaiko A.V., Frank Y.A. Microplastics in reptiles: Assessment of particle content in viviparous and sand lizard populations (<i>Zootoca vivipara</i> , <i>Lacerta agilis</i> , Lacertidae) and common adder (<i>Vipera berus</i> , Viperidae) from Western Siberia	185

КЛЕТочная Биология и Генетика

Бабынин Э.В., Царькова Ю.Р., Дегтярева И.А. Характеристика генома штамма *Stutzerimonas stutzeri*, выделенного из нефтезагрязненной почвы Татарстана 199

Марушак А.В., Торгунакова А.В., Титов Р.А., Соболева О.А., Елисейкин А.М., Киселева Е.А., Савченко Я.А., Минина В.И. Оценка величины повреждений ядерной ДНК у работников угольных теплоэлектростанций с помощью микроядерного теста с цитокинетическим блоком в связи с индивидуальными вариантами генов системы репарации ДНК *XRCC1*, *XRCC3*, *XRCC4* 217

Краткие Сообщения

Коробицын И.Г., Милешкина М.Т. О первой находке золотистой щурки *Merops apiaster* Linnaeus, 1758 на гнездовании в Томской области 237

Тарасов В.В. Гнездовые находки малого баклана *Phalacrocorax pygmeus* (Pallas, 1773) и каравайки *Plegadis falcinbellus* (Linnaeus, 1766) в Курганской области (Западная Сибирь) 243

TABLE OF CONTENTS

SOIL SCIENCE

Vasileva TIg, Legostaeva YaB. The transformation of mineral composition of permafrost soils formed on sedimentary deposits of the northern taiga in Central Siberia	8
Smirnova MA, Chendev YuG, Narozhnaya AG. Local diversity of untitled chernozem soils in the forest-steppe of the Central Russian Upland (European Russia)	32

BIOTECHNOLOGY AND MICROBIOLOGY

Koroleva OV, Molkanova OI, Krakhmaleva IL, Orlova ND. The effect of growth regulators on the <i>in vitro</i> morphogenesis and regeneration of <i>Syringa vulgaris</i> cultivars	58
Sysoeva AN, Ivashenko MD, Ivashenko DA, Gerasimchuk AL. Study of the potential of <i>Pseudomonas Protegens</i> A-CMC-05 and <i>Gordonia Paraffinivorans</i> A-CMC-11 strains for use in agricultural biotechnology	80

BOTANY

Sheremet NV, Safronova OS, Lamanova TG. Natural revegetation of the 20-year-old “Chernogorsky” spoil dump in the Republic of Khakassia	101
---	-----

ZOOLOGY

Yartsev VV. Addressing the reader	122
Babkina IB, Simakova AV, Babkin AM, Soloviev MYA. Biological characteristics of the Siberian gudgeon <i>Gobio sibiricus</i> (Cyprinidae) and its infection with metacercariae <i>Opisthorchis felinus</i> in the Tom River basin (Tomsk Oblast, Russia)	123
Evseeva SS, Yartsev VV, Maslova IV, Rogashevskaya DA. Morphological adaptations of the skin of <i>Onychodactylus fischeri</i> and <i>Salamandrella keyserlinigii</i> (Amphibia: Caudata, Hynobiidae) to the aquatic environment	138
Yartsev VV, Deridov DA, Soloveva SS, Batranin AV, Babkina IB. Designation of a lectotype for Siberian lamprey <i>Lethenteron kessleri</i> (Anikin, 1905) (Petromyzotiformes: Petromyzontidae)	156
Katasonova PA, Shapovalov AA, Korobitsyn IG. Current status of forest-steppe marmot <i>Marmota kastschenkoi</i> settlements on the northern periphery of its range (Tomsk Oblast) and problems of its protection	169
Kuranova VN, Zaiko AV, Frank YA. Microplastics in reptiles: Assessment of particle content in viviparous and sand lizard populations (<i>Zootoca vivipara</i> , <i>Lacerta agilis</i> , Lacertidae) and common adder (<i>Vipera berus</i> , Viperidae) from Western Siberia	185

CELL BIOLOGY AND GENETICS

- Babynin EV, Tsarkova YuR, Degtyareva IA.** Genome characteristics of the *Stutzerimonas stutzeri* strain isolated from oil-contaminated soil of Tatarstan 199
- Marushchak AV, Torgunakova AV, Titov RA, Soboleva OA, Elisejkin AM, Kiseleva EA, Savchenko YA, Minina VI.** Estimation of the magnitude of nuclear DNA damage in coal thermal power plant workers using a micronucleus test with a cytokinetic block in connection with individual variants of the genes of the DNA repair system *XRCC1, XRCC3, XRCC4* 217

BRIEF COMMUNICATIONS

- Korobitsyn IG, Mileshkina MT.** The first finding of nesting of the European Bee-eater *Merops apiaster* Linnaeus, 1758 in the Tomsk Oblast (Western Siberia) 237
- Tarasov VV.** Breeding records of the Pygmy Cormorant *Phalacrocorax pygmeus* (Pallas, 1773) and Glossy Ibis *Plegadis falcinbellus* (Linnaeus, 1766) in the Kurgan Oblast (Western Siberia) 243

ПОЧВОВЕДЕНИЕ

Научная статья

УДК 631.4

doi: 10.17223/19988591/71/1

Трансформация минерального состава мерзлотных почв, сформированных на осадочных отложениях северной тайги Средней Сибири

Татьяна Игнатьевна Васильева¹, Яна Борисовна Легостаева²

^{1, 2} *Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия*

¹ <https://orcid.org/0000-0002-9203-9193>, vasilevatig@yandex.ru

² <https://orcid.org/0000-0002-1556-9182>, ylego@mail.ru

Аннотация. В последние десятилетия активно исследуются процессы почвообразования в регионах с суровыми климатическими условиями. Эти территории не характеризуются активным накоплением свежего материала, и, как считается, здесь не наблюдается ярко выраженной дифференциации химического состава по горизонтам. В данной работе рассматривается возможность применения геохимического подхода для анализа изменений состава генетических горизонтов почв, формирующихся в суровых климатических условиях северной тайги Далдын-Алакитского района Западной Якутии (66°24'N, 112°17'E). Установлено, что рассматриваемые типы почв имеют схожие валовые концентрации основных оксидов и близкий минералогический состав с преобладанием кварца, полевых шпатов, карбонатов и слоистых силикатов. Результаты сканирующей электронной микроскопии показывают различия в морфологических признаках микрочастиц почвы. Почвенные агрегаты в криоземах и глееземах имеют более округлую форму и меньший размер (около 10 мкм) в верхних горизонтах по сравнению с нижними. Исследованные почвы также различаются по экзотермическим эффектам сгорания органического вещества, что отражается на термограммах. Для геохимической характеристики почв на основе данных валового химического анализа были проведены расчеты оксидных соотношений и ряда коэффициентов химического выветривания. Анализ геохимических коэффициентов позволил выявить различия между почвами по отношению к почвообразующей породе. Он подтвердил, что развитие почвообразовательных процессов наименее выражено в литоземах, глееземы занимают промежуточное положение, а криоземы наиболее подвержены педогенезу. Основные морфогенетические различия наблюдаются между почвами с более высоким содержанием органического углерода. Использование геохимических коэффициентов помогает выявить изменения минералогического состава криогенных почв и более контрастно отражает дифференциацию почвенных профилей постлитогенных почв.

Ключевые слова: криоземы (Cryosols), глееземы (Gleysols), литоземы (Lertosols), физико-химические свойства, отношение оксидов, коэффициенты выветривания

Источник финансирования: работа подготовлена в рамках выполнения проектов Государственного задания Министерства образования РФ № FUGG-2024-0007 «Мантйный магматизм, эволюция литосферы и рудоносность восточной части Сибирской платформы, геоэкология недропользования».

Благодарности: авторы признательны участникам полевых и химико-аналитических работ лаборатории геоэкологии и биогеохимии и отдела физико-химических методов анализа.

Для цитирования: Васильева Т.И., Легостаева Я.Б. Трансформация минерального состава мерзлотных почв, сформированных на осадочных отложениях северной тайги Средней Сибири // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2025. № 71. С. 8–31. doi: 10.17223/19988591/71/1

Original article

doi: 10.17223/19988591/71/1

The transformation of mineral composition of permafrost soils formed on sedimentary deposits of the northern taiga in Central Siberia

Tatiana Ig. Vasileva¹, Yana B. Legostaeva²

^{1, 2} *Diamond and Precious Metal Geology Institute of the Siberian Branch of the RAS, Yakutsk, Russian Federation*

¹ <https://orcid.org/0000-0002-9203-9193>, vasilevatig@yandex.ru

² <https://orcid.org/0000-0002-1556-9182>, ylego@mail.ru

Summary. In recent years, soil formation processes have been actively studied in areas with harsh climatic conditions and dominating post-lithogenic soils. It is assumed that there is no active accumulation of fresh material in these soils and there is no differentiation of chemical composition along the horizons. The prediction of intensity and direction of soil processes is crucial due to climate warming and the expansion of mineral resource extraction. One of the least studied soil parameters is the mineralogical composition of coarse fractions and its changes during soil formation. The unique geological structure and rich mineralogical composition of deposits, combined with harsh climatic conditions, result in highly specific mineral transformation processes during cryogenic weathering.

The paper reflects the possibility of using a geochemical approach to analyse the transformation of the soil column composition in relation to the genetic horizons and the parent rock. For the research on the territory of the Daldyn-Alakit mining district (66°24'N, 112°17'E) located in the northeastern part of the Central Siberian Plateau, soil sections of the most predominant soil types (Cryosols, Gleysols, and Leptosols divisions) have been established. The soils are formed on eluvial-deluvial-solifluction deposits with close occurrence of bedrock, represented by dense dolomites, yellowish limestones and oolitic dolomite limestones. The climate of the region is strongly continental with long cold winters and short summers, the average monthly temperature in January is -33...-38°C, in July +16...+18°C, the amount of precipitation is low (about 247 mm).

The most typical pedons (See Fig. 1), physicochemical properties, and bulk composition of the soils (See Tables 1, 2) are described along with X-ray diffraction (XRD), thermogravimetric (TGA), and scanning electron microscopy (SEM) analyses (See Figs. 2-4). The main physicochemical indicators include a slightly acidic reaction in the upper organogenic horizon and a near-neutral reaction lower in the profile, relatively high carbon content (up to 10% in the upper and 1-3% in the lower horizons),

and a heavy granulometric composition (See Table 1). The bulk chemical composition of the studied soil types in the Daldyn-Alakit mining district is quite similar (See Table 2). By weight, the major oxides follow this decreasing order: $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{CaO} > \text{MgO} > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{K}_2\text{O} > \text{TiO}_2 > \text{Na}_2\text{O} > \text{MnO}$. The behavior of dominant oxides in the soils depends not on the subtype or main soil-forming process but correlates well with organic matter content. The studied soil types are similar in mineralogical composition, consisting of quartz, feldspars, carbonates, and layered silicates. Scanning electron microscopy revealed common micromorphological features of pedogenesis. Soil aggregates in Cryosols and Gleysols have a more rounded shape and smaller size (about 10 μm) in the upper horizon compared to the lower one. The thermograms of the soils differ in exothermic and endothermic effects, reflecting key genetic characteristics within each soil type. The predominance of humic acid combustion in Cryosols, compared to other soils, indicates more intensive decomposition of plant residues due to microbial activity (See Figs. 2-4).

For the geochemical characteristics of the soils, calculations of oxide ratios and a series of coefficients (chemical weathering in soils of G.J. Retallack, CIA and ICV) were carried out on the basis of gross chemical analysis data. The weak eluvial-illuvial differentiation is also evident in the molar ratios of $\text{SiO}_2 \div \text{R}_2\text{O}_3$ and $\text{R}_2\text{O} \div \text{Al}_2\text{O}_3$, with differences between horizons observed in the $\text{RO} \div \text{Al}_2\text{O}_3$ ratio. Overall, biological activity and productivity in permafrost-affected soils of the northern taiga are low, but the calculated coefficient values increase in the upper organogenic horizons compared to mineral horizons (See Table 3). Analysis of geochemical coefficients revealed soil heterogeneity relative to the parent material at the level of morphogenetic characteristics (See Figs. 5a, 5b). Soil-forming processes are least pronounced in Leptosols, while Gleysols occupy an intermediate position. Cryosols are the most sensitive to pedogenesis. The main morphogenetic differences occur between soils with higher organic carbon content. The use of geochemical coefficients helps identify changes in the mineral composition of permafrost-affected soils and more distinctly reflects the differentiation of post-lithogenic soil profiles. All studied soils exhibit relatively low weathering indices, indicating minor alterations in mineral composition. However, an increase in the clay fraction relative to the parent material is observed. Biochemical weathering is likely to play a greater role in the transformation of the mineral soil component. In terms of the degree of soil material transformation, the investigated permafrost-affected soils of the northern taiga landscapes can be ranked as follows: Leptosols $\rightarrow$ Gleysols $\rightarrow$ Cryosols.

The article contains 5 Figures, 3 Tables, 44 References.

Keywords: Cryosols, Gleysols, Leptosols, physico-chemical and thermogravimetric properties, mineralogical composition, ratio of oxides, weathering coefficients

Fundings: this work was partially supported by the government assignment of the Ministry of Education of the Russian Federation No. FUG-2024-0007 “Mantle magmatism, evolution of the lithosphere and ore content of the eastern part of the Siberian platform, geoecology of subsoil use”.

Acknowledgments: the authors are grateful to the participants of the field and chemical-analytical works of the Laboratory of geoecology and biogeochemistry and the Department of physical and chemical methods of analysis.

For citation: Vasileva TIg, Legostaeva YaB. The transformation of mineral composition of permafrost soils formed on sedimentary deposits of the northern taiga in Central Siberia. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya* = *Tomsk State University Journal of Biology*. 2025;71:8-31. doi: 10.17223/19988591/71/1

Введение

В последние годы большое внимание уделяется изучению почв и почвенного покрова территорий с суровыми климатическими условиями, сильно ограничивающими почвообразование [1]. Но вместе с тем отмечается, что такие исследования не выступают единым научным направлением и не имеют единой теории и методологической основы [2]. Территория Якутии с низкой активностью биохимических преобразований и коротким годовым циклом развития почв относится к таким регионам. Изученный Далдын-Алакитский район характеризуется в основном средне- и низковысотными плато и равнинами с хорошо выраженным пятнисто-бугорковым криогенным микрорельефом. Потепление климата [3–6] и расширение добычи полезных ископаемых делает актуальным прогнозирование интенсивности и направленности протекания почвенных процессов.

Одним из наиболее плохо изученных почвенных параметров является минералогический состав крупных фракций и его изменение в ходе почвообразования. Особенности территории Средней Сибири является не только суровый климат, но и постоянно повторяющиеся пожары, приводящие к постоянному обновлению субстрата [7, 8]. Особенности геологического строения, богатый минералогический состав отложений на фоне суровых климатических условий делают очень специфическими процессы трансформации минералов при криогенном выветривании [9]. Изучение почв на северо-западе Якутии проводилось фрагментарно. Анализ отечественной и зарубежной литературы показал, что сведения о химико-минералогических свойствах почв северной тайги единичны. В основном работы касаются подзон тундры, лесотундры и средней тайги [10, 11]. Например, в работе Р.В. Десяткина с соавторами на примере криоземов, в том числе и Анабарского плато, относящегося к крайне северной части территории Северо-Западной Якутии, выявлено, что минералогический состав илистых фракций и профильное распределение глинистых минералов в слабодифференцированных почвах, сформированных в условиях холодного ультраконтинентального климата, выражены слабо из-за криогенной гомогенизации [12, 13]. При этом многие стороны генезиса, геохимии и особенно минералогия почв для очень специфических почвенно-мерзлотных условий и обширного региона Сибири еще изучены недостаточно.

Целью настоящего исследования является выявление интенсивности преобразования почвенного профиля и возможных межтиповых различий в доминирующих в северотаежных ландшафтах трех типов почв – криоземов, глееземов и литоземов относительно подстилающей породы с использованием геохимических коэффициентов и анализа крупных окристаллизованных минералов.

Материалы и методики исследования

Условия почвообразования. Ландшафт территории Далдыно-Алакитского алмазоносного района ($66^{\circ}24'$ с. ш., $112^{\circ}17'$ в. д.), расположенного в северо-восточной части Средне-Сибирского плоскогорья, представляет со-

бой сильно расчлененное пологоволнистое плато. Почвы формируются на элювиально-делювиально-солифлюкционных отложениях с близким залеганием коренных пород, представленных плотными доломитами, желтоватыми известняками и оолитовыми доломитовыми известняками [14, 15]. Климат района резко континентальный с продолжительной холодной зимой и коротким летом, среднемесячная температура января $-33...-38^{\circ}\text{C}$, июля $+16...+18^{\circ}\text{C}$, количество осадков небольшое – порядка 247 мм [16]. Распространение многолетнемерзлых пород сплошное. Глубина сезонного протаивания колеблется в пределах 0,3–1,4 м [17].

Особенности литолого-геоморфологических и геокриологических условий предопределяют существенные отличия таежных почв континентальных областей по морфогенетическим характеристикам от их аналогов в областях с умеренно-континентальным климатом [18]. Криоземы занимают равнинные территории, протяженные гряды, верхние и средние части пологих склонов, в микрорельефе они формируются на бугорках и полигонах. В западинах и полигональных трещинах преобладают глееземы, на плотных карбонатных породах формируются различные типы литоземов, в долине рек – аллювиальные почвы.

Объекты исследования. Для расчетов геохимических коэффициентов отобраны разрезы, которые заложены в период 2017–2020 гг., находящиеся в наиболее типичных для района геолого-геоморфологических условиях. Во всех разрезах для химического и минералогического анализа образцы отобраны по генетическим горизонтам. Диагностика и классификация почв осуществлялась согласно «Полевому определителю почв России» [19] и международной классификации почв WRB [20]. В статье приводятся данные валового анализа оксидов и физико-химические свойства по 4 наиболее типичным почвенным разрезам, относящимся к литоземам, криоземам и глееземам, отобранным в природных не нарушенных техногенным воздействием ландшафтах. Расчеты геохимических коэффициентов приведены на основании 26 проб, характеризующих органогенные и минеральные горизонты исследуемых трех типов почв.

Методы анализа. Определение физико-химических свойств и валового состава почв выполнены по общепринятым методикам в двухкратной повторности [21–23]. Изучение минералогического состава выполнено во всех образцах в одной повторности методом рентгенофазового анализа на дифрактометре D2 PHASER (Bruker, Германия), съемка образцов проводилась на трубке с медным анодом (CuK_{α}) при напряжении 30 кВ и силе тока 10 мА. Для идентификации слоистых силикатов с разбухающими пакетами образцы насыщали этиленгликолем. Препараты для съемок готовились из порошковых проб для выявления валового содержания минералов с целью анализа и сравнения результатов расчета геохимических коэффициентов. При расчете геохимических коэффициентов применяется валовый химический состав, так как используется отношение содержания неглинистых силикатных минералов относительно глинистой алюмосиликокластики, согласно работам [24, 25]. Термический анализ выполнен на приборе синхротронного термического анализа фирмы NETZSCH-STA 449C (Juri-

ter, Германия). Образцы в виде порошка (разные навески) нагревались от комнатной температуры до 1000°C со скоростью нагрева 10°C/мин в инертной среде аргона. Микрофотографирование почвенных частиц выполнено на электронном сканирующем микроскопе JSM-6480LV (JEOL, Япония) с энергетическим дисперсионным спектрометром Energy 350 Oxford: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 1 нА.

Интерпретация результатов. Для геохимической характеристики почв выполнены расчеты соотношений оксидов и ряда коэффициентов по данным валового химического анализа. Изменение содержания химических элементов по почвенному профилю в сравнении с почвообразующей породой позволяет выявить направленность почвообразовательного процесса и наиболее важные итоги почвообразования [26]. Относительную потерю плутонных оксидов устанавливали, используя соотношение $\text{SiO}_2 \div \text{R}_2\text{O}_3$. Интенсивность выноса и накопления щелочных (Na_2O и K_2O) и щелочноземельных (CaO и MgO) элементов по почвенному профилю определяли на примере соотношений $\text{R}_2\text{O} \div \text{Al}_2\text{O}_3$ и $\text{RO} \div \text{Al}_2\text{O}_3$, биологическую активность и продуктивность почв устанавливали на примере соотношения $\text{MnO} \div \text{Fe}_2\text{O}_3$. Для анализа активности миграции химических элементов по почвенному профилю в зависимости от водного режима почв выполняли расчет $\text{Ret} = \text{Al}_2\text{O}_3 \div (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{MgO})$ по G.J. Retallack, в котором отношение алюминия представлено как основной компонент глинистой составляющей к оксидам растворимых оснований, поступающих в почвенный раствор в результате гипергенеза [27]. Преобразованность почв определяли на примере литохимического индекса степени зрелости тонкой алюмосиликокластики (расчет $\text{CIA} = [\text{Al}_2\text{O}_3 \div (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})] \times 100$ представляет собой, по сути, меру степени превращения полевых шпатов в слоистые силикаты [25]) и индекса изменчивости состава $\text{ICV} = (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{MnO} + \text{TiO}_2) \div \text{Al}_2\text{O}_3$, выявляющего содержание устойчивых и неустойчивых к выветриванию минералов. В этих формулах CaO^* означает, что учитывается только оксид кальция, входящий в состав силикатных минералов. ICV характеризуется самым высоким значением у минералов с высоким содержанием в последовательности выветривания S.S. Goldich [28], таких как пироксены и амфиболы, и уменьшается у более стабильных минералов, таких как щелочные полевые шпаты. ICV уменьшается далее в глинистых минералах группы монтмориллонита и является самым низким в минералах группы каолинита. Для расчета CIA и ICV использовался перерасчет количества молей CaO^* согласно работам S.M. McLennan [29] и С.М. Федо [30].

Полученные данные обработаны с использованием программ Microsoft Excel 2013, Statistica 6.0, OriginPro 8.5.1. Результаты представлены, как среднее $\pm$ стандартное отклонение. Выполнение применимости расчетов проведено на уровне достоверной значимости $p < 0,05$.

Результаты исследования

Описание наиболее типичных педонов и основных физико-химических характеристик почв. Криозем типичный (Skeletal Cryosol (Loamic))

сформирован на вершине пологого склона в лиственничном редколесье черниково-голубичном мохово-лишайниковом (рис. 1а) (66°22'26,8" с. ш., 112°14'08,6" в. д.), с 40 см плотная подстилающая порода (рис. 1б).

Строение почвенного профиля:

О (0–9 см). Буроватого цвета слаборазложившиеся растительные остатки, влажный, густо переплетен корнями, граница перехода горизонтально-волнистая.

CR₁ (9–19 см). Влажный светло-коричневый тяжелый суглинок, однородный, бесструктурный, переплетен корнями, признаки оглеения отсутствуют.

CR₂ (19–38 см). Коричневый, глинистый, неплотный, ореховатого сложения, разнонаправленные включения щебня подстилающих пород до 20%, с глубины 40 см залегает сильнокаменистый субстрат.

Глеезем тиксотропный (Reductigleyic Gleysol (Ohric)) сформирован в лиственничнике с примесью ели, разрез заложен на склоне микропонижения (66°24'13,4" с. ш., 112°24'19,0" в. д.). Почва тиксотропная, имеется верховодка (рис. 1с).

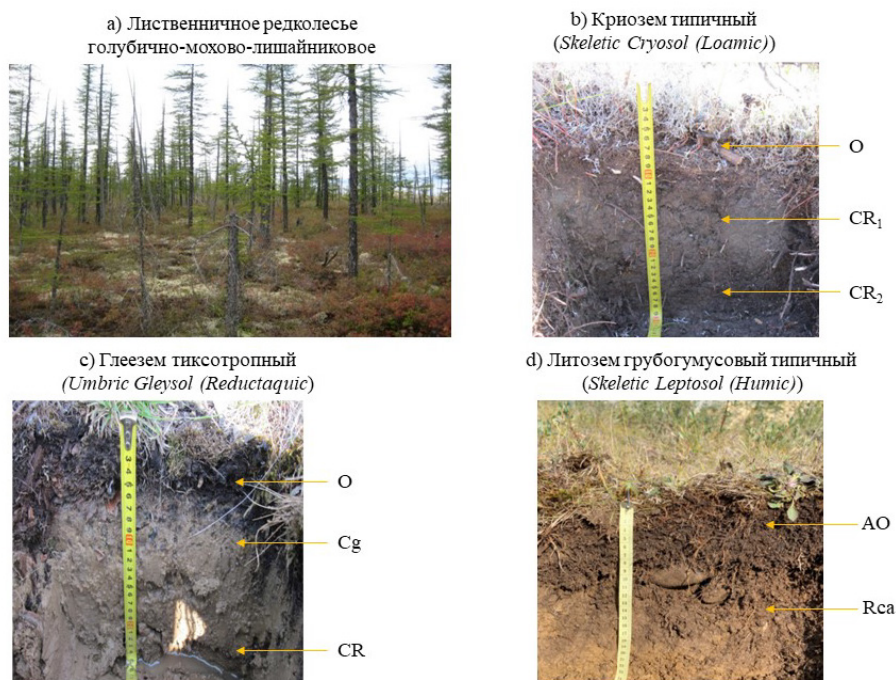


Рис. 1. Растительность (а) и почвенные профили криозема (б), глеезема (с) и литозема (д) на исследованной территории. Фото Я.Б. Легостаевой
[Fig. 1. Vegetation (a) and soil profiles of Cryosol (b), Gleysol (c) and Leptosol (d) in the study area. Photo by Yana Legostaeva]

Строение почвенного профиля:

О (0–6/9 см). Темно-бурый органогенный материал, влажный, рыхлый, переплетенный мелкими корнями.

Cg (6/9–30 см). Серовато-светлобурый, мокрый, глинистый, тиксотропный горизонт с единичными мелкими корнями, бесструктурный, мелкие примазки органического вещества.

CR (30–40 см). Грязно-бурый тяжелый суглинок, мокрый, бесструктурный, тиксотропный, внизу горизонта единичный крупный доломитовый щебень. В разрез интенсивно поступает вода.

Литозем грубогумусовый типичный (Skeletal Leptosol (Humic)) описан на вершине водораздела рек Сытыкан и Далдын в лиственничном багульниково-ерниковом редколесье (66°02'41,0" с. ш., 111°45'33,8" в. д.). Микро-рельеф слабо выраженный бугорковато-западинный (рис. 1с).

Строение почвенного профиля:

АО (0–8/13 см). Коричневато-серый до черного, сильно влажный, пронизан корнями растений, мелкие древесные угли, не оструктурен, тяжелый суглинок, включения гравия, граница волнообразная, переход четкий по цвету.

R_{ca} (8/13–33 см). Сero-коричневый, неоднородно окрашенный тяжелый суглинок, пронизан тонкими корнями растений, пятна гидроксидов Fe, крупная галька и щебень подстилающих пород. Ниже 33 см плотная порода, слабо вскипает от 10% HCl.

Основные физико-химические показатели, объединяющие описываемые типы почв, – это слабокислая реакция среды в верхнем органогенном горизонте и близкая к нейтральной ниже по профилю; относительно высокое содержание органического углерода (C_{орг}) в почвенном профиле до 10% в верхних и порядка 1–3% в нижних горизонтах (табл. 1). Органическое вещество верхнего горизонта состоит из грубогумусных малоразложившихся растительных остатков. Почвы характеризуются тяжелым гранулометрическим составом, как правило, тяжелосуглинистым или глинистым, с преобладанием фракции физической глины до 49–50%. Дифференциации по составу исследованных фракций нет, почвенный профиль относительно гомогенный.

Валовый химический состав изученных типов почв Далдыно-Алаkitского горнопромышленного района достаточно близок друг к другу (табл. 2). По весовому содержанию основные оксиды располагаются в следующем убывающем порядке: SiO₂ > Al₂O₃ > CaO > MgO > Fe₂O₃ > K₂O > TiO₂ > Na₂O > MnO. Невысокие средние значения SiO₂ (40–50%) отражают среднесуглинистый состав исследованных почв. Для исследованных почв характерно свойственное материнской породе и условиям формирования почв значительное содержание щелочноземельных элементов и существенное – полуторных оксидов.

Минералогический состав почв и микроморфологические признаки достаточно однородны между типами почв и наследуются от почвообразующей породы. На рис. 2–4 представлены SEM-изображения почвенного

Таблица 1 [Table 1]

Физико-химические свойства почв Далдыно-Алакитского горнопромышленного района Северо-Западной Якутии
[Physical and chemical properties of soils of the Daldyno-Alakitsky mining region of Northwestern Yakutia]

Почвы [Soils, WRB [20]]	Горизонты (глубина, см) [Horizons (depth, cm)]	pH _{H₂O}	pH _{KCl}	C _{орг} , % [C _{org} , %]	N _{общ} , % [N _t , %]	C/N	ЕКО, мг-экв/100 г почвы [CEC, mmol/100 g]	Содержание почвенных фракций, % [Particle-size fractions, %]	
								< 0,01	> 0,01
Криозем типичный [Skeletal Cryosol (Loamic)]	O (0–9)	5,3 ± 0,7*	3,5 ± 0,4	9,0 ± 1,4	0,76 ± 0,11	11,8	32,0 ± 4,8		
	CR ₁ (9–19)	6,3 ± 0,8	4,9 ± 0,7	2,4 ± 0,3	0,10 ± 0,02	25,1	20,5 ± 3,1	47,3,5	45,94
	CR ₂ (19–38)	6,1 ± 0,8	4,3 ± 0,7	1,4 ± 0,2	0,06 ± 0,01	24,4	20,8 ± 3,1	55,7,7	31,92
	Oao (0–6(9))	5,9 ± 0,7	4,7 ± 0,7	6,2 ± 0,9	0,30 ± 0,05	20,9	28,0 ± 4,2		
Глеезем тиксотропный [Reductigleyic Gleysol (Ohric)]	Cg ((6)9–30)	7,2 ± 0,9	6,2 ± 0,8	2,9 ± 0,4	0,23 ± 0,01	12,4	20,0 ± 3,0	50,02	33,91
	CR (30–40)	7,8 ± 0,9	6,5 ± 0,8	2,6 ± 0,4	0,17 ± 0,03	16,0	47,2 ± 7,1	49,42	33,08
Глеезем перегнойный [Histic Gleysol]	H (0–7)	7,2 ± 0,9	5,9 ± 0,7	6,1 ± 0,9	0,41 ± 0,06	15,1	17,6 ± 2,6		
	Cg (7–37)	8,4 ± 1,1	6,5 ± 0,9	1,6 ± 0,2	0,11 ± 0,02	14,3	21,6 ± 3,2	57,71	22,14
Литозем грубогумусовый типичный [Skeletal Leptosol (Humic)]	AO (0–8(13))	7,3 ± 0,9	6,9 ± 1,0	8,5 ± 1,3	0,38 ± 0,06	22,2	24,8 ± 3,7	53,19	28,98
	Rca (8(13)–33)	7,8 ± 0,9	7,5 ± 1,0	1,9 ± 0,3	0,17 ± 0,03	11,4	40,8 ± 6,1	46,55	42,59

Примечание. ЕКО – емкость катионного обмена.
 [Note. CEC - cation exchange capacity].

Таблица 2 [Table 2]

Валовый химический состав почв, % к прокаленной навеске
[The gross chemical composition of soils, % on a calcined sample]

Почвы [Soils]	Глубина, см [Depth, cm]	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	MnO	TiO ₂
Криозем типичный [Skeletal Cryosol (Loamic)]	0–9	49,67 ± 2,48*	12,13 ± 0,61	4,70 ± 0,24	4,36 ± 0,22	0,46 ± 0,02	8,83 ± 0,44	3,48 ± 0,17	0,12 ± 0,01	0,66 ± 0,03
	9–19	49,28 ± 2,46	10,42 ± 0,52	4,31 ± 0,22	4,22 ± 0,21	0,20 ± 0,01	7,94 ± 0,40	7,38 ± 0,37	0,06 ± 0,003	0,55 ± 0,03
	19–38	41,77 ± 2,09	9,68 ± 0,48	4,08 ± 0,20	3,93 ± 0,20	0,19 ± 0,01	10,98 ± 0,55	9,18 ± 0,46	0,08 ± 0,004	0,51 ± 0,03
Глеезем тиксотропный [Reductigleyic Gleysol (Ohric)]	0–9	52,78 ± 2,64	10,57 ± 0,53	5,04 ± 0,25	3,10 ± 0,16	0,60 ± 0,03	7,94 ± 0,40	5,44 ± 0,27	0,10 ± 0,01	0,70 ± 0,04
	9–30	47,88 ± 2,39	9,45 ± 0,47	5,09 ± 0,25	2,70 ± 0,14	0,58 ± 0,03	10,88 ± 0,54	8,16 ± 0,41	0,06 ± 0,00	0,67 ± 0,03
	30–40	45,45 ± 2,27	8,97 ± 0,45	4,77 ± 0,24	2,54 ± 0,13	0,57 ± 0,03	12,46 ± 0,62	8,86 ± 0,44	0,07 ± 0,00	0,60 ± 0,03
Глеезем перетнойный [Humic Gleysol]	0–7	27,12 ± 1,36	7,42 ± 0,37	6,92 ± 0,35	1,22 ± 0,06	0,31 ± 0,02	17,77 ± 0,89	2,99 ± 0,15	0,09 ± 0,00	0,34 ± 0,02
	7–37	46,42 ± 2,32	12,94 ± 0,65	6,83 ± 0,34	3,11 ± 0,16	0,52 ± 0,03	7,51 ± 0,38	3,92 ± 0,20	0,20 ± 0,01	0,70 ± 0,04
Литозем грубогумусовый [Skeletal Leptosol (Humic)]	0–8(13)	37,92 ± 1,90	9,54 ± 0,48	4,38 ± 0,22	2,82 ± 0,14	0,30 ± 0,02	18,55 ± 0,93	4,73 ± 0,24	0,15 ± 0,01	0,54 ± 0,03
	8(13)–33	42,48 ± 2,12	10,42 ± 0,52	4,41 ± 0,22	3,41 ± 0,17	0,25 ± 0,01	10,89 ± 0,54	8,58 ± 0,43	0,06 ± 0,00	0,51 ± 0,03

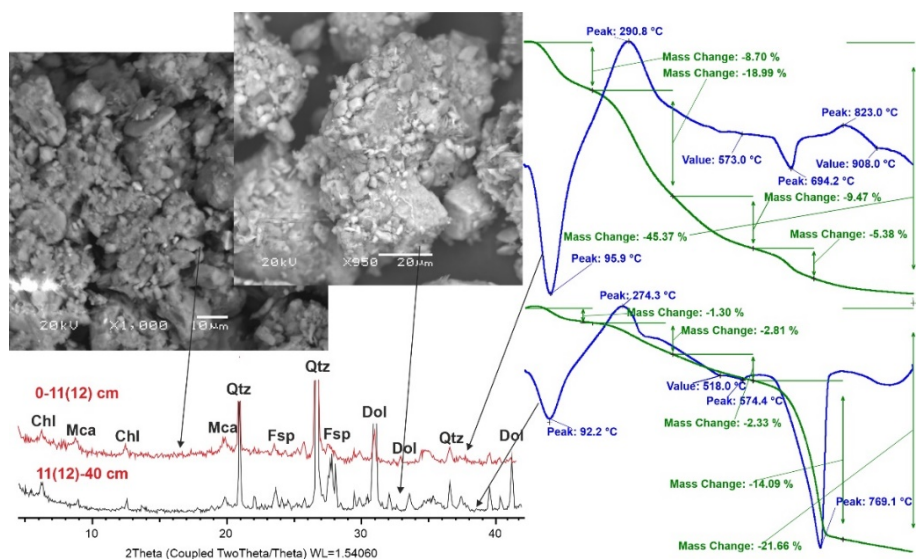


Рис. 2. SEM-изображения, дифрактограммы и термограммы почвенного материала криозема по горизонтам: Chl – хлорит, Mca – слюда, Qtz – кварц, Fsp – полевые шпаты, Dol – доломит

[Fig. 2. SEM images, diffractograms and thermograms of Cryosol material by horizons: Chl - chlorite, Mca - mica, Qtz - quartz, Fsp - feldspars, Dol - dolomite]

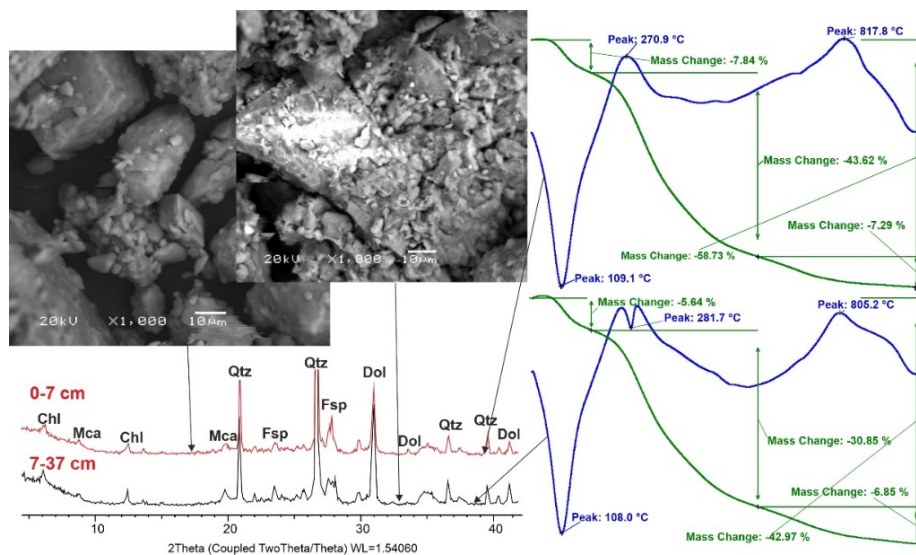


Рис. 3. SEM-изображения, дифрактограммы и термограммы почвенного материала глеезема по горизонтам: Chl – хлорит, Mca – слюда, Qtz – кварц, Fsp – полевые шпаты, Dol – доломит

[Fig. 3. SEM images, diffractograms and thermograms of Gleysol material by horizons: Chl - chlorite, Mca - mica, Qtz - quartz, Fsp - feldspars, Dol - dolomite]

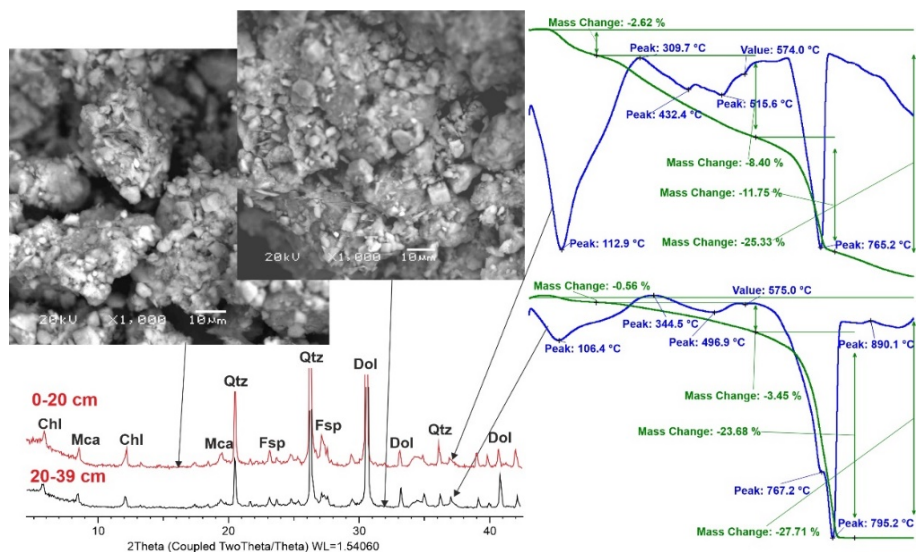


Рис. 4. SEM-изображения, дифрактограммы и термограммы почвенного материала литозема по горизонтам: Chl – хлорит, Mca – слюда, Qtz – кварц, Fsp – полевые шпаты, Dol – доломит

[Fig. 4. SEM images, diffractograms and thermograms of *Leptosol* material by horizons: Chl - chlorite, Mca - mica, Qtz - quartz, Fsp - feldspars, Dol - dolomite]

материала, дифрактограммы минерального состава и кривые термогравиметрии (TG) и дифференциальной сканирующей калориметрии (DSC) по каждому типу изучаемых почв.

Основными минералами почв исследуемой территории являются доломит и кварц, кальцит выявлен только в одном из литоземов, далее следуют алюмосиликаты, их состав достаточно однообразен и представлен минералами из группы полевых шпатов, слюд и хлоритов. При этом содержание доломита, полевых шпатов и минералов группы хлорита и слюд уменьшается снизу-вверх по профилю, что, вероятно, указывает на проявление почвенного выветривания.

Сканирующая электронная микроскопия выявила общие микроморфологические признаки почвообразования. Почвенные агрегаты в криоземах и глееземах имеют более окатанную форму и меньший размер (около 10 мкм) в верхнем горизонте по сравнению с нижним. Более крупные частицы порядка 20 мкм отличаются угловатой формой, а частицы менее 5 мкм пластинчатые и закругленной формы.

На термограммах всех исследованных почв имеются эндотермические и экзотермические эффекты, соответствующие выделению сорбированной воды, сгоранию органического материала, дегидратации, разрушению карбонатов и слоистых силикатов. Испарение сорбированной воды не имеет различия между горизонтами у глеезема, также здесь слабо проявились термоэффекты, связанные с разрушением минералов. В криоземе пик сгорания гумуса более ярко выражен, чем пик сгорания лигнина, в то время как в глееземе и литоземе они практически равнозначны.

Результаты расчета геохимических коэффициентов. Изменение химического и минералогического состава подтверждают расчеты коэффициентов и построенные по ним графики (табл. 3, рис. 5). Слабая элювиально-иллювиальная дифференциация проявляется и в молярных отношениях $\text{SiO}_2 \div \text{R}_2\text{O}_3$ и $\text{R}_2\text{O} \div \text{Al}_2\text{O}_3$, отличия между горизонтами отмечены при расчете $\text{RO} \div \text{Al}_2\text{O}_3$. В целом биологическая активность и продуктивность мерзлотных почв северной тайги низкая, но значения рассчитанного коэффициента увеличиваются в верхних органогенных горизонтах по отношению к минеральным горизонтам.

Рассчитанные молярные отношения для щелочных металлов указывают на слабый вынос Na и K, более значительный – для Ca и Mg в пределах почвенной толщи. Тенденцию к увеличению вверх по профилю коэффициента Ret (табл. 3) можно рассматривать как результат слабого выветривания, при котором происходят накопление алюминия и вынос оксидов кальция, магния, натрия и калия. При этом понижаются значения величины индикатора кальцификации $\text{RO} \div \text{Al}_2\text{O}_3$, что вероятно свидетельствует о разрушении карбонатных фаз под воздействием органических кислот, выщелачиваемых из органогенных почвенных горизонтов, опада и надземной биомассы растений.

Изменение минералогического состава почв, определяющее степень превращения первичных минералов во вторичные, рассмотрена по вариациям значений индексов CIA и ICV (табл. 3). Значения CIA ниже 70 и ICV близкое и больше 1 соответствуют почвам с высоким количеством первичных силикатных минералов, а именно плагиоклазов и калиевых полевых шпатов.

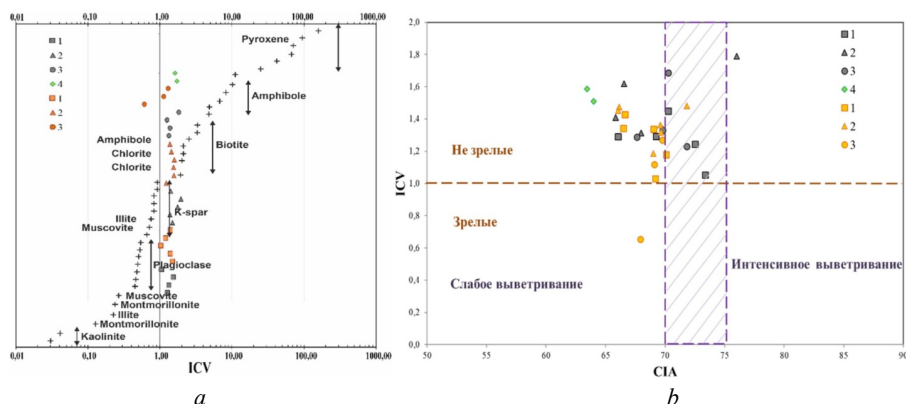


Рис. 5. Графики изменения минералогического состава ICV по R. Cox и др. [28] (a) и зависимости CIA от ICV по L.J. Suttner и P.K. Dutta [31] (b): 1 – криоземы, 2 – глееземы, 3 – литоземы, 4 – материнская порода; серым цветом отмечены органогенные горизонты, оранжевым – минеральные, заштрихованная область – область стабилизации

[Fig. 5. Plot of mineralogical variability by R. Cox et al. [28] (a) and CIA vs ICV by L.J. Suttner and P.K. Dutta [31] (b) for soils: 1 - Cryosols, 2 - Gleysols, 3 - Leptosols, 4 - rock; organogenic horizons are marked in gray, mineral horizons are marked in orange, shaded area – area of permafrost stabilization]

Таблица 3 [Table 3]

Отношение оксидов и коэффициенты выветривания почв
[Oxide ratio and soil weathering coefficients]

Горизонты [Horizons]	$\text{SiO}_2 \div \text{R}_2\text{O}_3$	$\text{R}_2\text{O} \div \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{RO} \div \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{MnO} \div \text{Fe}_2\text{O}_3$	Ret	ICV	CIA
Криоземы [Cryosols]							
Органогенные горизонты, $n = 5$ [Organic horizons, $n = 5$]	<u>5.43</u> 5,02–6,16	<u>0.38</u> 0,31–0,45	<u>2.05</u> 1,26–2,57	<u>0.04</u> 0,02–0,06	<u>0.43</u> 0,27–0,61	<u>1.07</u> 0,9–1,23	<u>70</u> 66–73
Минеральные горизонты, $n = 5$ [Mineral horizons, $n = 5$]	<u>6.06</u> 5,20–6,82	<u>0.40</u> 0,33–0,47	<u>3.09</u> 1,42–4,46	<u>0.04</u> 0,03–0,05	<u>0.33</u> 0,2–0,57	<u>1.16</u> 1,09–1,29	<u>68</u> 66–70
Глееземы [Gleysols]							
Органогенные горизонты, $n = 3$ [Organic horizons, $n = 5$]	<u>5.84</u> 3,89–7,09	<u>0.37</u> 0,25–0,42	<u>3.04</u> 2,03–5,37	<u>0.04</u> 0,03–0,06	<u>0.32</u> 0,18–0,41	<u>1.19</u> 1,12–1,24	<u>69</u> 66–76
Минеральные горизонты, $n = 6$ [Mineral horizons, $n = 5$]	<u>6.20</u> 4,55–6,85	<u>0.38</u> 0,33–0,41	<u>3.50</u> 1,82–5,02	<u>0.03</u> 0,02–0,07	<u>0.29</u> 0,18–0,47	<u>1.17</u> 1,08–1,27	<u>69</u> 66–72
Литоземы [Leptosols]							
Органогенные горизонты, $n = 4$ [Organic horizons, $n = 5$]	<u>5.54</u> 5,22–5,88	<u>0.38</u> 0,34–0,45	<u>2.68</u> 1,44–4,79	<u>0.05</u> 0,03–0,08	<u>0.38</u> 0,32–0,53	<u>1.22</u> 0,65–1,69	<u>70</u> 68–72
Минеральные горизонты, $n = 3$ [Mineral horizons, $n = 5$]	<u>5.46</u> 5,16–5,78	<u>0.41</u> 0,39–0,45	<u>5.28</u> 3,60–8,27	<u>0.04</u> 0,02–0,05	<u>0.20</u> 0,12–0,25	<u>1.01</u> 0,65–1,27	<u>69</u> 68–70

Примечание. n – количество проб.
[Note. n - number of samples].

Для сравнения рассчитаны коэффициенты выветривания для материнских пород, на которых сформированы исследованные типы почв, для этого использовали данные из отчета по изучению структурно-тектонических и геохимических особенностей исследованного района [32]: моркокинская свита ($\text{Є}_3\text{mr}$) – $\text{ICV} = 1,59$, $\text{CIA} = 63$, олдондинская свита ($\text{O}_{1\text{ol}}$) – $\text{ICV} = 1,51$, $\text{CIA} = 64$.

Полученные коэффициенты указывают на слабую выветрелость и незрелость самих почвообразующих пород. На рис. 5а представлена вариативность минералогического состава, где ICV криоземов расположены в основном в области, между плагиоклазом и калиевым полевым шпатом. ICV глееземов расположены в области между калиевым полевым шпатом и биотитом, практически такое же расположение у литоземов. Рассчитанные величины ICV материнской породы располагается чуть дальше от области калиевых полевых шпатов ближе к биотитовому составу.

Обсуждение результатов

Считается, что в постлитогенных почвах не происходит аккумуляция свежего материала, либо она незначительна и не отражается на строении профиля; не наблюдается дифференциация химического состава по горизонтам [19]. Гомогенность почвенных профилей криоземов выявлена ранее на примере почв Анабарского плато и Алазейского нагорья [13–33], которые находятся гораздо севернее рассматриваемой нами территории. По данным авторов почвы характеризуются слабокислыми и нейтральными условиями и легким гранулометрическим составом, в отличие от почв исследуемой территории, которые характеризуются тяжелым гранулометрическим составом по всему профилю. Применение геохимических коэффициентов в анализе преобразования состава почвенной толщи позволило выявить изменение относительно материнской породы и изменение параметров между исследованными типами почв.

Поведение преобладающих оксидов в почвах зависит не от подтипа или основного процесса в почве, а хорошо коррелирует с содержанием органического вещества. Для почв с низким содержанием $\text{C}_{\text{орг}}$ прослеживается увеличение оксидов Si, Al и Fe вверх по почвенному профилю, указывающее на преобладание минеральной составляющей в почвенном материале. В то же время общее количество кальция и магния закономерно уменьшается в верхней почвенной толще в отличие от материнской породы. В почвах с высоким содержанием $\text{C}_{\text{орг}}$ не наблюдается четко выраженная дифференциация оксидов в каком-либо направлении, кроме уменьшения содержания кремния и увеличения полуторных оксидов вверх по почвенному профилю. Так как в почвах не отмечено накопление минералов в верхней части профиля, то предполагается, что накопление полуторных оксидов связано с образованием их аморфных форм – глинозема и гидроксидов. Также выявлена аккумуляция оксида Ca в органогенных горизонтах, при этом накопление магния не наблюдается, то есть данное обстоятельство не связано с карбонатами материнской породы, а, скорее всего, обусловлено органогенной аккумуляцией. Похожая ситуация отмечалась и в мерзлот-

ных почвах Верхоянского хребта, где при равномерном распределении валового состава наблюдалось относительное повышенное содержания СаО [34].

Минералогический состав исследованных типов почв территории Далдыно-Алакитского горнопромышленного района Северо-западной Якутии практически идентичен. На уровне анализа крупных окристаллизованных минералов дифференциация почвенного профиля всех трех изучаемых типов почв не фиксируется. За исключением увеличения содержания доломита вниз по профилю, что закономерно для почв, сформированных на карбонатных породах.

По данным РЭМ-изображений наблюдается преобладание угловатых частиц с появлением признаков окатанности, свидетельствующих о переработке обломков минеральных частиц. Подобные тенденции описаны также и для молодых почв техногенных ландшафтов, сформированных на отвалах каменноугольных разрезов в Сибири [35]. Признаки преобразования почвенных частиц проявляются в криоземе и глееземе. При этом в криоземе и глееземе есть небольшие отличия между минеральным и органогенными горизонтами, в литоземе их практически нет, что позволяет сделать вывод об однородности и слабой трансформации вещественного состава почвенного профиля литоземов.

Термограммы изученных типов почв отличаются по пикам, отражающим основные генетические характеристики, и по различиям в потере массы основных термоэффектов (см. рис. 2–4). Сгорание органического материала на термограммах верхних горизонтов отмечается двумя экзотермическими эффектами в интервале 200–400°C и выше 400°C, связанными двухэтапным разрушением гумусовых кислот с деструкцией алифатической части гуминовых молекул и разрывом наиболее прочно связанных ароматических фрагментов центральной части гумусовых кислот. Отметим дополнительный пологий продолжительный экзотермический эффект в области выше 800°C, который связан уже с процессом длительного термического разложения лигнина [36]. Преобладание сгорания гумусовых кислот в криоземе относительно других типов указывает на более интенсивную переработку растительных остатков в ходе микробиологической активности почвы.

Слабая элювиально-иллювиальная дифференциация проявляется в незначительном изменении молярных отношений $\text{SiO}_2 \div \text{R}_2\text{O}_3$ и указывает на слабое проявление процесса сиаллитного выветривания [24, 37–41]. Этот процесс характерен для умеренных широт, где в основном преобладает слабая миграция соединений алюминия и железа при относительной стабильности кварца [42]. CIA органогенных горизонтов часто попадают в интервал 70–75, который отмечает промежуточные значения химической преобразованности почв, характерной для измененной, но малотрансформированной почвы, формирующейся в условиях холодного климата [24, 38, 39]. Согласно исследованиям других авторов [24, 38] предполагалось, что значения CIA должны быть несколько выше 75, особенно в почвах с высоким содержанием $\text{C}_{\text{орг}}$. Небольшая величина рассчитанных коэффи-

циентов, вероятно, объясняется действием близко расположенной границы сезонно-талого слоя, приводящей, на наш взгляд, к стабилизации процессов выветривания минералов в надмерзлотных горизонтах почв. Несмотря на это, увеличение значений CIA относительно почвообразующих пород, на которых они сформированы, указывает на протекание процессов, приводящих к изменению минералогического состава почвенного материала, то есть выветриванию в ходе педогенеза. Степень интенсивности выветривания зависит от количества $C_{орг}$ ($r = 0,60$) и обратно пропорциональна величине pH ($r = -0,52$). Таким образом, высокое содержание $C_{орг}$ и, соответственно, более кислая реакция среды почвенного раствора указывают на активное педогенное преобразование минерального материала.

Наиболее ярко преобразование состава отражается в расположении точек значений ICV, в котором материнская порода и исследуемые нами типы почв – литозем, глеезем и криозем – располагаются в интервале варьирования минералогического состава от биотита к плагиоклазу соответственно. При этом присутствие более нестабильного к выветриванию биотита указывает на слабую преобразованность исследованного материала. Таким образом, криоземы являются более измененными и выветрелыми относительно других рассматриваемых типов постлитогенных почв и особенно материнской породы. Литоземы наименее развитые и выветрелые почвы, а глееземы занимают промежуточное между ними положение. На основании рассчитанных отношений оксидов и коэффициентов в почвах не наблюдается резкая дифференциация почвенного профиля, но достаточно четко обнаруживается различие между минеральной и органогенной частью, что особенно проявляется в почвах с общим содержанием органического вещества выше 2%. Такие почвы отличаются слабокислыми условиями верхних органогенных горизонтов и нейтральными в минеральной части почвенного профиля, что сказывается на педогенном преобразовании минеральной фазы. И как следствие этого, в органогенных и органо-минеральных горизонтах более активно выветривание по сравнению с минеральной надмерзлотной частью почвенного профиля. Вероятно, на интенсивность преобразования минеральной части почв больше оказывает влияние биохимическое выветривание. Как отмечается в последнее время [42–44], преобразование почвенного материала под влиянием органических кислот и живых организмов преобладает в почвах с прохладным климатом.

Заключение

На основании геохимических индексов установлено, что эволюционно-генетические особенности криоморфных почв идентифицируют стадию почвообразования как близкую к начальной. Их геохимическая неоднородность отражает особенности почвообразующих пород. Установлено, что изменение количества оксидов в почвах в большей степени зависит от содержания $C_{орг}$. Во всех исследованных почвах довольно низкие величины индексов выветривания, что свидетельствует о слабой трансформа-

ции минерального состава, но тем не менее наблюдается увеличение глинистой составляющей относительно материнской породы.

Нашими исследованиями подтверждаются выводы о том, что рассматриваемые типы почв характеризуются гомогенностью почвенного профиля на минералогическом и микроморфологическом уровнях, перераспределение вещества заметно только при анализе геохимических характеристик. При этом перемещение вещества по профилю более интенсивно происходит в верхней органоминеральной части почвенного профиля, а процессы выноса на фоне относительно слабого перемещения в нижних минеральных горизонтах.

По степени преобразованности почвенного материала исследуемые типы мерзлотных почв северо-таежных ландшафтов могут располагаться в следующем порядке: литоземы → глееземы → криоземы.

Список источников

1. Горячкин С.В., Мергелов Н.С., Таргульян В.О. Генезис и география почв экстремальных условий: элементы теории и методические подходы // Почвоведение. 2019. № 1. С. 5–19. doi: 10.1134/S0032180X19010040
2. Горячкин С.В. География экстремальных почв и почвоподобных систем // Вестник Российской академии наук. 2022. Т. 92, № 6. С. 564–571. doi: 10.31857/S0869587322060056
3. Collins Ph.E.F. Ice-affected soil systems under rapid climate warming – insights from the past // Bulletin of L.N. Gumilyov Eurasian National University. Technical Science and Technology Series. 2021. Vol. 135, № 2. PP. 27–36. doi: 10.32523/2616-7263-2021-135-2-27-36
4. Худяков О.И., Решоткин О.В. Динамика температуры мерзлотных почв в вегетационный период на фоне повышения среднегодовой температуры воздуха // Почвоведение. 2020. № 5. С. 576–589. doi: 10.31857/S0032180X2005007X
5. Chen L., Aalto J., Luoto M. Significant shallow–depth soil warming over Russia during the past 40 years // Global and Planetary Change. 2021. Vol. 197. 103394. doi: 10.1016/j.gloplacha.2020.103394
6. Goncharova O.Yu., Matyshak G.V., Epstein H.E., Sefilian A.R., Bobrik A.A. Influence of snow cover on soil temperatures: Meso- and micro-scale topographic effects (a case study from the northern West Siberia discontinuous permafrost zone) // Catena. 2019. Vol. 183. 104224. doi: 10.1016/j.catena.2019.104224
7. Novenko E.Y., Kupryanov D.A., Mazei N.G., Prokushkin A.S., Phelps L.N., Buri A., Davis B.A.S. Evidence that modern fires may be unprecedented during the last 3400 years in permafrost zone of Central Siberia, Russia // Environmental Research Letters. 2022. Vol. 17, № 2. 025004. doi: 10.1088/1748-9326/ac4b53
8. Чевычелов А.П. Лесные пожары в Якутии и их влияние на почвенный покров в аспекте прогнозируемого изменения климата // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия «Науки о Земле». 2019. № 1. С. 55–67. doi: 10.25587/SVFU.2019.13.27557
9. Lebedeva M., Makeev A., Rusakov A. Microfeatures of cryogenesis in modern and late pleistocene soils // Cryosols in perspective: A view from the permafrost heartland. Proceedings of the VII International Conference on Cryopedology. Yakutsk : Institute of Biological Problems of the Cryolithozone, 2017. PP. 89–90.
10. Соколова Т.А. Глинистые минералы в почвах гумидных областей СССР. Новосибирск : Наука, 1985. 256 с.

11. Губин С.В., Лупачев АВ. Почвы и отложения озерно-аласных котловин тундр Колымской низменности // Почвоведение. 2020. № 7. С. 775–790. doi: 10.1134/S1064229320070042
12. Lessovaia S.N., Goryachkin S.V., Desyatkin R.V., Okoneshnikova M.V. Pedoweathering and mineralogical change in cryosols in an ultracontinental climate (Central Yakutia, Russia) // *Acta Geodynamica et Geomaterialia*. 2013. № 4. PP. 465–473. doi: 10.1134/S1064229321120048
13. Десяткин Р.В., Лесовая С.Н., Оконешникова М.В., Иванова А.З. Криоземы и палеовые слабодифференцированные почвы тундр и тайги Якутии: свойства, минералогический состав и классификация // Почвоведение. 2021. № 12. С. 1423–1436. doi: 10.31857/S0032180X21120042
14. Геологическая карта СССР масштаба 1:200 000. Серия Анабарская. Лист Q-49-XVII. Объяснительная записка. М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по геологии и охране недр, 1960. 68 с.
15. Салихов Р.Ф., Салихова В.В., Иванюшин Н.В., Охлопков В.И. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Серия Верхневилуйская. Лист Q-49-XXI, XXII (Айхал). Объяснительная записка. М.: МФ ВСЕГЕИ, 2013. 284 с.
16. Спесивцева Н.А. Климатическая особенность Западной Якутии. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение. 1979, С. 87–95.
17. Анисимов О.А., Анохин Ю.А., Лавров С.А., Малкова Г.В., Мяч Л.Т., Павлов А.В., Романовский В.А., Стрелецкий Д.А., Холодов А.Л., Шикломанов Н.И. Континентальная многолетняя мерзлота. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем / под ред. С.М. Семенова. М.: Науч. изд. центр «Планета», 2012. С. 301–359.
18. Горячкин С.В., Водяницкий Ю.Н., Конюшков Д.Е., Лесовая С.Н., Мергелов Н.А., Титова А.А. Биоклиматогенные и геогенные проблемы географии почв Северной Евразии // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2008. № 62. С. 48–68.
19. Полевой определитель почв России. М.: Институт почвоведения им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
20. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2022. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports. 4th edition. Vienna, Austria: International Union of Soil Sciences (IUSS), 2022. 234 p.
21. Качинский Н.А. Механический и микроагрегатный состав почвы, методы его изучения. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 192 с.
22. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1970. 487 с.
23. Мамонтов В.Г. Химический анализ почв и использование аналитических данных. СПб.: Лань, 2021. 328 с.
24. Русанова Г.В., Шахтарова О.В. Структурная организация и профильная дифференциация вещества в автоморфных почвах юго-востока Большеземельской тундры // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2012. № 3 (19). С. 18–32. doi: 10.17223/19988591/19/2
25. Nesbitt H.W., Young G.M. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations // *Geochimica et cosmochimica acta*. 1984. Vol. 48, № 7. PP. 1523–1534. doi: 10.1016/0016-7037(84)90408-3
26. Мамонтов В.Г., Гладков А.А., Кузелев М.М. Практическое руководство по химии почв: Учебное пособие. М.: Изд-во РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2012. 225 с.
27. Retallack G.J., Krull E.S., Bockheim J. New grounds for reassessing paleoclimate of the Sirius Group, Antarctica // *Journal of The Geological Society*. 2001. Vol. 158, № 6. PP. 925–935. doi: 10.1144/0016-764901-030

28. Cox R., Lowe D.R., Cullers R.L. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1995. Vol. 59, № 7. PP. 2919–2940. doi: 10.1016/0016-7037(95)00185-9
29. McLennan S.M., Hemming S., McDaniel D.K., Hanson G.N. Geo-chemical approaches to sedimentation, provenance and tectonics // *Geological Society of America Special Paper*. 1993. Vol. 284. PP. 21–40. doi: 10.1130/SPE284-p21
30. Fedo C.M., Nesbitt H.W., Young G.M. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols with implications for paleoweathering conditions and provenance // *Geology*. 1995. Vol. 23. PP. 921–924. doi: 10.1130/0091-7613(1995)023%3C0921:UTEOPM%3E2.3.CO;2
31. Suttner L.J., Dutta P.K. Alluvial sandstone composition and palaeoclimate framework mineralogy // *Journal of Sedimentary Petrology*. 1986. Vol. 56. PP. 329–345. doi: 10.1306/212F8909-2B24-11D7-8648000102C1865D
32. Устинов В.И., Чернов М.К., Ягнышев Б.С. Изучение структурно-тектонических и геохимических особенностей района коренных месторождений алмазов трубок Ай-хал и Удачная (1980–1982 гг.). Якутск : Изд-во Якутскгеология, 1983. 343 с.
33. Иванова А.З., Десяткин Р.В. Валовой состав основных типов почв бассейна реки Алазея // *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2016. № 1. С. 110–114.
34. Оконешникова М.В., Иванова А.З., Десяткин Р.В. Почвы Верхоянского хребта в пределах Аркачанского плато // *Почвоведение*. 2020. № 5. С. 509–518. doi: 10.31857/S0032180X2005010X
35. Соколов Д.А., Кулижский С.П., Лойко С.В., Доможакова Е.А. Использование сканирующей электронной микроскопии для диагностики процессов почвообразования на поверхности отвалов каменноугольных разрезов Сибири // *Вестник Томского государственного университета. Биология*. 2014. № 3 (27). С. 36–52.
36. Старых С.Э., Шнее Т.В., Одинцова И.Г., Алпатова И.Н. Термический анализ гумусовых веществ отходов прядильных культур // *Современные тенденции в научном обеспечении АПК Верхневолжского региона : коллективная монография*. Иваново : Издательско-полиграфический комплекс «ПресСто», 2018. Т. 1. С. 412–421.
37. Губин С.В., Лупачев А.В. Роль пятнообразования в формировании и развитии криоземов приморских низменностей севера Якутии // *Почвоведение*. 2017. № 11. С. 1283–1295. doi: 10.1134/S1064229317110072
38. Самофалова И.А. Диагностика процессов почвообразования и выветривания по содержанию щелочных и щелочноземельных макроэлементов в почвах Среднего Урала (хребет Басеги) // *Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки*. 2020. Т. 162, кн. 4. С. 592–611. doi: 10.26907/2542-064X.2020.4.592-611
39. Старцев В.В., Дубровицкий Ю.А., Жангуров Е.В., Дымов А.А. Пространственная неоднородность свойств почв в зоне распространения островной мерзлоты (Приполярный Урал) // *Вестник Томского государственного университета. Биология*. 2019. № 48. С. 32–55. doi: 10.17223/19988591/48/2
40. Белоусова Н.И., Соколова Т.А., Тяпкина Н.А. Профильная дифференциация глинистых минералов в подзолистых альфегумусовых почвах на гранитах // *Почвоведение*. 1973. № 11. С. 116–132.
41. Uziak S., Wilgat M., Klimowicz Z. Mineral composition of arctic soils in the Bellsund region, Spitsbergen // *Polish Polar Research*. 1999. № 1. PP. 33–41.
42. Wilson M.J., Jones D. Lichen weathering of minerals: implications for pedogenesis // *Geological Society*. 2007. Vol. 11. PP. 5–12. doi: 10.1144/GSL.SP.1983.011.01.01
43. Крупская В.В., Мирошников А.Ю., Доржиева О.В. Минеральный состав почв и донных осадков заливов архипелага Новая Земля // *Океанология*. 2017. № 1. С. 238–245. doi: 10.7868/S0030157417010075

44. Sirbu-Radasanu D.S., Huzum R., Dumitraş D.-G., Stan C.O. Mineralogical and geochemical implications of weathering processes responsible for soil generation in Mănăila Alpine Area (Tulgheş 3 Unit–Eastern Carpathians) // Minerals. 2022. Vol. 12. 1161. doi: 10.3390/min12091161

Reference

1. Goryachkin SV. Extreme pedology: Elements of theory and methodological approaches. *Eurasian Soil Science*. 2019;52(1):1-13. doi: 10.1134/S1064229319010046
2. Goryachkin SV. Geografiya ekstremal'nykh pochv i pochvopodobnykh system [Geography of extreme soils and soil-like systems]. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2022;6(92):564-571. doi: 10.31857/S0869587322060056. In Russian
3. Collins PhEF. Ice-affected soil systems under rapid climate warming - insights from the past. *Bulletin of L.N. Gumilyov Eurasian National University. Technical Science and Technology Series*. 2021;2(135):27-36. doi: 10.32523/2616-7263-2021-135-2-27-36
4. Khudyakov OI, Reshotkin OV. Multidirectional changes in temperature of permafrost-affected soils during the growing season against the background increase in the mean annual air temperature. *Eurasian Soil Science*. 2020;53:607-618. doi: 10.1134/S1064229320050075
5. Chen L, Aalto J, Luoto M. Significant shallow-depth soil warming over Russia during the past 40 years. *Global and Planetary Change*. 2021;197:103394. doi: 10.1016/j.gloplacha.2020.103394
6. Goncharova OYu, Matyshak GV, Epstein HE, Sefilian AR, Bobrik AA. Influence of snow cover on soil temperatures: Meso- and micro-scale topographic effects (a case study from the northern West Siberia discontinuous permafrost zone). *Catena*. 2019; 183:104224. doi: 10.1016/j.catena.2019.104224
7. Novenko EY, Kupryanov DA, Mazei NG, Prokushkin AS, Phelps LN, Buri A, Davis BAS. Evidence that modern fires may be unprecedented during the last 3400 years in permafrost zone of Central Siberia, Russia. *Environmental Research Letters*. 2022; 2(17):025004. doi: 10.1088/1748-9326/ac4b53
8. Chevychelov AP. Lesnye pozhary v Yakutii i ih vliyanie na pochvennyj pokrov v aspekte prognoziruemogo izmeneniya klimata [Forest fires in Yakutia and their impact on the soil cover in the aspect of predicted climate change]. *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M.K. Ammosova. Seriya: Nauki o Zemle*. 2019;1(13):55-67. doi: 10.25587/SVFU.2019.13.27557. In Russian
9. Lebedeva M, Makeev A, Rusakov A. Microfeatures of cryogenesis in modern and late pleistocene soils. In: *Cryosols in perspective: a view from the permafrost heartland. Proceedings of the VII International Conference on Cryopedology*. Yakutsk: Institute of Biological Problems of the Cryolithozone; 2017. pp. 89-90.
10. Sokolova TA. Glinistye mineraly v pochvakh gumidnykh oblastey SSSR [Glinistye mineraly v pochvakh gumidnykh oblastey SSSR]. Novosibirsk: Nauka Publ.; 1985. 256 p. In Russian
11. Gubin SV, Lupachev AV. Soils and sediments of the lacustrine-alas depressions in tundra zone of the Kolyma Lowland. *Eurasian Soil Science*. 2020;53:845-858. doi: 10.1134/S1064229320070042
12. Lessovaia SN, Goryachkin SV, Desyatkin RV, Okoneshnikova MV. Pedoweathering and mineralogical change in cryosols in an ultracontinental climate (Central Yakutia, Russia). *Acta Geodynamica et Geomaterialia*. 2013;4:465-473. doi: 10.1134/S1064229321120048
13. Desyatkin RV, Lessovaia SN, Okoneshnikova MV, Ivanova AZ. Cryosols from tundra and taiga zones of Yakutia: Properties, clay mineralogy, and problems of classification. *Eurasian Soil Science*. 2021;12:1783-1794. doi: 10.31857/S0032180X21120042
14. Geologicheskaya karta SSSR masshtaba 1 : 200 000. Seriya Anabarskaya. List Q-49-XVII / Ob'yasnitel'naya zapiska [Geological map of the USSR, scale 1 : 200,000. Anabar

- series. Sheet Q-49-XVII / Explanatory Note]. Moscow: Gosudarstvennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo literatury po geologii i okhrane nedr; 1960. 68 p. In Russian
15. Salikhov RF, Salikhova VV, Ivanyushin NV, Okhlopov VI. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:200 000. Seriya Verkhnevilyuyskaya. List Q-49-XXI, XXII (Aykhel) / Ob'yasnitel'naya zapiska. [State geological map of the Russian Federation. Scale 1: 200,000. Verkhnevilyuyskaya series. Sheet Q-49-XXI, XXII (Aykhel) / Explanatory Note]. St. Petersburg: Cartographic Factory VSEGEI; 2013. 284 p. In Russian
 16. Spesivtseva NA. Klimaticheskaya osobennost' Zapadnoy Yakutii [Climatic feature of Western Yakutia]. Novosibirsk: Nauka. Siberian Branch Publ.; 1979. pp. 87-95. In Russian
 17. Anisimov OA, Anokhin YA, Lavrov SA, Malkova GV, Pavlov AV, Romanovskiy VE, Streletskiy DA, Kholodov AL, Shiklomanov NI. Continental many-year permafrost. Metody izucheniya posledstviy izmeneniya klimata dlya prirodnykh sistem [Methods of the climate changes aftermath for natural systems]. In: *Kriosfera zemli*. Semenov SM, editor. Moscow: Izd-vo VNIIMGMI; 2012. pp. 268-328. In Russian
 18. Goryachkin SV, Vodyanitskii YuN, Konyushkov DE, Lesovaya SN, Mergelov NA, Titova AA. Bioklimatogennyye i geogennyye problemy geografii pochv Severnoy Evrazii [Bioclimatogenic and geogenic problems of soil geography in Northern Eurasia]. *Byulleten Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva*. 2008;62:48-68. In Russian
 19. Polevoy opredelitel' pochv Rossii [Field guide to soils of Russia]. Khitrov NB, editor. Moscow: Soil Institute of VV Dokuchaeva Publ.; 2008. 182 p. [Electronic resource]. Available at: http://esoil.ru/images/stories/pdf/Field_guide.pdf (accessed 10.06.2017). In Russian
 20. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports. № 106. Rome; 2015. 192 p.
 21. Kachinskiy NA. Mekhanicheskii i mikroagregatnyy sostav pochvy, metody ego izucheniya [Mechanical and microaggregate composition of the soil, methods of its study]. Moscow: Akademiya nauk SSSR Publ.; 1958. 192 p. In Russian
 22. Arinushkina EV. Rukovodstvo po khimicheskomu analizu pochv [Manual on soil chemical analysis]. Moscow: Moscow State University Publ.; 1970. 488 p. In Russian
 23. Mamontov VG. Khimicheskii analiz pochv i ispol'zovanie analiticheskikh dannykh [Chemical analysis of soils and the use of analytical data: Textbook for universities]. St. Petersburg: Lan' Publ.; 2021. 328 p. In Russian
 24. Rusanova GV, Shakhtarova OV. Structural organization and matter differentiation of Bolshezemelskaya tundra south-east automorphic soils. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Biologiya*. 2012;3(19):18-32. In Russian, English summary
 25. Nesbitt HW, Young GM. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochimica et cosmochimica acta*. 1984;48(7):1523-1534. doi: 10.1016/0016-7037(84)90408-3
 26. Mamontov VG, Gladkov AA, Kuzelev MM. Prakticheskoe rukovodstvo po khimii pochv [A practical guide to soil chemistry]. Moscow: Publishing house RSAU-MAA; 2012. 225 p. In Russian
 27. Retallack GJ, Krull ES, Bockheim J. New grounds for reassessing paleoclimate of the Sirius Group, Antarctica. *Journal of the Geological Society*. 2001;158(6):925-935. doi: 10.1144/0016-764901-030
 28. Cox R, Lowe DR, Cullers RL. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1995;14(59):2919-2940. doi: 10.1016/0016-7037(95)00185-9
 29. McLennan SM, Hemming S, McDaniel DK, Hanson GN. Geo-chemical Approaches to Sedimentation, Provenance and Tectonics. *Geological Society of America Special Paper*. 1993;284:21-40. doi: 10.1130/SPE284-p21

30. Fedo CM, Nesbitt HW, Young GM. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*. 1995;23(10):1-934. doi: 10.1130/0091-7613(1995)023%3C0921:UTEOPM%3E2.3.CO;2
31. Suttner LJ, Dutta PK. Alluvial sandstone composition and palaeoclimate framework mineralogy. *Journal of Sedimentary Petrology*. 1986;56(3):329-345. doi: 10.1306/212F8909-2B24-11D7-8648000102C1865D
32. Ustinov VI, Chernov MK, Yagnyshev BS. Izuchenie strukturno-tektonicheskikh i geokhimicheskikh osobennostey rayona korenykh mestorozhdeniy almazov trubok Aykhal i Udachnaya (1980-1982 gg.) [Study of the structural-tectonic and geochemical features of the area of primary diamond deposits of the Aikhal and Udachnaya pipes (1980-1982)]. Yakutsk: Izd-vo Yakutskgeologiya; 1983. 343 p. In Russian
33. Ivanova AZ, Desyatkin RV. Valovoy sostav osnovnykh tipov pochv basseyna reki Alazeya [The grosscomposition of main soil types of the Alazeya River valley]. *Prirodnye Resursy Arktiki i Subarkтики*. 2016;1:110-114. In Russian
34. Okoneshnikova MV, Ivanova AZ, Desyatkin RV. Soils of the Verkhoyansk range in the area of Arkachan Plateau. *Eurasian Soil Science*. 2020;53(5):535-543 doi: 10.1134/S1064229320050105
35. Sokolov DA, Kulizhsky SP, Loiko SV, Domozhakova EA. Using electronic scanning microscopy for diagnostics of soil-forming processes on the surface of coal-mine dumps in Siberia. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Biologiya*. 2014;3(27):36-52. In Russian, English summary
36. Starykh SE, Shnee TV, Odintsova IG, Alpatova IN. Termicheskiy analiz gumusovykh veshchestv otkhodov pryadil'nykh kul'tur [Thermal analysis of humic substances from spinning crop waste]. In: *Modern trends in scientific support of the agro-industrial complex of the Upper Volga region*. Collective monograph. Vol. 1. Ivanovo: Publishing and printing complex "PresSto"; 2018. pp. 412-421. In Russian
37. Gubin SV, Lupachev AV. The role of frost boils in the development of cryozems on coastal lowlands of northern Yakutia. *Eurasian Soil Science*. 2017;50(11):1243-1254. doi: 10.1134/S1064229317110072
38. Samofalova IA. Diagnostics of soil formation and weathering processes based on the content of alkaline and alkaline earth macroelements in soils of the Middle Urals (Basegi Ridge). *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*. 2020;162(4):592-611. doi: 10.26907/2542-064X.2020.4.592-611. In Russian, English summary
39. Startsev VV, Dubrovsky YA, Zhangurov EV, Dymov AA. Spatial heterogeneity of soil properties in the zone of sporadic distribution of permafrost (Subpolar Urals). *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Biologiya*. 2019;48:32-55. doi: 10.17223/19988591/48/2. In Russian, English summary
40. Belousova NI, Sokolova TA, Tyapkina NA. Profil'naya differentsiatsiya glinistyykh mineralov v podzolistyykh al'fegumusovykh pochvakh na granitakh [Profile differentiation of clay minerals in Al-Fehumus podzolic soils on granites]. *Pochvovedenie*. 1973;11:116-132. In Russian
41. Uziak S, Wilgat M, Klimowicz Z. Mineral composition of arctic soils in the Bellsund region, Spitsbergen. *Polish Polar Research*. 1999;1:33-41.
42. Wilson MJ, Jones D. Lichen weathering of minerals: Implications for pedogenesis. *Geological Society*. 2007;11:5-12. doi: 10.1144/GSL.SP.1983.011.01.01
43. Krupskaya VV, Miroshnikov AY, Dorzhieva OV, Zakusin SV, Semenov IN, Usacheva AA. Mineral composition of soils and bottom sediments in bays of Novaya Zemlya. *Oceanology*. 2017;57(1):215-221. doi: 10.1134/S0001437017010076
44. Sirbu-Radasanu DS, Huzum R, Dumitras D-G, Stan CO. Mineralogical and geochemical implications of weathering processes responsible for soil generation in Mănăila Alpine Area (Tulgheș 3 Unit-Eastern Carpathians). *Minerals*. 2022;12:1161. doi: 10.3390/min12091161

Информация об авторах:

Васильева Татьяна Игнатьевна, канд. биол. наук, н.с. лаборатории геоэкологии и биогеохимии, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН (Якутск, Россия).
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9203-9193>

E-mail: vasilevatig@yandex.ru

Легостаева Яна Борисовна, канд. биол. наук, в.н.с. лаборатории геоэкологии и биогеохимии, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН (Якутск, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1556-9182>

E-mail: ylego@mail.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Tatiana Ig. Vasileva, Cand. Sci. (Biol.), researcher of the Laboratory of geoecology and biogeochemistry, Diamond and Precious Metal Geology Institute of the Siberian Branch of the RAS (Yakutsk, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9203-9193>

E-mail: vasilevatig@yandex.ru

Yana B. Legostaeva, Cand. Sci. (Biol.), leading researcher of the Laboratory of geoecology and biogeochemistry, Diamond and Precious Metal Geology Institute of the Siberian Branch of the RAS (Yakutsk, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1556-9182>

E-mail: ylego@mail.ru

The Authors declare no conflict of interest.

*Статья поступила в редакцию 07.09.2022;
одобрена после рецензирования 14.02.2023; принята к публикации 04.09.2025*

*The article was submitted 07.09.2022;
approved after reviewing 14.02.2023; accepted for publication 04.09.2025*

Научная статья

УДК 631.48

doi: 10.17223/19988591/71/2

Локальное разнообразие непаханных черноземов лесостепи Среднерусской возвышенности (Европейская Россия)

Мария Андреевна Смирнова¹, Юрий Георгиевич Чендев²,
Анастасия Григорьевна Нарожняя³

¹ *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

^{2, 3} *Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Белгород, Россия*

¹ <https://orcid.org/0000-0002-5256-4348>, summerija@yandex.ru

² <https://orcid.org/0000-0001-7864-041X>, sciences@mail.ru

³ <https://orcid.org/0000-0002-4271-1607>, narozhnyaya_A@bsu.edu.ru

Аннотация. Участки с нативными, никогда не распаханymi черноземами являются большой редкостью на Среднерусской возвышенности, и именно поэтому изучение, инвентаризация, картографирование и оценка почвенного разнообразия таких участков имеют большое значение для решения географо-генетических и практических задач. В работе приводятся результаты детального обследования почв участка размером $50 \times 50 \text{ м}^2$ (36 скважин и 6 почвенных разрезов), функционировавшего в режиме сенокоса/выгона по крайней мере последние 240 лет. Составлены 4 почвенные карты для разных таксономических уровней: типов, подтипов, видов, разрядов; на картах подсчитано число ареалов, рассчитаны индексы богатства, Шеннона, Симпсона, Рао, таксономического расстояния между почвами. Показано, что на общем фоне черноземов миграционно-мицелярных мощных глубоко- и среднекарбонатных встречаются ареалы черноземов глинисто-иллювиальных миграционно-мицелярных и мицелярных квазиглееватых мощных глубококарбонатных; черноземов миграционно-мицелярных сверхмощных глубоко- и среднекарбонатных; черноземов мицелярных сверхмощных и мощных средне- и глубококарбонатных. Почвенный покров участка слабо контрастный, что подтверждается расчетами таксономических расстояний, и характеризуется низким разнообразием. Значения индексов Шеннона, Симпсона и число ареалов двукратно увеличиваются при уменьшении уровня картографируемых единиц от типов к подтипам и от подтипов к видам, индекса Рао – при переходе от уровня подтипа к виду; вероятно, уровень вида является наиболее оптимальным для проведения оценок разнообразия нативных почв лесостепи.

Ключевые слова: педоразнообразие, структура почвенного покрова, картографирование почв, охрана почв, Белгородская область

Источник финансирования: работа выполнена при поддержке РФФ, проект № 24-17-00154 «География, свойства и эталонные функции нативных черноземов лесостепи юга Среднерусской возвышенности».

Для цитирования: Смирнова М.А., Чендев Ю.Г., Нарожняя А.Г. Локальное разнообразие непаханных черноземов лесостепи Среднерусской возвышенности (Европейская Россия) // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2025. № 71. С. 32–57. doi: 10.17223/19988591/71/2

Original article

doi: 10.17223/19988591/71/2

Local diversity of untilled chernozem soils in the forest-steppe of the Central Russian Upland (European Russia)

Maria A. Smirnova¹, Yuri G. Chendev², Anastasia G. Narozhnaya³

¹ *M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

^{2, 3} *Institute of Earth Sciences, Belgorod State National Research University,
Belgorod, Russian Federation*

¹ <https://orcid.org/0000-0002-5256-4348>, summerija@yandex.ru

² <https://orcid.org/0000-0001-7864-041X>, sciences@mail.ru

³ <https://orcid.org/0000-0002-4271-1607>, narozhnyaya_A@bsu.edu.ru

Summary. Native, never-plowed Chernozem areas are practically non-existent in the forest-steppe zone of the Eastern European Plain. Therefore, the study, inventory, mapping, and assessment of soil diversity in these areas are essential for addressing geographic, genetic, and practical issues. This paper presents the results of a comprehensive soil survey carried out at the "Korovino" site, which has been under a mowing/grazing regime for at least 240 years (See Fig. 1). A topographic survey was also conducted, and soil drilling to a depth of two meters was performed at 36 locations along a regular grid (See Fig. 2). Six profiles were established for detailed soil analysis for identified areas of Haplic and Luvic Chernozem. The vegetation cover of the area is shown (See Fig. 3). The assessment of taxonomic distances, as a measure of contrast between soils, is based on a matrix of soil properties (See Table 1), where the rows correspond to classification-relevant characteristics and the columns represent the soils studied. Each cell indicates the presence (ranging from 0.1 to 1) or absence (0) of a property within the soil, with the weight of each property assigned according to a hierarchical classification system. The taxonomic distance is defined as the Euclidean distance between the column vectors of the matrix. We produce four soil maps, each using different classification units - types, subtypes, species and phases - as mapping units. For each of the maps, we calculate the number of ranges and the indices of richness, Shannon, Simpson, and Rao. Statistical calculations have been performed to evaluate the variability of the chernic horizon, humus profile (chernic + mollic horizons), and effervescence line in the soils of the study area.

The soils in this area are mainly represented by Haplic and Luvic Chernozems (See Fig. 4), with well-developed granular and cloddy-granular structures in the AU horizon, and also root beads, coprolites, and various forms of carbonate neoformations. Iron-manganese neoformations have been identified in the BCAq/Cca,q and Cca,q horizons of eight soil samples with texture heterogeneity. A significant feature of these soils is the high degree of material disturbance, manifested in the presence of coprolites and krotovinas up to 20 cm in size, both direct and reverse. The coefficients of intra-profile variation, variation within areas, and variation across the entire site for the thickness of the chernic horizon, humus profile (chernic + mollic horizons), and effervescence line are closely aligned, not exceeding 20% (See Table 2). However, the difference between the extremes within the site can reach up to 30 cm for the chernic horizon, 60 cm for chernic + mollic horizons, and 70 cm for effervescence line. The investigated soils show a left-sided asymmetry in the distribution of the thickness of the chernic+ mollic horizon and a left-sided asymmetry in the distribution of BCA horizon thickness (horizon with secondary carbonates; See Fig. 5),

indicating a prevailing trend of decreasing thickness in the humified part of soil profiles and BCA horizons in the investigated soils. With regard to the effervescence line, a right-sided asymmetry in this characteristic was observed, indicating a trend towards carbonate leaching.

The main part of the site has a humus profile with a thickness of 100-110 cm and an effervescence line at a depth of 80-90 cm (*see Fig. 6*). The dominant soil types in the study area (*See Fig. 7*) are Haplic Chernozem (Siltic, Hyperhymic, Pachic) with 80-120 cm thick chernic + mollic horizons and an effervescence line deeper than 50 cm at approximately half of the site area. At approximately one-quarter of the site area, there are also areas of Luvic Chernozem (Siltic, Hyperhymic, Pachic, Bathyglyeyic), Luvic Chernozem (Siltic, Hyperhymic, Pachic, Bathyglyeyic) with chernic + mollic horizon thickness of 80-120 cm and effervescence line deeper than 80 cm, Haplic Chernozem (Siltic, Hyperhymic, Pachic) with chernic + mollic horizon thickness of more than 120 cm and effervescence line deeper than 50 cm, and Haplic Chernozem (Siltic, Hyperhymic, Pachic, Bathyglyeyic) with chernic + mollic horizon thickness of 80-120 cm and effervescence line deeper than 50 cm (*See Figs. 6, 7*). The soil cover in the area has a low contrast, as shown by the calculations of taxonomic distances. The average value is 0.7 out of the possible 2.98. In general, soils of low contrast are found next to each other within the site, while soils of high contrast are found at opposite ends of the site. The Shannon and Simpson diversity indices and the number of polygons on the map double when the classification level of the mapped units decreases from types to subtypes and then to species (*See Table 3*). The values of Rao's quadratic entropy index, which takes into account not only the number of areas and their proportion of the total area (as Shannon and Simpson indices) but also the contrast between soils, increase as the level of classification of mapped units decreases. A sharp twofold increase is observed when transitioning from the subtype level to the species level, suggesting that the species level may be the most suitable for evaluating quantitative diversity in native soils in the forest-steppe region.

The article contains 7 Figures, 3 Tables, 30 References.

Keywords: pedodiversity, soil cover pattern, soil mapping, soil security, Belgorod oblast

Fundings: this work was supported by the Russian Science Foundation (Project No. 24-17-00154, "Geography, properties, and benchmark functions of native chernozems in the southern forest-steppe of the Central Russian Upland").

For citation: Smirnova MA, Chendev YuG, Narozhnaya AG. Local diversity of untilled chernozem soils in the forest-steppe of the Central Russian Upland (European Russia). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2025;71:32-57. doi: 10.17223/19988591/71/2

Введение

Почвенный покров староосвоенных регионов характеризуется высокой степенью антропогенной трансформации, вызванной как былой, так и современной распашкой [1, 2]. Участки непаханных (нативных) черноземов практически не сохранились в пределах лесостепи Восточно-Европейской равнины [3, 4] как в силу старой освоенности региона, так и высокого плодородия этих почв [5]. По современным оценкам, общая площадь непахотных черноземов в пределах лесостепи Среднерусской возвышенности не превышает 60 км², из которых 88% приходится на территорию Централь-

но-Черноземного заповедника им. В.В. Алехина и около 8% – на участок «Ямская Степь» заповедника «Белогорье» [6, 7].

Абсолютное большинство исследований нативных черноземов староосвоенной лесостепи выполнены на заповедных территориях: на их основе даны представления о генезисе [8], режимах и свойствах лесостепных черноземов [9–11], структуре почвенного покрова заповедных участков [11–14] и пространственной вариабельности свойств почв [13, 15]. Вместе с тем природные условия Центрально-Черноземного заповедника и Ямской степи не охватывают всего разнообразия сочетаний факторов почвообразования староосвоенной лесостепи Среднерусской возвышенности, что обуславливает необходимость поиска, инвентаризации и изучения почв других, нетронутых участков лесостепи. В условиях практически полной сельскохозяйственной трансформации большой научный интерес к изучению представляют даже небольшие неиспользуемые под пашню территории, которые исторически функционировали в режиме сенокосов и/или выгонов [3, 7]. Характеристика свойств почв, структуры почвенного покрова и количественная оценка почвенного разнообразия таких участков могут выступать в качестве обоснования закрепления за ними особого природоохранного статуса [16, 17]. С практической точки зрения нативные черноземы сенокосов и выгонов могут быть использованы в качестве эталонов сравнения для прилегающих антропогенно-трансформированных черноземов.

Цель настоящей работы – характеристика структуры почвенного покрова и количественная оценка почвенного разнообразия для территории, представленной непахаными (нативными) автоморфными лесостепными черноземами на примере ключевого участка в Белгородской области, используемого в качестве сенокоса и выгона по крайней мере последние 240 лет.

Материалы и методы

Исследования проведены на южной окраине села Коровино Ракитянского района Белгородской области (рис. 1). Участок расположен приблизительно в 110 км к югу от Центрально-Черноземного заповедника им. В.В. Алехина и в 120 км к юго-западу от заповедной Ямской степи (кластер в составе заповедника «Белогорье»). Согласно картам 1783, 1865 и 1981 г. (рис. 1), а также разновременным космическим снимкам, эта территория никогда не распахивалась и использовалась в качестве сенокосных угодий и выгона, на ней отсутствовали дороги или проезды.

Были выполнены геодезическая съемка участка (квадрат со стороной 50 м) и геоботаническое описание. Бурение почв до глубины 2 м проводилось по регулярной сетке с шагом в 10 м в 36 точках (рис. 2). В каждой точке бурения выполнялось описание морфологического строения кернов с характеристикой таких свойств, как мощность почвенных горизонтов, их цвет, влажность, гранулометрический состав, наличие новообразований, их размер и обилие, наличие включений, глубина вскипания и профильное

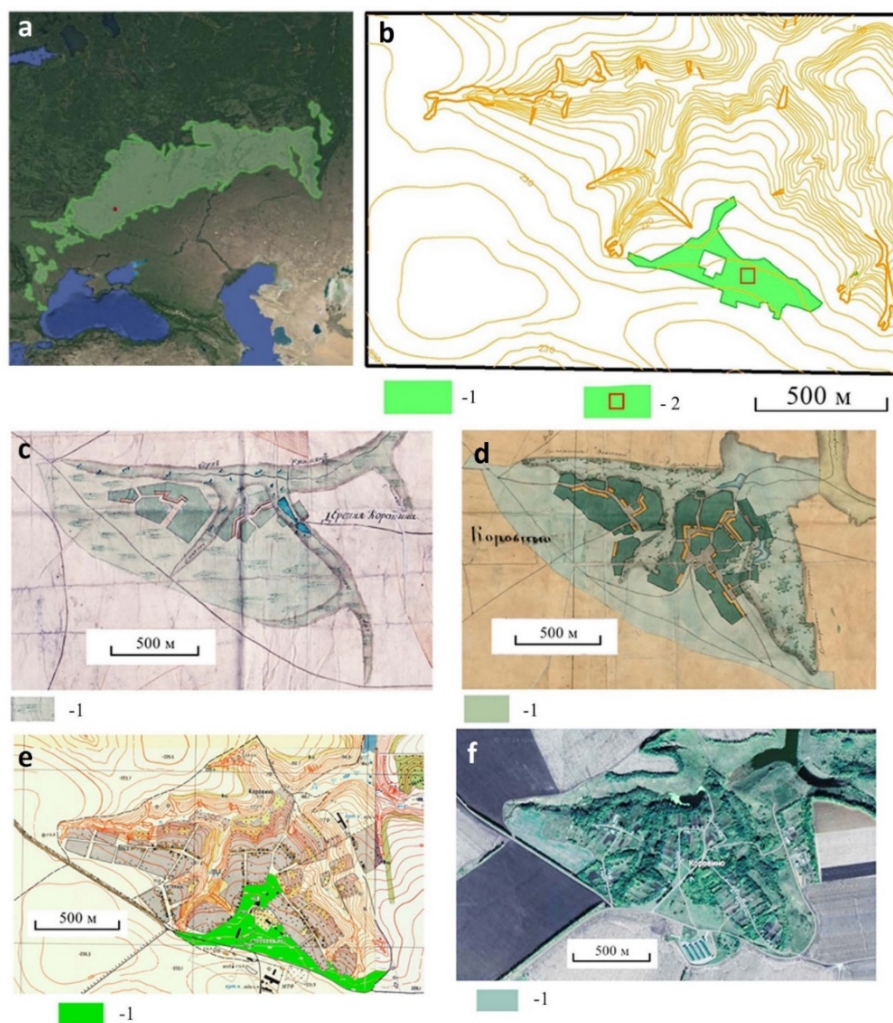


Рис. 1. Расположение участка исследования: *a* – на космическом снимке в пределах лесостепи (границы лесостепи даны по [18]), *b* – план с горизонталями (проведены через 2,5 м) и неизменный с 1783 г. ареал сенокоса/выгона, *c* – фрагмент плана деревни Коровино Богатинского уезда Курского наместничества 1783 г., *d* – фрагмент плана села Коровино Богатинского уезда Курской губернии 1865 г., *e* – фрагмент топографической карты 1981 г. территории села Коровино Ракитянского района Белгородской области, *f* – фрагмент спутникового снимка 2024 г. территории села Коровино Ракитянского района Белгородской области.

1 – положение сенокосов/выгонов, 2 – расположение участка полевого обследования почв

[Fig. 1. Maps and satellite image of the Korovino village: (1) location of meadows/pastures, (2) location of the soil survey area. (a) site on a space image within the forest-steppe (the forest-steppe boundaries are given according to [18]), (b) topographic map (contour lines are drawn every 2,5 m) and permanent since 1783 pasture/hayfield area, (c) fragment of the 1783 plan of the Korovino village in the Bogatinsky district of the Kursk governorate, (d) fragment of the 1865 plan of the Korovino village in the Bogatinsky district of the Kursk province, (e) fragment of the 1981 topographic map of Korovino village in the Rakityansky district of the Belgorod region, (f) fragment of the 2024 satellite image of the area of the Korovino village in the Rakityansky district of the Belgorod region]

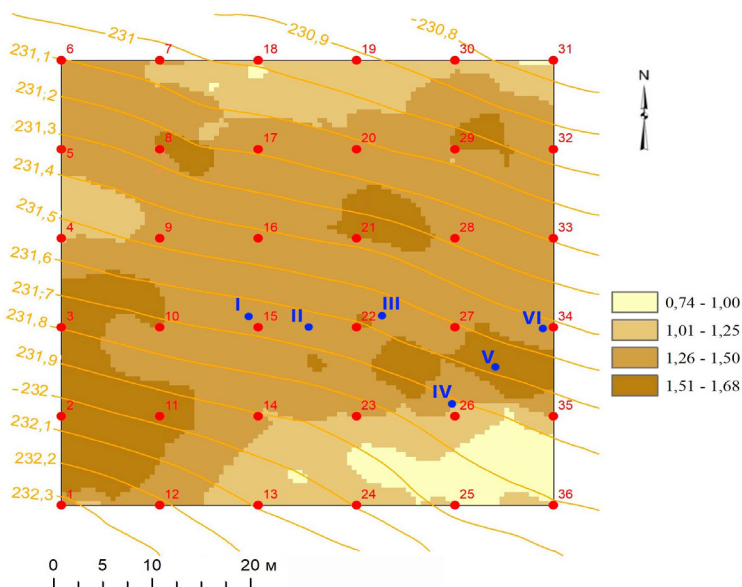


Рис. 2. План участка «Коровино» с указанием горизонталей (сечение 0,1 м) и крутизны склонов в градусах (цвет). Красными пунсонами указаны места бурения, арабскими цифрами указаны номера буровых скважин; синими точками отмечены места заложения почвенных разрезов, латинскими цифрами – номера разрезов (I–III – черноземы, IV–VI – черноземы глинисто-иллювиальные)

[Fig. 2. The topography of the site “Korovino” with isohypses (drawn every 0.1 m) and slope steepness in degrees (color-coded). Red dots with Arabic numerals indicate locations of soil core drilling locations; blue dots with Latin numerals indicating the soil pits locations (I–III - Haplic Chernozems, IV–VI - Luvic Chernozems)]

изменение его интенсивности. Диагностика почв проведена в соответствии с классификацией и диагностикой почв России [19].

На основании данных описания строения почвенных профилей в точках бурения намечались участки исследования почв в разрезах. С учетом выявления на ключевом участке двух типов почв – черноземов глинисто-иллювиальных (соответствуют черноземам, выщелоченным по [20]) и черноземов (соответствуют черноземам, типичным по [20]) – в пределах двух ареалов этих типов почв было заложено по три почвенных разреза с выбором базового разреза для детального полнопрофильного описания почв. Во всех разрезах выполнялся анализ морфометрических признаков почв по результатам измерений мощности генетических горизонтов и глубины вскипания вдоль боковых и передней стенок почвенных разрезов (в каждом разрезе по 10 измерений – по три на боковых стенках и 4 на передней).

На основании анализа геодезического плана участка исследований (см. рис. 2), изучаемая территория представляет собой слабонаклонную к северо-востоку поверхность крутизной от 1° до 1,7° (см. рис. 2). Абсолютные высоты в пределах участка исследований варьируют в пределах 231–232 м. Поэтому данный участок с полным основанием можно отнести к плакору.

Растительный покров в момент изучения почв (начало июня 2024 г.) был представлен лугово-степным разнотравьем (рис. 3) и образован следующими видами: пырей ползучий (*Elytrigia répens*) – sp 1-sp, эспарцет песчаный (*Onobrychis arenaria*) – sp, зеленчук желтый (*Galeobdolon luteum*) – sp, мятлик луговой (*Poa pratensis*) – sp gr, плевел многолетний (*Lolium perenne*) – sp gr, овсяница красная (*Festuca rubra*) – sp gr, костер безостый (*Brōmus inērmis*) – sp gr-sol, герань луговая (*Geranium pratense*) – sp gr, ветреница лютиковая (*Anemonoides ranunculoides*) – sp gr, подорожник ланцетолистный (*Plantago lanceolata*) – sp gr, полынь австрийская (*Artemisia austriaca*) – sp gr, ежа сборная (*Dáctylis glomerata*) – sol, типчак (*Festuca valesiaca*) – sol, смолевка поникшая (*Silēne nūtans*) – sol, полынь горькая (*Artemisia absinthium*) – sol, лютик едкий (*Ranunculus ácris*) – sol, молочай кипарисовый (*Euphōrbia cyparissias*) – sol, подмаренник мягкий (*Gálium mollúgo*) – sol. Согласно полевым исследованиям и расчетам, выполненным на территории заповедных лугово-степных участков, поверхностный сток на задернованных травами склонах (даже на крутых) не приводит к эрозии почвенного мелкозема [21]. Поэтому с полным основанием можно считать, что на изучаемом ключевом участке естественная эрозия почв отсутствовала в прошлом и отсутствует в настоящее время.

Оценка локального разнообразия почв включала расчет параметров вариабельности (средние арифметические и медианные значения, стандартное отклонение, коэффициент вариации) мощностей гумусового горизонта, гумусового профиля и глубины вскипания от 10%-й HCl (отдельно для черноземов и черноземов глинисто-иллювиальных), расчет таксономических расстояний между парами почв (как показателя контрастности почв), расчет индексов богатства, разнообразия Шеннона, Симпсона, квадратной энтропии Рао, подсчет числа почвенных ареалов в пределах участка. Гипотезы о нормальности распределения данных по свойствам почв проверены на основании критериев Шапиро–Уилка и Колмогорова–Смирнова. Оценка значимости различий средних выполнена с использованием критерия Краскела–Уоллиса ($p = 0,05$).



Рис. 3. Общий вид растительности участка «Коровино» до первого сенокоса в 2024 г.

[Fig. 3. The vegetation of the “Korovino” site before the first haymaking in 2024]

Оценка таксономических расстояний как меры контрастности почв по отношению друг к другу проведена по стандартной методике [22]. Для расчета таксономических расстояний была создана матрица свойств почв (табл. 1), где строки соответствовали морфологическим свойствам почв, а столбцы – исследуемым почвам. В качестве морфологических свойств были использованы классификационно-значимые характеристики, определяющие тип, подтип, вид и разряд в классификации и диагностике почв России. В каждой ячейке матрицы было отмечено наличие (от 0,1 до 1) или отсутствие (0) в почве свойства. Вес свойства присваивался в соответствии с иерархической системой классификации:

1) диагностические горизонты ВІ и ВСА (независимо от наличия или отсутствия в них каких-либо других диагностических признаков), вес – 1;

2) диагностические генетические признаки Іс, тс, q (без их привязки к генетическим горизонтам), вес – 0,5;

3) градации видовых признаков по мощности гумусового горизонта (мощные 80–120 см и сверхмощные > 120 см), глубине залегания карбонатов (среднекарбонатные 50–80 см, глубококарбонатные 80–120 см), вес – 0,2;

4) градации разрядных признаков – в качестве почвообразующих пород на участке встречались лессовидные тяжелые суглинки и лессовидные глины, вес – 0,1.

Всего была использована информация по наличию или отсутствию 11-ти свойств, комбинации из которых образуют все исследованные почвы участка. Было принято допущение, что набор введенных в таблицу свойств адекватно описывает почвы ключевого участка. Расчет таксономического расстояния между почвами производился согласно формуле [22]

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^T (x_i - x_j)}, \quad (1)$$

где d_{ij} – таксономическое расстояние между почвами i и j , x_i и x_j – векторы-столбцы матрицы почвенных свойств.

Контрастность почв по отношению друг к другу прямо пропорциональна значениям таксономического расстояния. Максимальное значение таксономического расстояния определяется количеством свойств в матрице и баллами, присваиваемыми за их наличие или отсутствие в почве; в данном случае максимально возможное значение таксономического расстояния равно 2,98.

На основании данных бурения в программе ArcGIS методом ординарного крикинга были составлены карты мощности гумусового профиля и глубины вскипания при реакции с 10% HCl. Почвенные карты были построены традиционным (экспертным) методом. Созданы 4 карты с разными единицами картографирования в соответствии с иерархической системой классификации: карты с отображением на них типов почв, типов и подтипов почв (для краткости далее такая карта будет упоминаться как карта подтипов), типов, подтипов и видов (для краткости далее такая карта будет упоминаться как карта видов), типов, подтипов, видов и разрядов (карта разрядов). Карта видов почв была составлена с привлечением карт

Таблица 1 [Table 1]

Фрагмент матрицы свойств почв, построенной для расчета таксономических расстояний
[Fragment of the soil properties matrix to calculate taxonomic distances]

Свойства [Properties]		Номера точек скважин [Borehole point numbers]									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Типовые [Soil types]	В1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
	ВСА	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
Подтиповые [Soil subtypes]	lc	0,5	0,5	0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	mc	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	q	0	0	0,5	0	0	0	0	0	0	0
Видовые [Soil species]	По мощности гумусового горизонта [By the thickness of the humus profile (Chernic + Mollic horizon)]	Сверхмощные [Humus profile thickness is more than 120 cm]	0	0	0	0,2	0	0,2		0	0,2
			0,2	0,2	0,2	0	0,2	0		0,2	0
	По глубине залегания карбонатов [By the depth of effervescence line]	Среднекарбонатные [Effervescence line at 50-80 depth]	0	0	0	0,2	0	0		0	0
		Глубококарбонатные [Effervescence line at 80-120 depth]	0,2	0,2	0,2	0	0,2	0,2		0,2	0,2
		На лессовидных тяжелых суглинках [On loess-like heavy loams]	0,1	0	0	0,1	0,1	0	0	0,1	0
Разрядные [Soil phases]	На лессовидных глинах [On loess-like clays]	0	0,1	0,1	0	0	0	0	0,1	0	0,1

мощности гумусового профиля и глубины вскипания согласно методике, описанной в работе [23]. Оценка почвенного разнообразия проведена для каждой из четырех почвенных карт. Были рассчитаны следующие индексы: индекс богатства (соответствует числу различных классификационных почвенных групп, выделенных на участке); число ареалов на карте, индексы Шеннона (H), Симпсона (G) и квадратной энтропии Рао (Q), рассчитанные согласно формулам [16]

$$H = -\sum_{i=1}^c p_i \ln p_i, \quad (2)$$

$$G = 1 - \sum_{i=1}^c p_i^2, \quad (3)$$

$$Q = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^c d_{ij} p_i p_j, \quad (4)$$

где p_i, p_j – доля площади, занимаемая почвами i и j от всего почвенного покрова участка, c – количество классификационных почвенных групп на ключевом участке, d_{ij} – таксономическое расстояние между почвами i и j .

Чем больше значения приведенных выше индексов, тем выше уровень разнообразия. Индексы разнообразия Шеннона и Симпсона учитывают как количество компонентов, образующих почвенный покров, так и их размеры. Чем больше число компонентов, образующих почвенных покров, и чем ближе по размеру ареалы, тем больше уровень разнообразия [16]. Индекс квадратной энтропии Рао учитывает не только количество компонентов в пределах участка и их доли от всей площади, но и контрастность компонентов по отношению друг к другу [16]; при одинаковом числе компонентов и их долях от площади всего участка, разнообразие будет выше там, где больше степень контрастности.

Результаты исследования и обсуждение

Почвы участка. По данным морфологического описания признаков почв в буровых ядрах на изучаемом участке выявлены два типа почв: черноземы (31 точка из 36, фотография типичного профиля представлена на рис. 4а) и черноземы глинисто-иллювиальные (5 точек; фотография типичного профиля представлена на рис. 4б), и 6 подтипов. Были диагностированы 4 подтипа черноземов: миграционно-мицелярных квазиглееватых (AU – (AUlc) – (AUlc/BCAlc) – (AU/BCAmc) – BCAlc,mc – BCAmc,q), миграционно-мицелярных (AU – (AUlc) – (AUlc/BCAlc) – (AU/BCAmc) – BCAlc, mc), мицелярных квазиглееватых (AU – AU/BCmc – BCAmc – BCAm,cq) и мицелярных (AU – AU/BCmc – BCAmc), и 2 подтипа черноземов глинисто-иллювиальных: миграционно-мицелярных квазиглееватых (AU – AU/BI – (BI/AU) – BI – BCAlc, mc – BCAlc,q) и миграционно-мицелярных (AU – AU/BI – (BI/AU) – BI – BCAlc – BCAmc). Среди черноземов 7 почв были отнесены к сверхмощным и 24 – к мощным; 9 – к среднекарбонатным и 22 – к глубококарбонатным. Все черноземы глинисто-иллювиальные отнесены к мощным глубококарбонатным. Почвы участка

представлены среднесуглинистыми разностями. В качестве почвообразующих пород в равной степени (по 18 скважин) выступают как лессовидные карбонатные тяжелые суглинки, так и лессовидные карбонатные глины. Таким образом, в пределах участка на уровне типа почв выделены 2 группы; на уровне типа и подтипа – 6; на уровне типа, подтипа и вида – 12; на уровне типа, подтипа, вида и разряда – 19.

Основными свойствами исследованных почв являются хорошо выраженная зернистая и комковато-зернистая структура горизонта AU и корневые бусы, копролиты, различные формы карбонатных новообразований. Железо-марганцевые новообразования диагностированы в горизонтах BSAq/Csa,q и Csa,q в почвах, где наблюдается неоднородность гранулометрического состава – более легкий состав верхней части профиля и более тяжелый – нижней, переходной к почвообразующей породе и самой почвообразующей породе (почвы скважин 11, 12, 13, 14, 24, 25, 26, 36). Примазки выступают как индикаторы периодического переувлажнения почв на водоупоре, возникающего, скорее всего, осенью и весной – в период отсутствия корневой десукции; подобные морфологические признаки переувлажнения обнаружены в автоморфных заповедных черноземах, формирующихся на литологически неоднородных породах в годы с повышенным атмосферным увлажнением [24]. Важной особенностью почв является очень высокая степень перерытости животными – как червями (*Lumbricina*), так и слепышами (*Spalax microphthalmus*), следы жизнедеятельности

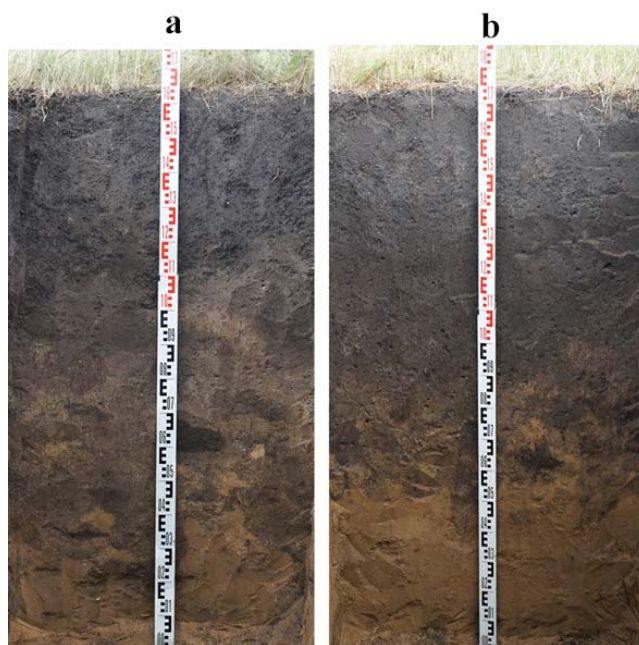


Рис. 4. Чернозем р. I (a) и чернозем глинисто-иллювиальный р. V (b) на участке «Коровино»

[Fig. 4. Haplic Chernozem p. I (a) and Luvic Chernozem p. V (b) at "Korovino" site]

которых отчетливо проявляются в профиле в виде копролитов, прямых и обратных кротовин размерами до 20 см в поперечном разрезе.

Вариабельность свойств почв. В табл. 2 приведены основные статистические показатели морфологического строения почв участка: мощность гумусового горизонта (AU), гумусового профиля (AU + AU/BI или AU + AU/BCA) и глубина обнаружения вторичных карбонатов (глубина вскипания от 10% HCl). Гумусовый горизонт занимает примерно 60–70% от мощности всего гумусового профиля, остаток приходится на темный, хорошо прокрашенный органическим веществом переходный к срединному горизонт. Морфологический облик переходных горизонтов свидетельствует о большой роли почвенных животных в его формировании – эти горизонты очень неоднородны, состоят из материала прямых и обратных кротовин.

Мощность гумусового горизонта в двух исследованных ареалах чернозема и чернозема глинисто-иллювиального близка, и наблюдаемая разница в значениях не является статистически-значимой согласно рассчитанному критерию Краскела–Уоллиса ($p = 0,05$). Вместе с тем меньшая на 9 см мощность гумусового профиля в ареале чернозема в сравнении с ареалом чернозема глинисто-иллювиального статистически значима. Исследованный ареал чернозема статистически значимо отличается от всех исследованных в скважинах черноземов по мощности гумусового горизонта (меньше на 10 см) и профиля (меньше на 27 см), что может являться подтверждением правильности выделения данного ареала на карте.

Вариабельность значений мощностей гумусового горизонта и гумусового профиля невысока – не превышает 15% как для отдельных почвенных профилей, так и для ареалов всего участка. Можно отметить, что вариабельность гумусового горизонта и гумусового профиля, наблюдаемая в пределах одного профиля, близка к вариабельности, наблюдаемой в пределах почвенного ареала и всего исследованного участка, т.е. исследованные автоморфные нативные черноземы достаточно однородны по мощности гумусового горизонта и гумусового профиля. Вместе с тем могут встречаться отдельные участки с экстремальными значениями показателей, и разница между этими экстремальными значениями может достигать 30 см для гумусового горизонта и 60 см для гумусового профиля.

Глубина обнаружения вторичных карбонатов, как правило, приурочена к нижней части гумусового профиля за исключением черноземов глинисто-иллювиальных. Разница между глубиной обнаружения карбонатов для ареала чернозема и чернозема глинисто-иллювиального статистически значима и составляет 62 см. Согласно значениям критерия Краскела–Уоллиса, средняя глубина вскипания почв в ареале чернозема и в черноземах всего участка достоверно не отличаются. Как и в случае с гумусовым горизонтом и гумусовым профилем, глубина вскипания характеризуется низкими значениями коэффициента вариации, не превышает 20% – т.е. участок достаточно однороден по этому параметру, однако разброс значений в некоторых местах может достигать 70 см.

Таблица 2 [Table 2]

**Статистические характеристики морфологических
свойств почв участка «Коровино»
[Statistical characteristics of the morphological properties of soils of the "Korovino" site]**

Выборка [Sample]	<i>n</i>	μ	μ_c	min	max	σ	<i>V</i> , %
Гумусовый горизонт [Chernic horizon]							
Чернозем, р. I [Haplic Chernozem, p. I]	10	55,2	53	47	67	6,7	13
Чернозем, р. II [Haplic Chernozem, p. II]	10	49,7	48,5	46	60	3,9	8
Чернозем, р. III [Haplic Chernozem, p. III]	10	49,8	49,5	44	54	2,9	6
Ареал чернозема* [Polygon of Haplic Chernozem]	30	51,6	50	44	67	5,3	11
Все скважины, почвы которых диагностированы как черноземы [All Haplic Chernozems, studied in soil cores]	31	63,9	60	50	80	7,6	13
Чернозем глинисто-иллювиальный, р. IV [Luvic Chernozem, p. IV]	10	52,3	54	41	57	4,5	8
Чернозем глинисто-иллювиальный, р. V [Luvic Chernozem, p. V]	10	58,9	60	55	64	3,2	5
Чернозем глинисто-иллювиальный, р. VI [Luvic Chernozem, p. VI]	10	48,1	48	41	53	3,2	7
Ареал чернозема глинисто- иллювиального** [Polygon of Luvic Chernozem]	30	53,1	54	41	64	5,7	11
Все скважины, почвы которых диагно- стированы как черноземы глинисто- иллювиальные [All Luvic Chernozems, studied in soil cores]	5	63	60	60	70	4,5	7
Все почвы скважин [All soils, studied in soil cores]	36	63,7	60	50	80	7,2	12
Гумусовый профиль [Chernic + Mollic horizon]							
Чернозем, р. I [Haplic Chernozem, p. I]	10	76	76,5	63	84	6,1	8
Чернозем, р. II [Haplic Chernozem, p. II]	10	82,9	83	63	98	9,7	12
Чернозем, р. III [Haplic Chernozem, p. III]	10	77,8	77,5	70	86	4,6	6
Ареал чернозема* [Polygon of Haplic Chernozem]	30	78,9	78	63	98	7,5	10
Все скважины, почвы которых диагностированы как черноземы [All Haplic Chernozems, studied in soil cores]	31	106,3	105	80	140	13,3	13
Чернозем глинисто-иллювиальный, р. IV [Luvic Chernozem, p. IV]	10	88,4	87	83	96	4,2	5
Чернозем глинисто-иллювиальный, р. V [Luvic Chernozem, p. V]	10	90,7	90	86	96	3,4	4
Чернозем глинисто-иллювиальный, р. VI [Luvic Chernozem, p. VI]	10	79,9	79	72	90	5,5	7

Выборка [Sample]	<i>n</i>	μ	μ_c	min	max	σ	<i>V</i> , %
Ареал чернозема глинисто-иллювиального** [Polygon of Luvic Chernozem]	30	86,3	87	72	96	6,4	7
Все скважины, почвы которых диагностированы как черноземы глинисто-иллювиальные [All Luvic Chernozems, studied in soil cores]	5	90	90	80	100	10	11
Все почвы скважин [All soils, studied in soil cores]	36	104,0	100	80	140	14,0	14
Глубина вскипания от 10%-й HCl [Effervescence line]							
Чернозем, р. I [Haplic Chernozem, p. I]	10	65,8	67	50	75	7,5	11
Чернозем, р. II [Haplic Chernozem, p. II]	10	56	57	46	63	6,6	12
Чернозем, р. III [Haplic Chernozem, p. III]	10	79,3	79,5	72	85	3,5	4
Ареал чернозема* [Polygon of Haplic Chernozem]	30	67,0	67	46	85	11,4	17
Все скважины, почвы которых диагно- стированы как черноземы [All Haplic Chernozems, studied in soil cores]	31	83,1	80	50	110	14,4	18
Чернозем глинисто-иллювиальный, р. IV [Luvic Chernozem, p. IV]	10	106,5	105,5	98	118	5,4	5
Чернозем глинисто-иллювиальный, р. V [Luvic Chernozem, p. V]	10	137	136,5	131	145	4,2	3
Чернозем глинисто-иллювиальный, р. VI [Luvic Chernozem, p. VI]	10	136,2	135,5	125	146	8,6	6
Ареал чернозема глинисто-иллювиального** [Polygon of Luvic Chernozem]	30	126,6	132	98	146	15,7	12
Все скважины, почвы которых диагностированы как черноземы глинисто-иллювиальные [All Luvic Chernozems, studied in soil cores]	5	116	120	110	120	5,5	5
Все почвы скважин [All soils, studied in soil cores]	36	87,6	90	50	120	17,7	20

Примечание. *n* – размер выборки; μ – среднее значение; μ_c – медиана; min – минимальное значение; max – максимальное значение; σ – среднееквадратическое отклонение; *V*, % – коэффициент вариации; * – значения приведены для разрезов I, II и III вместе; ** – значения приведены для разрезов IV, V и VI вместе.

[Note. *n* - sample size; μ - mean value; μ_c - mediana; min - minimum value; max - maximum value; σ - standard deviation; *V*, % - coefficient of variation; * - values are given for soil pits I, II and III together; ** - values are given for soil pits IV, V and VI together].

Важным индикатором генетических особенностей почв участка выступает степень асимметричности полигонов распределения морфометрических свойств почв (рис. 5). Как видно на представленном рисунке, в изучаемых черноземах имеют место левосторонняя асимметрия распределения

мощности гумусированной части профилей черноземов и левосторонняя асимметрия распределения мощности горизонта ВСА, т.е. в изучаемом почвенном пространстве преобладает тенденция снижения мощности гумусированной части профилей и мощности горизонтов ВСА. По показателю глубины вскипания наблюдается правосторонняя асимметрия признака, т.е. тенденция к выщелачиванию карбонатов (рис. 5).

Разброс значений мощностей гумусового горизонта, гумусового профиля и глубины вскипания для целинных черноземов заповедных участков варьирует в значительных пределах; по обобщенным данным [9, 12, 15], мощность гумусового горизонта автоморфных нативных черноземов варьирует от 40 до 100 см, гумусового профиля – от 70 до 140 см, а глубина вскипания – от 20 до 180 см. Полученные нами данные укладываются в обозначенные диапазоны. Сравнение средних значений по перечисленным выше параметрам с заповедными участками (средние значения получены для выборок более 800 точек [15]) показывает, что почвы участка «Коровино» характеризуются меньшей на 3 см мощностью гумусового горизонта и гумусового профиля и на 17 см большей глубиной вскипания; вместе с тем эти цифры не превышают значений стандартных отклонений, поэтому не могут считаться значимыми.

Почвенный покров и оценка почвенного разнообразия на разных классификационных уровнях. В пределах почвенного покрова выделяются несколько зон (рис. 6) – самая широкая, протяженная с Ю-З на С-В центральная зона с более близким залеганием к поверхности карбонатов и достаточно мощным гумусовым профилем, и две зоны, приуроченные к С-З и Ю-В части участка с более глубоким, чем в центральной части, залеганием карбонатов,

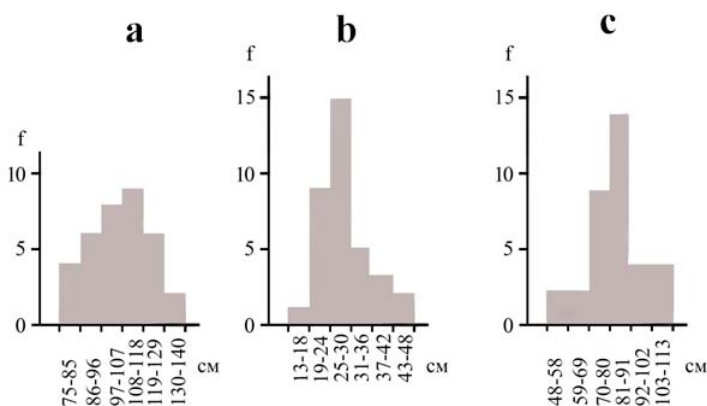


Рис. 5. Гистограммы распределения мощности гумусового профиля (а), горизонтов ВСА (b) и глубины вскипания (с) в выборке черноземов на участке «Коровино» ($n = 34$, объединены данные по почвам разрезов и буровых скважин)

[Fig. 5. Distribution histograms of the Chernic + Mollic horizon thickness (a), horizons with secondary carbonates (b) and effervescence line (c) in a sample of Chernozems at the "Korovino" site ($n = 34$, data on soils of open pits and boreholes combined)]

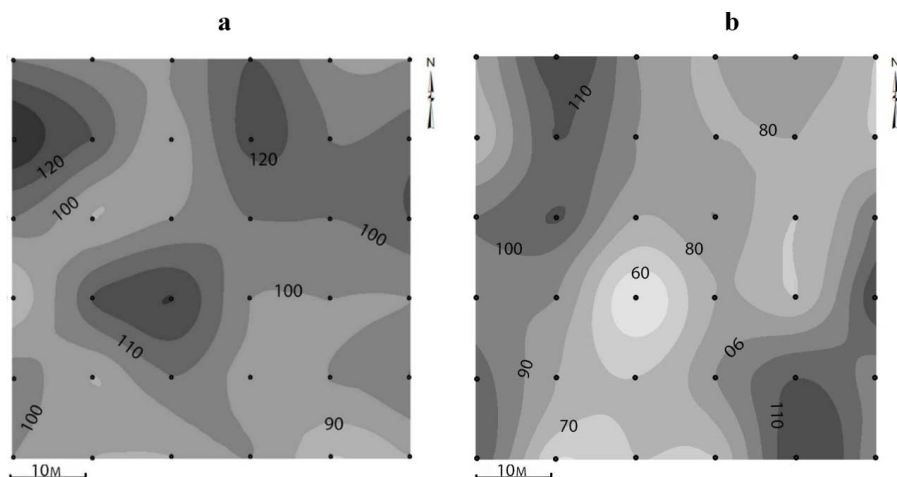


Рис. 6. Мощность гумусового профиля (а) и глубина вскипания почв при реакции с 10% HCl (b) на участке «Коровино»

[Fig. 6. The Chernic + Mollic horizon thickness (a) and the effervescence line (b) at the site “Korovino”]

но более мощным (на С-3) и менее мощным (на Ю-В) гумусовым профилем. Ареалы пониженного вскипания почв линейно вытянуты с Ю-З на С-С-В; предположительно они могут быть связаны с реликтовыми полигонально-блочными структурами, возникшими на стадии вытаивания многолетней мерзлоты в позднем плейстоцене (выщелоченные почвы соответствуют межблочьям, в которых происходило вытаивание ледяных жил) [25]. Чтобы подтвердить или опровергнуть данное предположение, требуется проведение дополнительных исследований с заложением глубоких почвенно-геологических шурфов.

Почвенные карты ключевого участка, построенные для разных уровней классификации, показаны на рис. 7. Черноземы занимают 76% от площади всего участка, наибольшие площади среди которых приходятся на черноземы миграционно-мицелярные мощные глубококарбонатные (26% от площади всего участка и 34% от площади всех черноземов) и миграционно-мицелярные мощные среднекарбонатные (21% от площади всего участка и 28% от площади всех черноземов). Черноземы миграционно-мицелярные мощные среднекарбонатные формируются преимущественно на тяжелых лессовидных суглинках, глубококарбонатные – приблизительно в равной мере как на лессовидных тяжелых суглинках, так и на лессовидных глинах. Миграционно-мицелярный и мицелярный квазиглееватый подтипы черноземов глинисто-иллювиальных занимают приблизительно одинаковые площади (по 7% от всего участка), все виды представлены мощными глубококарбонатными, в качестве почвообразующих пород преобладают лессовидные тяжелые суглинки.

Основная часть участка приходится на области с мощностью гумусового профиля в 100–110 см и глубиной залегания карбонатов на 80–90 см.

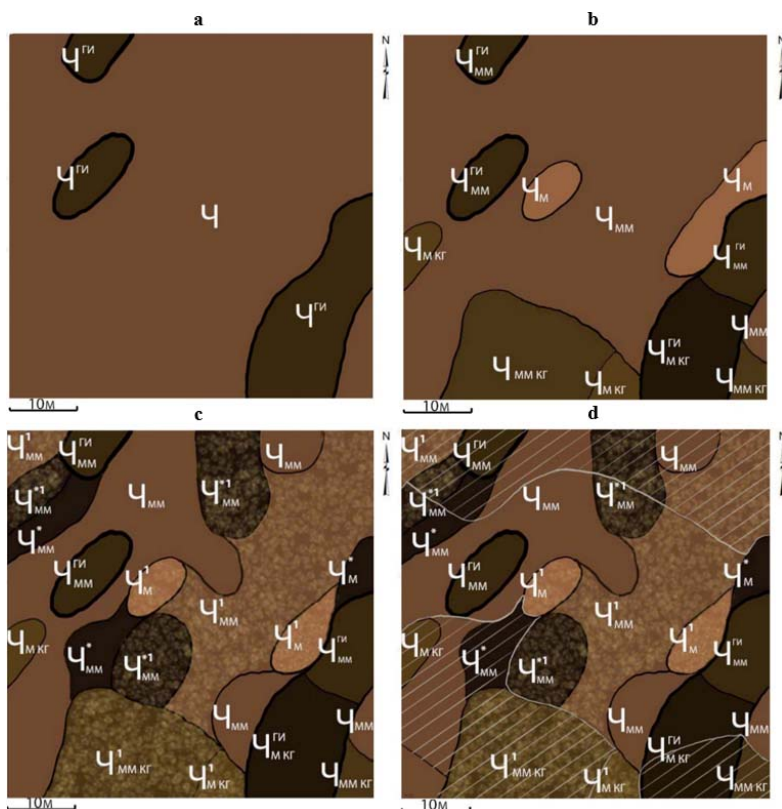


Рис. 7. Почвенные карты ключевого участка «Коровино», построенные для единиц разного классификационного уровня: типов почв (а), подтипов (б), видов (с), разрядов (д). Типы почв: Ч – черноземы, Чги – черноземы глинисто-иллювиальные; подтиповые признаки: м – мицелярные, мм – миграционно-мицелярные, кг – квазиглееватые; видовые признаки: * – сверхмощные, при отсутствии * – мощные; 1 – среднекарбонатные, при отсутствии 1 – глубококарбонатные; серой штриховкой показаны почвы, формирующиеся на лессовидных глинах, в остальных случаях – на лессовидных тяжелых суглинках

[Fig. 7. Soil maps of the "Korovino" site, constructed for units of different classification levels: soil types (a), soil subtypes (b), soil species (c), soil phases (d). Soil types: Ch - chernozems (Haplic Chernozems), Chgi - clayey-illuvial chernozems (Luvic Chernozems); subtype characters: м - mycelial, мм - migratory-mycelial, кг - quasi-gleyic; species characteristics: * - humus profile thickness is more than 120 cm, in the absence of * - humus profile thickness is 80-120 cm; 1 - effervescence line at 50-80 depth, in the absence of 1 - effervescence line at 80-120 depth; gray shading shows soils formed on loess-like clays, in other cases - on loess-like heavy loams]

Почвенные карты ключевого участка, построенные для разных уровней классификации, показаны на рис. 7. Черноземы занимают 76% от площади всего участка, наибольшие площади среди которых приходятся на черноземы миграционно-мицелярные мощные глубококарбонатные (26% от площади всего участка и 34% от площади всех черноземов) и миграционно-мицелярные мощные среднекарбонатные (21% от площади всего участка и 28% от площади всех черноземов). Черноземы миграционно-мицелярные мощные среднекарбонатные формируются преимущественно на тяжелых

лессовидных суглинках, глубококарбонатные – приблизительно в равной мере как на лессовидных тяжелых суглинках, так и на лессовидных глинах. Миграционно-мицелярный и мицелярный квазиглееватый подтипы черноземов глинисто-иллювиальных занимают приблизительно одинаковые площади (по 7% от всего участка), все виды представлены мощными глубококарбонатными, в качестве почвообразующих пород преобладают лессовидные тяжелые суглинки.

В качестве преобладающих на карте типов и подтипов почв выступают соответственно ареалы черноземов и черноземов миграционно-мицелярных. На их фоне выделяются ареалы других почв, имеющие преимущественно вытянутую с Ю-З на С-В форму, соответствующую направлению падения очень пологого склона участка. Крупный ареал чернозема дробится на более мелкие при изменении единиц картографирования от более высоких классификационных уровней к более низким; в случае черноземов глинисто-иллювиальных границы двух ареалов, выделенные на карте типов почв в С-З части участка, остаются неизменными при понижении классификационного уровня картографируемых единиц. Единый ареал в Ю-В части участка дробится на 3 части при переходе от уровня типа к уровню разряда.

Наибольшее количество ареалов на карте разрядов представлено черноземами миграционно-мицелярными мощными глубококарбонатными на тяжелых лессовидных суглинках (4 ареала), черноземами миграционно-мицелярными сверхмощными среднекарбонатными на лессовидных тяжелых суглинках (3 ареала), черноземами миграционно-мицелярными мощными глубококарбонатными на лессовидных глинах (3 ареала). Остальные разряды преимущественно представлены двумя ареалами. Наибольшее число соседств характерно для ареалов черноземов миграционно-мицелярных мощных глубоко- и среднекарбонатных на лессовидных тяжелых суглинках; наименьшее число соседств – для черноземов миграционных квазиглееватых мощных глубококарбонатных на лессовидных глинах и среднекарбонатных на лессовидных тяжелых суглинках.

Структура почвенного покрова может быть описана как спорадически-пятнистая микрокомбинация черноземов миграционно-мицелярных мощных глубоко- и среднекарбонатных, выступающих в качестве фона и вытянутых, преимущественно овальных ареалов черноземов глинисто-иллювиальных миграционно-мицелярных и мицелярных квазиглееватых мощных глубококарбонатных, черноземов миграционно-мицелярных сверхмощных глубоко- и среднекарбонатных, черноземов миграционно-мицелярных квазиглееватых глубоко- и среднекарбонатных, черноземов мицелярных сверхмощных и мощных средне- и глубококарбонатных.

Форма почвенных ареалов и эволюция почвенного покрова связана с роющей деятельностью животных и формированием таким образом микрорельефа, обусловливавшего перераспределение влаги в пределах участка [26]. Почвенный покров участка является типичным для водораздельных пространств заповедной лесостепи [9, 12, 14]. Рисунок почвенного покрова и число компонентов повторяют рисунок и число компонентов в пределах

слабонаклонных пахотных склонов Среднерусской возвышенности [27], вместе с тем состав компонентов различен – на пашне появляются слабо-эродированные почвенные разности. Почвенный покров пахотных пологих и крутых склонов значительно отличается от почвенного покрова непашотных участков не только составом компонентов, но и пространственным рисунком – преобладают древовидные структуры, эволюция которых определяется эрозионно-аккумулятивными, а не водно-миграционными процессами как на непашотных участках [9, 12, 27].

Анализ контрастности почвенного покрова, основанный на расчете таксономических расстояний между почвенными группами уровня разрядов, показал, что самой контрастной парой в пределах участка является пара чернозема миграционно-мицелярного сверхмощного среднекарбонатного на лессовидном тяжелом суглинке (скважина 5) и чернозема глинисто-иллювиального мицелярного квазиглееватого мощного глубококарбонатного на лессовидной глине (скважина 25), значение таксономического расстояния равно 1,6. Ареалы этих почв удалены друг от друга и находятся на разных концах участка. Наиболее контрастная пара почв, ареалы которых соседствуют на участке, представлена черноземом мицелярным мощным среднекарбонатным на тяжелом лессовидном суглинке и черноземом глинисто-иллювиальным миграционно-мицелярным мощным глубококарбонатным на лессовидной глине; значение таксономического расстояния между почвами равно 1,4. Наименее контрастными являются пары, отличающиеся только по характеру почвообразующих пород, например, черноземы миграционно-мицелярные мощные глубококарбонатные на тяжелых суглинках и глинах со значениями таксономического расстояния, равного 0,1. Как правило, ареалы этих групп почв соседствуют друг с другом. Среднее значение таксономического расстояния на участке равно 0,7, почвенный покров участка можно обозначить как слабоконтрастный.

В табл. 3 приведены значения индексов разнообразия, рассчитанные для различных единиц картографирования почв. Значения индексов ожидаемо растут при уменьшении классификационного уровня картографируемых единиц, сопровождаемого увеличением числа ареалов [28]. Общей тенденцией для числа ареалов, индексов богатства, Шеннона и Симпсона является приблизительно двукратное увеличение значений при переходе от классификационного уровня типа к уровню подтипа и уровню вида. Двукратное увеличение значения индекса Рао наблюдается только при переходе от классификационного уровня подтипа к уровню вида; значения индексов Рао, рассчитанные для классификационного уровня вида и разряда, практически не отличаются. Таким образом, резкий рост значений всех индексов разнообразия наблюдается при переходе от классификационного уровня подтипа к уровню вида; наименьший рост – при переходе от уровня вида к уровню разряда. Вероятно, уровень вида является наиболее оптимальным для проведения оценок количественного разнообразия нативных почв лесостепи.

Таблица 3 [Table 3]

**Значения индексов разнообразия почвенного покрова участка «Коровино»,
рассчитанные для разных классификационных уровней**
[Values of diversity indices for the soils of “Korovino” site,
calculated for different soil taxonomic levels]

Классификационный уровень, на котором выполнено картографирование почв [The soil classification level at which the soil mapping has been conducted]	Число ареалов [Number of poly- gons]	Индексы разнообразия [Diversity index]			
		Богат- ства [Rich- ness]	Шен- нона [Shan- non]	Симп- сона [Simp- son]	Рао [Ruo]
Тип (см. рис. 7a) [Soil type (see Fig. 7a)]	5	2	0,61	0,28	0,12
Подтип (см. рис. 7b) [Soil subtype (see Fig. 7b)]	12	6	1,28	0,52	0,16
Вид (см. рис. 7c) [Soil species (see Fig. 7c)]	22	12	2,49	0,87	0,31
Разряд (см. рис. 7d) [Soil phases (see Fig. 7d)]	30	19	3,07	0,94	0,33

Количественная оценка почвенного разнообразия является относительно новым направлением в географии почв и работы, посвященные оценке разнообразия почв лесостепи, единичны [17]. Полученные нами индексы разнообразия, рассчитанные на уровне подтипа для ключевого участка с нативными автоморфными черноземами, оказались ниже, чем индексы, рассчитанные для участка горной лесостепи Алтая (размер участка 7 км × 4,5 км, индекс Шеннона 2,4, Симпсона 0,8) [29] и для двух пахотных участков размерами 30 м × 50 м в агроландшафте лесостепи Белгородской области (средние значения индексов богатства – 8, Шеннона – 1,5, Симпсона – 0,86, Рао – 0,57) [30], но выше чем для трансекты (размер 30 м × 50 м) под лесополосой (индекс богатства – 8, Шеннона – 0,89, Симпсона – 0,83, Рао – 0,42).

Таким образом, исследованный почвенный покров участка с нативными черноземами характеризуется невысоким почвенным разнообразием, а структура почвенного покрова типична для заповедных участков лесостепных ландшафтов как для плакоров, так и пологих склонов. Пространственный рисунок и число компонентов, а значит, и уровень почвенного разнообразия сходны для исследованного нами участка и пахотных приводораздельных слабонаклонных склонов (уклон до 2°) на территории Среднерусской возвышенности, хотя и отличаются компонентным составом. Вместе с тем почвенный покров пахотных пологих и крутых склонов претерпевает существенные изменения по сравнению с непахотными участками – не только в составе компонентов, но и в пространственном рисунке; распашка приводит к доминированию эрозионно-аккумулятивных, а не водно-миграционных механизмов в процессах связи компонентов и эволюции почвенных комбинаций.

Выводы

На основании изучения почвенного покрова участка (размеры 50 × 50 м), функционирующего в режиме сенокоса/выгона по крайней мере последние 240 лет в пределах старо освоенной лесостепи Среднерусской возвышенности (Белгородская область), могут быть сформулированы следующие выводы.

1. Структура почвенного покрова представлена спорадически-пятнистой микрокомбинацией черноземов миграционно-мицелярных мощных глубоко- и среднекарбонатных, выступающих в качестве фона (приблизительно половина от площади всего участка) и вытянутых, преимущественно овальных ареалов черноземов глинисто-иллювиальных миграционно-мицелярных и мицелярных квазиглееватых мощных глубококарбонатных, черноземов миграционно-мицелярных сверхмощных глубоко- и среднекарбонатных, черноземов миграционно-мицелярных квазиглееватых глубоко- и среднекарбонатных, черноземов мицелярных сверхмощных и мощных средне- и глубококарбонатных. Почвенный покров участка слабо контрастный, что подтверждается расчетами таксономических расстояний.

2. Средняя мощность гумусового горизонта составляет 60 см как для черноземов, так и для черноземов глинисто-иллювиальных; мощность гумусового профиля – 105 см для черноземов и 90 см для черноземов глинисто-иллювиальных, глубина вскипания – 80 и 120 см соответственно. Коэффициенты внутрипрофильной вариации, вариации внутри ареалов и в пределах всего участка для мощностей гумусового горизонта, профиля и глубины вскипания близки между собой и не превышают 20%. Вместе с тем разница между экстремумами в пределах участка может достигать 30 см для гумусового горизонта, 60 см для гумусового профиля и 70 см для глубины вскипания.

3. Разнообразие почв ключевого участка невелико; значения индексов разнообразия Шеннона, Симпсона и число ареалов на карте двукратно увеличиваются при уменьшении классификационного уровня картографируемых единиц от типов к подтипам и от подтипов к видам; значения индекса квадратной энтропии Рао, учитывающего не только число ареалов и занимаемую ими долю от площади всего участка (как индексы Шеннона и Симпсона), но и контрастность почв по отношению друг другу, тоже увеличиваются при уменьшении классификационного уровня картографируемых единиц, однако резкое двукратное увеличение значений наблюдается только при переходе от уровня подтипа к уровню вида. Вероятно, уровень вида является наиболее оптимальным для проведения оценок количественного разнообразия почв лесостепи.

Список источников

1. Лойко С.В., Ткачева А.А., Истигечев Г.И., Кузьмина Д.М., Кулижский С.П. Залежные земли и особенности исторического природопользования в ареале тёмно-серых лесных типичных почв Северного Притома (Западная Сибирь) // Почвы и окружающая среда. 2024. Т. 7, № 3. e283–e283. doi: 10.31251/pos.v7i3.283
2. Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваева Н.А., Денисенко Е.А., Нефедова Т.Г. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. М. : ГЕОС, 2010. 415 с.
3. Тишков А.А. Новые подходы к сохранению степей староосвоенных черноземных регионов России // Вопросы степеведения. 2024. № 1. С. 22–31. doi: 10.24412/2712-8628-2024-1-22-31
4. Labaz B., Hartemink A.E., Zhang Y., Stevenson A., Kabala C. Organic carbon in Mollic soils of the world – A review // Geoderma. 2024. Vol. 447. 116937. doi: 10.1016/j.geoderma.2024.116937
5. Smelansky I.E., Tishkov A.A. The steppe biome in Russia: Ecosystem services, conservation status, and actual challenges // Ecological Problems and Livelihoods in a Changing World, Plant and Vegetation. 2012. Vol. 6. PP. 45–101. doi: 0.1007/978-94-007-3886-7_2
6. Грошева О.А. Эволюционное развитие черноземов и степей Евразии в исторической ретроспективе // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2020. № 12. С. 31–35.
7. Чернова О.В. Сохранение естественных почв на охраняемых природных территориях Российской Федерации // Известия РАН. Серия географическая. 2012. № 2. С. 30–37. doi: 10.15356/0373-2444-2012-2-30-37
8. Марголина Н.Я., Александровский А.Л., Ильичев Б.А., Черкинский А.Е., Чичагова О.А. Возраст и эволюция черноземов. М. : Наука, 1988. 144 с.
9. Афанасьева Е.А. Черноземы Среднерусской возвышенности. М. : Наука, 1966. 224 с.
10. Черноземы СССР / под ред. В.М. Фридланда, И.И. Лебедевой. М. : Колос, 1974. Т. 1. 559 с.
11. Целищева Л.К., Дайнеко Е.К. Очерк почв Стрелецкого участка Центрально-черноземного заповедника // Тр. Центрально-черноземного государственного заповедника им. В.В. Алёхина. 1966. Вып. 10. С. 154–186.
12. Смирнова К.М. Комплексность почвенного покрова в курских заповедных степях // Почвоведение. 1941. № 5. С. 44–61.
13. Русаков А.В. Почвы и почвенный покров Ямской степи. СПб. : Изд. дом Санкт-Петербургского гос. ун-та, 2012. 215 с.
14. Lozbenov N., Yurova A., Smirnova M., Kozlov D. Incorporating process-based modeling into digital soil mapping: A case study in the virgin steppe of the central Russian upland // Geoderma. 2021. Vol. 383. 114733. doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114733
15. Фридланд В.М., Белобров В.П., Дайнеко Е.К. Опыт статистического анализа морфологических свойств черноземов целинной степи // Почвоведение. 1969. № 4. С. 12–24.
16. Ibanez J.J., Vargas R.J., Vazquez-Hoehne A. Pedodiversity state of the art and future challenges // Pedodiversity / ed. by J.J. Ibanez, J.G. Bockheim. London : CRC Press, 2013. PP. 1–28.
17. Красильников П.В., Герасимова М.И., Голованов Д.Л., Конюшкова М.В., Сидорова В.А., Сорокин А.С. Почвенное разнообразие и его значение в контексте современной географии почв // Почвоведение. 2018. № 1. С. 1–13. doi: 10.7868/S0032180X1801001X

18. Olson D.M., Dinerstein E., Wikramanayake E.D., Burgess N.D., Powell G.V.N., Underwood E.C., D'Amico J.A. Terrestrial ecoregions of the world: A new map of life on Earth // *Bioscience*. 2001. Vol. 51 (11). PP. 933–938. doi: 10.1641/0006-3568(2001)051[0933:TEOTWA]2.0.CO;2
19. Полевой определитель почв. М. : Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
20. Классификация и диагностика почв СССР. М. : Колос, 1977. 221 с.
21. Геннадиев А.Н., Жидкин А.П., Олсон К.Р., Качинский В.Л. Эрозия почв в различных условиях землепользования: оценка методом магнитного трассера // *Почвоведение*. 2010. № 9. С. 1126–1134.
22. Minasny B., McBratney A.B., Hartemink A.E. Global pedodiversity, taxonomic distance, and the World Reference Base // *Geoderma*. 2010. Vol. 155. PP. 132–139. doi: 10.1016/j.geoderma.2009.04.024
23. Хитров Н.Б. Создание детальных почвенных карт на основе интерполяции данных о свойствах почв // *Почвоведение*. 2012. № 10. С. 1045–1046.
24. Базыкина Г.С., Овечкин С.В. Влияние цикличности климата на водный режим и карбонатный профиль черноземов центра европейской части России и сопредельных территорий // *Почвоведение*. 2016. № 4. С. 475–488. doi: 10.7868/S0032180X1604002X
25. Алифанов В.М. Палеокриогенез и современное почвообразование. Пущино : ОНТИ ПНЦ РАН, 1995. 318 с.
26. Дмитриев П.П., Худяков О.И. Педогенез в поселениях млекопитающих-землероев. М. : КМК, 2018. 250 с.
27. Фишман М.И. Черноземные комплексы и их связь с рельефом на Среднерусской возвышенности // *Почвоведение*. 1977. № 5. С. 17–30.
28. Красильников П.В., Герасимова М.И., Голованов Д.Л., Головлёва Ю.А., Конюшкова М.В., Сидорова В.А., Сорокин А.С. Разнообразие и пространственная организация почвенного покрова в разных картографических масштабах // *Почвоведение*. 2020. № 8. С. 913–920. doi: 10.31857/S0032180X20080092
29. Smirnova M.A., Bocharnikov M.V. Ecosystem, vegetation and soil diversity of the mountain forest-steppe of West Altai (a case study of the Tigirek State Natural Reserve) // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing. 2021. Vol. 908, № 1. 012028. doi: 10.1088/1755-1315/908/1/012028
30. Смирнова М.А., Геннадиев А.Н., Чендев Ю.Г., Ковач Р.Г. Влияние защитных лесных насаждений на локальное разнообразие почв (Белгородская область) // *Почвоведение*. 2020. № 9. С. 1041–1052. doi: 10.31857/S0032180X20090166

References

1. Lojko SV, Tkacheva AA., Istigechev GI, Kuz'mina DM, Kulizhskij SP. Historical context for abandoned lands and land use in the area of Luvic Greyzemic Phaeozems of the Northern Pritomye (West Siberia). *The Journal of Soils and Environment*. 2024; 7(3):e283–e283. In Russian, English summary. doi: 10.31251/pos.v7i3.283
2. Lyuri DI, Goryachkin SV, Karavaeva NA, Denisenko EA, Nefedova TG. Dinamika sel'skoxozyajstvenny'x zemel' Rossii v XX veke i postagrogennoe vosstanovlenie rastitel'nosti i pochv [Dynamics of agricultural lands of Russia in the twentieth century and post-agrogenic restoration of vegetation and soils]. Moscow: GEOS Publ.; 2010. 415 p. In Russian
3. Tishkov AA. New approaches to the conservation of steppes in the old-developed chernozem regions of Russia. *Voprosy stepovedeniya*. 2024;1:22–31. In Russian, English summary. doi: 10.24412/2712-8628-2024-1-22-31

4. Labaz B, Hartemink AE, Zhang Y, Stevenson A, Kabala C. Organic carbon in Mollisols of the world - A review. *Geoderma*. 2024;447:116937. doi: 10.1016/j.geoderma.2024.116937
5. Smelansky IE, Tishkov AA. The steppe biome in Russia: ecosystem services, conservation status, and actual challenges. *Ecological Problems and Livelihoods in a Changing World, Plant and Vegetation*. 2012;6:45-101. doi: 0.1007/978-94-007-3886-7_2
6. Grosheva OA. Evolutionary development of chernozems and steppes of Eurasia in historical retrospective. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2020;12:31-35. In Russian, English summary
7. Chernova OV. Sohranenie estestvennykh pochv na ohranyaemykh prirodnym territoriyah Rossijskoj Federacii [Conservation of Virgin Soils' Diversity in Network of Nature Reserves of the Russian Federation]. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*. 2012;2:30-37. In Russian. doi: 10.15356/0373-2444-2012-2-30-37
8. Margolina NYA, Aleksandrovskij AL, Il'ichev BA, Cherkinskij AE, Chichagova OA. Vozrast i evolyuciya chernozemov [Age and evolution of chernozems]. Moscow: Nauka Publ.; 1988. 144 p. In Russian
9. Afanas'eva EA. Chernozemy Srednerusskoj vozvysheynosti [Chernozems of the Central Russian Upland]. Moscow: Nauka Publ.; 1966. 224 p. In Russian
10. Chernozemy SSSR [Chernozems of the USSR]. Vol. 1. Fridland VM, Lebedeva II, editors. Moscow: Kolos; 1974. 559 p. In Russian
11. Celishcheva LK, Dajneko EK. Ocherk pochv streleckogo uchastka central'no-chernozemnogo zapovednika [Essay on the soils of the Streltsy section of the Central Chernozem Reserve]. In: *Tr. Central'no-chernozemnogo gosudarstvennogo zapovednika im. V.V. Alyohina* [Works of the Central Black Earth State Reserve named after V.V. Alekhine]. 1966. Iss. 10. pp. 154-186. In Russian
12. Smirnova KM. Complexity of soil cover in the Kursk protected steppes. *Pochvovedenie*. 1941;5:44-61. In Russian, English summary
13. Rusakov AV. Pochvy i pochvennyj pokrov Yamskoj stepi [Soils and soil cover of the Yamskaya steppe]. St. Petersburg: Izd. dom Sankt-Peterburgskogo gos. un-ta; 2012. 215 p. In Russian
14. Lozbenov N, Yurova A, Smirnova M, Kozlov D. Incorporating process-based modeling into digital soil mapping: a case study in the virgin steppe of the Central Russian Upland. *Geoderma*. 2021;383:114733. doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114733
15. Fridland VM, Belobrov VP, Dajneko EK. Experience of statistical analysis of the morphological properties of virgin steppe chernozems. *Pochvovedenie*. 1969;4:12-24. In Russian, English summary
16. Ibanez JJ, Vargas RJ, Vazquez-Hoehne A. Pedodiversity state of the art and future challenges. Ibanez JJ, Bockheim JG, editors. *Pedodiversity*. London: CRC Press; 2013. pp. 1-28.
17. Krasilnikov PV, Gerasimova MI, Golovanov DL, Konyushkova MV, Sorokin AS, Sidorova VA. Pedodiversity and its significance in the context of modern soil geography. *Eurasian Soil Science*. 2018;51:1-13. doi: 10.1134/S1064229318010118
18. Olson DM, Dinerstein E, Wikramanayake ED, Burgess ND, Powell GVN, Underwood EC, D'Amico JA. Terrestrial ecoregions of the world: A new map of life on Earth. *Bioscience*. 2001;51(11):933-938. doi: 10.1641/0006-3568(2001)051[0933:TEOTWA]2.0.CO;2
19. Polevoy opredelitel' pochv [Field soil guide]. Moscow: V.V. Dokuchaev Soil Science Institute; 2008. 182 p. In Russian
20. Klassifikaciya i diagnostika pochv Rossii [Classification and diagnostic system of Russian soils]. Smolensk: Oikumena Publ.; 2004. p. in Russian

21. Gennadiev AN, Zhidkin AP, Olson KR, Kachinskii VL. Soil erosion under different land uses: Assessment by the magnetic tracer method. *Eurasian Soil Science*. 2010;43:1047-1054. doi: 10.1134/S1064229310090127
22. Minasny B, McBratney AB, Hartemink AE. Global pedodiversity, taxonomic distance, and the World Reference Base. *Geoderma*. 2010;155:132-139. doi: 10.1016/j.geoderma.2009.04.024
23. Khitrov NB. The development of detailed soil maps on the basis of interpolation of data on soil properties. *Eurasian Soil Science*. 2012;45(10):918-928. doi: 10.1134/S1064229312100043
24. Bazykina GS, Ovechkin SV. The influence of climate cycles on the water regime and carbonate profile in chernozems of Central European Russia and adjacent territories. *Eurasian Soil Science*. 2016;49(4):437-449. doi: 10.1134/S1064229316040025
25. Alifanov VM. Paleokriogenez i sovremennoe pochvoobrazovanie [Paleocryogenesis and modern soil formation]. Pushhino: ONTI PNCz RAN Publ.; 1995. 318 p. In Russian
26. Dmitriev PP, Hudyakov OI. Pedogenez v poseleniyah mlekopitayushchih-zemleroev [Pedogenesis in settlements of earth-moving mammals]. Moscow: KMK Publ.; 2018. 250 p. In Russian
27. Fishman MI. Chernozemnye komplekсы i ih svyaz' s rel'efom na Srednerusskoj vozvysheynosti [Chernozem complexes and their connection with the relief on the Central Russian Upland]. *Pochvovedenie*. 1977;5:17-30. In Russian, English summary
28. Krasilnikov PV, Gerasimova MI, Golovanov DL, Golovleva YA, Konyushkova MV, Sidorova VA, Sorokin AS. Soil cover diversity and its spatial organization at different map scales. *Eurasian Soil Science*. 2020;53:1013-1020. doi: 10.1134/S1064229320080098
29. Smirnova MA, Bocharnikov MV. Ecosystem, vegetation and soil diversity of the mountain forest-steppe of West Altai (a case study of the Tigirek State Natural Reserve). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;908(1):012028. doi: 10.1088/1755-1315/908/1/012028
30. Smirnova MA, Gennadiev AN, Chendev YG, Kovach RG. Influence of Forest Shelterbelts on local pedodiversity (Belgorod Oblast). *Eurasian Soil Science*. 2020;53(9):1195-1205. doi: 10.1134/S1064229320090161

Информация об авторах:

Смирнова Мария Андреевна, канд. геогр. наук, доцент кафедры геохимии ландшафтов и географии почв, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5256-4348>

E-mail: summerija@yandex.ru

Чендев Юрий Георгиевич, д-р геогр. наук, проф. кафедры природопользования и земельного кадастра, Белгородский государственный национальный исследовательский университет (Белгород, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7864-041X>

E-mail: sciences@mail.ru

Нарожняя Анастасия Георгиевна, канд. геогр. наук, доцент кафедры природопользования и земельного кадастра, Белгородский государственный национальный исследовательский университет (Белгород, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4271-1607>

E-mail: narozhnyaya_A@bsu.edu.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Maria A. Smirnova, Cand. Sci. (Geography), Assoc. Prof. of the Department of landscape geochemistry and soil geography, Faculty of Geography, M.V. Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5256-4348>

E-mail: summerija@yandex.ru

Yuri G. Chendev, Dr. Sci. (Geography), Professor of the Department of environmental management and land cadastre, Belgorod State National Research University (Belgorod, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7864-041X>

E-mail: sciences@mail.ru

Anastasia G. Narozhnaya, Cand. Sci. (Geography), Assoc. Prof. of the Department of environmental management and land cadastre, Belgorod State National Research University (Belgorod, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4271-1607>

E-mail: narozhnaya_A@bsu.edu.ru

The Authors declare no conflict of interest.

*Статья поступила в редакцию 09.08.2024;
одобрена после рецензирования 31.10.2024; принята к публикации 04.09.2025*

*The article was submitted 09.08.2024;
approved after reviewing 31.10.2024; accepted for publication 04.09.2025*

БИОТЕХНОЛОГИЯ И МИКРОБИОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 635.925:57.085.23

doi: 10.17223/19988591/71/3

Влияние регуляторов роста на морфогенез и регенерацию сортов *Syringa vulgaris* в условиях *in vitro*

Ольга Васильевна Королева¹, Ольга Ивановна Молканова²,
Ирина Леонидовна Крахмалева³, Наталия Дмитриевна Орлова⁴

^{1, 2, 3, 4} Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина Российской академии наук,
Москва, Россия

¹ <https://orcid.org/0000-0001-9416-4396>, elaem@yandex.ru

² <https://orcid.org/0000-0002-4664-7809>, molkanova@mail.ru

³ <https://orcid.org/0000-0003-0409-6989>, seglory@bk.ru

⁴ <https://orcid.org/0009-0002-5191-2627>, irosvet96@mail.ru

Аннотация. Существующее генетическое разнообразие представителей рода *Syringa* L. и сортоспецифическая реакция на регуляторы роста в питательной среде обуславливают необходимость в проведении исследований по оптимизации методики размножения сирени в условиях *in vitro*. Изучены морфометрические показатели и особенности морфогенеза микропобегов на питательных средах с разными регуляторами роста четырех сортов *Syringa vulgaris* L. ('Красавица Москвы', 'П.П. Кончаловский', 'Frank Paterson', 'Sensation') на этапе собственно микроразмножения. Экспланты культивировали на питательных средах Murahige-Skoog, дополненных 0,5 или 1,0 мг/л 6-бензиламинопурина (БАП), мета-Тополина (мТ) или тидиазурона (ТДЗ) или комбинациями БАП + мТ, БАП + ТДЗ или мТ + ТДЗ в концентрации 1,0 мг/л. Показаны преимущества мТ над ТДЗ и широко используемым БАП: при культивировании на средах с мТ у микропобегов наблюдали самые высокие показатели высоты побегов ($48,3 \pm 1,6$ мм) и коэффициента размножения ($21,9 \pm 0,8$). мТ способствовал пробуждению пазушных почек (79,8%) и образованию нескольких адвентивных побегов на экспланте ($2,3 \pm 0,1$ шт.). Совместное применение регуляторов роста (БАП + мТ, БАП + ТДЗ, мТ + ТДЗ) оказало положительное влияние на размножение изучаемых сортов. Использование мТ или БАП совместно с ТДЗ позволило уменьшить некоторые негативные воздействия этого регулятора роста. Полученные результаты позволяют оптимизировать методику культивирования *in vitro* посредством реализуемого пути морфогенеза и увеличения коэффициента размножения для сортов *Syringa vulgaris*.

Ключевые слова: микроразмножение, регенерация, бензиламинопурин, мета-Тополин, тидиазурон, *Syringa vulgaris*

Источник финансирования: работа выполнена в рамках государственного задания ГБС РАН № 122042700002-6 «Биологическое разнообразие природной и культурной флоры: фундаментальные и прикладные вопросы изучения и сохранения».

Для цитирования: Королева О.В., Молканова О.И., Крахмалева И.Л., Орлова Н.Д. Влияние регуляторов роста на морфогенез и регенерацию сортов *Syringa vulgaris* в условиях *in vitro* // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2025. № 71. С. 58–79. doi: 10.17223/19988591/71/3

Original article

doi: 10.17223/19988591/71/3

The effect of growth regulators on the *in vitro* morphogenesis and regeneration of *Syringa vulgaris* cultivars

Olga V. Koroleva¹, Olga I. Molkanova², Irina L. Krakhmaleva³,
Nataliya D. Orlova⁴

^{1, 2, 3, 4} Tsitsin Main Botanical Garden of Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

¹ <https://orcid.org/0000-0001-9416-4396>, elaem@yandex.ru

² <https://orcid.org/0000-0002-4664-7809>, molkanova@mail.ru

³ <https://orcid.org/0000-0003-0409-6989>, seglory@bk.ru

⁴ <https://orcid.org/0009-0002-5191-2627>, irosvet96@mail.ru

Summary. The lilac (*Syringa* L.) is a genus of woody plants widely used in landscaping and also in perfumery, pharmacology, and other industries. Studies to optimize the technology of *in vitro* propagation and preservation of lilac are needed due to the existing genetic diversity of the genus members and cultivar specificity to growth regulators in nutrient media. In this research, we evaluated the micropropagation efficiency and morphometric parameters of *Syringa vulgaris* L. explants on media with different cytokinins and their mixes. The aim of the study was to determine the effect of plant growth regulators (6-benzylaminopurine, *meta*-Topolin, and thidiazuron) on the development of lilac explants at the micropropagation stage.

The studies were conducted in the Laboratory of Plant Biotechnology of Tsitsin Main Botanical Garden in 2023. The shoot cultures of four ornamental cultivars of *Syringa vulgaris* with high regeneration potential ('Krasavitsa Moskvyy', 'P.P. Konchalovskii', 'Frank Paterson', and 'Sensation') from the *in vitro* collection of the Laboratory were used in the research. For the cultivation of explants (about 5 mm long, containing 1-2 metamers), Murashige-Skoog media supplemented with 7 g/L agar, 30 g/L sucrose, and growth regulators 6-benzylaminopurine, *meta*-Topolin, and thidiazuron at concentrations of 0.5 or 1.0 mg/L were used in the experiments. Nine variants of a nutrient medium were tested (see Table 1). The comparison of the growth regulators showed the advantage of *meta*-Topolin over thidiazuron and the widely used 6-benzylaminopurine (See Figs. 1-3). When cultured on media with *meta*-Topolin, the greatest microshoot height (48.3 ± 1.6 mm vs. 35.6 ± 1.3 mm (on 6-benzylaminopurine) and 39.4 ± 1.3 mm (on thidiazuron)) and micropropagation rate (21.9 ± 0.8 vs. 8.0 ± 0.2 and 9.7 ± 0.4) of explants were observed. *Meta*-Topolin promoted the induction of axillary buds (79.8% vs. 27.6% and 33.2%) and the formation of several adventitious shoots per explant (2.3 ± 0.1 vs. 1.3 ± 0.1 and 1.6 ± 0.1).

The results showed that the combinations of the growth regulators (6-benzylaminopurine + *meta*-Topolin, 6-benzylaminopurine + thidiazuron, *meta*-Topolin + thidiazuron), added to the medium had a positive effect on micropropagation of the studied cultivars (See Table 2, Fig. 4). When cultured on the media supplemented with a mix of cytokinins, most studied cultivars produced the highest microshoots and developed more adventitious shoots per explant (2.3 ± 0.2 (6-benzylaminopurine + *meta*-Topolin), 2.2 ± 0.2 (6-benzylaminopurine + thidiazuron), 3.0 ± 0.2 (*meta*-Topolin + thidiazuron)). The combined use of cytokinins increased the micropropagation rate only relative to cultivation on medium with 6-benzylaminopurine and thidiazuron added separately. For instance, 'Frank Paterson' increased its micropropagation rate from

10.1 ± 0.8 (1.0 mg/L thidiazuron) to 22.7 ± 1.1 on the medium with *meta*-Topolin + thidiazuron, and 'Sensation' increased it from 8.1 ± 0.3 (1.0 mg/L 6-benzylaminopurine) to 21.0 ± 2.2 on the medium with 6-benzylaminopurine + thidiazuron. We revealed the reduction of some negative effects of thidiazuron when used together with other growth regulators. For instance, 'Krasavitsa Moskv'y' produced higher microshoots on the medium with the mix of phytohormones (86.0 ± 4.4 and 74.4 ± 3.9 mm), while 'P.P. Konchalovskii' increased its micropropagation rate from 8.1 ± 1.0 (0.5 mg/L thidiazuron) and 6.7 ± 0.6 (1.0 mg/L thidiazuron) to 13.0 ± 2.0 due to the addition of *meta*-Topolin to the medium. However, application of other cytokinins to thidiazuron in the medium could not completely prevent large callus formation in some lilac cultivars ('P.P. Konchalovskii' and 'Frank Paterson').

Since lilac micropropagation occurs mainly through the formation and further development of adventitious shoots at the base of explants, the observed formation of several shoots per explant on the tested media significantly increased the efficiency of propagation of *Syringa vulgaris* cultivars. During the research, we observed almost no root formation in explants on the media with *meta*-Topolin. Only 'Sensation' showed spontaneous rhizogenesis on the medium with 0.5 mg/L *meta*-Topolin (10%) and the medium with 6-benzylaminopurine + *meta*-Topolin (12.5%). When cultured on the media with 6-benzylaminopurine, the studied cultivars had 27.7% of rooted explants. When cultured on the media with thidiazuron, some cultivars showed root formation ('Krasavitsa Moskv'y' (17.6%); 'Frank Paterson' (27.8%)), while other cultivars had callus formation at the base of explants. Application of cytokinin combinations to the medium suppressed root formation in explants; most cultivars on these media had no rooted explants. Thus, to obtain rooted microplants before adaptation and exclude a separate rooting stage, we recommend using media with low auxin content or media with low cytokinin content with the addition of auxins.

To conclude, we investigated the morphometric parameters of microshoot development and morphogenesis of lilac cultivars on the media with different growth regulators and their combinations at the micropropagation stage. Therefore, we optimized the micropropagation technique for *Syringa vulgaris* cultivars.

The article contains 4 Figures, 2 Tables, 50 References.

Keywords: micropropagation, regeneration, benzylaminopurine, *meta*-Topolin, thidiazuron, *Syringa vulgaris*

Fundings: the work was carried out as part of the framework of the state assignment of MBG RAS No. 122042700002-6 "Biological diversity of natural and cultural flora: fundamental and applied issues of study and conservation".

For citation: Koroleva OV, Molkanova OI, Krakhmaleva IL, Orlova ND. The effect of growth regulators on the *in vitro* morphogenesis and regeneration of *Syringa vulgaris* cultivars. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2025;71:58-79. doi: 10.17223/19988591/71/3

Введение

Род *Syringa* L. (сем. Oleaceae) включает в себя 12 видов (согласно WFO Plant List [1]), культигенный ареал которых охватывает территории от северо-восточной Европы до юго-восточной Азии, в восточной и северной частях Северной Америки и на юге Южной Америки. Помимо озеленения сирень находит применение в кулинарии, парфюмерии и косметологии. Благодаря высокому содержанию биологически активных веществ, обладающих антиоксидантными, противовоспалительными, жаропонижающими

ми и другими полезными свойствами, сирень используют в народной и традиционной медицине, а также фармакологии [2, 3].

Syringa vulgaris L. – высокодекоративный кустарник, наиболее широко используемый в озеленении и флористике. Как и другие виды, *S. vulgaris* является источником лекарственного сырья [4–6]. За десятилетия селекционной работы было выведено и зарегистрировано более 2000 сортов этого вида [7], во многих странах селекция продолжается, поэтому вопрос оптимизации методики размножения и сохранения сирени не теряет своей актуальности. Многие сорта *S. vulgaris* сильно отличаются по характеру роста и развитию побегов, формированию корней, что затрудняет разработку единого протокола культивирования для данной культуры.

Для размножения сирени используют как традиционные методы (черенкование, прививка и т.д.) [8], так и биотехнологические [9–11]. Во многих небольших питомниках применяют черенкование, однако для промышленного производства выровненного высококачественного посадочного материала, в особенности трудно укореняемых и малораспространенных сортов, предпочтение отдают клональному микроразмножению.

Наличие эффективной и оптимизированной методики клонального микроразмножения необходимо для размножения и сохранения экономически важных культур, в том числе декоративных. Из-за сортового многообразия в пределах вида *S. vulgaris* существует множество исследований по оптимизации технологии культивирования *in vitro* [12–15], однако работ, описывающих влияние нескольких цитокининов на органогенез микрорастений, крайне мало [16].

Для сирени характерно различие в реакции на регуляторы роста и их концентрации. И в наших предыдущих исследованиях, и в работах других авторов наблюдали сильное влияние сортовых особенностей изучаемых объектов на рост и развитие растений в условиях *in vitro* [11, 15]. Вследствие этого выявление оптимальных условий культивирования для большинства сортов необходимо для усовершенствования методики микроразмножения представителей рода *Syringa* L.

Разные исследователи для размножения сирени рекомендуют использовать 6-бензиламинопурин (БАП) или 2-изопентиладенин (2ip), концентрации которых варьируют от 1,0 до 5,0 мг/л [10, 13, 17]. В наших предыдущих исследованиях установлено, что оптимальной концентрацией БАП является 1,0 мг/л [18]. БАП является наиболее широко используемым цитокинином для клонального микроразмножения растений благодаря своей эффективности и доступности [19, 20], однако для некоторых культур этот регулятор роста может оказывать негативное влияние [21, 22]. В культуре *in vitro* накопление производных БАП в основании микропобегов может вызывать неоднородность роста и торможение процессов корнеобразования, а его высокие концентрации и длительное культивирование могут стать причиной оводненности у многих культур [23].

Тополыны более эффективны и обладают меньшей токсичностью при более высоких эквимоллярных концентрациях, чем БАП: они не накапливаются в растениях благодаря быстрой транслокации по тканям растения,

а их метаболиты (О-гликозиды) легко разлагаются [22, 24, 25]. В работе Pczuk и Jagiełło-Kubies [16] было показано превосходство *мета*-Тополина (*мТ*) над обычно используемыми БАП и 2ip для культивирования сирени *in vitro*. *мТ* – ароматический цитокинин, производное от бензиладенина, который часто используют для улучшения побегообразования и повышения эффективности корнеобразования у экономически важных растений. *мТ* метаболизируется быстрее, чем обычные цитокинины, вследствие чего предотвращает возникновение морфо-анатомических и физиологических отклонений и способствует восстановлению нормальной структуры и метаболизма микрорастений [26, 27].

Для ряда культур тидиазурон (ТДЗ) используют наравне с БАП на этапе микроразмножения [21, 28]. ТДЗ относится к замещенным фенилмочевинам и, в отличие от других регуляторов роста растений, обладает высокой как цитокининовой, так и ауксиновой активностью [29]. В условиях *in vitro* он стимулирует развитие боковых почек и побегов, но ингибирует вытягивание побегов и может оказывать ряд негативных воздействий [30]. Некоторые исследования показали эффективность добавления ТДЗ в питательную среду для успешного микроразмножения сирени [15, 31].

Для предотвращения появления негативных эффектов отдельных регуляторов роста и более эффективного микроразмножения используют их комбинации (обычно цитокинины с ауксинами в определенном соотношении) [19, 32, 33], в том числе несколько цитокининов одновременно. Вследствие этого в данной работе оценивали как эффективность микроразмножения и морфометрические показатели эксплантов сортов *S. vulgaris* при культивировании на разных цитокининах, так и воздействие различных их комбинаций.

Цель исследования – изучение влияния регуляторов роста (БАП, *мТ* и ТДЗ) на развитие эксплантов сирени на этапе собственно микроразмножения.

Материалы и методика исследования

Исследования проводили в лаборатории биотехнологии растений ГБС РАН в 2023 г. В работе применяли общепринятые [34] и разработанные в лаборатории биотехнологии растений ГБС РАН [35] приемы работы с культурами изолированных тканей и органов растений.

В качестве объектов использовали стерильную культуру четырех высокодекоративных сортов *S. vulgaris* из коллекции *in vitro* лаборатории, характеризующихся высоким регенерационным потенциалом: 'Красавица Москвы', 'П.П. Кончаловский', 'Frank Paterson' и 'Sensation'. Для экспериментов использовали экспланты около 5 мм длиной, содержащие 1–2 метамера, в стадии активного размножения.

Для культивирования эксплантов использовали среды с минеральной основой Murashige-Skoog, дополненные 7 г/л агара (С.Е. Roepers GmbH, Hamburg, Germany), 30 г/л сахарозы и регуляторами роста БАП (Merck KGaA, Darmstadt, Germany), *мТ* и ТДЗ (Duchefa Biochemie B.V., Haarlem, Netherlands) в концентрациях 0,5 или 1,0 мг/л. В исследовании изучали

9 вариантов питательных сред (табл. 1). В качестве контрольного варианта использовали питательную среду с добавлением 0,5 мг/л БАП, поскольку предыдущие исследования [18] показали, что безгормональная среда неэффективна на этапе собственно микроразмножения (медленный рост побегов, формирование малого числа метамеров и т.д.); в то время как 0,5 мг/л является минимально эффективной концентрацией БАП для активного размножения сирени. Питательные среды стерилизовали в автоматическом автоклаве MAC-235EX (Sanyo Industry Co., Ltd., Japan) насыщенным водяным паром под давлением (1 атм.) при 121°C в течение 20 мин. Регуляторы роста стерилизовали путем автоклавирования в составе питательной среды.

Экспланты культивировали при температуре $23 \pm 2^\circ\text{C}$, освещенности 4000–5000 лк (светодиодные лампы ДПО-36Вт, цветовая температура 6500; освещенность измерена прибором Lux-Meter model LU-345 (Nieuwkoop B.V., Aalsmeer, Holland)) и 16-ч фотопериоде. После 45 дней культивирования учитывали показатели высоты микропобегов, числа микропобегов от основания, количество корней; вычисляли коэффициент размножения (как произведение числа побегов на экспланте на количество узлов на микропобеге), частоту активизации пазушных почек и частоту спонтанного ризогенеза.

Эксперименты проводили в трех повторностях, по 10 эксплантов в каждой для каждого варианта среды. Обработку результатов проводили с помощью программы SPSS statistics. Для оценки значимости влияния регуляторов роста и их комбинаций на показатели микроразмножения сортов сирени использовали дисперсионный анализ ANOVA (ANalysis of VAriance) с множественным ранговым критерием Дункана с уровнем значимости $p < 0,05$. Результаты приведены в виде среднего арифметического $\pm$ SE (standard error). Вследствие контаминации питательной среды в некоторых вариантах ('П.П. Кончаловский' 1,0 мг/л БАП; 'Sensation' 1,0 мг/л мТ + 1,0 мг/л ТДЗ) сократилось количество учетных растений в повторностях.

Таблица 1 [Table 1]

Содержание цитокининов в используемых вариантах питательных сред
[Cytokinin content in the studied variants of the medium]

Цитокинин [Cytokinin]	Концентрация регулятора роста в средах, мг/л [Concentration of a growth regulator in a medium, mg/L]								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
6-бензиламинопурин [6-benzylaminopurin]	0,5	1,0	–	–	–	–	1,0	1,0	–
мета-Тополин [meta-Topolin]	–	–	0,5	1,0	–	–	1,0	–	1,0
Тидиазурон [thidiazuron]	–	–	–	–	0,5	1,0	–	1,0	1,0

Примечание. «–» означает отсутствие регулятора роста в среде.

[Note. “–” indicates the absence of the growth regulator in the medium].

Во избежание возникновения статистических ошибок данные варианты были изъяты из анализа, что не оказало существенного влияния на выявленные в результате исследования закономерности.

Результаты исследования

Цитокинины являются основным классом регуляторов роста, отвечающих за регуляцию различных процессов развития растений, включая деление клеток и их дифференциацию, активность апикальных меристем побега и корня, пропорциональное формирование органов и т.д. [36].

Анализ влияния разных регуляторов роста (БАП, мТ и ТДЗ), применяемых по отдельности, показал, что мТ оказывает наибольшее положительное воздействие на развитие микропобегов. Он способствовал значительному увеличению высоты микропобегов ($48,3 \pm 1,6$ мм относительно $35,6 \pm 1,3$ мм (БАП) и $39,4 \pm 1,3$ мм (ТДЗ)), развитию адвентивных побегов ($2,3 \pm 0,1$ шт. относительно $1,3 \pm 0,1$ шт. (БАП) и $1,6 \pm 0,1$ шт. (ТДЗ)), а также существенно увеличивал коэффициент размножения ($21,9 \pm 0,8$ относительно $8,0 \pm 0,2$ (БАП) и $9,7 \pm 0,4$ (ТДЗ)).

Результаты исследования показали, что высота растений во многом зависит от сортовых особенностей растений, но при культивировании на питательной среде с добавлением $0,5$ мг/л мТ наблюдали более высокие показатели, чем на среде с традиционно используемым для размножения сирени БАП в той же концентрации ($30,7 \pm 2,1$ – $65,2 \pm 3,7$ по сравнению с $23,7 \pm 2,3$ – $48,4 \pm 2,4$) (рис. 1). При повышении концентрации с $0,5$ до $1,0$ мг/л у мТ и БАП высота микропобегов увеличивалась. Влияние ТДЗ и увеличение его содержания в питательной среде на высоту микропобегов у разных сортов проявлялось по-разному. Так, у сорта 'Sensation' с повышением концентрации ТДЗ произошло увеличение высоты растений с $32,6 \pm 2,3$ до $53,2 \pm 6,8$ мм, в то время как у 'Красавицы Москвы' микропобеги стали ниже (с $43,6 \pm 1,4$ до $32,1 \pm 1,1$ мм).

Культивирование на питательной среде с добавлением мТ способствовало развитию пазушных почек на эксплантах: частота активизации

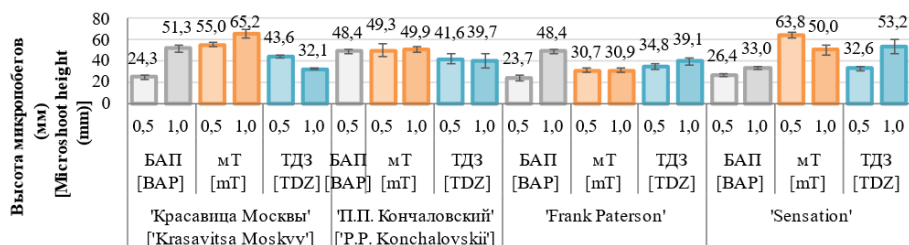


Рис. 1. Влияние цитокининов на высоту микропобегов сортов *Syringa vulgaris*.

БАП – 6-бензиламинопурин; мТ – *meta*-Тополин; ТДЗ – тидиазурон.

Концентрация регуляторов роста указана в мг/л

[Fig. 1. Effect of cytokinins on the microshoot height of *Syringa vulgaris* cultivars.

BAP (6-benzylaminopurine), mT (*meta*-Topolin), TDZ (thidiazuron).

The concentration of growth regulators is expressed in mg/L]

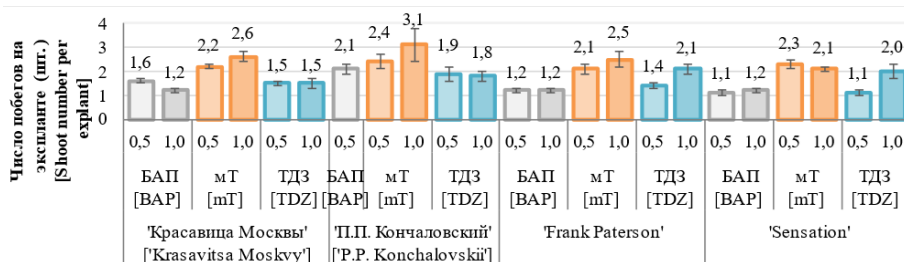


Рис. 2. Влияние цитокининов на образование адвентивных побегов у сортов *Syringa vulgaris*. БАП – 6-бензиламинопурин; мТ – мета-Тополин; ТДЗ – тидиазурон.

Концентрация регуляторов роста указана в мг/л

[Fig. 2. Effect of cytokinins on the adventitious shoot formation on *Syringa vulgaris* cultivars.

BAP (6-benzylaminopurine), mT (meta-Topolin), TDZ (thidiazuron).

The concentration of growth regulators is expressed in mg/L]

пазушных почек составляла 62,5–95,0%, в то время как на среде с ТДЗ частота активизации пазушных почек колебалась от 15,4% до 54,5%, а на среде с БАП – от 6,7% до 58,8%. мТ в большей степени способствовал образованию адвентивных побегов относительно других цитокининов ($2,3 \pm 0,1$ шт. по сравнению с $1,6 \pm 0,1$ шт. (БАП) и $1,6 \pm 0,1$ шт. (ТДЗ)); даже меньшая концентрация (0,5 мг/л) приводила к образованию более 2 побегов на экспланте (см. рис. 2). В результате формирования адвентивных побегов и активация пазушных меристем как реализуемый путь морфогенеза существенно увеличили коэффициент размножения (рис. 3). Наибольшие значения были получены при культивировании на питательных средах с добавлением мТ; содержание этого цитокинина даже в небольшой концентрации (0,5 мг/л) показало значительное превышение коэффициента размножения относительно других регуляторов роста.

Из-за синергетического эффекта, оказываемого применением нескольких цитокининов, использование комбинаций регуляторов роста считается

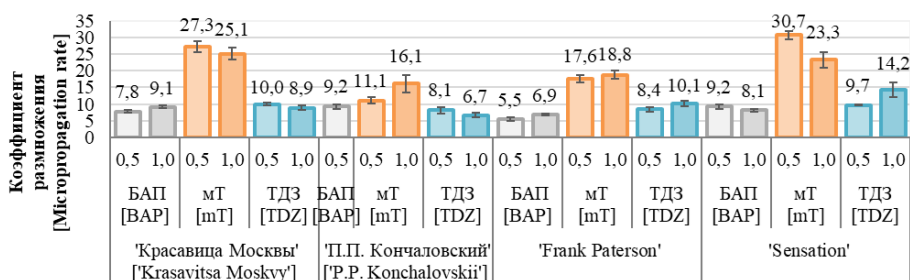


Рис. 3. Влияние цитокининов на коэффициент размножения сортов *Syringa vulgaris*.

БАП – 6-бензиламинопурин; мТ – мета-Тополин; ТДЗ – тидиазурон.

Концентрация регуляторов роста указана в мг/л

[Fig. 3. Effect of cytokinins on the micropropagation rate of *Syringa vulgaris* cultivars.

BAP (6-benzylaminopurine), mT (meta-Topolin), TDZ (thidiazuron).

The concentration of growth regulators is expressed in mg/L]

эффективным способом усовершенствования микроразмножения и предотвращения возникновения нарушений в строении и физиологических процессах. Результаты исследования показали, что использование нескольких цитокининов в среде оказало положительное воздействие на микроразмножение сирени (табл. 2, рис. 4).

Использование комбинаций цитокининов оказало положительное воздействие на высоту микропобегов у сортов 'Красавица Москвы' и 'П.П. Кончаловский'. Для сорта 'Frank Paterson' совместное применение регуляторов роста не дало повышения высоты побегов, а для сорта 'Sensation' использование БАП совместно с ТДЗ значительно повысило высоту растений (до $76,4 \pm 6,4$ мм). Применение мТ совместно с другими цитокининами способствовало активизации пазушных почек, но в меньшей степени, чем при отдельном применении. Результаты экспериментов показали, что совместное использование регуляторов роста способствует развитию нескольких адвентивных побегов у большинства изучаемых сортов ($2,3 \pm 0,2$ шт. (БАП + мТ), $2,2 \pm 0,2$ шт. (БАП + ТДЗ), $3,0 \pm 0,2$ шт. (мТ + ТДЗ)). Совместное применение цитокининов не повысило коэффициент размножения, по сравнению с показателями, полученными на средах только с мТ, однако относительно применения БАП и ТДЗ по отдельности показатели стали существенно выше. Так, у 'Frank Paterson' коэффициент размножения с $10,1 \pm 0,8$ (1,0 мг/л ТДЗ) увеличился до $22,7 \pm 1,1$ на среде с мТ + ТДЗ, а у 'Sensation' с $8,1 \pm 0,3$ (1,0 мг/л БАП) до $21,0 \pm 2,2$ на среде с БАП + ТДЗ.

Таблица 2 [Table 2]

**Влияние цитокининов и их комбинаций на показатели
микроразмножения сортов *Syringa vulgaris*
[Effect of cytokinins and their combinations on the micropagation
parameters of *Syringa vulgaris*]**

Сорт [Cultivar]	Регуляторы роста, мг/л [Growth regulators, mg/L]			Высота микро- побегов, мм [Microshoot height, mm]	Число побегов на экспланте, шт. [Shoot number per explant]	Коэффициент размножения [Micropagation rate]
	БАП [BAP]	мТ [mT]	ТДЗ [TDZ]			
'Красавица Москвы' ['Krasavitsa Moskvy']	0,5	—	—	$24,3 \pm 1,5^e$	$1,6 \pm 0,1^b$	$7,8 \pm 0,4^d$
	1,0	—	—	$51,3 \pm 3,0^{cd}$	$1,2 \pm 0,1^b$	$9,1 \pm 0,4^d$
	—	0,5	—	$55,0 \pm 2,6^c$	$2,2 \pm 0,1^a$	$27,3 \pm 1,6^a$
	—	1,0	—	$65,2 \pm 3,7^b$	$2,6 \pm 0,2^a$	$25,1 \pm 1,8^a$
	—	—	0,5	$43,6 \pm 1,4^d$	$1,5 \pm 0,1^b$	$10,0 \pm 0,5^d$
	—	—	1,0	$32,1 \pm 1,1^e$	$1,5 \pm 0,2^b$	$8,9 \pm 0,7^d$
	1,0	1,0	—	$72,4 \pm 5,3^b$	$2,3 \pm 0,4^a$	$18,5 \pm 1,9^{bc}$
	1,0	—	1,0	$86,0 \pm 4,4^a$	$1,7 \pm 0,2^b$	$15,3 \pm 1,4^c$
	—	1,0	1,0	$74,4 \pm 3,9^b$	$2,5 \pm 0,2^a$	$20,3 \pm 1,7^b$

Сорт [Cultivar]	Регуляторы роста, мг/л [Growth regulators, mg/L]			Высота микро- побегов, мм [Microshoot height, mm]	Число побегов на экспланте, шт. [Shoot number per explant]	Коэффициент размножения [Micropropagation rate]
	БАП [BAP]	МТ [mT]	ТДЗ [TDZ]			
'П.П. Кончаловский' ['P.P. Konchalovskii']	0,5	—	—	48,4 ± 2,4 ^a	2,1 ± 0,2 ^{ab}	9,2 ± 0,7 ^{bcd}
	—	0,5	—	49,3 ± 5,9 ^a	2,4 ± 0,3 ^{ab}	11,1 ± 1,0 ^{bc}
	—	1,0	—	49,9 ± 2,5 ^a	3,1 ± 0,7 ^a	16,1 ± 2,6 ^a
	—	—	0,5	41,6 ± 4,1 ^a	1,9 ± 0,3 ^b	8,1 ± 1,0 ^{cd}
	—	—	1,0	39,7 ± 6,8 ^a	1,8 ± 0,2 ^b	6,7 ± 0,6 ^d
	1,0	1,0	—	53,8 ± 5,2 ^a	2,4 ± 0,2 ^{ab}	9,9 ± 0,8 ^{bcd}
	1,0	—	1,0	50,6 ± 4,4 ^a	2,3 ± 0,4 ^{ab}	10,3 ± 1,2 ^{bcd}
	—	1,0	1,0	45,7 ± 7,8 ^a	2,2 ± 0,4 ^{ab}	13,0 ± 2,0 ^{ab}
'Frank Paterson'	0,5	—	—	23,7 ± 2,3 ^d	1,2 ± 0,1 ^d	5,5 ± 0,5 ^e
	1,0	—	—	48,4 ± 2,2 ^a	1,2 ± 0,1 ^d	6,9 ± 0,3 ^{de}
	—	0,5	—	30,7 ± 2,1 ^{cd}	2,1 ± 0,2 ^c	17,6 ± 1,2 ^b
	—	1,0	—	30,9 ± 2,4 ^{cd}	2,5 ± 0,3 ^{bc}	18,8 ± 1,2 ^b
	—	—	0,5	34,8 ± 2,8 ^{bc}	1,4 ± 0,1 ^d	8,4 ± 0,6 ^{de}
	—	—	1,0	39,1 ± 3,7 ^{bc}	2,1 ± 0,2 ^c	10,1 ± 0,8 ^{cd}
	1,0	1,0	—	42,8 ± 3,9 ^{ab}	2,9 ± 0,3 ^b	20,6 ± 1,5 ^{ab}
	1,0	—	1,0	37,5 ± 5,3 ^{bc}	2,4 ± 0,3 ^{bc}	12,1 ± 2,0 ^c
	—	1,0	1,0	25,4 ± 1,4 ^d	3,8 ± 0,2 ^a	22,7 ± 1,1 ^a
'Sensation'	0,5	—	—	26,4 ± 1,5 ^d	1,1 ± 0,1 ^c	9,2 ± 0,6 ^d
	1,0	—	—	33,0 ± 1,6 ^d	1,2 ± 0,1 ^c	8,1 ± 0,3 ^d
	—	0,5	—	63,8 ± 3,0 ^b	2,3 ± 0,2 ^b	30,7 ± 1,3 ^a
	—	1,0	—	50,0 ± 4,7 ^c	2,1 ± 0,1 ^b	23,3 ± 2,4 ^b
	—	—	0,5	32,6 ± 2,3 ^d	1,1 ± 0,1 ^c	9,7 ± 0,2 ^d
	—	—	1,0	53,2 ± 6,8 ^{bc}	2,0 ± 0,3 ^b	14,2 ± 2,2 ^c
	1,0	1,0	—	52,3 ± 5,5 ^c	1,1 ± 0,1 ^c	7,8 ± 0,5 ^d
	1,0	—	1,0	76,4 ± 6,4 ^a	3,0 ± 0,4 ^a	21,0 ± 2,2 ^b

Примечание. В каждом столбце разными буквами обозначены статистически значимые различия ($p < 0,05$) между вариантами среды для каждого сорта. БАП – 6-бензиламинопурин, МТ – мета-Тополин, ТДЗ – тидиазурон.

[Note. Statistically significant differences ($p < 0.05$) between the medium variants for each cultivar are indicated by different letters in each column. BAP - 6-benzylaminopurine, mT - meta-Topolin, TDZ - thidiazuron].



Рис. 4. Развитие микропобегов сорта *Syringa vulgaris* 'Красавица Москвы' на разных регуляторах роста и их комбинациях после 45 дней культивирования: 1 – 0,5 мг/л БАП, 2 – 0,5 мг/л мТ, 3 – 0,5 мг/л ТДЗ, 4 – 1,0 мг/л БАП, 5 – 1,0 мг/л мТ, 6 – 1,0 мг/л ТДЗ; 7 – 1,0 мг/л БАП + 1,0 мг/л мТ, 8 – 1,0 мг/л БАП + 1,0 мг/л ТДЗ, 9 – 1,0 мг/л мТ + 1,0 мг/л ТДЗ. БАП – 6-бензиламинопурин; мТ – *meta*-Тополин; ТДЗ – тидиазурон. Масштабная линейка – 1 см

[Fig. 4. Microshoot development of *Syringa vulgaris* cultivar 'Krasavitsa Moskvyy' on different growth regulators and their mixtures after 45 days of subculture: 1 - 0.5 mg/L BAP, 2 - 0.5 mg/L mT, 3 - 0.5 mg/L TDZ, 4 - 1.0 mg/L BAP, 5 - 1.0 mg/L mT, 6 - 1.0 mg/L TDZ; 7 - 1.0 mg/L BAP + 1.0 mg/L mT, 8 - 1.0 mg/L BAP + 1.0 mg/L TDZ, 9 - 1.0 mg/L mT + 1.0 mg/L TDZ. BAP - 6-benzylaminopurine, mT - *meta*-Topolin, TDZ - thidiazuron. Scale bar – 1 cm]

Стоит отметить, что там, где повышение содержания ТДЗ с 0,5 до 1,0 мг/л оказывало негативное влияние, добавление в среду другого цитокинина позволило избежать негативных эффектов. Так, у 'Красавицы Москвы' использование БАП + ТДЗ и мТ + ТДЗ позволило получить микропобеги большей высоты ($86,0 \pm 4,4$ и $74,4 \pm 3,9$ мм). А у сорта 'П.П. Кончаловский' применение мТ + ТДЗ повысило коэффициент размножения с $8,1 \pm 1,0$ (0,5 мг/л ТДЗ) и $6,7 \pm 0,6$ (1,0 мг/л ТДЗ) до $13,0 \pm 2,0$.

Необходимо отметить, что у всех изучаемых сортов на средах с добавлением БАП (как 0,5 мг/л, так и 1,0 мг/л) наблюдали спонтанный ризогенез (от 12,5% у 'Красавицы Москвы' до 57,1% у 'П.П. Кончаловского'). На средах с добавлением ТДЗ формирование корней происходило лишь у неко-

торых сортов ('Красавица Москвы' (17,6%) и 'Frank Paterson' (27,8%)), в то время как у сортов 'П.П. Кончаловский' и 'Frank Paterson' в основании эксплантов образовывалось большое количество каллуса. Добавление в питательную среду нескольких цитокининов подавляло корнеобразование ('Sensation' 0–20,0%, у остальных сортов – 0%).

Обсуждение результатов исследования

Регенерация растений в условиях *in vitro* от экспланта до полностью сформированного растения по сути является основой микроразмножения. Это достигается за счет определения оптимального состава питательной среды, выбора экспланта, а также установления и поддержания оптимальных условий культивирования [37]. Для размножения представителей рода *Syringa* используют прямой органогенез – образование вегетативных органов без промежуточной стадии каллусообразования. Микроразмножение сортов *S. vulgaris* происходит в большей степени за счет формирования и дальнейшего развития адвентивных побегов в базальной части эксплантов. Это достигается в основном подбором регуляторов роста и их концентраций.

Выбор цитокинина для использования для активного микроразмножения определяется его комплексной эффективностью в индуцировании оптимальной скорости роста эксплантов, образовании нормальных побегов и корней, а также влиянием на последующую адаптацию микрорастений к условиям *ex vitro* [23]. Необходимо отметить, что цитокинины в составе питательной среды могут оказывать различные воздействия на разных генотипах одного таксона и это необходимо учитывать при планировании и проведении экспериментов на растениях с высоким генетическим разнообразием [21].

Образование побегов, их рост, активизация пазушных почек, наблюдаемые в данном исследовании, обусловлены не только генетическими особенностями исследуемых сортов, но и также во многом зависели от типа цитокинина и его концентрации в питательной среде (см. табл. 2). Для увеличения коэффициента размножения при прямом морфогенезе важно добиться не только развития адвентивных почек, но также активизации пазушных меристем вновь образованных адвентивных побегов. Исследования показали, что мТ в большей степени индуцирует пробуждение пазушных почек по сравнению с другими регуляторами роста (79,8% по сравнению с 27,6% (БАП) и 33,2% (ТДЗ)). Кроме того, мТ оказал большее стимулирующее воздействие на ростовые процессы у эксплантов: на питательных средах с мТ наблюдали наибольшее число образованных побегов на экспланте (выше, чем на БАП и ТДЗ, на 43% и 31% соответственно), а также более высокие показатели высоты микропобегов (на 26% и 20% соответственно). Необходимо отметить, что при повышении концентрации мТ количество микропобегов на экспланте увеличивалось, в отличие от БАП [24]. Способность мТ стимулировать образование адвентивных побегов в большей степени, чем БАП, показана и на многих других культурах [21, 38–40].

Для некоторых культур ТДЗ более эффективен для индукции образования адвентивных побегов, чем производные аденина [19]. Однако из-за высокой физиологической активности этот регулятор роста эффективен в очень низких концентрациях, и их повышение может негативно сказываться на культуре *in vitro* [30]. Для сирени культивирование на среде с ТДЗ может оказывать как положительное, как это продемонстрировано в работе Чуриковой и Криницыной [15], так и отрицательное воздействие. Результаты нашего исследования показали, что применение 0,5 мг/л ТДЗ стимулировало развитие боковых почек и побегов. Повышение концентрации до 1,0 мг/л существенно снижало эффективность микроразмножения. У некоторых сортов увеличивалось образование недифференцированного каллуса в основании эксплантов, что может негативно повлиять на их укоренение и последующую адаптацию, а также повышает вероятность возникновения соматоклональных вариантов [41]. Стоит отметить, что в исследованиях Чуриковой и Криницыной [15] также наблюдали каллусообразование у сорта 'П.П. Кончаловский'. Следовательно, можно предположить, что данное явление обусловлено генетическими особенностями сорта. Это представляет интерес для отдельного исследования, поскольку разрастание недифференцированного каллуса в основании эксплантов осложняет культивирование *in vitro* и некоторых других ценных сортов.

Таким образом, несмотря на стимулирование побегообразования, добавление ТДЗ в состав питательной среды не обеспечивает эффективное микроразмножение сортов *S. vulgaris*. В то время как использование мТ не только повышает эффективность микроразмножения за счет увеличения коэффициента размножения (на 62% относительно БАП и на 55% относительно ТДЗ) через индукцию адвентивного побегообразования, но и не оказывает негативного влияния на экспланты. Полученные результаты согласуются с исследованиями Ilczuk и Jagiełło-Kubiec [16], в которых было показано превосходство мТ над обычно используемыми БАП и 2ip для микроразмножения сирени. Учитывая меньшую токсичность тополинов, следует рекомендовать мТ для культивирования сортов *S. vulgaris* в условиях *in vitro*.

Комбинации регуляторов роста приводят к множественным физиологическим реакциям, вследствие чего использование нескольких цитокининов может быть эффективнее, чем применение их по отдельности [19, 20, 42]. Известно, что у некоторых культур применение БАП совместно с другими цитокининами оказывает синергетический эффект [43]. Добавление других цитокининов позволяет избежать негативных воздействий как самого БАП, так и добавляемого цитокинина, а также повысить эффективность микроразмножения. Совместное применение мТ с БАП оказало положительное влияние на размножение большинства изучаемых сортов. Поскольку для сирени БАП по-прежнему остается достаточно эффективным регулятором роста, целесообразно не переходить на применение мТ, а использовать комбинации цитокининов (БАП + мТ) для предотвращения негативного влияния БАП и повышения показателей микроразмножения.

Поскольку ТДЗ может оказывать некоторые негативные эффекты (укороченные побеги, оводненность), для многих культур рекомендовано использовать его совместно с другим цитокинином для предотвращения или уменьшения отрицательных воздействий [44–46]. В наших исследованиях применение мТ и БАП совместно с ТДЗ не смогло полностью предотвратить каллусообразование у некоторых сортов ('П.П. Кончаловский' и 'Frank Paterson'), но смогло повысить морфометрические показатели. Так, при культивировании на среде с ТДЗ + БАП наблюдали существенное повышение рассматриваемых показателей микроразмножения (высота микропобегов, число микропобегов от основания экспланта, коэффициент размножения) не только относительно ТДЗ, но и БАП. Таким образом, продемонстрирована эффективность совместного применения производных аденина с ТДЗ для уменьшения его негативного влияния на микрорастения.

Высокие концентрации цитокининов могут подавлять процессы формирования корней даже в присутствии ауксинов, поэтому для укоренения микрорастений обычно выделяют отдельный этап, на котором экспланты культивируют на безгормональной или ауксин-содержащей среде в течение одного или нескольких пассажей [47]. Однако поскольку экзогенные цитокинины принимают участие в биосинтезе эндогенных ауксинов [32], на некоторых культурах можно наблюдать спонтанное укоренение эксплантов не только на безгормональных средах, но и на средах с высоким соотношением цитокининов-ауксинов или только с цитокининами [48–50]. При оптимизации протокола культивирования *in vitro* следует учитывать наличие спонтанного ризогенеза у эксплантов, поскольку это позволяет кардинально изменить состав сред, а в некоторых случаях исключить отдельный этап укоренения. Исследования показывают, что у некоторых сортов сирени может происходить спонтанное укоренение на среде без ауксинов [15].

Несмотря на то, что мТ должен способствовать лучшему корнеобразованию благодаря меньшему тормозящему воздействию на этот процесс [22–27], в данных исследованиях при культивировании на среде с мТ экспланты практически не формировали корней. Только у 'Sensation' наблюдали спонтанный ризогенез на средах с 0,5 мг/л мТ (10%) и с БАП + мТ (12,5%). Стоит отметить, что, несмотря на возможное негативное влияние БАП на формирование корней у эксплантов [21], 27,7% эксплантов изучаемых сортов укоренились при культивировании на средах с этим цитокинином. Совместное применение цитокининов подавляло корнеобразование у эксплантов, у большинства сортов на средах с комбинациями цитокининов его не происходило. Следовательно, изучаемые сорта являются хорошо укореняемыми, и для получения укоренившихся микрорастений перед адаптацией можно использовать среды с низким содержанием ауксинов или среды с низким содержанием цитокининов в присутствии ауксинов, исключив отдельный этап укоренения.

Заключение

Изучены морфометрические показатели развития микропобегов, а также особенности морфогенеза четырех сортов *S. vulgaris* на питательных средах с разными регуляторами роста и их комбинациях на этапе собственно микроразмножения. Выявлено, что из использованных регуляторов роста (БАП, мТ, ТДЗ) наибольшие показатели высоты побегов, числа побегов на экплант, коэффициента размножения были получены на средах с добавлением мТ. Применение мТ способствовало активизации пазушных почек и формированию нескольких адвентивных побегов на экпланте. Показано, что совместное добавление в среду регуляторов роста (БАП + мТ, БАП + ТДЗ, мТ + ТДЗ) оказало положительное влияние на размножение изучаемых сортов. Использование мТ или БАП совместно с ТДЗ позволило уменьшить некоторые негативные воздействия этого регулятора роста. Реализуемый с помощью используемых регуляторов роста путь морфогенеза (формирование и дальнейшее развитие адвентивных побегов) существенно повысил эффективность микроразмножения, увеличив коэффициент размножения изучаемых сортов. Наблюдаемое у изучаемых сортов спонтанное укоренение микропобегов на питательных средах для размножения позволяет сократить содержание ауксинов в среде на этапе укоренения или и вовсе исключить отдельный этап укоренения. Таким образом, в результате исследования проведена оптимизация методики микроразмножения для сортов *S. vulgaris*.

Список источников

1. The World Flora Online (WFO) Plant List. Genus *Syringa* L. URL: <https://wfoplantlist.org/taxon/wfo-4000037351-2023-12?page=1> (дата обращения 22.03.2024).
2. Su G., Cao Y., Li C., Yu X., Gao X., Tu P., Chai X. Phytochemical and pharmacological progress on the genus *Syringa* // Chemistry Central Journal. 2015. Vol. 9. 2. doi: 10.1186/s13065-015-0079-2
3. Zhu W., Wang Z., Sun Y., Yang B., Wang Q., Kuang H. Traditional uses, phytochemistry and pharmacology of genus *Syringa*: A comprehensive review // Journal of Ethnopharmacology. 2021. Vol. 266. 113465. doi: 10.1016/j.jep.2020.113465
4. Woźniak M., Michalak B., Wyszomierska J., Dudek M.K., Kiss A.K. Effects of phytochemically characterized extracts from *Syringa vulgaris* and isolated secoiridoids on mediators of inflammation in a human neutrophil model // Frontiers in pharmacology. 2018. Vol. 9. 349. doi: 10.3389/fphar.2018.00349
5. Oku H., Maeda M., Kitagawa F., Ishiguro K. Effect of polyphenols from *Syringa vulgaris* on blood stasis syndrome // Journal of clinical biochemistry and nutrition. 2020. Vol. 67, № 1. PP. 84–88. doi: 10.3164/jcbn.20-55
6. Hanganu D., Niculae M., Ielciu I., Olah N.-K., Munteanu M., Burtescu R., Ștefan R., Olar L., Pall E., Andrei S., Vodnar D.C., Benedec D., Oniga I. Chemical profile, cytotoxic activity and oxidative stress reduction of different *Syringa vulgaris* L. // Extracts. Molecules. 2021. Vol. 26, № 11. 3104. doi: 10.3390/molecules26113104
7. International Register and Checklist of cultivar names in the genus *Syringa* L. (Oleaceae). 2023. URL: <http://www.internationallilacsociety.org/public-register/> (дата обращения 28.02.2024).

8. Ткаченко К.Г., Рейнвальд В.М., Варфоломеева Е.А. Опыт зимнего зелёного черенкования коллекции сиреней в условиях защищённого грунта Ботанического сада Петра Великого // *Hortus botanicus*. 2023. Т. 18. URL: <http://hb.karelia.ru/journal/article.php?id=8745>. doi: 10.15393/j4.art.2023.8745
9. Charlebois D. Multiplication *in vitro* de *Syringa vulgaris* 'Katherine Havemeyer' et 'Charles Joly' // *Canadian Journal of Plant Science*. 2004. Vol. 84. PP. 279–289. doi: 10.4141/P02-105
10. Nesterowicz S., Kulpa D., Moder K., Kurek J. Micropropagation of an old specimen of common lilac (*Syringa vulgaris* L.) from the dendrological garden at Przelewiec // *Acta Scientiarum Polonorum, Hortorum Cultus*. 2006. Vol. 5, № 1. PP. 27–35.
11. Molkanova O., Koroleva O. Biotechnological methods of *Syringa* L. collection propagation and preservation // *In Vitro. Cellular & Developmental Biology*. 2018. Vol. 54. PP. 545–546. doi: 10.1007/s11627-018-9927-9
12. Gabryszevska E. Effect of various levels of sucrose, nitrogen salts and temperature on the growth and development of *Syringa vulgaris* L. shoots *in vitro* // *Journal of fruit and ornamental plant research*. 2011. Vol. 19. PP. 133–148.
13. Lyubomirova T., Iliev I. *In vitro* propagation of *Syringa vulgaris* L. // *Forestry Ideas*. 2013. Vol. 19, № 2 (46). PP. 173–185.
14. Orsolya B., Clapa D., Fira A., Hârta M., Dumitraş A., Pop R., Pamfil D.C. The effect of gelling agent on the micropropagation of common lilac (*Syringa vulgaris* L.) // *Agriculture – Science and Practice*. 2017. № 3–4 (103–104). PP. 63–71.
15. Чурикова О.А., Криницына А.А. Изучение влияния состава питательной среды и тиадазурина на реализацию морфогенетического потенциала различных сортов сирени в культуре *in vitro* // *Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел биологический*. 2019. Т. 124, вып. 5. С. 55–64.
16. Ilczuk A., Jagiełło-Kubiec K. The effect of plant growth regulators and sucrose on the micropropagation of common lilac (*Syringa vulgaris* L.) // *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW Horticulture and Landscape Architecture*. 2015. Vol. 36. PP. 3–12.
17. Tomsone S., Galemece A., Akere A., Priede G., Zira L. *In vitro* propagation of *Syringa vulgaris* L. cultivars // *Biologija*. 2007. Vol. 53, № 2. PP. 28–31.
18. Koroleva O.V., Molkanova O.I., Mishanova E.V. Biotechnological methods of reproduction and preservation of species and cultivars of the genus *Syringa* L. // *Acta Horticulturae*. 2022. Vol. 1339. PP. 87–92. doi: 10.17660/ActaHortic.2022.1339.12
19. George E.F., Hall M.A., Klerk G.J.D. Plant growth regulators II: Cytokinins, their analogues and antagonists // *Plant Propagation by Tissue Culture*. Dordrecht, Netherlands : Springer Dordrecht, 2007. PP. 205–226. doi: 10.1007/978-1-4020-5005-3_6
20. Phillips G.C., Garda M. Plant tissue culture media and practices: an overview // *In Vitro. Cellular & Developmental Biology. Plant*. 2019. Vol. 55. PP. 242–257. doi: 10.1007/s11627-019-09983-5
21. Cardoso J.C. *Meta*-Topolins: *in vitro* responses and applications in large-scale micropropagation of horticultural crops // *Meta*-Topolin: A growth regulator for plant biotechnology and agriculture. Singapore : Springer Singapore, 2021. PP. 203–219. doi: 10.1007/978-981-15-9046-7_15
22. Koç E. Effects of *meta*-Topolin on the growth, physiological and biochemical parameters in plant tissue culture // *Meta*-Topolin: A growth regulator for plant biotechnology and agriculture. Singapore : Springer Singapore, 2021. PP. 265–278. doi: 10.1007/978-981-15-9046-7_19
23. Bairu M.W., Stirk W.A., Dolezal K., Van Staden J. Optimizing the micropropagation protocol for the endangered *Aloe polyphylla*: Can *meta*-Topolin and its derivatives serve as replacement for benzyladenine and zeatin? // *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*. 2007. Vol. 90. PP. 15–23. doi: 10.1007/s11240-007-9233-4

24. Amoo S.O., Finnie J.F., Van Staden J. The role of *meta*-Topolins in alleviating micro-propagation problems // Plant Growth Regulation. 2011. Vol. 63. PP. 197–206. doi: 10.1007/s10725-010-9504-7
25. Werbrouck S.P.O. *Meta*-Topolin and related cytokinins as a solution to some *in vitro* problems // *Meta*-Topolin: A growth regulator for plant biotechnology and agriculture. Singapore : Springer Singapore, 2021. PP. 85–91. doi: 10.1007/978-981-15-9046-7_9
26. Mok M.C., Martin R.C., Dobrev P.I., Vanková R., Shing Ho P., Yonekura-Sakakibara K., Sakakibara H., Mok D.W.S. Topolins and hydroxylated thidiazuron derivatives are substrates of cytokinin o-glucosyltransferase with position specificity related to receptor recognition // Plant Physiology. 2005. Vol. 137, № 3. PP. 1057–1066. doi: 10.1104/pp.104.057174
27. Doležal K., Bryksová M. Topolin metabolism and its implications for *in vitro* plant micropropagation // *Meta*-Topolin: A growth regulator for plant biotechnology and agriculture. Singapore : Springer Singapore, 2021. PP. 49–58. doi: 10.1007/978-981-15-9046-7_6
28. Govindaraj S. Thidiazuron: A potent phytohormone for *in vitro* regeneration // Thidiazuron: From urea derivative to plant growth regulator. Singapore : Springer Singapore, 2018. PP. 393–418. doi: 10.1007/978-981-10-8004-3_22
29. Guo B., Abbasi B.H., Zeb A., Xu L.L., Wei Y.H. Thidiazuron: A multi-dimensional plant growth regulator // African Journal of Biotechnology. 2011. Vol. 10, № 45. PP. 8984–9000. doi: 10.5897/AJB11.636
30. Vinoth A., Ravindhran R. *In vitro* morphogenesis of woody plants using thidiazuron // Thidiazuron: From urea derivative to plant growth regulator. Singapore : Springer Singapore, 2018. PP. 211–229. doi: 10.1007/978-981-10-8004-3_10
31. Набиева А.Ю. Биотехнологические приемы клонального микроразмножения перспективных сортов *Syringa vulgaris* L. для Западной Сибири // Вестник ИрГЦХА. 2011. Т. 5, № 44. С. 69–76.
32. Su Y.H., Liu Y.B., Zhang X.S. Auxin–cytokinin interaction regulates meristem development // Molecular Plant. 2011. Vol. 4, № 4. PP. 616–625. doi: 10.1093/mp/ssr007
33. Nowakowska K., Pacholczak A., Tepper W. The effect of selected growth regulators and culture media on regeneration of *Daphne mezereum* L. ‘Alba’ // Rendiconti lincei. Scienze fisiche e naturali. 2019. Vol. 30. PP. 197–205. doi: 10.1007/s12210-019-00777-w
34. Бутенко Р.Г. Биология клеток высших растений *in vitro* и биотехнология на их основе. М. : ФБК-ПРЕСС, 1999. 160 с.
35. Молканова О.И., Васильева О.Г., Коновалова Л.Н. Научные основы сохранения и устойчивого воспроизводства генофонда растений в культуре *in vitro* // Вестник удмуртского университета. Серия биология. Науки о Земле. 2015. Т. 15, вып. 2. С. 95–100.
36. Kieber J.J., Schaller G.E. Cytokinin signaling in plant development // Development. 2018. Vol. 145. 149344. doi: 10.1242/dev.149344
37. Phillips G.C. *In vitro* morphogenesis in plants: recent advances // In Vitro. Cellular & Developmental Biology. Plant. 2004. Vol. 40, № 4. PP. 342–345. <http://www.jstor.org/stable/4293752>
38. Amoo S.O., Aremu A.O., Van Staden J. *In vitro* plant regeneration, secondary metabolite production and antioxidant activity of micropropagated *Aloe arborescens* Mill. // Plant Cell, Tissue and Organ Culture. 2012. Vol. 111. PP. 345–358. doi: 10.1007/s11240-012-0200-3
39. Kucharska D., Orlikowska T., Maciorowski R., Kunka M., Wójcik D., Pluta S. Application of *meta*-Topolin for improving micropropagation of gooseberry (*Ribes grossularia*) // Scientia Horticulturae. 2020. Vol. 272. 109529. doi: 10.1016/j.scienta.2020.109529
40. Manokari M., Mehta S.R., Priyadharshini S., Kumar B.M., Dulam S., Jayaprakash K., Mathiyazhagan C.R., Dey A., Rajput B.S., Shekhawat M.S. *Meta*-Topolin mediated improved micropropagation, foliar micro-morphological traits, biochemical profiling, and assessment of genetic fidelity in *Santalum album* L. // Industrial Crops and Products. 2021. Vol. 171. 113931. doi: 10.1016/j.indcrop.2021.113931

41. Bairu M.W., Aremu A.O., Van Staden J. Somaclonal variation in plants: Causes and detection methods // *Plant Growth Regulation*. 2011. Vol. 63. PP. 147–173. doi: 10.1007/s10725-010-9554-x
42. Patel A.K., Lodha D., Shekhawat N.S. An improved micropropagation protocol for the *ex situ* conservation of *Mitragyna parvifolia* (Roxb.) Korth. (Rubiaceae): An endangered tree of pharmaceutical importance // *In Vitro. Cellular & Developmental Biology. Plant*. 2020. Vol. 56. PP. 817–826. doi: 10.1007/s11627-020-10089-6
43. Chhajaj S., Kalia R.K. Seasonal and micro-environmental factors controlling clonal propagation of mature trees of marwar teak [*Tecomella undulata* (Sm.) Seem] // *Acta Physiologiae Plantarum*. 2017. Vol. 39. 60. doi: 10.1007/s11738-017-2364-2
44. Novikova T.I., Zaytseva Y.G. TDZ-induced morphogenesis pathways in woody plant culture // *Thidiazuron: From urea derivative to plant growth regulator*. Singapore : Springer Singapore, 2018. PP. 61–94. doi: 10.1007/978-981-10-8004-3_3
45. Dewir Y.H., Nurmansyah, Naidoo, Y., da Silva J.A.T. Thidiazuron-induced abnormalities in plant tissue cultures // *Plant Cell Reports*. 2018. Vol. 37. PP. 1451–1470. doi: 10.1007/s00299-018-2326-1
46. Pai S.R., Desai N.S. Effect of TDZ on various plant cultures // *Thidiazuron: From urea derivative to plant growth regulator*. Singapore : Springer Singapore, 2018. PP. 439–454. doi: 10.1007/978-981-10-8004-3_25
47. Van Staden J., Zazimalova E., George E.F. Plant growth regulators II: Cytokinins, their analogues and antagonists // *Plant propagation by tissue culture: Vol. 1. The Background*. Dordrecht, Netherlands : Springer, 2008. PP. 205–226. doi: 10.1007/978-1-4020-5005-3_6
48. Guariniello J., Iannicelli J., Peralta P.A., Escandón A.S. *In vivo* and *in vitro* propagation of “macela”: A medicinal-aromatic native plant with ornamental potential // *Ornamental Horticulture*. 2018. Vol. 24, № 4. PP. 361–370. doi: 10.14295/oh.v24i4.1238
49. Mitrofanova I.V., Lesnikova-Sedoshenko N.P., Chelombit S.V., Zhdanova I.V., Ivanova N.N., Mitrofanova O.V. The effect of plant growth regulators on the *in vitro* regeneration capacity in some horticultural crops and rare endangered plant species // *Acta Horticulturae*. 2022. Vol. 1339. PP. 181–190. doi: 10.17660/ActaHortic.2022.1339.24
50. Bettoni J.C., Wang M.-R., Wang Q.-C. *In vitro* regeneration, micropropagation and germplasm conservation of horticultural plants // *Horticulturae*. 2024. Vol. 10, № 1. 45. doi: 10.3390/horticulturae10010045

References

1. The World Flora Online (WFO) Plant List. Genus *Syringa* L. [Electronic resource]. Available at: <https://wfoplantlist.org/taxon/wfo-4000037351-2023-12?page=1> (accessed 22.03.2024).
2. Su G, Cao Y, Li C, Yu X, Gao X, Tu P, Chai X. Phytochemical and pharmacological progress on the genus *Syringa*. *Chem. Cent. J.* 2015;9:2. doi: 10.1186/s13065-015-0079-2
3. Zhu W, Wang Z, Sun Y, Yang B, Wang Q, Kuang H. Traditional uses, phytochemistry and pharmacology of genus *Syringa*: A comprehensive review. *J. Ethnopharmacol.* 2021;266:113465. doi: 10.1016/j.jep.2020.113465
4. Woźniak M, Michalak B, Wyszomierska J, Dudek MK, Kiss AK. Effects of phytochemically characterized extracts from *Syringa vulgaris* and isolated secoiridoids on mediators of inflammation in a human neutrophil model. *Front. Pharmacol.* 2018;9:349. doi: 10.3389/fphar.2018.00349
5. Oku H, Maeda M, Kitagawa F, Ishiguro K. Effect of polyphenols from *Syringa vulgaris* on blood stasis syndrome. *J. Clin. Biochem. Nutr.* 2020;67(1):84-88. doi: 10.3164/jcbtn.20-55
6. Hanganu D, Niculae M, Ielciu I, Olah N-K, Munteanu M, Burtescu R, Ștefan R, Olar L, Pall E, Andrei S, Vodnar DC, Benedec D, Oniga I. Chemical profile, cytotoxic activity and oxidative stress reduction of different *Syringa vulgaris* L. *Extracts. Molecules*. 2021;26(11):3104. doi: 10.3390/molecules26113104

7. International Register and Checklist of cultivar names in the genus *Syringa* L. (Oleaceae). 2023. [Electronic resource]. Available at: <http://www.internationalilacsociety.org/public-register/> (accessed 28.02.2024).
8. Tkachenko K, Reinald V, Varfolomeeva E. Experience of winter green grafting of a collection of lilacs in the protected ground of the Botanical Garden of Peter the Great. *Hortus bot.* 2023;18. [Electronic resource]. Available at: <http://hb.karelia.ru/journal/article.php?id=8745> (accessed 28.02.2024). in Russian. doi: 10.15393/j4.art.2023.8745
9. Charlebois D. Multiplication *in vitro* de *Syringa vulgaris* 'Katherine Havemeyer' et 'Charles Joly'. *Can. J. Plant Sci.* 2004;84:279-289. doi: 10.4141/P02-105
10. Nesterowicz S, Kulpa D, Moder K, Kurek J. Micropropagation of an old specimen of common lilac (*Syringa vulgaris* L.) from the dendrological garden at Przelewiec. *Acta Sci. Pol. Hortorum Cultus.* 2006;5(1):27-35.
11. Molkanova O, Koroleva O. Biotechnological methods of *Syringa* L. collection propagation and preservation. *In Vitro. Cell. Dev. Biol.* 2018;54:545-546. doi: 10.1007/s11627-018-9927-9
12. Gabryszevska E. Effect of various levels of sucrose, nitrogen salts and temperature on the growth and development of *Syringa vulgaris* L. shoots *in vitro*. *J. Fruit Ornament. Plant Res.* 2011;19:133-148.
13. Lyubomirova T, Iliev I. *In vitro* propagation of *Syringa vulgaris* L. *For. Ideas.* 2013;19,2(46):173-185.
14. Orsolya B, Clapa D, Fira A, Hârta M, Dumitraş A, Pop R, Pamfil DC. The effect of gelling agent on the micropropagation of common lilac (*Syringa vulgaris* L.). *Agric. Sci. Pract.* 2017;3-4(103-104):63-71.
15. Churikova OA, Krinitsina AA. The influence of nutritive medium composition and thidiazuron on realization of morphogenetic potential *in vitro* of different lilac cultivars. *Byull. Moskovsk. Obshch. Isp. Prir. Otd. Biol.* 2019;124(5):55-64. in Russian, English summary.
16. Ilczuk A, Jagiełło-Kubiec K. The effect of plant growth regulators and sucrose on the micropropagation of common lilac (*Syringa vulgaris* L.). *Ann. Warsaw Univ. Life Sci.-SGGW, Horticult. Landsc. Architect.* 2015;36:3-12.
17. Tomsone S, Galemece A, Akere A, Priede G, Zira L. *In vitro* propagation of *Syringa vulgaris* L. cultivars. *Biologija.* 2007;53(2):28-31.
18. Koroleva OV, Molkanova OI, Mishanova EV. Biotechnological methods of reproduction and preservation of species and cultivars of the genus *Syringa* L. *Acta Hort.* 2022;1339:87-92. doi: 10.17660/ActaHortic.2022.1339.12
19. George EF, Hall MA, Klerk GJD. Plant growth regulators II: Cytokinins, their analogues and antagonists. In: *Plant Propagation by Tissue Culture*. Netherlands: Springer Dordrecht; 2007. pp. 205-226. doi: 10.1007/978-1-4020-5005-3_6
20. Phillips GC, Garda M. Plant tissue culture media and practices: an overview. *In Vitro Cell. Dev. Biol. Plant.* 2019;55:242-257. doi: 10.1007/s11627-019-09983-5
21. Cardoso JC. Meta-Topolins: *In vitro* responses and applications in large-scale micropropagation of horticultural crops. In: *Meta-Topolin: A growth regulator for plant biotechnology and agriculture*. Singapore: Springer Singapore; 2021. pp. 203-219. doi: 10.1007/978-981-15-9046-7_15
22. Koç E. Effects of Meta-Topolin on the Growth, Physiological and Biochemical Parameters in Plant Tissue Culture. In: *Meta-Topolin: A growth regulator for plant biotechnology and agriculture*. Singapore: Springer Singapore; 2021. pp. 265-278. doi: 10.1007/978-981-15-9046-7_19
23. Bairu MW, Stirik WA, Dolezal K, Van Staden J. Optimizing the micropropagation protocol for the endangered *Aloe polyphylla*: Can meta-Topolin and its derivatives serve as replacement for benzyladenine and zeatin? *Plant Cell Tiss Organ Cult.* 2007;90:15-23. doi: 10.1007/s11240-007-9233-4
24. Amoo SO, Finnie JF, Van Staden J. The role of meta-Topolins in alleviating micropropagation problems. *Plant Growth Regul.* 2011;63:197-206. doi: 10.1007/s10725-010-9504-7

25. Werbrouck SPO. *Meta-Topolin* and related cytokinins as a solution to some *in vitro* problems. In: *Meta-Topolin: A growth regulator for plant biotechnology and agriculture*. Singapore: Springer Singapore; 2021. pp. 85-91. doi: 10.1007/978-981-15-9046-7_9
26. Mok MC, Martin RC, Dobrev PI, Vanková R, Shing Ho P, Yonekura-Sakakibara K, Sakakibara H, Mok DWS. Topolins and hydroxylated thidiazuron derivatives are substrates of cytokinin o-glucosyltransferase with position specificity related to receptor recognition. *Plant Physiology*. 2005;137(3):1057-1066. doi: 10.1104/pp.104.057174
27. Doležal K, Bryksová M. Topolin metabolism and its implications for *in vitro* plant micropropagation. In: *Meta-Topolin: A growth regulator for plant biotechnology and agriculture*. Singapore: Springer Singapore; 2021. pp. 49-58. doi: 10.1007/978-981-15-9046-7_6
28. Govindaraj S. Thidiazuron: A potent phytohormone for *in vitro* regeneration. In: *Thidiazuron: From urea derivative to plant growth regulator*. Singapore: Springer Singapore; 2018. pp. 393-418. doi: 10.1007/978-981-10-8004-3_22
29. Guo B, Abbasi BH, Zeb A, Xu LL, Wei YH. Thidiazuron: A multi-dimensional plant growth regulator. *Afr. J. Biotechnol.* 2011;10(45):8984-9000. doi: 10.5897/AJB11.636
30. Vinoth A, Ravindhran R. *In vitro* morphogenesis of woody plants using thidiazuron. In: *Thidiazuron: From urea derivative to plant growth regulator*. Singapore: Springer Singapore; 2018. pp. 211-229. doi: 10.1007/978-981-10-8004-3_10
31. Nabieva AY. Biotechnological methods of clonal micropropagation of prospective *Syringa vulgaris* L. cultivars for Western Siberia. *Vestnik IrGSCCHA*. 2011;5(44):69-76. In Russian, English summary.
32. Su YH, Liu YB, Zhang XS. Auxin-cytokinin interaction regulates meristem development. *Mol. Plant*. 2011;4(4):616-625. doi: 10.1093/mp/ssr007
33. Nowakowska K, Pacholczak A, Tepper W. The effect of selected growth regulators and culture media on regeneration of *Daphne mezereum* L. 'Alba'. *Rend. Fis. Acc. Lincei*. 2019;30:197-205. doi: 10.1007/s12210-019-00777-w
34. Butenko RG. Biologiya kletok vysshikh rasteniy *in vitro* i biotekhnologiya na ikh osnove [Biology of higher plant cells cultured *in vitro* and biotechnology on their basis: the manual]. Moscow: FBK-Press Publ.; 1999. 160 p. In Russian
35. Molkanova OI, Vasilyeva OG, Konovalova LN. The scientific basis for conservation and sustainable reproduction of plant genofond in culture *in vitro*. *Bull. Udmurt Univ. Ser. Biol. Earth Sci.* 2015;15(2):95-100. In Russian, English summary.
36. Kieber JJ, Schaller GE. Cytokinin signaling in plant development. *Development*. 2018;145:149344. doi: 10.1242/dev.149344
37. Phillips GC. *In vitro* morphogenesis in plants: recent advances. *In Vitro Cell. Dev. Biol. Plant*. 2004;40(4):342-345. doi: 10.1079/IVP2004555
38. Amoo SO, Aremu AO, Van Staden J. *In vitro* plant regeneration, secondary metabolite production and antioxidant activity of micropropagated *Aloe arborescens* Mill. *Plant Cell Tiss Organ Cult*. 2012;111:345-358. doi: 10.1007/s11240-012-0200-3
39. Kucharska D, Orlikowska T, Maciorowski R, Kunka M, Wójcik D, Pluta S. Application of *meta-Topolin* for improving micropropagation of gooseberry (*Ribes grossularia*). *Sci. Hortic.* 2020;272:109529. doi: 10.1016/j.scienta.2020.109529
40. Manokari M, Mehta SR, Priyadarshini S, Kumar BM, Dulam S, Jayaprakash K, Mathiyazhagan CR, Dey A, Rajput BS, Shekhawat MS. *Meta-Topolin* mediated improved micropropagation, foliar micro-morphological traits, biochemical profiling, and assessment of genetic fidelity in *Santalum album* L. *Industrial Crops and Products*. 2021;171:113931. doi: 10.1016/j.indcrop.2021.113931
41. Bairu MW, Aremu AO, Van Staden J. Somaclonal variation in plants: Causes and detection methods. *Plant Growth Regul.* 2011;63:147-173. doi: 10.1007/s10725-010-9554-x
42. Patel AK, Lodha D, Shekhawat NS. An improved micropropagation protocol for the *ex situ* conservation of *Mitragyna parvifolia* (Roxb.) Korth. (Rubiaceae): An endangered tree of pharmaceutical importance. *In Vitro Cell. Dev. Biol. Plant*. 2020;56:817-826. doi: 10.1007/s11627-020-10089-6

43. Chhajjer S, Kalia RK. Seasonal and micro-environmental factors controlling clonal propagation of mature trees of marwar teak [*Tecomella undulata* (Sm.) Seem]. *Acta Physiol Plant*. 2017;39:60. doi: 10.1007/s11738-017-2364-2
44. Novikova TI, Zaytseva YG. TDZ-induced morphogenesis pathways in woody plant culture. In: *Thidiazuron: From urea derivative to plant growth regulator*. Singapore: Springer Singapore; 2018. pp. 61-94. doi: 10.1007/978-981-10-8004-3_3
45. Dewir YH, Nurmansyah, Naidoo Y, da Silva JAT. Thidiazuron-induced abnormalities in plant tissue cultures. *Plant Cell Rep*. 2018;37:1451-1470. doi: 10.1007/s00299-018-2326-1
46. Pai SR, Desai NS. Effect of TDZ on various plant cultures. In: *Thidiazuron: From urea derivative to plant growth regulator*. Singapore: Springer Singapore; 2018. pp. 439-454. doi: 10.1007/978-981-10-8004-3_25
47. Van Staden J, Zazimalova E, George EF. Plant growth regulators II: Cytokinins, their analogues and antagonists. In: *Plant propagation by tissue culture: Volume 1. The Background*. Dordrecht, The Netherlands: Springer; 2008. pp. 205-226. doi: 10.1007/978-1-4020-5005-3_6
48. Guariniello J, Iannicelli J, Peralta PA, Escandón AS. *In vivo* and *in vitro* propagation of “macela”: A medicinal-aromatic native plant with ornamental potential. *Ornam. Hortic*. 2018;24(4):361-370. doi: 10.14295/oh.v24i4.1238
49. Mitrofanova IV, Lesnikova-Sedoshenko NP, Chelombit SV, Zhdanova IV, Ivanova NN, Mitrofanova OV. The effect of plant growth regulators on the *in vitro* regeneration capacity in some horticultural crops and rare endangered plant species. *Acta Hortic*. 2022;1339:181-190. doi: 10.17660/ActaHortic.2022.1339.24
50. Bettoni JC, Wang M-R, Wang Q-C. *In vitro* regeneration, micropropagation and germplasm conservation of horticultural plants. *Horticulturae*. 2024;10(1):45. doi: 10.3390/horticulturae10010045

Информация об авторах:

Королева Ольга Васильевна, н.с. лаборатории биотехнологии растений, Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина (Москва, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9416-4396>

E-mail: elaem@yandex.ru

Молканова Ольга Ивановна, канд. с.-х. наук, в.н.с., зав. лабораторией биотехнологии растений, Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина (Москва, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4664-7809>

E-mail: molkanova@mail.ru

Крахмалева Ирина Леонидовна, н.с. лаборатории биотехнологии растений, Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина (Москва, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0409-6989>

E-mail: seglory@bk.ru

Орлова Наталия Дмитриевна, м.н.с. лаборатории биотехнологии растений, Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина (Москва, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-5191-2627>

E-mail: irosvet96@mail.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Olga V. Koroleva, researcher of the Laboratory of Plant Biotechnology, Tsitsin Main Botanical Garden (Moscow, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9416-4396>

E-mail: elaem@yandex.ru

Olga I. Molkanova, Cand. Sci. (Agr.), leading researcher, Head of the Laboratory of Plant Biotechnology, Tsitsin Main Botanical Garden (Moscow, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4664-7809>

E-mail: molkanova@mail.ru

Irina L. Krakhmaleva, researcher of the Laboratory of Plant Biotechnology, Tsitsin Main Botanical Garden (Moscow, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0409-6989>

E-mail: seglory@bk.ru

Nataliya D. Orlova, junior researcher of the Laboratory of Plant Biotechnology, Tsitsin Main Botanical Garden (Moscow, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-5191-2627>

E-mail: irosvet96@mail.ru

The Authors declare no conflict of interest.

*Статья поступила в редакцию 29.05.2024;
одобрена после рецензирования 02.07.2024; принята к публикации 04.09.2025*

*The article was submitted 29.05.2024;
approved after reviewing 02.07.2024; accepted for publication 04.09.2025*

Научная статья

УДК 574.24, 579.26, 579.64

doi: 10.17223/19988591/71/4

Изучение потенциала штаммов *Pseudomonas protegens* A-СМС-05 и *Gordonia paraffinivorans* A-СМС-11 для использования в сельскохозяйственной биотехнологии

Анастасия Николаевна Сысоева¹, Мария Денисовна Ивасенко²,
Денис Александрович Ивасенко³, Анна Леонидовна Герасимчук⁴

^{1, 2, 3, 4} Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Томск, Россия

^{1, 2, 3} ООО «Дарвин», Томск, Россия

¹ <https://orcid.org/0009-0000-3716-3338>, nastena.sysoeva.97@bk.ru

² ivaskenko.mary@mail.ru

³ <https://orcid.org/0000-0001-7132-182X>, ivaskenko.da@mail.ru

⁴ <https://orcid.org/0000-0002-2945-2364>, gerasimchuk_ann@mail.ru

Аннотация. В статье приведены результаты экспериментов по изучению стимулирования роста растений и биопротекторных свойств изолятов из сточных вод городских очистных сооружений *Pseudomonas protegens* и *Gordonia paraffinivorans*. Исследовали ингибирующую активность штаммов *P. protegens* A-СМС-05 и *G. paraffinivorans* A-СМС-11 по отношению к фитопатогенному грибу *Fusarium equiseti*. Ингибирование радиального роста мицелия составило от 11% до 13% для штамма A-СМС-11 и от 36% до 67% для штамма A-СМС-05. Показано, что штамм A-СМС-05 обладает выраженными свойствами, способствующими ризогенезу у эксплантов барбариса (*Berberis thunbergii* Aurea). В опытах с проращиванием семян пшеницы (*Triticum aestivum* L.) не обнаружено какого-либо влияния штаммов *G. paraffinivorans* A-СМС-11 и *P. protegens* A-СМС-05, в том числе в составе консорциума, на всхожесть семян. Однако выявлены статистически значимые ($p < 0,05$) отличия по признаку длины проростков и корней пшеницы при обработке семян штаммами *G. paraffinivorans* A-СМС-11 и *P. protegens* A-СМС-05 соответственно. Обработка эксплантов малины (*Rubus idaeus* L.) культуральной жидкостью штамма A-СМС-05 способствовала увеличению средней длины побегов по сравнению с отрицательным и положительным контролями на 40% и на 73% соответственно. Использование штаммов в составе консорциума не показало значимых результатов. Для штамма *P. Protegens* A-СМС-05 выявлены более высокие показатели по всем исследованным характеристикам, таким как эффективность ингибирования фитопатогена и процент эксплантов с признаками ризогенеза.

Ключевые слова: микроорганизмы – продуценты биоактивных веществ, ингибирование роста фитопатогенных микроорганизмов, стимулирование роста растений, ризогенез

Источник финансирования: исследование выполнено при поддержке Гранта № 075-15-2022-1152 (Постановление № 619 от 8 апреля 2022 г.).

Для цитирования: Сысоева А.Н., Ивасенко М.Д., Ивасенко Д.А., Герасимчук А.Л. Изучение потенциала штаммов *Pseudomonas protegens* A-СМС-05 и *Gordonia paraffinivorans* A-СМС-11 для использования в сельскохозяйственной биотехнологии // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2025. № 71. С. 80–100. doi: 10.17223/19988591/71/4

Study of the potential of *Pseudomonas Protegens* A-CMC-05 and *Gordonia Paraffinivorans* A-CMC-11 strains for use in agricultural biotechnology

Anastasya N. Sysoeva¹, Marya D. Ivasenko², Denis A. Ivasenko³, Anna L. Gerasimchuk⁴

^{1, 2, 3, 4} National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

^{1, 2, 3} Darwin Ltd., Tomsk, Russian Federation

¹ <https://orcid.org/0009-0000-3716-3338>, nastena.sysoeva.97@bk.ru

² ivasenko.mary@mail.ru

³ <https://orcid.org/0000-0001-7132-182X>, ivasenko.da@mail.ru

⁴ <https://orcid.org/0000-0002-2945-2364>, gerasimchuk_ann@mail.ru

Summary. Excessive use of chemical fertilizers has led to various negative consequences such as accumulation of harmful elements in the soil, groundwater pollution, reduction of soil organic matter content and fertility, and deterioration of soil physical and chemical properties. In recent years, special attention has been paid to the industrial potential of microorganisms for use as biological fertilizers, their ability to improve nutrient availability, enhance plant growth and productivity, and protect the environment from negative impacts. A large group of soil bacteria has been shown to have a positive effect on plant growth, which is associated with such properties as increased availability of mineral nutrition elements for plants, production of metabolites with hormonal and signaling functions (auxins, cytokinins, gibberellins, abscisic, salicylic and jasmonic acids), induction of mechanisms of systemic resistance to stresses of abiotic and biotic nature. *Bacillus* and *Pseudomonas* are among the most studied and widely used producers of bacterial enzymes and destructors of organic compounds, as well as plant growth-promoting bacteria and antagonists of plant pathogens.

In the present study, the growth-stimulating and bioprotective properties of strains *Pseudomonas protegens* A-CMC-05 and *Gordonia paraffinivorans* A-CMC-11, which we had isolated earlier from municipal wastewater treatment plants in Surabaya, Indonesia, were investigated. The representatives of *Pseudomonas* and *Gordonia* are widely distributed in nature and are actively studied due to their ability to destruct, transform and synthesize organic compounds. *P. protegens* is known as a plant growth-promoting rhizobacterium. No published data were found for *G. paraffinivorans* to investigate their potential as plant growth stimulators or biocontrol properties, but such works are available for other members of the genus *Gordonia*.

The inhibitory activity of strains *P. protegens* A-CMC-05 and *G. paraffinivorans* A-CMC-11 against the phytopathogenic fungus of the genus *Fusarium*, representatives of which are often associated with severe crown and root rot diseases of wheat, was investigated. When *Fusarium equiseti* D1 was co-cultured in the presence of each of the bacterial strains, changes in the morphology of the fungal mycelium and inhibition of the growth zone were observed (See Fig. 1A). When the fungal fragment was inoculated onto freshly grown bacterial turf, the inhibitory activity of *P. protegens* A-CMC-05 was as prominent, whereas strain *G. paraffinivorans* A-CMC-11 showed less pronounced antagonism (see Fig. 1B). In the third cultivation variant, which consisted of inoculating the fungal mycelium into the center of the Petri dish at the same distance (3.5 cm) between two bacterial growth zones (0.7-0.8 mm in diameter), in the presence of the *Pseudomonas* sp. strain A-CMC-05, a more noticeable inhibition of mycelial growth was also observed than in the presence of the *Gordonia* sp. strain A-CMC-11 (See Fig. 1C). Inhibition of radial mycelial growth ranged from 11% to

13% for strain A-CMC-11 and from 36% to 67% for strain A-CMC-05. In addition to inhibition of the growth zone, strain A-CMC-05 inhibited the development of aerial hyphae of *Fusarium equiseti* D1, only weak growth in the depth of the agarized medium was observed (See Table 1).

An experiment was conducted to study the growth-stimulating properties promoting rhizogenesis of unrooted explants of barberry of Thunberg (*Berberis thunbergii* Aurea), selected as an object for research (See Fig. 2). As a result, rhizogenesis processes were observed in 12.1% of explants planted in sterile soil treated with the culture liquid solution of strain A-CMC-05. In the experiment with strain A-CMC-11, root formation was detected in 7.5% of explants. In the control experiment with the addition of the Kornevin commercial preparation based on 4(indol-3yl)butyric acid (IBA) the efficiency of rhizogenesis was 15%. Analysis of the obtained results indicates that strain A-CMS-05 has pronounced properties promoting rhizogenesis in barberry plants used as an object of research and its efficiency in stimulating rhizogenesis is comparable to the efficiency of the preparation based on IBA. In subsequent experiments, in addition to the effect of strains A-CMC-05 and A-CMC-11 individually, their effect on plant growth and rhizogenesis in the consortium was investigated. In experiments with germination of wheat (*Triticum aestivum* L.) seeds in sterile soil, strains of *G. paraffinivorans* A-CMC-11 and *P. protegens* A-CMC-05, including as part of a consortium, had no effect on seed germinability (See Fig. 3A). At the same time, the formation of a denser earth clod at the roots of wheat seedlings in the experiments with each of the strains and as part of the consortium compared to the control was noted (See Fig. 3B). Statistically significant differences were also revealed between the lengths of seedlings when seeds were treated with *G. paraffinivorans* A-CMC-11 and the lengths of wheat roots under the influence of *P. protegens* A-CMC-05 (See Fig. 4). The use of strains as part of a consortium showed no significant results. Additionally, the effect of bacterial strains and consortium on rooting efficiency and shoot length in raspberry (*Rubus ideus* L.) explants of "Cassiopeia" variety was investigated (See Fig. 5). In contrast to the experiment with barberry explants, no positive effect of individual strains or their consortium on rhizogenesis processes in raspberry was found. Moreover, the efficiency of root formation by the number of rooted explants was the most significant in the negative control without any soil or explants treatment and amounted to 87% (See Fig. 5A). We did not analyze root and shoot masses except for visual assessment. The total root mass in experimental and control experiments could differ and, among other things, affect the average shoot mass, which visually increased after treatment with culture liquid of the strains and consortium due to a wider leaf plate (See Fig. 6). In addition, treatment of explants with the culture fluid of *P. protegens* A-CMC-05 increased the average shoot length by 40% compared with the negative control and by 73% compared with the positive control (See Fig. 5B). The studies demonstrated the potential of *P. protegens* A-CMC-05 and *G. paraffinivorans* A-CMC-11 as biocontrol agents and plant growth stimulators. *P. protegens* A-CMC-05 showed more pronounced results and is a more promising agent for further studies of growth-stimulating and bioprotective properties.

The article contains 6 Figures, 1 Table, 40 References.

Keywords: microorganisms - producers of bioactive substances, growth inhibition of phytopathogenic microorganisms, plant growth stimulation, rhizogenesis

Fundings: the study was supported by Grant No. 075-15-2022-1152 (Resolution No. 619 of April 8, 2022).

For citation: Sysoeva AN, Ivashenko MD, Ivashenko DA, Gerasimchuk AL. Study of the potential of *Pseudomonas Protegens* A-CMC-05 and *Gordonia Paraffinivorans* A-CMC-11 strains for use in agricultural biotechnology. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya* = Tomsk State University Journal of Biology. 2025;71:80-100. doi: 10.17223/19988591/71/4

Введение

Одной из важных задач агропромышленного комплекса (АПК) является необходимость производства всё большего количества продуктов питания для удовлетворения растущего спроса населения. Кроме того, сельское хозяйство сталкивается с проблемами последствий загрязнения окружающей среды, такими как изменение климата и нехватка воды, которые снижают урожайность сельскохозяйственных культур. Чрезмерное использование химических удобрений привело к различным негативным последствиям, таким как накопление вредных элементов в почве, загрязнение грунтовых вод, снижение содержания органического вещества в почве и ее плодородия вместе с ухудшением физических и химических свойств почвы [1]. Таким образом, современное сельскохозяйственное производство в различных странах мира сталкивается с необходимостью решения сразу двух важнейших проблем, а именно защиты сельскохозяйственных культур от вредителей, болезней и сорняков и защиты окружающей среды от техногенного загрязнения [2].

В последние годы особое внимание уделяется промышленному потенциалу микроорганизмов для использования в качестве биологических удобрений, их способности улучшать доступность питательных веществ, усиливать рост и продуктивность растений и защищать окружающую среду от негативных воздействий [3, 4]. Для большой группы почвенных бактерий показано положительное влияние на рост и развитие растений, что связывают с такими свойствами, как повышение доступности для растений элементов минерального питания, продукция метаболитов с гормональными и сигнальными функциями (ауксины, цитокинины, гиббереллины, абсцизовая, салициловая и жасмоновая кислоты), индукция механизмов системной устойчивости к стрессам абиотической и биотической природы [5, 6]. Помимо этого, некоторые ростостимулирующие микроорганизмы могут обладать и свойствами биоконтроля, подавляя рост фитопатогенов с помощью производства антимикробных соединений или конкуренции за экологические ниши или питательные ресурсы. Изучение потенциала таких микроорганизмов и их применение в устойчивом сельском хозяйстве в качестве альтернатив химическим удобрениям и пестицидам будет способствовать улучшению состояния окружающей среды и повышению производительности сельского хозяйства [7].

Во всем мире биостимуляторы роста на основе бактерий все шире используют в растениеводстве для увеличения урожайности растений [8]. Однако несмотря на достаточно широкий ассортимент присутствующих на рынке препаратов на основе живых бактерий для защиты и регуляции роста растений, их применение занимает лишь небольшую долю в сельскохозяйственной отрасли. Одной из основных причин, ограничивающих применение таких биопрепаратов, может являться недостаточное изучение механизмов, обеспечивающих биопротекторные (обеспечивающие фунгицидный эффект в отношении фитопатогенных грибов) и ростостимулирующие свойства микроорганизмов разнообразных филогенетических групп, а также изменяющиеся свойства инокулированных в почву микроорганиз-

мов, которые могут влиять на производство сельскохозяйственных культур. Успешное использование микробных биостимуляторов зависит от их выживаемости в почве, способности взаимодействия с местными микроорганизмами в почве и факторами окружающей среды [9, 10]. Также эффективные микроорганизмы должны усиливать возможности роста растений, иметь широкий спектр действия, быть безопасными для окружающей среды, быть устойчивыми к разнообразным температурным воздействиям, УФ-излучению и иным факторам [11]. Учитывая всё вышеперечисленное, необходимость в разработке новых биоудобрений на основе ростостимулирующих бактерий остается актуальной.

Целью настоящего исследования явилось изучение ростостимулирующих и биопротекторных свойств двух штаммов бактерий, *Pseudomonas protegens* A-CMC-05 и *Gordonia paraffinivorans* A-CMC-11, обладающих липолитическими свойствами и являющихся деструкторами широкого круга органических веществ.

Материалы и методы

Штаммы бактерий *Pseudomonas protegens* A-CMC-05 (VKM B-3844D) и *Gordonia paraffinivorans* A-CMC-11 (VKM Ac-3071D) культивировали на среде PCA (plate count agar) и агаризованной или жидкой среде на основе гидролизата рыбной муки (ГРМ). Влияние штаммов бактерий на рост по отношению друг к другу определяли с помощью посевов на агаризованную питательную среду методом перекрестных штрихов. На середину чашки от одного края до другого наносили полоску бактериального инокулята одного штамма и инкубировали при 28°C в течение ночи. Далее наносили на чашку полосу инокулята второго штамма, перпендикулярно выросшему бактериальному штамму. Еще через сутки инкубирования при 28°C проверяли зону роста второго штамма и определяли наличие или отсутствие ингибирования одного штамма другим. Посевы проводили в двух повторностях с обоими вариантами перекрестных штрихов.

Ингибирующий эффект штаммов A-CMC-05 и A-CMC-11 на рост и развитие фитопатогенных микроорганизмов исследовали на тест-штамме *Fusarium equiseti* D1. Эксперимент проводили на среде с мальтозным экстрактом (МЭ: мальтозный экстракт – 30 г/л; пептон – 5 г/л; агар – 15 г) с добавлением 1 мл стокового раствора микроэлементов ($\text{CuSO}_4 \times 5\text{H}_2\text{O}$ – 5 г/л; $\text{ZnSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ – 1 г/л) и PCA (plate count agar). Использовали три разных подхода к культивированию при проведении эксперимента. В первом варианте с совместным культивированием высевали на чашки с агаризованной средой 0,1 мл свежей жидкой бактериальной культуры и равномерно распределяли по поверхности агара. Далее на инокулированные бактериями чашки помещали два агаровых блока свежесвыращенного грибного мицелия на расстоянии друг от друга не менее 3 см. Во втором варианте эксперимента проводили посев жидкой бактериальной культуры на чашку Петри (0,1 мл суспензии клеток с концентрацией не менее 10^8 кл/мл), через 1 сутки инкубирования при 28°C на поверхность агара помещали два фрагмента мицелия, как описано выше. Третий вариант культивирова-

ния заключался в следующем: 3 мкл жидкой бактериальной культуры (10^8 кл/мл) инокулировали с двух противоположных сторон чашки Петри с КДА (картофельно-декстрозный агар: картофель – 200 г/л, глюкоза – 20 г/л; агар – 15 г/л) на равном расстоянии от центра (не менее 3 см) и культивировали при 28°C в течение 24 ч; после в центр чашки Петри помещали агаровый блок мицелия диаметром 5 мм. Культивирование всех вариантов эксперимента в трех независимых повторностях проводили в течение 5 суток. Далее измеряли диаметр грибного мицелия в контрольных и экспериментальных чашках и рассчитывали ингибирующий эффект бактериальных штаммов по описанной ранее формуле [12].

Эксперимент по влиянию метаболитов культуральной жидкости штаммов *P. protegens* А-СМС-05 и *G. paraffinivorans* А-СМС-11 на всхожесть семян пшеницы яровой (*Triticum aestivum* L.) проводили по следующей схеме: семена пшеницы вымачивали 1 ч в свежей жидкой культуре каждого штамма (не менее 10^8 кл/мл) по отдельности и культуральной жидкости консорциума из двух штаммов, затем высевали в стерильную почву. Параллельно проводили контрольный посев необработанных семян. Эксперимент проводили в стерильных пластиковых парниках с прозрачными крышками с режимом инсоляции день-ночь (16:8) в течение 8 сут. Для каждого варианта эксперимента, включая контрольный, использовали три биологических повторности по 100 семян пшеницы в каждой. В конце эксперимента определяли процент всхожести семян, а также анализировали длину корней и проростков.

Эксперимент по стимулированию процессов ризогенеза у растений метаболитами, образуемыми штаммами бактерий, проводили с использованием эксплантов барбариса Тунберга (*Berberis thunbergii* Aurea). Полученные микроклональным размножением экспланты барбариса без признаков ризогенеза были высажены в стерильную почву, обработанную раствором (150 мл раствора на 2 л почвы) культуральной жидкости штаммов *P. protegens* А-СМС-05 и *G. paraffinivorans* А-СМС-11 с концентрацией 10^8 кл/мл. Проводили отдельный эксперимент для каждого штамма. В каждом эксперименте было использовано 66 эксплантов барбариса. В контрольном эксперименте экспланты высаживались в стерильную почву без какой-либо обработки. Дополнительный контрольный эксперимент включал обработку эксплантов (опудривание) регулятором роста растений (препарат «Корневин», содержащий 4(индол-Зил)масляную кислоту (ИМК) в качестве действующего вещества), а также внесение жидкой формы биопрепарата на основе спор (в конечной концентрации 10^6 на мл) и мицелия гриба *Trichoderma virens* 6 (производитель ООО «Дарвин», г. Томск) для подавления развития нежелательных микроорганизмов. Эксперимент проводили при комнатной температуре на протяжении 5 недель. Первые 2 недели контейнеры с эксплантами были закрыты герметичными прозрачными крышками для поддержания высокой влажности и адаптации эксплантов. Далее в течение 3 недель влажность постепенно снижали за счет нарушения герметичности крышек. После испарения всей влаги растения извлекали из почвы и проводили подсчет эксплантов с признаками ризогенеза.

Для последующего исследования ростостимулирующих свойств штаммов, включая образование корней и длину побегов, выбраны экспланты малины (*Rubus idaeus* L.) сорта «Кассиопея». Экспланты без признаков ризогенеза были высажены в стерильную почву, как описано выше. Во всех трех вариантах эксперимента, а именно с обработкой культуральной жидкостью штамма *P. protegens* A-CMC-05, штамма *G. paraffinivorans* A-CMC-11 и консорциума из двух штаммов, использовали по 70 эксплантов малины. В контрольных экспериментах высаживали экспланты в стерильную почву без какой-либо обработки и с обработкой препаратом «Корневин». Продолжительность и условия проведения эксперимента с эксплантами малины совпадали с описанным выше с участием барбариса. Однако в данном случае по завершении эксперимента оценивали не только число эксплантов с признаками ризогенеза, но и длину побегов.

Статистическую обработку полученных данных проводили с применением непараметрического U-критерия Манна–Уитни. Отличия считали значимыми при $p \leq 0,05$.

Результаты исследования и обсуждение

В исследовании использовали штаммы бактерий, выделенные нами ранее из городских очистных сооружений г. Сурабая (Индонезия) и идентифицированные на основе молекулярно-биологического анализа как *Pseudomonas protegens* A-CMC-05 (VKM B-3844D) и *Gordonia paraffinivorans* A-CMC-11 (VKM Ac-3071D) (данные не опубликованы). Исследуемые штаммы относятся к филогенетически удаленным друг от друга таксонам (Gammaproteobacteria и Actinomycetia соответственно) и представляют интерес как потенциальные агенты для использования в различных экологических и сельскохозяйственных биотехнологиях. Представители *Pseudomonas* и *Gordonia* широко распространены в природе и активно изучаются благодаря своей способности разлагать, преобразовывать и синтезировать органические соединения [13, 14]. *P. protegens* известен как стимулирующая рост растений ризобактерия [15]. Для *G. paraffinivorans* не обнаружено опубликованных данных об исследовании их потенциала в качестве стимуляторов роста растений или свойств биоконтроля, однако подобные работы есть для других представителей рода *Gordonia* [16].

Исследовали ингибирующую активность штаммов *P. protegens* A-CMC-05 и *G. paraffinivorans* A-CMC-11 по отношению к фитопатогенному грибу рода *Fusarium*, штамм D1, выделенному нами ранее из пораженных фузариозом растений клубники. *Fusarium* D1 по анализу гена ITS (номер доступа GenBank NCBI PV390695) относится к *Fusarium equiseti*, представителю комплекса видов *Fusarium incarnatum-equiseti*, который является патогеном для разнообразных растений [17, 18].

Fusarium spp., широко распространенный мицелиальный гриб, встречающийся в почве и растениях, многие виды которого являются важными патогенами растений [19, 20], влияют на качество урожая и приводят к порче продуктов питания [21], а также оказывают значительное влияние на здоровье человека и животных [22, 23].

При совместном культивировании *F. equiseti* D1 в присутствии каждого из бактериальных штаммов наблюдали ингибирование зоны роста мицелия (рис. 1А). При инокулировании фрагмента гриба на свежевыросший бактериальный газон ингибирующая активность штамма *Pseudomonas* sp. А-СМС-05 была такой же заметной, тогда как для штамма *Gordonia* sp. А-СМС-11 наблюдали менее выраженный антагонизм (рис. 1В). При третьем варианте культивирования, который заключался в инокулировании грибного мицелия в центр чашки Петри на одинаковом расстоянии (3,5 см) между двумя бактериальными зонами роста (диаметром 0,7–0,8 мм), в присутствии штамма *Pseudomonas* sp. А-СМС-05 также наблюдали более заметное ингибирование роста мицелия, чем в присутствии штамма *Gordonia* sp. А-СМС-11 (рис. 1С).

Ингибирование радиального роста мицелия на среде для микромицетов составило 11–13% для штамма А-СМС-11 и от 36% до 67% для штамма А-СМС-05. Для штамма А-СМС-11 отмечено наибольшее ингибирующее воздействие на мицелий (до 57%) при культивировании на среде PCA, предназначенной для культивирования бактерий и подсчета колоний.

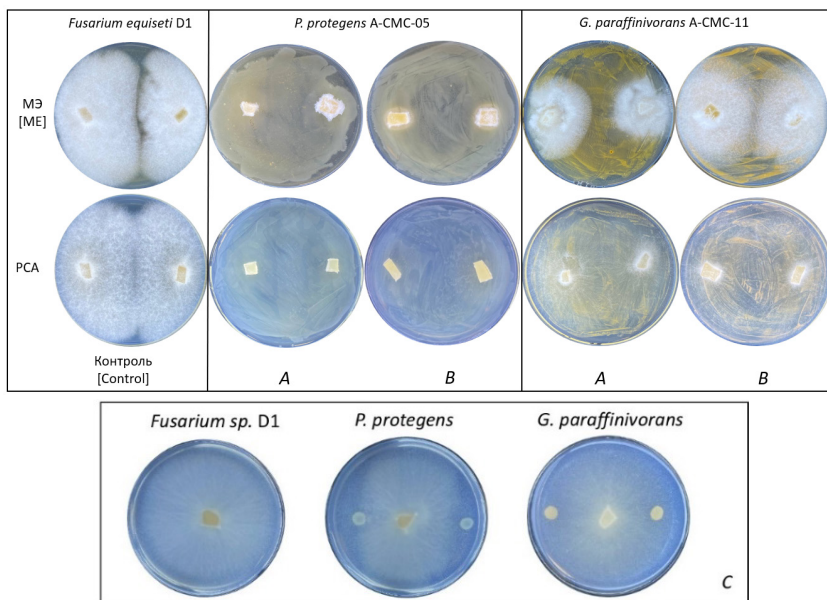


Рис. 1. Подавление роста *Fusarium equiseti* D1 при разных вариантах культивирования на средах с мальтозным экстрактом (МЭ) и PCA (А – совместное культивирование; В – инокулирование грибного мицелия на выросший бактериальный газон; С – инокулирование мицелия между двумя бактериальными зонами роста) в присутствии штаммов *Gordonia* sp. А-СМС-11 и *Pseudomonas* sp. А-СМС-05 при 28°C в течение 5 суток

[Fig. 1 Inhibition of *Fusarium equiseti* D1 growth under different cultivation conditions on media with maltose extract (ME) and PCA (A - co-cultivation; B - inoculation of fungal mycelium onto the grown bacterial lawn; C - inoculation of mycelium between two bacterial growth zones) in the presence of strains *Gordonia* sp. А-СМС-11 and *Pseudomonas* sp. А-СМС-05 strains at 28°C for 5 days]

Помимо ингибирования зоны роста, штамм А-СМС-05 препятствовал развитию воздушных гиф фузариума, наблюдали лишь слабый рост в глубине агаризованной среды (табл. 1).

Ранее продемонстрировано ингибирование роста мицелия *Fusarium equiseti*, выделенного из больных стеблей и корней перца хабанеро, почвенными штаммами *Paenibacillus* sp. и *Bacillus* spp. как при совместном культивировании (до 66%), так и при использовании бесклеточных фильтратов (до 69%) [24]. В другом исследовании для ризосферных штаммов *Bacillus amyloliquefaciens*, *B. velezensis*, *B. subtilis* и *B. mojavensis* показана высокая степень снижения фузариозного увядания у *Vicia faba*, вызванного

Таблица 1 [Table 1]

Ингибирование роста *Fusarium equiseti* D1 при культивировании в присутствии штаммов *Gordonia* sp. А-СМС-11 и *Pseudomonas* sp. А-СМС-05
[Inhibition of *Fusarium equiseti* D1 growth when cultivated in the presence of *Gordonia* sp. А-SMS-11 and *Pseudomonas* sp. А-SMS-05 strains]

Наименование штамма-антагониста [Name of antagonist strain]	Мицелий [Mycelium]	Ингибирование роста мицелия, % [Inhibition of mycelium growth, %]				
		Совместное культивирование [Co-cultivation]		Инокулирование грибного мицелия на бактериальный газон [Inoculation of fungal mycelium on bacterial lawn]		Инокулирование мицелия между двумя бактериальными зонами роста [Inoculation of mycelium between two bacterial growth zones]
		МЭ [malt extract]	PCA	МЭ [malt extract]	PCA	КДА [potato dextrose agar]
<i>Pseudomonas protegens</i> А-СМС-05	Воздушные гифы [Aerial hyphae]	83,8 ± 4,1	100	82,7 ± 3,4	100	39,0 ± 2,4
	Глубинный мицелий [Deep mycelium]	36,1 ± 1,2	35,0 ± 7,3	67,66 ± 6,7	34,9 ± 5,5	Не наблюдали [Not observed]
<i>Gordonia paraffinivorans</i> А-СМС-11	Воздушные гифы [Aerial hyphae]	23,8 ± 9,1	16,8 ± 1,4	11,4 ± 0,0	57,3 ± 2,3	13,0 ± 7,4
	Глубинный мицелий [Deep mycelium]	10,5 ± 9,1	Не наблюдали [Not observed]	Не наблюдали [Not observed]	Не наблюдали [Not observed]	Не наблюдали [Not observed]

F. equiseti, в тепличных условиях [25]. Помимо *Bacillus* и родственных ему видов показана фунгицидная активность для штамма *Chryseobacterium rhizophlanae* 1М и его метаболитов, ацетона и 2,3-бутандиола, в отношении возбудителей фузариоза маша (*Vigna radiata*), среди которых был *Fusarium equiseti* [26].

Фунгицидная активность штаммов *Pseudomonas protegens* относительно представителей рода *Fusarium* также была показана ранее другими исследователями [27]. При этом в одной из опубликованных работ продемонстрировано отсутствие ингибирующей активности у двух штаммов *P. protegens* в отношении грибов рода *Fusarium*, тогда как для других фитопатогенных грибов фунгицидная активность присутствовала [28]. Информации об исследованиях ингибирующей активности штаммов *Gordonia* против фитопатогенных грибов нами не обнаружено.

Бактериальные антагонисты фитопатогенных грибов, как и стимулирующие рост растений бактерий, обычно выделяют из почв и корней растений как основного местообитания ризобактерий. В отдельных работах описывается выделение способствующих росту растений бактерий из орошаемых сточными водами сельскохозяйственных почв [29, 30] и других типов почв, подверженных антропогенному влиянию [31]. Однако некоторые исследования продемонстрировали, что микроорганизмы, выделенные из других экологических ниш, таких как водная среда (морская вода, питьевая вода), также эффективно подавляли рост патогенов и способствовали росту растений [32, 33]. Кроме того, продемонстрирован эффект стимулирования роста растений и защиты растений от патогенов рода *Fusarium* spp бактериями, выделенными из очистных сооружений сточных вод [34]. Авторами показано ингибирующее действие бактерий родов *Pseudomonas*, *Proteus* на рост *Fusarium culmorum* и *Fusarium graminearum* и наличие свойств, стимулирующих рост растений. Также авторы данной работы предполагают, что у ризосферных и неризосферных бактерий могут отличаться механизмы, ответственные за противогрибковые свойства. Этими же авторами показано, что бактерии могут переноситься из ризосферы одного вида растений в ризосферу другого вида растений без потери их свойств, способствующих росту растений [35], что подтверждает возможный потенциал разных бактерий в стимулировании роста разнообразных растений.

Помимо исследования потенциала штаммов в качестве агентов биоконтроля, проведен эксперимент по изучению ростостимулирующих свойств, а именно синтеза биоактивных веществ, способствующих ризогенезу эксплантов барбариса (рис. 2). Для представителей разных видов барбариса сообщается о сложностях с укоренением и введением в культуру при микроклональном размножении [36, 37], чем и обоснован выбор декоративного кустарника барбариса Тунберга (*Berberis thunbergii* Aurea) в качестве объекта для исследований. В итоге у 12,1% эксплантов, высаженных в стерильную почву, обработанную раствором культуральной жидкости штамма А-СМС-05, наблюдали процессы ризогенеза. В эксперименте со штаммом А-СМС-11 образование корней выявлено у 7,5% эксплантов. В контрольном эксперименте с добавлением коммерческого препарата

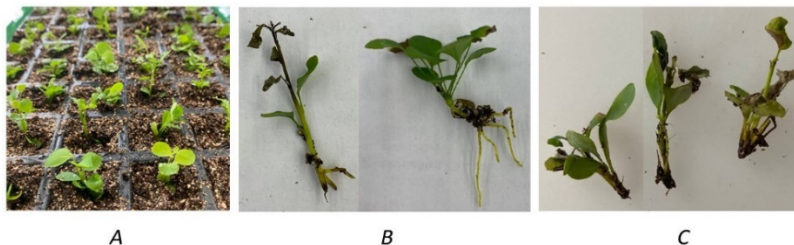


Рис. 2. Эксперимент по стимулированию корнеобразования у эксплантов барбариса штаммами *P. protegens* A-CMC-05 и *G. paraffinivorans* A-CMC-11: внешний вид эксплантов барбариса Тунберга (*Berberis thunbergii* Aurea) в начале эксперимента (A); экспланты с корнями в конце эксперимента (B); экспланты без признаков ризогенеза в конце эксперимента (C)

[Fig. 2. Experiment on stimulation of root formation in barberry explants by strains *P. protegens* A-CMC-05 and *G. paraffinivorans* A-CMC-11: external appearance of explants of Thunberg barberry (*Berberis thunbergii* Aurea) at the beginning of the experiment (A); explants with roots at the end of the experiment (B); explants without signs of rhizogenesis at the end of the experiment (C)]

«Корневин» и биопрепарата на основе *Trichoderma virens* 6 эффективность ризогенеза составила 15%. Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что штамм А-СМС-05 обладает выраженными свойствами, способствующими ризогенезу у использованных в качестве объекта исследования растений барбариса, и его эффективность в стимулировании ризогенеза сравнима с эффективностью препарата на основе ИМК. Литературный поиск для сравнительного анализа полученных результатов практически не выявил публикаций, касающихся биостимулирования роста и укоренения эксплантов барбариса. В одной из обнаруженных работ приводится протокол по индукции развития корневых волосков у эксплантов индийского барбариса (*Berberis aristata* DC) штаммами *Agrobacterium rhizogenes* [38].

В последующих экспериментах, помимо влияния штаммов А-СМС-05 и А-СМС-11 по отдельности, исследовали их воздействие на рост и ризогенез растений в составе консорциума. Совместное культивирование штаммов А-СМС-05 и А-СМС-11 на плотных питательных средах подтвердило, что они не проявляют антагонистической активности в отношении друг друга и могут применяться в виде консорциума.

В опытах с проращиванием семян пшеницы (*Triticum aestivum* L.) культуральная жидкость штаммов *G. paraffinivorans* А-СМС-11 и *P. protegens* А-СМС-05, в том числе в составе консорциума, не показала какого-либо влияния на всхожесть семян (рис. 3). Значимых отличий от контрольного эксперимента не обнаружено (рис. 3А). При этом отмечено формирование более плотного земляного кома у корней проростков пшеницы в экспериментах с каждым из штаммов и в составе консорциума по сравнению с контролем (рис. 3В). Вместе с тем выявлены статистически значимые отличия длин проростков и корней пшеницы при обработке семян культуральной жидкостью штаммов *G. paraffinivorans* А-СМС-11 и *P. protegens* А-СМС-05 соответственно (рис. 4). Использование штаммов в составе консорциума не показало значимых результатов.

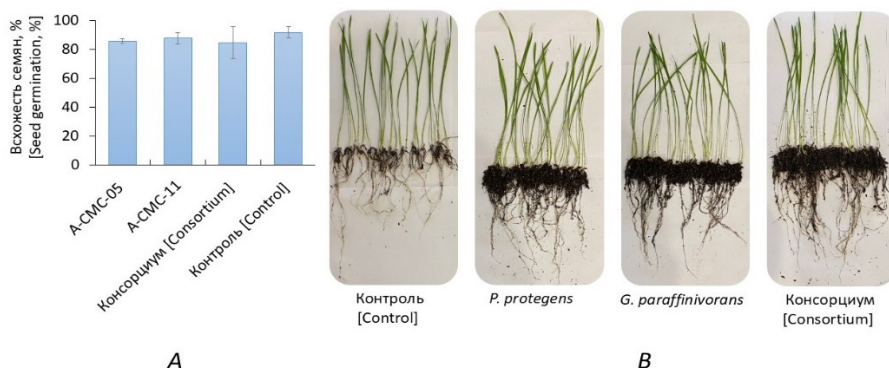


Рис. 3. Влияние штаммов *P. protegens* A-CMC-05 и *G. paraffinivorans* A-CMC-11 на всхожесть семян пшеницы (А) и внешний вид проростков и корней пшеницы (В)
[Fig. 3. The effect of *P. protegens* A-CMC-05 and *G. paraffinivorans* A-CMC-11 strains on the germination of wheat seeds (А) and the appearance of wheat seedlings and roots (В)]

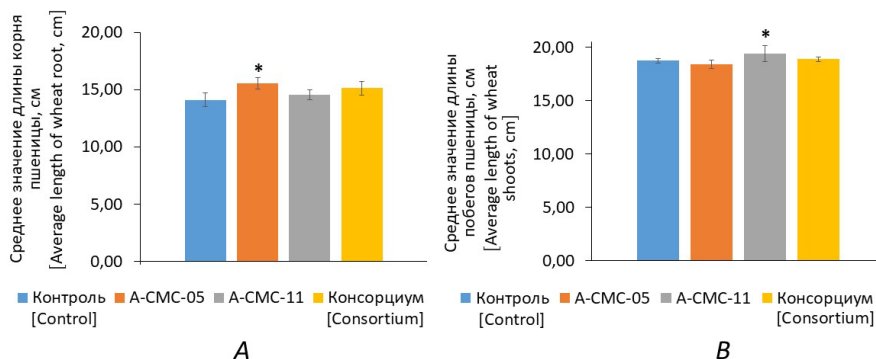


Рис. 4. Влияние штаммов *G. paraffinivorans* A-CMC-11 и *P. protegens* A-CMC-05 на длину корней (А) и побегов пшеницы (В). На графиках отображены среднеарифметические значения длины побегов и корней пшеницы со стандартной ошибкой среднего. Знаком (*) показаны статистически значимые различия ($p \leq 0,05$)
[Fig. 4. Effect of *G. paraffinivorans* A-CMC-11 and *P. protegens* A-CMC-05 strains on the length of wheat roots (А) and shoots (В). The graphs show the arithmetic mean values of the length of shoots and roots of wheat with the standard error of the mean. The sign (*) shows statistically significant differences ($p \leq 0.05$)]

В следующем эксперименте изучали влияние метаболитов штаммов *G. paraffinivorans* A-CMC-11 и *P. protegens* A-CMC-05 на эффективность укоренения и длину побегов у эксплантов малины (*Rubus idaeus* L.) сорта «Кассиопея» (рис. 5). Выбор растительного объекта связан со сложностями ризогенеза эксплантов малины *in vitro*. Производителям приходится высаживать экспланты без признаков ризогенеза для укоренения и адаптации растений. Однако, в отличие от эксперимента с эксплантами барбариса, положительного влияния штаммов или их консорциума на процессы ризогенеза у малины не обнаружено. Эффективность корнеобразования по количеству укоренившихся эксплантов оказалась самой значительной

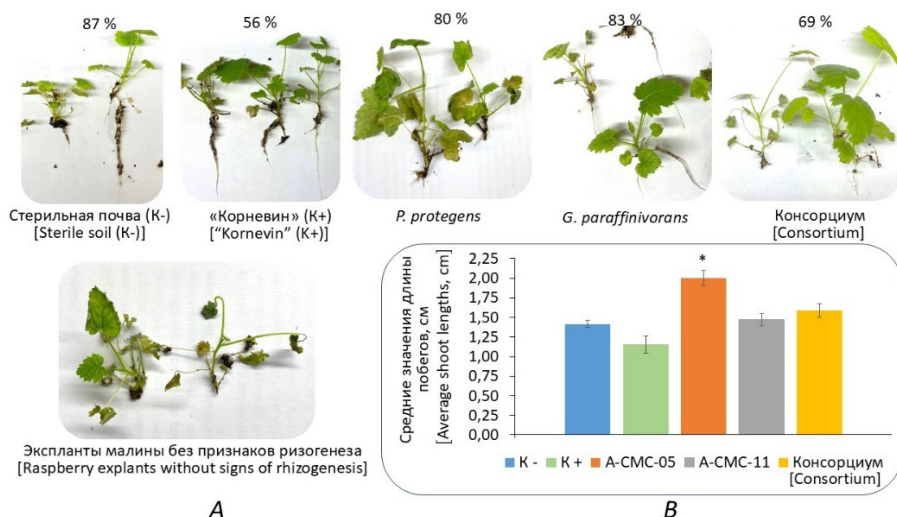


Рис. 5. Влияние штаммов *G. paraffinivorans* A-CMC-11 и *P. protegens* A-CMC-05 на корнеобразование (А) и длину побегов малины (В). На графике отображены среднесарифметические значения длины побегов со стандартной ошибкой среднего.

Знаком (*) показаны статистически значимые различия ($p \leq 0,05$)

[Fig. 5. Effect of *G. paraffinivorans* A-CMC-11 and *P. protegens* A-CMC-05 strains on root formation (A) and shoot length (B) of raspberry. The graph shows the arithmetic mean values of shoot length with the standard error of the mean. The sign (*) indicates statistically significant differences ($p \leq 0.05$)]

в отрицательном контроле без какой-либо обработки почвы или эксплантов и составила 87% (см. рис. 5А). По всей видимости, влияние исследуемых штаммов на ризогенез специфично, зависит от конкретного растительного объекта и избирательно может оказывать положительное воздействие на процесс образования корней. Самая низкая эффективность ризогенеза обнаружена в положительном контроле с обработкой коммерческим препаратом, содержащим ИМК, что сложно поддается объяснениям. Однако в настоящем исследовании учитывалось только число укоренившихся эксплантов, измерений массы корней не проводилось. Общая масса корней в контрольных и опытных экспериментах могла отличаться и в том числе влиять на среднюю массу побегов, которая визуально увеличивалась после обработки культуральной жидкостью штаммов и консорциума за счет более широкой листовой пластины (рис. 6). Кроме того, обработка эксплантов культуральной жидкостью штамма *P. protegens* A-CMC-05 способствовала увеличению средней длины побегов на 40% по сравнению с отрицательным контролем и на 73% по сравнению с положительным контролем (см. рис. 5В). Положительный эффект может быть связан как с синтезом ИМК бактерией, так и других биоактивных веществ, способствующих росту растений и описанных ранее для представителей *P. protegens* [39]. Ростостимулирующие свойства у представителей *P. protegens* описаны ранее, включая улучшение роста пшеницы [40].

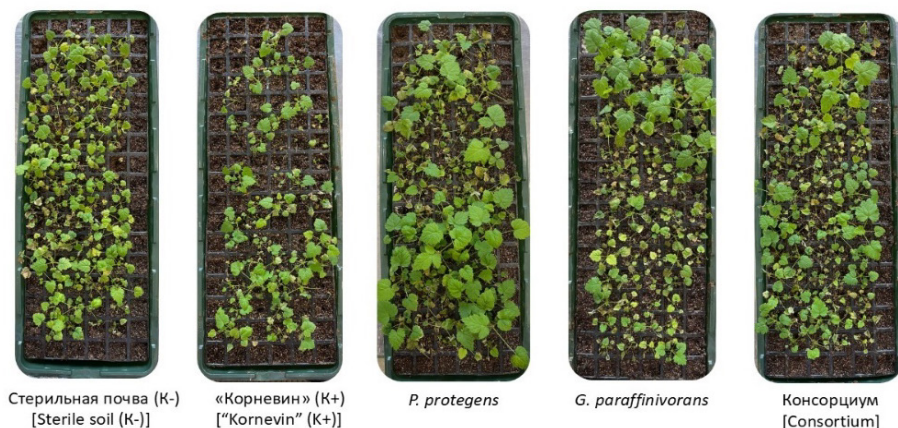


Рис. 6. Внешний вид эксплантов малины по окончании эксперимента по стимулированию роста и корнеобразования штаммами *Pseudomonas protegens* A-CMC-05 и *Gordonia paraffinivorans* A-CMC-11

[Fig. 6. Appearance of raspberry explants at the end of the experiment on stimulating growth and root formation with strains of *Pseudomonas protegens* A-CMC-05 and *Gordonia paraffinivorans* A-CMC-11]

Заключение

В данной работе изучали биопротекторные и биоактивные свойства двух изолятов из очистных сооружений, получающих муниципальные сточные воды (г. Сурабая, Индонезия), для которых ранее нами показаны липолитические свойства и способность к деструкции пальмового масла (данные не опубликованы). Штаммы *P. protegens* A-CMC-05 и *G. paraffinivorans* A-CMC-11 продемонстрировали *in vitro* антагонистический потенциал против фитопатогенного гриба *Fusarium equiseti* D1, а также ряд признаков, способствующих росту растений.

В нашем исследовании ингибирование радиального роста мицелия *Fusarium* sp. D1, являющегося представителем *Fusarium equiseti*, составило от 11% до 13% для штамма A-CMC-11 и от 36% до 67% для штамма A-CMC-05. Следует отметить, что штамм *P. protegens* A-CMC-05 полностью подавлял развитие воздушного мицелия, однако эффективность ингибирования рассчитывали по подавлению роста не только воздушных гиф, но и глубинного мицелия. Помимо фунгицидной активности, штамм A-CMC-05 обладает выраженными свойствами, способствующими ризогенезу у эксплантов барбариса (*Berberis thunbergii* Aurea), и его эффективность в стимулировании ризогенеза сравнима с эффективностью препарата на основе ИМК.

В опытах с проращиванием семян пшеницы (*Triticum aestivum* L.) выявлены статистически значимые увеличения длин проростков и корней пшеницы при обработке семян штаммами *G. paraffinivorans* A-CMC-11 и *P. protegens* A-CMC-05 соответственно. Обработка эксплантов малины (*Rubus idaeus* L.) культуральной жидкостью штамма A-CMC-05 способствовала увеличению средней длины побегов по сравнению с отрицатель-

ным и положительным контролями на 40% и на 73% соответственно. Для штамма *P. protegens* А-СМС-05 выявлены более высокие показатели по всем исследованным характеристикам, таким как эффективность ингибирования фитопатогена и процент эксплантов с признаками ризогенеза.

Результаты проведенных исследований подтверждают литературные данные о том, что неризосферные бактерии могут значительно улучшать свойства сельскохозяйственных растений. Полученные данные продемонстрировали потенциал штаммов *P. protegens* А-СМС-05 и *G. paraffinivorans* А-СМС-11, выделенных из аэротенка городских очистных сооружений, в качестве агентов биоконтроля и стимуляторов роста растений. Штамм *P. protegens* А-СМС-05 показал более значимые результаты и является более перспективным для дальнейших исследований ростостимулирующих и биопротекторных свойств.

Список источников

1. Fróna D., Szenderák J., Harangi-Rákos M. The challenge of feeding the World // *Sustainability*. 2019. Vol. 11, № 20. 5816. doi: 10.3390/su11205816
2. Pathak V.M., Verma V.K., Rawat B.S., Kaur B., Babu N., Sharma A., Dewali S., Yadav M., Kumari R., Singh S., Mohapatra A., Pandey V., Rana N., Cunill J.M. Current status of pesticide effects on environment, human health and it's eco-friendly management as bioremediation: A comprehensive review // *Frontiers in Microbiology*. 2022. Vol. 13. 962619. doi: 10.3389/fmicb.2022.962619
3. Khan A., Upadhyay V.K., Panwar M., Singh A.V. Soil microbiota: A key bioagent for revitalization of soil health in hilly regions // *Microbiological advancements for higher altitude agro-ecosystems & sustainability* / ed. by R. Goel, R. Soni, D.C. Suyal. Singapore : Springer, 2020. PP. 183–200. doi: 10.1007/978-981-15-1902-4_10
4. Ayilara M.S., Adeleke B.S., Akinola S.A., Fayose C.A., Adeyemi U.T., Gbadegehin L.A., Omole R.K., Johnson R.M., Uthman Q.O., Babalola O.O. Biopesticides as a promising alternative to synthetic pesticides: A case for microbial pesticides, phytopesticides, and nanobiopesticides // *Frontiers in Microbiology*. 2023. Vol. 14. 1040901. doi: 10.3389/fmicb.2023.1040901
5. Максимов И., Веселова С., Нужная Т., Сарварова Е., Хайруллин Р. Стимулирующие рост растений бактерии в регуляции устойчивости растений к стрессовым факторам // *Физиология растений*. 2015. Т. 62, № 6. С. 763–775. doi: 10.7868/S0015330315060111
6. Vejan P., Abdullah R., Khadiran T., Ismail S., Nasrullah B.A. Role of plant growth promoting rhizobacteria in agricultural sustainability – a review // *Molecules*. 2016. Vol. 21, № 5. 573. doi: 10.3390/molecules21050573
7. Taheri P., Puopolo G., Santoyo G. Plant growth-promoting microorganisms: New insights and the way forward // *Microbiological Research*. 2025. Vol. 297. 128168. doi: 10.1016/j.micres.2025.128168
8. Glick B.R. Plant growth-promoting bacteria: Mechanisms and applications // *Scientifica (Cairo)*. 2012. Vol. 2012. 963401. doi: 10.6064/2012/963401
9. Martinez-Viveros O., Jorquera M.A., Crowley D.E., Gajardo G., Mora M.L. Mechanisms and practical considerations involved in plant growth promotion by rhizobacteria // *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2010. Vol. 10, № 3. PP. 293–319. doi: 10.4067/S0718-95162010000100006
10. Choudhary D.K., Sharma K.P., Gaur R.K. Biotechnological perspectives of microbes in agro-ecosystems // *Biotechnology Letters*. 2011. Vol. 33, № 10. PP. 1905–1910. doi: 10.1007/s10529-011-0662-0

11. Nakkeeran S., Fernando W.G.D., Siddiqui Z.A. Plant growth promoting rhizobacteria formulations and its scope in commercialization for the management of pests and diseases // PGPR: Biocontrol and biofertilization / ed. by Z.A. Siddiqui. Dordrecht, The Netherlands : Springer, 2005. PP. 257–296. doi: 10.1007/1-4020-4152-7_10
12. Whipps J.M. Effect of media on growth and interactions between a range of soil-borne glasshouse pathogens and antagonistic fungi // New Phytologist. 1987. Vol. 107, № 1. PP. 127–142. doi: 10.1111/J.1469-8137.1987.TB04887.X
13. Afonso L., Gionco-Cano B., Simionato A.S., Niekawa E.T.G., Pega G.E.A. et al. Chapter 3 – Microbial bioactive compounds in plant disease management // Food security and plant disease management / ed. by A. Kumar, S. Droby. Woodhead Publishing, 2021. PP. 37–61. doi: 10.1016/B978-0-12-821843-3.00013-1
14. Silva N.M., de Oliveira A.M.S.A., Pegorin S., Giusti C.E., Ferrari V.B., Barbosa D. et al. Characterization of novel hydrocarbon-degrading *Gordonia paraffinivorans* and *Gordonia sihwensis* strains isolated from composting // PLoS ONE. 2019. Vol. 14, № 4. e0215396. doi: 10.1371/journal.pone.0215396
15. Ramette A., Frapolli M., Fischer-Le S.M., Gruffaz C., Meyer J.-M., Défago G., Sutra L., Moënne-Loccoz Y. *Pseudomonas protegens* sp. nov., widespread plant-protecting bacteria producing the biocontrol compounds 2,4-diacetylphloroglucinol and pyoluteorin // Systematic and Applied Microbiology. 2011. Vol. 34, № 3. PP. 180–188. doi: 10.1016/j.syapm.2010.10.005
16. Kayasth M., Kumar V., Gera R. *Gordonia* sp.: A salt tolerant bacterial inoculant for growth promotion of pearl millet under saline soil conditions // 3 Biotech. 2014. Vol. 4, № 5. PP. 553–557. doi: 10.1007/s13205-013-0178-5
17. El Hazzat N., Adnani M., Msairi S., El Alaoui M.A., Mouden N., Chliyah M. et al. *Fusarium equiseti* as one of the main *Fusarium* species causing wilt and root rot of chickpeas in Morocco // Acta Mycologica. 2023. Vol. 58. PP. 1–10. doi: 10.5586/am.576
18. Bibi A., Mubeen F., Rizwan A., Ullah I., Hammad M., Waqas M.A.B., Ikram A., Abbas Z., Halterman D., Saeed N.A. Morpho-molecular identification of *Fusarium equiseti* and *Fusarium oxysporum* associated with symptomatic wilting of potato from Pakistan // Journal of Fungi. 2024. Vol. 10, № 10. 701. doi: 10.3390/jof10100701
19. Pecoraro F., Giannini M., Beccari G., Covarelli L., Filippini G., Pisi A., Nipoti P., Prodi A. Comparative studies about fungal colonization and deoxynivalenol translocation in barley plants inoculated at the base with *Fusarium graminearum*, *Fusarium culmorum* and *Fusarium pseudograminearum* // Agricultural and Food Science. 2018. Vol. 27, № 1. PP. 74–83. doi: 10.23986/afsci.67704
20. Moya-Elizondo E.A., Rew L.J., Jacobsen B.J., Hogg A.C., Dyer A.T. Distribution and prevalence of *Fusarium* crown rot and common root rot pathogens of wheat in Montana // Plant Disease. 2011. Vol. 95, № 9. PP. 1099–1108. doi: 10.1094/PDIS-11-10-0795
21. Scherm B., Balmas V., Spanu F., Pani G., Delogu G., Pasquali M., Migheli Q. *Fusarium culmorum*: Causal agent of foot and root rot and head blight on wheat // Molecular Plant Pathology. 2012. Vol. 14, № 4. PP. 323–341. doi: 10.1111/mpp.12011
22. Rohweder D., Valenta H., Sondermann S., Schollenberger M., Drochner W., Pahlow G., Döll S., Dänicke S. Effect of different storage conditions on the mycotoxin contamination of *Fusarium culmorum*-infected and non-infected wheat straw // Mycotoxin Research. 2011. Vol. 27, № 2. PP. 145–153. doi: 10.1007/s12550-011-0087-6
23. Nordkvist E., Häggblom P. *Fusarium* mycotoxin contamination of cereals and bedding straw at Swedish pig farms // Animal Feed Science and Technology. 2014. Vol. 198. PP. 231–237. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2014.10.002
24. Mejia-Bautista M., Cristóbal-Alejo J., Tun-Suarez J., Reyes-Ramírez A. In vitro activity of *Bacillus* spp. on mycelial growth inhibition of *Fusarium equiseti* and *Fusarium solani* isolated from habanero peppers (*Capsicum chinense* Jacq.) // Agrociencia. 2016. Vol. 50, № 8. PP. 1123–1135.
25. Haddoudi I., Cabrefiga J., Mora I., Mhadhbi H., Montesinos E., Mrabet M. Biological control of *Fusarium* wilt caused by *Fusarium equiseti* in *Vicia faba* with broad spectrum

- antifungal plant-associated *Bacillus* spp. // *Biological Control*. 2021. Vol. 160, № 1. 104671. doi: 10.1016/j.biocontrol.2021.104671
26. Шемшур О.Н., Байдалинов А.И., Сулейменова Ж.Б., Джакибаева Г.Т., Баймаханова Г.Б., Момбекова Г.А. Штамм *Chryseobacterium rhizoplanae* 1M – основа биопрепарата против фузариозной гнили *Vidua radiata* и оценка его биобезопасности // *Микробиология және вирусология*. 2022. Т. 2, № 37. С. 80–91. doi: 10.53729/MV-AS.2022.02.0
27. Bensidhoum L., Nabti E., Tabli N., Kupferschmied P., Weiss A., Rothballer M., Schmid M., Keel C., Hartmann A. Heavy metal tolerant *Pseudomonas protegens* isolates from agricultural well water in northeastern Algeria with plant growth promoting, insecticidal and antifungal activities // *European Journal of Soil Biology*. 2016. Vol. 75. PP. 38–46. doi: 10.1016/j.ejsobi.2016.04.006
28. Andreolli M., Zapparoli G., Angelini E., Lucchetta G., Lampis S., Vallini G. *Pseudomonas protegens* MP12: A plant growth-promoting endophytic bacterium with broad-spectrum antifungal activity against grapevine phytopathogens // *Microbiological Research*. 2019. Vol. 219. PP. 123–131. doi: 10.1016/j.micres.2018.11.003
29. Uno S., Preece J. Micro and cutting propagation of ‘Crimson Pygmy’ Barberry // *Hort Science*. 1987. Vol. 22, № 3. PP. 488–491. doi: 10.21273/HORTSCI.22.3.488
30. Жарасова Д.Н., Толеп Н.А. Особенности введения в культуру *in vitro* барбариса илийского (*Berberis iliensis* М. Поп.) // *Вестник Карагандинского университета*. Серия «Биология. Медицина. География». 2022. Т. 4, № 108. С. 29–33. doi: 10.31489/2022BMG4/29-33
31. Бакаева М.Д., Кенджиева А.А., Стариков С.Н., Четвериков С.П., Четверикова Д.В. Влияние стимулирующей рост бактерии *Pseudomonas protegens* DA1.2 и ее метаболитов на повреждение рапса почвенными остатками метсульфурон-метила // *Агрохимия*. 2024. № 12. С. 30–35. doi: 10.31857/S0002188124120041
32. Ajmal A.W., Saroosh S., Mulk S., Hassan M.N., Yasmin H., Jabeen Z., Nosheen A. et al. Bacteria isolated from wastewater irrigated agricultural soils adapt to heavy metal toxicity while maintaining their plant growth promoting traits // *Sustainability*. 2024. Vol. 13. 7792. doi: 10.3390/su13147792
33. Sarawaneeyaruk S., Lorliam W., Krajangsang S., Pringsulaka O. Enhancing plant growth under municipal wastewater irrigation by plant growth promoting rhizospheric *Bacillus* spp // *Journal of King Saud University – Science*. 2019. Vol. 31, № 3. PP. 384–389. doi: 10.1016/j.jksus.2018.04.027
34. Barbaccia P., Gaglio R., Dazzi C., Miceli C., Bella P., Lo Papa G., Settanni L. Plant growth-promoting activities of bacteria isolated from an anthropogenic soil located in Agrigento province // *Microorganisms*. 2022. Vol. 10, № 11. 2167. doi: 10.3390/microorganisms10112167
35. Goswami D., Vaghela H., Parmar S., Dhandhukia P., Thakker J.N. Plant growth promoting potentials of *Pseudomonas* spp. strain OG isolated from marine water // *Journal of Plant Interactions*. 2013. Vol. 8, № 4. PP. 281–290. doi: 10.1080/17429145.2013.768360
36. Przemieniecki S.W., Kurowski T.P., Karwowska A. Plant growth promoting potential of *Pseudomonas* sp. SP0113 isolated from potable water from a closed water well // *Archives of Biological Science*. 2015. Vol. 67, № 2. PP. 663–673. doi: 10.2298/ABS141002029P
37. Przemieniecki S.W., Kurowski T.P., Kotlarz K., Krawczyk L., Damszel M. et al. Bacteria isolated from treated wastewater for biofertilization and crop protection against *Fusarium* spp. pathogens // *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2019. Vol. 19, № 1. PP. 1–11. doi: 10.1007/s42729-018-0001-9
38. Brijwal L., Tamta S. *Agrobacterium rhizogenes* mediated hairy root induction in endangered *Berberis aristata* DC // *SpringerPlus*. 2015. Vol. 4, № 1. 443. doi: 10.1186/s40064-015-1222-1
39. Przemieniecki S.W., Kurowski P.T., Kotlarz K., Krawczyk K., Damszel M., Karwowska A. Plant growth promoting properties of *Serratia fonticola* ART-8 and *Pseudomonas*

- putida* ART-9 and their effect on the growth of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) // Environmental Biotechnology. 2016. Vol. 12, № 2. PP. 35–39. doi: 10.14799/ebms263
40. Bakaeva M., Chetverikov S., Timergalin M., Feoktistova A., Rameev T., Chetverikova D., Kenjjeva A., Starikov S., Sharipov D., Hkudaygulov G. PGP-bacterium *Pseudomonas protegens* improves bread wheat growth and mitigates herbicide and drought stress // Plants. 2022. Vol. 11, № 23. 3289. doi: 10.3390/plants11233289

References

1. Fróna D, Szenderák J, Harangi-Rákos M. The Challenge of Feeding the World. *Sustainability*. 2019;11(20):5816. doi: 10.3390/su11205816
2. Pathak VM, Verma VK, Rawat BS, Kaur B, Babu N, Sharma A, Dewali S, Yadav M, Kumari R, Singh S, Mohapatra A, Pandey V, Rana N, Cunill JM. Current status of pesticide effects on environment, human health and it's eco-friendly management as bioremediation: A comprehensive review. *Front. Microbiol.* 2022;13:962619. doi: 10.3389/fmicb.2022.962619
3. Khan A, Upadhayay VK, Panwar M, Singh AV. Soil microbiota: A key bioagent for revitalization of soil health in hilly regions. In: *Microbiological Advancements for Higher Altitude Agro-Ecosystems & Sustainability*. Goel R, Soni R, Suyal DC, editors. Singapore: Springer; 2020. pp. 183-200. doi: 10.1007/978-981-15-1902-4_10
4. Ayilara MS, Adeleke BS, Akinola SA, Fayose CA, Adeyemi UT, Gbadegesin LA, Omole RK, Johnson RM, Uthman QO, Babalola OO. Biopesticides as a promising alternative to synthetic pesticides: A case for microbial pesticides, phytopesticides, and nanobiopesticides. *Front. Microbiol.* 2023;14:1040901. doi: 10.3389/fmicb.2023.1040901
5. Maksimov I, Veselova S, Nuzhnaya T, Sarvarova E, Khairullin R. Plant growth-promoting bacteria in the regulation of plant resistance to stress factors. *Russ. J. Plant Physiol.* 2015;62(6):763-775. In Russian, English summary. doi: 10.7868/S0015330315060111
6. Vejan P, Abdullah R, Khadiran T, Ismail S, Nasrulhaq BA. Role of plant growth promoting rhizobacteria in agricultural sustainability - A review. *Molecules*. 2016;21(5):573. doi: 10.3390/molecules21050573
7. Taheri P, Puopolo G, Santoyo G. Plant growth-promoting microorganisms: New insights and the way forward. *Microbiological Research*. 2025;297:128168. doi: 10.1016/j.micres.2025.128168
8. Glick BR. Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. *Scientifica (Cairo)*. 2012;2012:963401. doi: 10.6064/2012/963401
9. Martinez-Viveros O, Jorquera MA, Crowley DE, Gajardo G, Mora ML. Mechanisms and practical considerations involved in plant growth promotion by rhizobacteria. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 2010;10(3):293-319. doi: 10.4067/S0718-95162010000100006
10. Choudhary DK, Sharma KP, Gaur RK. Biotechnological perspectives of microbes in agro-ecosystems. *Biotechnol. Lett.* 2011;33(10):1905-1910. doi: 10.1007/s10529-011-0662-0
11. Nakkeeran S, Fernando WGD, Siddiqui ZA. Plant growth promoting rhizobacteria formulations and its scope in commercialization for the management of pests and diseases. In: *PGPR: Biocontrol and biofertilization*. Siddiqui ZA, editor. Dordrecht, The Netherlands: Springer; 2005. pp. 257-296. doi: 10.1007/1-4020-4152-7_10
12. Whipps JM. Effect of media on growth and interactions between a range of soil-borne glasshouse pathogens and antagonistic fungi. *New Phytol.* 1987;107(1):127-142. doi: 10.1111/J.1469-8137.1987.TB04887.X
13. Afonso L, Gionco-Cano B, Simionato AS, Niekawa ETG, Pega GEA et al. Chapter 3 - Microbial bioactive compounds in plant disease management. In: *Food Security and Plant Disease Management*. Kumar A, Droby S, editors. Woodhead Publishing; 2021. pp. 37-61. doi: 10.1016/B978-0-12-821843-3.00013-1
14. Silva NM, de Oliveira AMSA, Pegorin S, Giusti CE, Ferrari VB, Barbosa D et al. Characterization of novel hydrocarbon-degrading *Gordonia paraffinivorans* and *Gordonia*

- sihwensis* strains isolated from composting. *PLoS ONE*. 2019;14(4):e0215396. doi: 10.1371/journal.pone.0215396
15. Ramette A, Frapolli M, Fischer-Le SM, Gruffaz C, Meyer J-M, Défago G, Sutra L, Moëgne-Loccoz Y. *Pseudomonas protegens* sp. nov., widespread plant-protecting bacteria producing the biocontrol compounds 2,4-diacetylphloroglucinol and pyoluteorin. *Syst. Appl. Microbiol.* 2011;34(3):180-188. doi: 10.1016/j.syapm.2010.10.005
16. Kayasth M, Kumar V, Gera R. *Gordonia* sp.: A salt tolerant bacterial inoculant for growth promotion of pearl millet under saline soil conditions. *3 Biotech.* 2014;4(5):553-557. doi: 10.1007/s13205-013-0178-5
17. El Hazzat N, Adnani M, Msairi S, El Alaoui MA, Mouden N, Chliye M et al. *Fusarium equiseti* as one of the main *Fusarium* species causing wilt and root rot of chickpeas in Morocco. *Acta Mycol.* 2023;58:1-10. doi: 10.5586/am.576
18. Bibi A, Mubeen F, Rizwan A, Ullah I, Hammad M, Waqas MAB, Ikram A, Abbas Z, Halterman D, Saeed NA. Morpho-molecular identification of *Fusarium equiseti* and *Fusarium oxysporum* associated with symptomatic wilting of potato from Pakistan. *Journal of Fungi.* 2024;10(10):701. doi: 10.3390/jof10100701
19. Pecoraro F, Giannini M, Beccari G, Covarelli L, Filippini G, Pisi A, Nipoti P, Prodi A. Comparative studies about fungal colonization and deoxynivalenol translocation in barley plants inoculated at the base with *Fusarium graminearum*, *Fusarium culmorum* and *Fusarium pseudograminearum*. *Agricultural and Food Science.* 2018;27(1):74-83. doi: 10.23986/afsci.67704
20. Moya-Elizondo EA, Rew LJ, Jacobsen BJ, Hogg AC, Dyer AT. Distribution and prevalence of *Fusarium* crown rot and common root rot pathogens of wheat in Montana. *Plant Disease.* 2011;95(9):1099-1108. doi: 10.1094/PDIS-11-10-0795
21. Scherm B, Balmas V, Spanu F, Pani G, Delogu G, Pasquali M, Migheli Q. *Fusarium culmorum*: Causal agent of foot and root rot and head blight on wheat. *Mol. Plant Pathol.* 2012;14(4):323-341. doi: 10.1111/mpp.12011
22. Rohweder D, Valenta H, Sondermann S, Schollenberger M, Drochner W, Pahlow G, Döll S, Dänicke S. Effect of different storage conditions on the mycotoxin contamination of *Fusarium culmorum*-infected and non-infected wheat straw. *Mycotoxin Res.* 2011;27(2):145-153. doi: 10.1007/s12550-011-0087-6
23. Nordkvist E, Häggblom P. *Fusarium* mycotoxin contamination of cereals and bedding straw at Swedish pig farms. *Anim. Feed Sci. Technol.* 2014;198:231-237. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2014.10.002
24. Mejia-Bautista M, Cristobal-Alejo J, Tun-Suarez J, Reyes-Ramírez A. In vitro activity of *Bacillus* spp. on mycelial growth inhibition of *Fusarium equiseti* and *Fusarium solani* isolated from habanero peppers (*Capsicum chinense* Jacq.). *Agrociencia.* 2016;50(8):1123-1135.
25. Haddoudi I, Cabrefiga J, Mora I, Mhadhbi H, Montesinos E, Mrabet M. Biological control of *Fusarium* wilt caused by *Fusarium equiseti* in *Vicia faba* with broad spectrum antifungal plant-associated *Bacillus* spp. *Biological Control.* 2021;160(1):104671. doi: 10.1016/j.biocontrol.2021.104671
26. Shemshura ON, Baidalinov AI, Suleimenova ZhB, Dzhakibaeva GT, Baimakhanova GB, Mombekova GA. The strain *Chryseobacterium rhizoplanae* 1M - a basis of a biological preparation against fusarium rot *Vidna radiata* and its biosafety assessment. *Microbiology and Virology.* 2022;2(37):80-91. In Russian, English summary. doi: 10.53729/MV-AS.2022.02.0
27. Bensidhoum L, Nabti E, Tabli N, Kupferschmied P, Weiss A, Rothballer M, Schmid M, Keel C, Hartmann A. Heavy metal tolerant *Pseudomonas protegens* isolates from agricultural well water in northeastern Algeria with plant growth promoting, insecticidal and antifungal activities. *Eur. J. Soil Biol.* 2016;75:38-46. doi: 10.1016/j.ejsobi.2016.04.006
28. Andreolli M, Zapparoli G, Angelini E, Lucchetta G, Lampis S, Vallini G. *Pseudomonas protegens* MP12: A plant growth-promoting endophytic bacterium with broad-spectrum

- antifungal activity against grapevine phytopathogens. *Microbiol. Res.* 2019;219:123-131. doi: 10.1016/j.micres.2018.11.003
29. Uno S, Preece J. Micro and cutting propagation of 'Crimson Pygmy' Barberry. *Hort Science.* 1987;22(3):488-491. doi: 10.21273/HORTSCI.22.3.488
30. Zharassova D, Tolep NA. Features of the introduction of *Berberis iliensis* M. Pop. into *in vitro* culture. *Bulletin of the Karaganda University. "Biology, medicine, geography Series".* 2022;4(108):29-33. In Russian, English summary. doi: 10.31489/2022BMG4/29-33
31. Bakaeva M, Kendzhieva A, Starikov S, Chetverikov S, Chetverikova D. Effect of the growth-stimulating bacterium *Pseudomonas protegens* DA1.2 and its metabolites on damage to rapeseed by soil residues of metsulfuron-methyl. *Agrohimiâ.* 2024;12:30-35. In Russian, English summary. doi: 10.31857/S0002188124120041
32. Ajmal AW, Saroosh S, Mulk S, Hassan MN, Yasmin H, Jabeen Z, Nosheen A et al. Bacteria isolated from wastewater irrigated agricultural soils adapt to heavy metal toxicity while maintaining their plant growth promoting traits. *Sustainability.* 2024;13:7792. doi: 10.3390/su13147792
33. Sarawaneeyaruk S, Lorliam W, Krajangsang S, Pringsulaka O. Enhancing plant growth under municipal wastewater irrigation by plant growth promoting rhizospheric *Bacillus* spp. *J. King Saud Univ. Sci.* 2019;31(3):384-389. doi: 10.1016/j.jksus.2018.04.027
34. Barbaccia P, Gaglio R, Dazzi C, Miceli C, Bella P, Lo Papa G, Settanni L. Plant growth-promoting activities of bacteria isolated from an anthropogenic soil located in Agrigento province. *Microorganisms.* 2022;10(11):2167. doi: 10.3390/microorganisms10112167
35. Goswami D, Vaghela H, Parmar S, Dhandhukia P, Thakker JN. Plant growth promoting potentials of *Pseudomonas* spp. strain OG isolated from marine water. *J. Plant Interact.* 2013;8(4):281-290. doi: 10.1080/17429145.2013.768360
36. Przemieniecki SW, Kurowski TP, Karwowska A. Plant growth promoting potential of *Pseudomonas* sp. SP0113 isolated from potable water from a closed water well. *Arch. Biol. Sci.* 2015;67(2):663-673. doi: 10.2298/ABS141002029P
37. Przemieniecki SW, Kurowski TP, Kotlarz K, Krawczyk L, Damszel M et al. Bacteria isolated from treated wastewater for biofertilization and crop protection against *Fusarium* spp. pathogens. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 2019;19(1):1-11. doi: 10.1007/s42729-018-0001-9
38. Brijwal L, Tamta S. *Agrobacterium rhizogenes* mediated hairy root induction in endangered *Berberis aristata* DC. *SpringerPlus.* 2015;4(1):443. doi: 10.1186/s40064-015-1222-1
39. Przemieniecki SW, Kurowski PT, Kotlarz K, Krawczyk K, Damszel M, Karwowska A. Plant growth promoting properties of *Serratia fonticola* ART-8 and *Pseudomonas putida* ART-9 and their effect on the growth of spring wheat (*Triticum aestivum* L.). *Environ. Biotechnol.* 2016;12(2):35-39. doi: 10.14799/ebms263
40. Bakaeva M, Chetverikov S, Timergalin M, Feoktistova A, Rameev T, Chetverikova D, Kenjjeva A, Starikov S, Sharipov D, Hkudaygulov G. PGP-bacterium *Pseudomonas protegens* improves bread wheat growth and mitigates herbicide and drought stress. *Plants.* 2022;11(23):3289. doi: 10.3390/plants11233289

Информация об авторах:

Сысоева Анастасия Николаевна, аспирант, Биологический институт, Национальный исследовательский Томский государственный университет; начальник отдела производства биопрепаратов, ООО «Дарвин» (Томск, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3716-3338>

E-mail: nastena.sysoeva.97@bk.ru

Ивасенко Мария Денисовна, студент, Биологический институт, Национальный исследовательский Томский государственный университет; аппаратчик ООО «Дарвин» (Томск, Россия).

E-mail: ivasenko.mary@mail.ru

Ивасенко Денис Александрович, канд. биол. наук, доцент кафедры ихтиологии и гидробиологии, Биологический институт, Национальный исследовательский Томский государственный университет; директор ООО «Дарвин» (Томск, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7132-182X>

E-mail: ivasenko.da@mail.ru

Герасимчук Анна Леонидовна, канд. биол. наук, доцент кафедры ихтиологии и гидробиологии, Биологический институт, Национальный исследовательский Томский государственный университет (Томск, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2945-2364>

E-mail: gerasimchuk_ann@mail.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Anastasia N. Sysoeva, PhD student, Biological Institute, National Research Tomsk State University; Head of the Biological Products Production Department at Darwin LLC (Tomsk, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3716-3338>

E-mail: nastena.sysoeva.97@bk.ru

Maria D. Ivasenko, student, Biological Institute, National Research Tomsk State University; operator of Darwin LLC (Tomsk, Russian Federation).

E-mail: ivasenko.mary@mail.ru

Denis A. Ivasenko, Cand. Sci. (Biol.), Assoc. Prof. of the Department of Ichthyology and Hydrobiology, Biological Institute, National Research Tomsk State University; Director of Darwin LLC (Tomsk, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7132-182X>

E-mail: ivasenko.da@mail.ru

Anna L. Gerasimchuk, Cand. Sci. (Biol.), Assoc. Prof. of the Department of Ichthyology and Hydrobiology, Biological Institute, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2945-2364>

E-mail: gerasimchuk_ann@mail.ru

The Authors declare no conflict of interest.

*Статья поступила в редакцию 20.01.2025;
одобрена после рецензирования 08.04.2025; принята к публикации 04.09.2025*

*The article was submitted 20.01.2025;
approved after reviewing 08.04.2025; accepted for publication 04.09.2025*

БОТАНИКА

Научная статья

УДК 504.062.4 (571.513)

doi: 10.17223/19988591/71/5

Естественное восстановление растительного покрова на двадцатилетних отвалах угольного разреза «Черногорский» в Республике Хакасия

Наталья Владимировна Шеремет¹, Ольга Сергеевна Сафронова²,
Татьяна Григорьевна Ламанова³

^{1, 3} Центральный сибирский ботанический сад СО РАН, Новосибирск, Россия

² Научно-исследовательский институт аграрных проблем Хакасии,
филиал ФИЦ КНЦ СО РАН, Зеленое, Республика Хакасия, Россия

¹ <https://orcid.org/0000-0003-2973-3008>, nsheremet@yandex.ru

² <https://orcid.org/0000-0003-1181-5224>, olya_egoshina@mai.ru

³ <https://orcid.org/0000-0001-6691-3732>, tlamanova@yandex.ru

Аннотация. Проанализированы структурные особенности и продуктивность растительных сообществ на землях, нарушенных при добыче угля открытым способом на территории Республики Хакасия. В течение пяти лет мы исследовали растительные сообщества на различных элементах мезорельефа отвалов и установили следующие характерные особенности этих сообществ. Первичные сукцессии характеризуются травяным типом зарастания. Выявлено 42 вида сосудистых растений, среди которых 40 (95,2%) – аборигенные. Доминируют виды разнотравья *Artemisia sieversiana*, *Salsola collina*, *Erysimum cheiranthoides* и др., а также злаков *Calamagrostis epigeios*, *Leymus racemosus*, *Elytrigia repens* и др. В видовом составе отсутствуют эндемичные виды Приенисейских степей, широко представленные во флоре каменистых степей Хакасии. Вертикальная структура характеризуется значительной высотой травостоя. Продуктивность близка или превышает показатели зональных фитоценозов, ее значения максимальны на днище ($2,1 \pm 0,7$ т/га) и северном склоне ($2,6 \pm 0,2$). Надземная фитомасса на всех участках профиля преобладает над подземной. Анализ кривых значимости видов показал, что в ходе сукцессии происходит усложнение структуры, связанное с увеличением числа видов и выравненностью их обилия. Сообщества, сформированные за 20 лет самозарастания отвалов, находятся на одной из промежуточных стадий восстановления и отличаются по составу и структуре от зональных сообществ.

Ключевые слова: растительный покров, мезорельеф, вскрышные породные отвалы, естественное зарастание, первичные сукцессии, продуктивность

Источник финансирования: работа выполнена при поддержке гранта РФФИ и Правительства Республики Хакасия № 18-44-190006 р_а, в рамках государственного задания Центрального сибирского ботанического сада СО РАН № АААА-А21-121011290024-5, в рамках государственного задания НИИАП Хакасии – филиал ФИЦ КНЦ СО РАН 122041100185-5.

Для цитирования: Шеремет Н.В., Сафронова О.С., Ламанова Т.Г. Естественное восстановление растительного покрова на двадцатилетних отвалах угольного разреза «Черногорский» в Республике Хакасия // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2025. № 71. С. 101–121. doi: 10.17223/19988591/71/5

Original article

doi: 10.17223/19988591/71/5

Natural revegetation of the 20-year-old “Chernogorsky” spoil dump in the Republic of Khakassia

Natalia V. Sheremet¹, Olga S. Safronova², Tatyana G. Lamanova³

^{1, 3} *Central Siberian Botanical Garden, Siberian Branch of the RAS,
Novosibirsk, Russian Federation*

² *Research Institute of Agricultural Problems of Khakassia, FRC KSC SB RAS,
Zelenoe, Republic of Khakassia, Russian Federation*

¹ <https://orcid.org/0000-0003-2973-3008>, nsheremet@yandex.ru

² <https://orcid.org/0000-0003-1181-5224>, olya_egoshina@mai.ru

³ <https://orcid.org/0000-0001-6691-3732>, tlamanova@yandex.ru

Summary. The natural complexes of the Republic of Khakassia are in the process of anthropogenic transformation as a result of large-scale mining. The volume of anthropogenic pollution can be reduced by forming a vegetation cover on the slopes of spoil dumps, therefore studying the aspects of the formation of plant communities on spoil dumps is of actual importance. The fundamental side of the study is to investigate the problems of plants adaptation to new industry caused environmental factors. The applied side is to develop and improve reclamation technologies for disturbed areas. The purpose of the research is to study the structure and productivity of plant communities on 20-year-old open cut spoil dumps with the aim to estimate processes of natural revegetation of the disturbed lands in the arid zones of the Republic of Khakassia. The objects of the research are formed in the 1990's plant communities on the floor and slopes of different exposures of the “Chernogorsky” open cut spoil dumps (53°44'42"N, 91°02'27"E) by LLC SUEK-Khakassia.

The climate of the research area is sharply continental with a cold long winter (the absolute minimum temperature is -40.6°C) and a hot dry summer (the absolute maximum is +35.6°C), while the average annual precipitation is from 270 to 300 mm per year. The composition of the rocks covering the coal seams of the “Chernogorsky” deposit includes sandstones, siltstones, and carbonaceous mudstones, which, in turn, are overlain by a cover of quaternary deposits. Geobotanical zoning relates the area of the “Chernogorsky” open cut to Near-Abakan (Central Khakassian) district of the Minusinsk basin. Bunch-grass steppes, in the typical form of the four-grass steppe distinguished by V.V. Reverdatto, are the most prevalent for this area. Collection of materials on the “Chernogorsky” open cut was conducted in July-August from 2008 to 2012 according to conventional techniques. To examine the species composition, herbarium material was collected and geobotanical description was carried out. To determine the above-ground phytomass productivity and the economically significant botanical groups composition, mowing and species separation was carried out yearly, fourfold in July–beginning of August. To establish the above-ground phytomass vertical structure the standing parts were cut down to the roots, then cut in layers 0-10, 10-20, 20-30 cm, etc., and then weighed as fresh mass. Under-ground phytomass productivity was determined in 2009 by threefold sampling 10 cm³ soil monoliths in layers 0-10 and 10-20 cm. Roots were rinsed, then dried and weighed. The species distribution evenness was estimated using species dominance graphs.

The dumps are of external method of formation. On all mesorelief elements (northern, southern, western, eastern slopes, and the floor), primary successions have

a grass type of vegetation. The species composition is depleted and includes 42 species of vascular plants from 36 genera and 20 families, which is 11.7% of the Khakasian stony steppe flora. The most numerous families are Asteraceae and Poaceae, which is vastly typical for boreal flora. The peculiarity of the flora of the bunch-grass steppes of the Republic of Khakassia (which existed on the research area prior to mines) is the wide presence of endemic species of the near-Yenisei steppes, with legumes and Poaceae as dominating families amongst endemics. The absence of those endemics is observed in the species composition of plant communities on spoil dumps. The prevailing economic groups of plants are Poaceae and motley grasses (See Fig. 1). The dominants in the plant communities are synanthropic grasses: *Artemisia sieversiana* Willd., *Salsola collina* Pall., *Erysimum cheiranthoides* L., *Chenopodium aristatum* L. etc. Dominating Poaceae species are *Calamagrostis epigeios* L., *Leymus racemosus* (Trin.) K. Richt., *Elytrigia repens* L., *Agropyron cristatum* (L.) Gaertner. The dominant in legumes is faintly eaten *Melilotus officinalis* L. The plant communities on spoil dump contain a significant part (61.9%) of mesophytic group, which is usually observed in the meadow steppes. Considering life forms, a large part of vegetation is vegetative plants (which roam the surface of the dump and germinate in new places without retaining the habitat area). This contrasts the steppe zonal communities, where prevailing species are of the restative type (capable of living through unfavorable conditions and “resisting” the seizure of their area by other individuals). The vertical structure of spoil dumps plant communities was revealed, which show the herbage to have significant height and be enclosed mostly in a layer 0–40 cm (See Fig. 2). The productivity of above-ground phytomass is higher on spoil dumps than that (0.53–1.59 t/ha) in zonal communities: maximal productivities of air-dry phytomass are observed on the floor (2.1 ± 0.7 t/ha) and the northern slope (2.6 ± 0.2 t/ha) due to better microclimatic conditions (See Table 2). The above-ground phytomass prevails over the under-ground one on all areas of spoil dumps, which indicates the environmental conditions to be generally favorable for plants growth. The significance graphs show the log-normal distribution to be typical for the plant communities on all mesorelief elements, which is characteristic for multi-species zonal plant communities with predominance of species with an average abundance (See Fig. 3). Thus, 20-year-old natural vegetation on spoil dumps of “Chernogorsky” open cut in the arid regions of the Republic of Khakassia prove to be at an intermediate stage of restoration (primary succession), and it differs in composition and structure from the indigenous steppe community.

The article contains 4 Figures, 2 Tables, 37 References.

Keywords: vegetable cover, mesorelief, overburden, natural overgrowth, succession, productivity

Fundings: this work was partially supported by the grant of the Russian Foundation for Basic Research and the Government of the Republic of Khakassia No. 18-44-190006 p_a, as part of the Project of the State Assignment of Central Siberian Botanical Garden, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences No. AAAA-A21-121011290024-5A, as part of the Project of the State Assignment of Research Institute of Agricultural Problems of Khakassia No. 122041100185-5.

For citation: Sheremet NV, Safronova OS, Lamanova TG. Natural revegetation of the 20-year-old “Chernogorsky” spoil dump in the Republic of Khakassia. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya* = *Tomsk State University Journal of Biology*. 2025;71:101–121. doi: 10.17223/19988591/71/5

Введение

Природные комплексы Республики Хакасия в результате масштабной добычи полезных ископаемых активно вовлечены в процесс антропогенной трансформации. Площадь нарушенных земель Черногорского каменноугольного месторождения при добыче угля открытым способом за последние 25 лет увеличилась более чем на 50% с 2061 до 3168 га [1]. Успешность и время восстановления нарушенной экосистемы во многом зависят от регенерации растительного покрова. Детальное изучение закономерностей его формирования позволит оценить сложившиеся сообщества и прогнозировать их дальнейшее развитие [2–9]. Полученные знания являются необходимой теоретической основой для повышения эффективности технологий рекультивации отвалов горных пород и восстановления благоприятной для проживания человека среды [10–14]. В аридных районах Хакасии первые исследования в области изучения особенностей естественного зарастания отвалов горнодобывающей промышленности связаны с работами В.И. Щербатенко и Е.Р. Кондрашина [15]. Авторами проанализирована скорость зарастания отвалов угольных разрезов Абакано-Черногорского промышленного района и установлено, что восстановление растительного покрова естественным путем идет очень медленными темпами. Работы А.Т. Лавриненко с соавторами [16] по выявлению особенностей видового состава регенерационных фитоценозов на спланированных отвалах гребневых форм, А.А. Жукова и Е.Ю. Жуковой [17] по изучению сукцессионных процессов на рекультивированном отвале дополнили представления о закономерностях восстановления нарушенных территорий. Однако эти исследования затрагивают в основном стадии формирования растительных сообществ. Структурные особенности и продуктивность серийных сообществ при самозарастании вскрышных отвалов двадцатилетнего возраста в степной зоне Республики Хакасия практически не исследованы.

Целью настоящей работы является оценка процессов формирования растительного покрова при самозарастании нарушенных земель в аридных районах Республики Хакасия на основе изучения структуры и продуктивности растительных сообществ на 20-летних вскрышных отвалах.

Материалы и методики исследования

Объектами исследований являются пять растительных сообществ, сформированных на различных элементах мезорельефа отвалов вскрышных пород Черногорского угольного разреза (отвалы созданы в 1990-е гг., разрез принадлежит ООО «СУЭК-Хакасия»).

Изучаемые отвалы расположены в степной зоне, климат местности резко континентальный, с сухим жарким летом и холодной малоснежной зимой. Среднегодовая температура воздуха изменяется от +1,8 до –1,0°C. Абсолютный минимум температур отмечен в январе –40,6°C, абсолютный максимум – в июне +35,6°C. В теплый период года выпадает 270 мм осадков при общем годовом количестве 300 мм. Снежный покров небольшой

мощности (11–18 см), его накопление происходит на склонах и в понижениях. Сильные ветры в апреле и мае приводят к появлению «пыльных» бурь. Почвенный покров района достаточно разнообразный, среди зональных степных почв преобладают южные черноземы [18].

По геоботаническому районированию А.В. Куминовой [18], территория разреза отнесена к Приабаканскому (Центрально-Хакасскому) степному округу Минусинской котловины. Наиболее типичны для данной территории настоящие мелкодерновинные злаковые степи в типичном варианте четырехзлаковой степи, выделенной В.В. Ревердатто. Основу травостоя создают дерновинные виды: *Stipa krylovii* Roshev., *Festuca valesiaca* Gaudin, *Koeleria cristata* (L.) Pers., *Cleistogenes squarrosa* (Trin.) Keng. Эти степи преобладали на территории разреза в прошлом до проведения вскрышных работ.

Наши наблюдения, проведенные на вскрышных отвалах угольного разреза «Черногорский», охватывают период с 2008–2012 гг. В ходе исследования применялись общепринятые геоботанические методы [19]. Для изучения видового состава сообществ на всех элементах мезорельефа проведен сбор гербарных материалов и выполнены геоботанические описания существующих группировок согласно А.Г. Воронову [20]. Название фитоценозов дано по совокупности доминирующих видов. Латинские названия видов растений приведены согласно последним номенклатурным сводкам [21]. В работе использована общепринятая классификация экологических групп, уточненная и примененная А.В. Куминовой [18].

Надземную фитомассу и долю участия в ней отдельных видов, состав хозяйственно-ботанических групп определяли методом укосов [22, 23]. В каждом местообитании ежегодно в период максимального развития травостоя на площадках 0,25 м² отбирали растительные пробы. Укосные площадки закладывались в типичных местах, повторность укосов четырехкратная. Растения каждого из видов, присутствующих на площадке, срезали на уровне почвы, доводили до воздушно-сухого состояния и взвешивали. Всего взяли 100 укосов; все обнаруженные виды относятся к одной из трех хозяйственно-ботанических групп: злаки, бобовые и разнотравье (осоки отсутствовали).

Пробы подземной фитомассы отбирали параллельно с надземной фитомассой в 2009 г. методом выемки почвенных монолитов объемом 10 см³ из слоев глубиной 0–10 и 10–20 см (отбор на большую глубину был невозможен из-за каменистости). Повторность взятия проб трехкратная. Подземная фитомасса отмывалась от почвы с использованием почвенного сита с отверстием 0,5 мм, затем полученные образцы высушивали и взвешивали на электронных лабораторных весах.

Для установления вертикального сложения травостоя в период полного развития растений в каждом из пяти изучаемых сообществ проводили учет надземной фитомассы по горизонтам в 10 см, начиная от основания растений. Травостой срезали под корень и собирали в пучок так, чтобы сохранить его естественное положение. Затем пучок разрезали на высоту 0–10, 10–20, 20–30 см и т.д. и взвешивали в сыром виде [24].

Выравненность относительного распределения особей среди видов сосудистых растений оценивали с помощью кривых относительной значимости видов: по оси абсцисс располагали виды, ранжированные от наиболее к наименее обильным, а по оси ординат откладывали долю каждого вида в выборке в логарифмическом масштабе [25–27].

Значимость представляет группу оценок, с помощью которых виды в сообществе могут сравниваться друг с другом. Для сравнения популяций растений между собой использовали вес воздушно-сухой надземной фитомассы на единицу площади.

Для анализа видового разнообразия сообществ использовали четыре модели: геометрический ряд, логарифмическое распределение, лог-нормальное распределение и «модель разломанного стержня». Считается, что именно в этой последовательности снижается степень доминирования и растительное сообщество становится более выравненным по обилию.

Результаты исследования и их обсуждение

Отвал по техногенному рельефу относится к внешним и представляет собой лог, который вытянут с востока на запад и расширяется в западной части, где его перекрывает поперечный отвал гребневидной поверхности. На отвале представлены следующие элементы мезорельефа: днище и склоны северной, южной, западной и восточной экспозиций (рис. 1). Углы склонов – от 31° до 34°, высота – от 22 до 59 м относительно естественной поверхности. Географические координаты отвала 53°44'42"N, 91°02'27"E. В состав горных пород, покрывающих угольные пласты Черногорского



Рис. 1. Элементы мезорельефа вскрышных отвалов разреза «Черногорский» (фото О.С. Сафроновой)

[Fig. 1. Mesorelief elements of “Chernogorsky” open cut spoil (photo by O.S. Safronova)]

месторождения, входят алевролиты, углистые аргиллиты и песчаники, которые, в свою очередь, перекрываются четвертичными отложениями [15].

Оптимальные условия для восстановления растительности создаются на днище и северном склоне. Затем, по степени ухудшения экологических условий, идут восточный, западный и южный склоны, эта тенденция отмечена нами на отвалах разреза «Черногорский», сформированных в 70-х, 80-х и 2000-х годах.

Процесс формирования растительного покрова на вскрышных отвалах длительный, характеризуется обеднением видового состава травостоя и его нельзя считать приемлемым для реабилитации нарушенных территорий. Общий список видов, отмеченных на 20-летних отвалах, включает 42 вида сосудистых растений из 36 родов и 20 семейств, что составляет 11,7% от числа видов каменистых степей Хакасии.

Большинство видов, которые поселяются на отвалах, являются аборигенными – 40 (95,2%). Найдены три адвентивных вида: *Hordeum jubatum* L., *Melilotus officinalis* (L.) Pall. и *Ulmus pumila* L., которые включены в список инвазивных видов «Черной книги флоры Сибири» [28]. Заметную часть (около 5%) видового состава каменистых степей Республики Хакасия занимают эндемичные виды Приенисейских степей, среди этих видов преобладают представители семейств бобовых и злаковых [29]. Наиболее широко виды этой группы распространены в мелководерновинных степях Хакасии. Однако в составе растительных сообществ на отвалах данные эндемики отсутствуют.

Растительные сообщества на отвалах состоят в основном из травянистых многолетников (24 вида) и одно- и двулетников (14 видов); незначительным числом представлены древесные растения (2 вида), а также кустарнички и полукустарнички (2 вида). По данным Т.Г. Ламановой [29] в каменистых степях Хакасии встречаются 256 видов травянистых многолетников, 48 видов кустарничков и полукустарничков, 36 видов одно- и двулетников и 18 видов кустарников. Сравнение показывает существенные отличия в распространенности биологических групп (табл. 1).

В целом можно отметить, что первичные сукцессии на 20-летних вскрышных отвалах разреза Черногорский характеризуются травяным типом зарастания. Существуют примеры, когда формирование растительных сообществ на нарушенных землях в аридных районах идет на первых этапах по смешанному типу. В Республике Хакасия в сухой Койбальской степи на Изыхском углеразрезе И.С. Антонов и др. [30] наблюдали зарастание участка отвала «Береговой» *Populus × sibirica* G.V. Krylov & G.V. Grig. ex A.K. Skvortsov за счет переноса семян с островов р. Абакан. По достижении высоты 6–8 м деревья начали суховершинить и в возрасте около 20 лет засохли, так со временем начинает проявляться степной облик сообщества. А.А. Титлянова и А.Д. Самбуу [31] установили, что к 40-му году самозарастания участки отвалов Каа-Хемского угольного разреза в сухой степи Республики Тыва закустарены ивами, достигающими 4 м высотой. Семена и споры некоторых лесных видов попали на отвалы с берегов р. Каа-Хем.

Таблица 1 [Table 1]

**Биологические группы каменистых степей Хакасии и отвалов
разреза «Черногорский»**
[Biological groups for stony steppes of Khakassia and “Chernogorsky” spoil dumps]

Биологические группы [Biological groups]	Деревья [Trees]	Кустарники [Shrubs]	Кустарнички и полукустарнички [Dwarf shrubs and subshrubs]	Много- летники [Perennials]	Одно- и двулетники [Annials and biennials]
Отвалы: число видов (доля в %) [Spoil dumps: number (percentage) of species]	2 (5)	0 (0)	2 (5)	24 (57)	14 (33)
Каменистые степи: число видов (доля в %) [Stony steppes: number (percentage) of species]	0 (0)	18 (5)	48 (13)	256 (72)	36 (10)

Через какое-то время ивы выпадают и сукцессии медленно с флуктуациями движутся в сторону сухой степи.

Для изучения механизмов восстановления растительных сообществ на нарушенных землях важно установить принадлежность растений к определенным экологическим группам. Для мелкодерновинных злаковых степей Хакасии Т.Г. Ламанова [29] приводит такие данные о численности экологических групп: мезоксерофиты – 34,0%, ксеропетрофиты – 26,1%, ксерофиты – 22,0%, петрофиты-психрофиты – 5,8%, мезофиты – 5,0%, мезопетрофиты – 4,6%, галофиты – 2,1%, ксерогигрофиты – 0,4%. На отвалах разреза «Черногорский» экологический спектр растительных сообществ следующий: мезофиты – 35,7%, ксерофиты – 26,2%, мезоксерофиты – 26,2%, петрофиты – 4,7%, псаммофиты – 4,7%, ксерогигрофиты – 2,4%, галофиты – 2,4%. Можно заметить, что на отвалах процент видов ксерофитной группы уменьшается по сравнению с зональными сообществами, а мезофитной – наоборот возрастает. Увеличение числа мезофитов связано с тем, что большая каменистость субстрата породных отвалов и резкие колебания температур способствуют образованию конденсата влаги. По мнению ряда авторов [32, 33], в пустынных и засушливых областях атмосферные осадки не являются единственным источником воды в почве и конденсация влаги значительно влияет на общий водный баланс. На породных отвалах мезофиты чаще занимают днище отвала, его северный и восточный склоны, так как наиболее высокие температуры воздуха и почвы характерны для южных и западных склонов [34]. Наблюдения за видовым составом отвалов

Каа-Хемского угольного разреза в степи Республики Тыва показали, что с течением времени происходит ксерофитизация растительности [31].

Бедность видового состава петрофитов также отличает серийные сообщества нарушенных территорий от травостоя зональных сообществ. На распространение петрофитов, по данным А.И. Пяка [35], наибольшее влияние могут оказывать специфика самого субстрата (химический состав горных пород), степень и характер их увлажнения, освещенность.

Способность растений закрепляться и сохранять за собой на возможно более длительный срок место обитания играет существенную роль в освоении техногенных экотопов. Система жизненных форм Г.М. Зозулина [36] рассматривает приспособительные признаки, которые позволяют растительным организмам распространяться и удерживаться по поверхности отвала. Типы жизненных форм выделены по возможности восстановления особи при уничтожении по какой-либо причине ее надземной части: 1) реддитивные растения – многолетники, не возобновляющиеся при уничтожении надземной части; 2) рестативные растения – многолетники, возобновляющиеся в случае уничтожения надземной части; 3) ирруптивные растения – многолетники, не только возобновляющиеся в случае уничтожения их надземной части, но имеющие надземные или подземные побеги, функционирующие как органы вегетативного разрастания и размножения; 4) вагативные растения – однолетние или двусезонные виды, особи которых не удерживают площади обитания, а «блуждают» по площади, прорастая на новых местах.

По данным Т.Г. Ламановой [29], состав травостоя мелкодерновинных злаковых степей Республики Хакасия такой: 78,8% – рестативные виды, 12,0% – ирруптивные и 9,2% – вагативные. На отвалах разреза «Черногорский» распределение жизненных форм отличается от зонального: 41% – рестативные виды, 33% – вагативные и 26% – ирруптивные. Снижение числа видов рестативной группы на отвалах, по сравнению с зональными сообществами, связано со снижением роли петрофитов, большая часть которых являются удерживающими видами. Рестативные виды сохраняют занимаемую площадь, оставаясь на месте без существенного увеличения количества надземных побегов. В серийных сообществах к ним относятся типичные степные виды *Koeleria cristata*, *Stipa krylovi*, *Festuca valesiaca*, *Aster altaicus* Willd. Novopokr и др.

На отвалах встречается большое число вагативных видов, для которых характерен уход от активной конкуренции за площадь обитания. Г.М. Зозулин [36] рассматривает вагативный тип как крайнюю приспособительную форму, характерную для аридных областей, а для гумидных – в нарушенных местообитаниях. По поверхности отвала кочуют, прорастая на новых местах, одно- и двулетники (*Amaranthus retroflexus* L., *Panicum miliaceum* L., *Salsola collina* Pall., *Sinapis arvensis* L., *Teloxys aristata* (L.) Moq. и др.).

Ирруптивные виды поселяются на разных элементах рельефа там, где со временем образуется слой мелкозема и появляется возможность развиваться длиннокорневищным растениям (*Calamagrostis epigeios* L., *Elytrigia*

repens L., *Elymus racemosus* (Trin.) K. Richt., *Veronica incana* L., *Artemisia frigida* Willd., *Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop. и др.). Особи этих видов распространяются на небольшие расстояния, что сопровождается значительным увеличением числа надземных побегов и внедрением их на площади, занятые другими растениями. Представители этой жизненной формы являются наиболее конкурентоспособными, приспособленными к совместному обитанию в ценозах, и в сообществах аридных областей в большинстве случаев являются доминантами [36].

Общее проективное покрытие (ОПП) серийных сообществ, формирующихся в ходе первичной сукцессии на вскрышных отвалах, заметно различается в зависимости от экспозиции. На днище отвала сложилось разнотравно-пырейно-вейниковое серийное сообщество (*Calamagrostis epigeios* + *Elytrigia repens* + *Artemisia vulgaris* + *Linaria vulgaris*). Травостой сомкнутый, ОПП 90%. На северном склоне сформировалось разнотравно-житняково-вейниковое серийное сообщество (*Calamagrostis epigeios* + *Agropyron cristatum* + *Erysimum cheiranthoides* + *Artemisia glauca*). Травостой довольно густой, ОПП всех видов составляет 87%. Близкие по значениям показатели ОПП (около 80%) характерны для сообществ мелкодерновинной злаковой степи [18]. На восточном склоне возникновению сомкнутого покрова препятствует периодическое осыпание и размытие почвогрунтов. Здесь возникла разнотравно-маревая открытая группировка (*Chenopodium aristatum* + *Aster altaicus* + *Artemisia tanacetifolia*). Травостой изрежен, растения располагаются на значительном расстоянии друг от друга, ОПП 10%. На западном склоне образовалось солянко-маревое серийное сообщество (*Chenopodium aristatum* + *Salsolla collina*) с ОПП 28%. На южном склоне возникло разнотравно-солянковое серийное сообщество (*Salsolla collina* + *Artemisia sieversiana* + *Erysimum cheiranthoides*) с ОПП 25%.

Для оценки восстановления растительного покрова дополнительную информацию дает нам выявление состава хозяйственно-ботанических групп и доминирующих видов формирующихся сообществ. В изучаемый период наибольший вклад в надземную фитомассу на всех участках мезорельефа внесли виды синантропного разнотравья, а на северном склоне и днище в отдельные годы – злаки (рис. 2). К числу доминантов в группе разнотравья относятся: на северном склоне – *Erysimum cheiranthoides* L., *Sinapis arvensis*, *Artemisia glauca* Pall.; на восточном склоне – *Chenopodium aristatum* L., *Salsolla collina*, *A. Tanacetifolia* Willd., *A. Tanacetifolia* L., *Aster altaicus*, *Linaria vulgaris* Mill.; на западном склоне – *Salsolla collina*, *Chamaenerion angustifolium* (L.) Holub, *Artemisia glauca* Pall. ex Willd.; на южном склоне – *Salsolla collina*, *Artemisia sieversiana*, *Erysimum cheiranthoides*, *Aster altaicus*, *Solanum dulcamara* L. На днище доминируют *Artemisia vulgaris* L. *Potentilla acaulis* L. и *Linaria vulgaris*.

Бобовые на отвалах представлены двумя видами медоносов *Melilotus officinalis* и в небольшом количестве на северном и западном склонах – *Onobrychis arenaria* (Kit.) DC. Среди злаков, способных укреплять поверхность отвала, наибольшим обилием на северном склоне отличаются *Calamagrostis epigeios* и *Agropyron cristatum* (L.) Gaertner. *Elytrigia repens* и

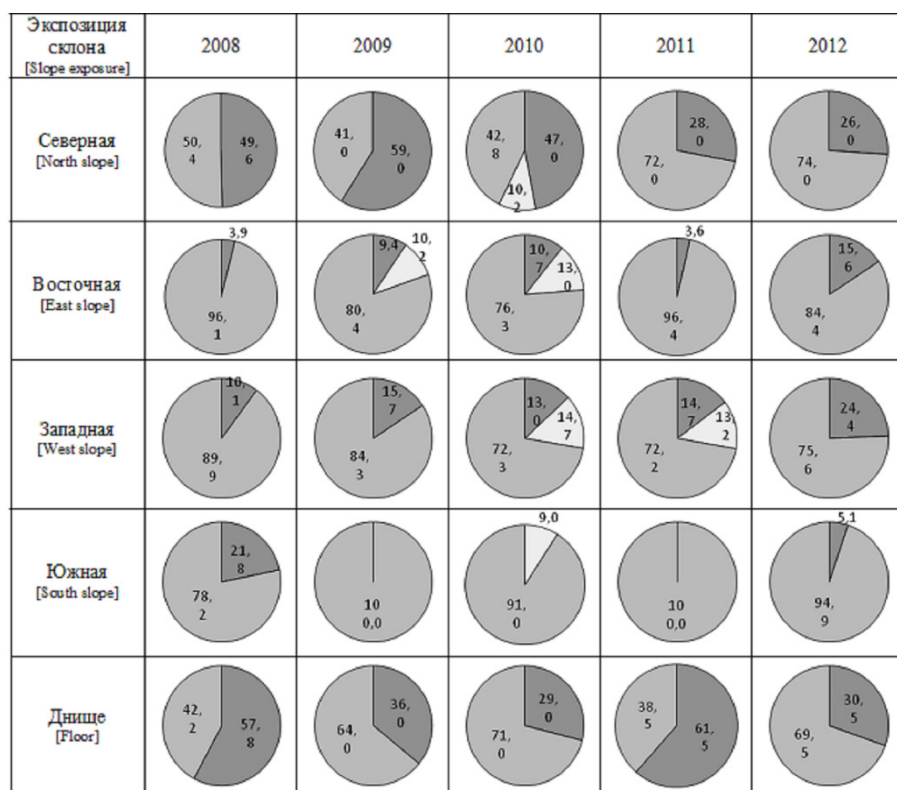


Рис. 2. Состав хозяйственно-ботанических групп (%) травостоя на вскрышных отвалах разреза «Черногорский»: ■ – злаки, □ – бобовые, ▨ – разнотравье
 [Fig 2. The composition, in %, of economical groups of vegetation on “Chernogorsky” open cut spoil dumps: ■ - poaceae, □ - legumes, ▨ - motley grasses]

C. epigeios являются основными ценозобразователями на дне, а вместе с *Panicum miliaceum* встречаются на склонах восточной и южной экспозиций. В 2012 г. на северном и восточном склонах доминировал *Stipa krylovii*.

Важным показателем развития сообщества является его вертикальная структура, которая отражает состав компонентов и условия среды. Г.И. Дохман [37] отмечала, что вертикальная структура травосмеси создает внутри травостоя определенные климатические условия, обуславливающие интенсивность использования солнечной энергии и углекислого газа, совокупно определяющих урожай. Наблюдения за вертикальной структурой растительных сообществ на отвалах разреза «Черногорский» выявили ряд отличий от структурных особенностей зональных сообществ. Во-первых, высота травостоя нарушенных местообитаний превышает высоту травостоя мелкодерновинной злаковой степи, которая, по данным А.В. Куминовой [18], составляет 40–90 см (диаграмма ST на рис. 3). В разные годы в серийных сообществах показатель варьирует: на днище от 100 до 118 см (среднее значение $111,2 \pm 3,3$ см), на северном склоне от 60 до 98 см ($80,0 \pm 6,0$), на южном склоне от 63 до 80 см ($69,4 \pm 2,9$), на западном склоне от 53

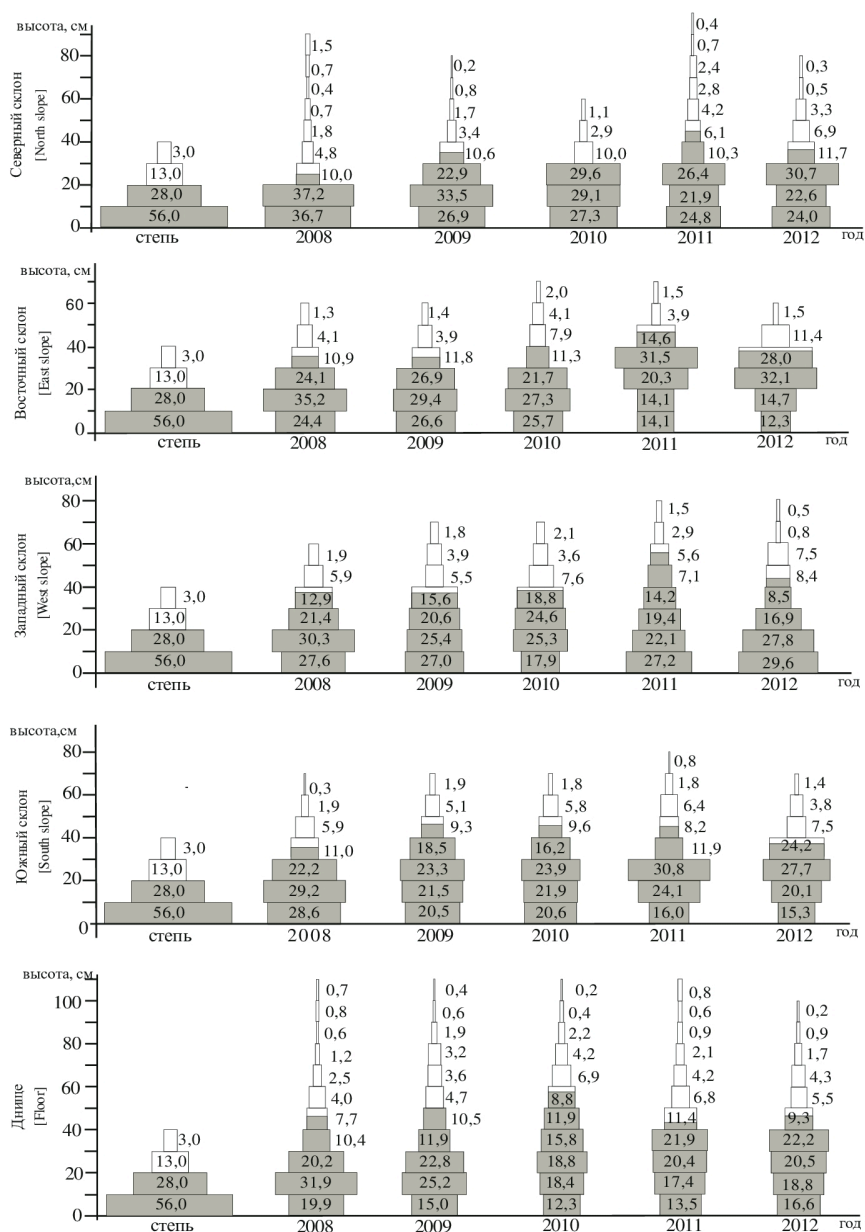


Рис. 3. Вертикальное распределение надземной фитомассы (%) в мелкодерновинной злаковой степи и на отвалах разреза «Черногорский» (2008–2012 гг.).

Вертикальная ось – высота в см. Серым цветом выделены 85%, основная фитомасса [Fig. 3. Vertical distribution in % of the above-ground phytomass in bunch grasses steppe and in natural vegetation on “Chernogorsky” spoil dumps (2008–2012). The vertical axis indicates the height in cm. The grey colouring indicates 85%, the main phytomass]

до 85 см ($70,8 \pm 5,5$), на восточном склоне от 51 до 68 см ($60,6 \pm 2,9$) (см. рис. 3). Увеличение высоты травостоя, вероятно, связано с наличием в почвогрунтах окисленного угля, который способствует росту и более мощному развитию растений, образованию гумуса. При изучении процессов самозаращения спланированных породных отвалов в лесостепи Кузнецкой котловины нами установлено, что высота травостоя на данных местообитаниях также превышает высоту травостоя суходольных лугов, которые преобладали на этой территории до проведения вскрышных работ [10]. Можно отметить, что значительные показатели высоты травостоя являются отличительной чертой растительности на отвалах.

Второй особенностью вертикальной структуры сообществ на отвалах является распределение надземной фитомассы по вертикальному профилю. Г.Г. Павлова [23] выделяет три типа распределения по вертикальному профилю: растянутое, при котором основная масса травостоя (85% от общей фитомассы) заключена в слое 0–60 см; среднее – 0–50 см и приземное, когда этот показатель приурочен к слою 0–40 см. Растянutosть профиля свойственна лесным вариантам суходольных лесов. Приземным распределением фитомассы отличаются степные фитоценозы и пастбищные луга. Средний тип распределения характерен для наиболее сложно организованных полидоминантных лугов с доминированием злаков и бобовых. Распределение фитомассы по вертикальному профилю травостоя в коренном сообществе описывается приземным типом распределения, таким оно остается и в серийных сообществах при самозаращении отвалов. Исключение составляет фитоценоз, сформировавшийся на днище, где в течение двух лет наблюдался средний тип распределения.

В-третьих, общий вид графика процентного распределения надземной фитомассы мелкодерновинной злаковой степи по слоям в 10 см имеет вид пирамиды [18] (см. рис. 3). Это оптимальная форма распределения фитомассы в травянистых сообществах, при котором происходит максимальное использование поступающей энергии. Графики вертикальной структуры, приближающиеся по конфигурации к графику зональных сообществ, получены на западном склоне в 2008, 2011, 2012 г. На других участках мезорельефа это распределение имело иную конфигурацию.

Продуктивность (надземная фитомасса) мелкодерновинной злаковой степи составляет 0,8 т/га (минимальная – 0,53, максимальная – 1,59 т/га) [18]. Продуктивность серийных сообществ на вскрышных отвалах достигает зонального уровня, максимальная продуктивность отмечена на днище ($2,1 \pm 0,7$ т/га) и северном склоне ($2,6 \pm 0,2$ т/га) (табл. 2). Также высокая продуктивность отмечена ранее при естественном зарастании спланированных вскрышных отвалов в лесостепи Кузнецкой котловины [10] и в степной зоне Республики Тыва [31]. К общей закономерности, выявленной для пионерных сообществ при самозаращении породных отвалов в лесостепной, степной и сухостепной зонах Южной Сибири, следует отнести высокие показатели надземной фитомассы.

На всех элементах мезорельефа отвалов Черногорского разреза надземная фитомасса превышает подземную фитомассу и отмершую растительную

Таблица 2 [Table 2]

**Фитомасса (т/га) растительных сообществ на разных участках
мезорельефа при самозарастании отвалов разреза «Черногорский»**
[The phytomass of natural vegetation on different mesorelief elements
of “Chernogorsky” spoil dumps, t/ha]

Компонент фитомассы [Phytomass component]	Экспозиция склона [Slope exposure]				
	Север [North]	Юг [South]	Восток [East]	Запад [West]	Днище [Floor]
Надземная [Above-ground]	2,8 ± 0,7	1,7 ± 0,2	1,4 ± 0,2	2,2 ± 0,2	3,5 ± 0,4
фитомасса [phytomass]	2,1 ± 0,7	1,0 ± 0,3	0,8 ± 0,1	1,6 ± 0,1	2,6 ± 0,2
мортмасса [mortmass]	0,6 ± 0,5	0,7 ± 0,2	0,7 ± 0,2	0,6 ± 0,1	1,0 ± 0,2
Подземная [Underground]	0,3 ± 0,05	0,1 ± 0,03	0,2 ± 0,05	0,1 ± 0,02	0,3 ± 0,03
Общая [Total]	3,1	1,8	1,6	2,3	3,8

массу, при этом максимальное значение надземной фитомассы ($1,0 \pm 0,2$ т/га) зарегистрировано на днище (см. табл. 2). Превышение надземной массы над подземной можно объяснить тем, что корневая система растений из-за малого количества мелкозема сформирована недостаточно мощно. Подземная фитомасса находится в процессе формирования, ее значения невелики: максимальные показатели отмечены на днище ($0,3 \pm 0,03$ т/га) и на северном склоне ($0,3 \pm 0,05$ т/га). Самые высокие значения общей фитомассы в сообществах при зарастании 20-летних вскрышных отвалов в аридных районах Хакасии выявлены на днище и северном склоне, где создаются лучшие микроклиматические условия.

Величина разнообразия биоты часто считается показателем лучшего или худшего состояния экосистемы. При оценке разнообразия принимают во внимание два фактора: видовое богатство – число видов на единицу площади и выравненность – распределения видов по их обилию в сообществе. Разнообразие сообщества тем выше, чем больше видов включает это сообщество и чем больше выравнены виды по обилию. Модели видового обилия описывают распределение обилия видов от ситуации с высокой выравненностью до тех случаев, когда численности видов весьма неодинаковы [27].

После 20 лет восстановления растительного покрова на отвалах разреза «Черногорский» отмечено усложнение структуры растительности в ходе сукцессии: постепенно растут число видов и выравненность их обилия, типичным для всех сообществ на разных участках мезорельефа становится лог-нормальное распределение (рис. 4). Данный тип распределения отображает наиболее распространенную в природе ситуацию и характерен для многовидовых зональных фитоценозов, которым свойственно преобладание видов со средним обилием. Распределение, наиболее соответствующее гипотетической кривой «модели разломанного стержня», наблюдалось единственный раз в 2012 г. на склоне северной экспозиции. Обилия видов в этом случае распределены с максимальной возможной равномерностью,

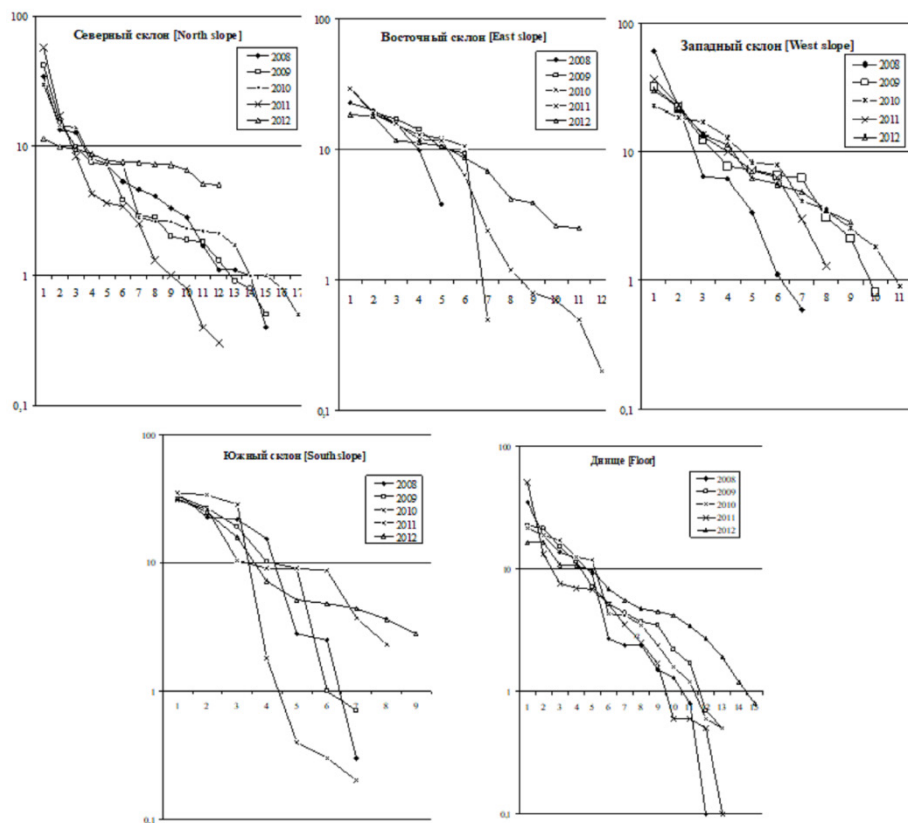


Рис. 4. Кривые значимости видов для серийных сообществ на разных элементах мезорельефа вскрышных отвалов разреза «Черногорский», созданных в 1990-х г. Горизонтальная ось – ранги видов по убыванию обилия. Вертикальная ось – относительная значимость в %, логарифмическая шкала
[Fig. 4. Species significance curves for vegetation on different mesorelief elements of “Chernogorsky” spoil dumps formed in the 1990’s. The horizontal axis indicates species ranks in the descending order of abundances. The vertical axis indicates relative significance in %, logarithmic scale]

что, вероятнее всего, происходит из-за невысокой плотности особей. В составе травостоя преобладают многолетники: *Calamagrostis epigejos*, *Stipa krylovii*, *Artemisia glauca*, *A. sieversiana*, *Linaria vulgaris*, *Sonchus arvensis* L. и др. Высокая выравненность свидетельствует о преобладании в сообществе видов с примерно равной конкурентоспособностью и близко расположенными экологическими оптимумами. В целом анализ кривых значимости видов показал, что структура изучаемых сообществ по данному показателю более или менее сформировалась.

Выводы

1. Первичные сукцессии на вскрышных отвалах в аридных районах Хакасии характеризуются травяным типом зарастания. Видовой состав рас-

тительности обеднен и насчитывает 42 вида сосудистых растений. На отвалах поселяются инвазивные растения, в их числе три вида (*Hordeum jubatum*, *Melilotus officinalis* и *Ulmus pumila*) включены в список издания «Черной книги флоры Сибири».

2. На всех элементах мезорельефа формируются серийные сообщества, которые после 20 лет самозарастания отвалов отличаются по составу и структуре от коренных мелкодерновинных злаковых степей. Находясь на одной из промежуточных стадий восстановления, пионерные сообщества характеризуются значительной высотой травостоя, доминированием видов синантропного разнотравья, высокой долей видов растений мезофитной группы (61,9%) и вагативного типа (33,2%). Эндемичные виды Приенисейских степей, широко представленные во флоре каменистых степей Хакасии, на отвалах отсутствуют.

3. На сближение с зональными сообществами указывает продуктивность растительных сообществ нарушенных территорий ($2,1 \pm 0,7$ т/га на северном склоне и $2,6 \pm 0,2$ т/га на днище), которая близка или превышает зональный уровень (0,53–1,59 т/га). Кроме того, анализ распределения видов по обилию показал, что с увеличением возраста отвала на разных типах склонов отмечаются рост числа видов и выравнивание их обилия, что является характерным для многовидовых зональных растительных сообществ.

Список источников

1. Зеньков И.В., Нефедов Б.Н., Юронен Ю.П., Нефедов Н.Б. Результаты дистанционного мониторинга и полевых исследований экологического состояния нарушенных земель угольными разрезами в Республике Хакасия // Уголь. 2017. № 9. С. 72–75. doi: 10.18796/0041-5790-2017-9-72-75
2. Миронычева-Токарева Н.П. Динамика растительности при зарастании отвалов (на примере КАТЭКа). Новосибирск : Наука, 1998. 172 с.
3. Стрельникова Т.О., Манakov Ю.А. Особенности флоры отвалов угольных разрезов Кемеровской области // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2010. № 2 (10). С. 44–57.
4. Ламанова Т.Г., Каракулов А.В. Естественное зарастание спланированных отвалов четвертичных отложений в лесостепной зоне Кузнецкой котловины (юг Западной Сибири) // Ботанический журнал. 2011. Т. 96, № 3. С. 411–422.
5. Миронова С.И., Кудинова З.А. Зарастание растительности на угольных отвалах Якутии // Вестник Северо-восточного федерального университета. 2012. Т. 9, № 3. С. 61–66.
6. Сумина О.И. Формирование растительности на техногенных местообитаниях крайнего севера России. СПб. : Информ-Навигатор, 2013. 340 с.
7. Lei H., Peng Zh., Yigang H., Yang Zh. Vegetation and soil restoration in refuse dumps from open pit coal mines // Ecological Engineering. 2016. № 94. PP. 638–646. doi: 10.1016/J.ECOLENG.2016.06.108
8. Костина Е.Э., Крышень А.М., Геникова Н.В. Анализ видового состава сосудистых растений на отвалах и карьерах на территории Республики Карелия // Ботанический журнал. 2021. Т. 106, № 12. С. 1147–1166. doi: 10.31857/S000681362112005X

9. Мартыненко В.А., Груздев Б.И. Флора техногенных ландшафтов таежной зоны европейского северо-востока (Республика Коми). Сыктывкар : Коми НЦ УрО РАН, 2021. 122 с.
10. Ламанова Т.Г., Шеремет Н.В. Агрофитоценозы на отвалах в южной части Кузнецкой котловины. Новосибирск : Офсет, 2010. 224 с.
11. Чибрик Т.С., Лукина Н.В., Филимонова Е.И., Глазырина М.А. Экологические основы и опыт биологической рекультивации нарушенных промышленностью земель. Екатеринбург : Изд-во Уральского университета, 2011. 268 с.
12. Лиханова И.А., Арчегова И.Б. Развитие теоретических и практических аспектов процесса восстановления нарушенных земель на севере Республики Коми // Теоретическая и прикладная экология. 2014. № 3. С. 79–85.
13. Chuman T. Restoration practices used on post mining sites and industrial deposits in the Czech Republic with an example of natural restoration of granodiorite quarries and spoil heaps // Journal of Landscape Ecology. 2015. № 8 (2). PP. 29–46. doi:10.1515/jlecol-2015-0007
14. Banaszek J., Leksy M., Rahmonov O. The role of spontaneous succession in reclamation of mining waste tip in area of Ruda Śląska City // 10th International Conference “Environmental Engineering” (ICEE-2017): Proc. of the Sci. Conf (Vilnius, Lithuania, 27–28 April, 2017). Vilnius, Lithuania, 2017. doi: 10.3846/ENVIRO.2017.098
15. Щербатенко В.И., Кондрашин Е.Р. Естественная растительность отвальнокарьерных ландшафтов Сибири // Восстановление таёжно-техногенных ландшафтов Сибири (теория и технология). Новосибирск : Наука, 1977. С. 65–80.
16. Лавриненко А.Т., Остапова Н.А., Сафронова О.С., Шаповаленко Г.Н., Евсеева И.Н., Моршнев Е.А. Некоторые особенности флористического состава спланированных отвалов разреза «Черногорский» ООО «СУЭК-Хакасия» // Уголь. 2020. № 9. С. 68–71. doi: 10.18796/0041-5790-2020-9-68-71
17. Жуков А.А., Жукова Е.Ю. Особенности сукцессии растительности на примере рекультивированного отвала угольного разреза «Черногорский» // Лесохозяйственная информация. 2022. № 3. С. 114–124. doi: 10.24419/LHI.2304-3083.2022.3.10
18. Куминова А.В., Зверева Г.А., Маскаев Ю.М., Павлова Г.Г., Седельников В.П., Королева А.С., Нейфельд Э.Я., Танзыбаев М.Г., Чижикова Н.М., Ламанова Т.Г. Растительный покров Хакасии. Новосибирск : Наука, 1976. 418 с.
19. Полевая геоботаника / под ред. Е.М. Лавренко, А.А. Корчагина. Т. I–V. Л. : Наука, 1959–1976.
20. Воронов А.Г. Геоботаника. М. : Высшая школа, 1973. 384 с.
21. Конспект флоры Азиатской России: сосудистые растения. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2012. 640 с.
22. Алексеев Л.Н. Некоторые проблемы изучения структуры травостоя травянистых фитоценозов // Ботанический журнал. 1964. Т. 49, № 1. С. 65–74.
23. Павлова Г.Г. Суходольные луга Средней Сибири. Новосибирск : Наука, 1980. 213 с.
24. Корчагин А.А., Лавренко Е.М. Морфологическое строение сообществ (синморфология) // Полевая геоботаника. М. ; Л. : Наука, 1976. Т. 5. С. 28–130.
25. Уиттекер Р. Сообщества и экосистемы. М. : Прогресс, 1980. 327 с.
26. Песенко Ю.А. Принципы и методы количественного анализа в фаунистических исследованиях. М. : Наука, 1982. 281 с.
27. Мзгарран Э. Экологическое разнообразие и его измерение. М. : Мир, 1992. 184 с.
28. Черная книга флоры Сибири. Новосибирск : Гео, 2016. 440 с.
29. Ламанова Т.Г. Анализ флоры каменистых степей Хакасии // Геоботанические исследования в Западной и Средней Сибири. Новосибирск : Наука, 1978. С. 193–209.
30. Антонов И.С., Винокурова О.Т., Градобоева Н.А., Игнотенко Л.П., Леоненко А.Н., Лиховид Н.И., Новак Д.Д., Семшов А.Ф., Собоцкая Л.С., Чаптыков А.Г., Чарков С.М., Шепелев В.В. Биологическая рекультивация нарушенных земель в Рес-

- публике Хакасия. Рекомендации и технологические схемы. Абакан : Изд-во Хакасского государственного университета, 2003. 68 с.
31. Титлянова А.А., Самбу А.Д. Сукцессии в травянистых экосистемах. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2016. 191 с.
 32. Благовещенский Э.Н. О конденсации влаги в почвах пустынь // Пустыни СССР и их освоение. М. ; Л. : Изд-во АН СССР, 1954. С. 508–519.
 33. Свешникова В.М. Водный режим растений и почв высокогорных пустынь Памира. Душанбе : Изд-во АН Таджикской ССР, 1962. 245 с.
 34. Щербakov Ю.А. Из опыта изучения роли экспозиции в ландшафтообразовании // Влияние экспозиции на ландшафты. Пермь : Изд-во Пермского университета, 1970. С. 3–99.
 35. Пяк А.И. Петрофиты Русского Алтая. Томск : Изд-во Томского университета, 2003. 200 с.
 36. Зозулин Г.М. Схема основных направлений и путей эволюции жизненных форм семенных растений // Ботанический журнал 1968. Т. 53, вып. 2. С. 223–232.
 37. Дохман Г.И. Экспериментально-фитоценологические основы исследования злаково-бобовых сообществ. М. : Наука, 1979. 199 с.

References

1. Zen'kov IV, Nefedov BN, Yuronen YuP, Nefedov NB. Environmental condition remote sounding and field surveys of the lands, disturbed by coal mining open pits in the Republic of Khakassia. *Ugol' – Russian Coal Journal*. 2017;9:72-75. In Russian, English summary. doi: 10.18796/0041-5790-2017-9-72-75
2. Mironycheva-Tokareva NP. Dinamika rastitel'nosti pri zarastanii otvalov (na primere KATEKa) [Dynamics of vegetation during overgrowing of dumps (according to the KATEK principle)]. Novosibirsk: Nauka Publ.; 1998. 172 p. In Russian
3. Strel'nikova TO, Manakov YuA. Features of coal mines dumps flora of Kemerovo region. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya – Tomsk State University Journal of Biology*. 2010;2(10):44-57. In Russian, English summary.
4. Lamanova TG, Karakulov AV. Natural plant colonization of leveled spoil banks of quarternary deposits in the forest-steppe zone of the Kuznetsk basin (south of West Siberia). *Botanicheskiy zhurnal – Botanical Journal*. 2011;96(3):411-422. In Russian, English summary
5. Mironova SI, Kudina ZA. Overgrowth of vegetation on mine tips of Yakutia. *Vestnik Severo-vostochnogo federal'nogo universiteta – Vestnik of North-Eastern Federal University*. 2012;9(3):61-66. In Russia, English summary
6. Sumina OI. Formirovanie rastitel'nosti na tekhnogennykh mestoobitaniyakh kraynego severa Rossii [Formation of vegetation in technogenic habitats of the far north of Russia]. St. Petersburg: Inform-Navigator Publ.; 2013. 340 p. In Russian
7. Lei H, Peng Zh, Yigang H, Yang Zh. Vegetation and soil restoration in refuse dumps from open pit coal mines. *Ecological Engineering*. 2016;94:638-646. doi: 10.1016/J.ECOLENG.2016.06.108
8. Kostina EE, Kryshen' AM, Genikova NV. Analysis of vascular plant species composition of dumps and quarries in the Republic of Karelia. *Botanicheskiy zhurnal – Botanical Journal*. 2021;106(12):1147-1166. In Russian, English summary. doi: 10.31857/S000681362112005X
9. Martynenko VA, Gruzdev BI. Flora tehnoennykh landshaftov taezhnoy zony evropejskogo severo-vostoka (Respublika Komi) [Flora of technogenic landscapes of the taiga zone of the European north-east (Komi Republic)]. Syktyvkar: Komi Research Centre of Uralian Branch RAS Publ.; 2021. 122 p. In Russian
10. Lamanova TG, Sheremet NV. Agrofитocenozы na otvalah v juzhnoy chasti Kuznetsoj kotloviny [Agrophytocoenoses on the Spoil Banks in the Southern Part of the Kuznetsk Basin]. Novosibirsk: Ofset Publ.; 2010. 226 p. In Russian

11. Chibrik TS, Lukina NV, Filimonova EI, Glazyrina MA. *Ekologicheskie osnovy i opyt biologicheskoy rekultivatsii narushennykh promyshlennost'yu zemel'* [Ecological foundations and experience of biological reclamation of industrially disturbed lands]. Ekaterinburg: Ural State University Publ.; 2011. 268 p. In Russian
12. Likhanova IA, Archegova IB. An unconventional approach to solving the problem of restoring damaged ecosystems in the Nord. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya – Theoretical and Applied Ecology*. 2014;3:79-85. In Russian, English summary
13. Chuman T. Restoration practices used on post mining sites and industrial deposits in the Czech Republic with an example of natural restoration of granodiorite quarries and spoil heaps. *Journal of Landscape Ecology*. 2015;8(2):29-46. doi: 10.1515/jlecol-2015-0007
14. Banaszek J, Leksy M, Rahmonov O. The role of spontaneous succession in reclamation of mining waste tip in area of Ruda Śląska City. In: *Environmental engineering*. 10th International Conf. (Vilnius, Lithuania, 27-28 April, 2017). Vilnius, Lithuania; 2017. doi: 10.3846/ENVIRO.2017.098
15. Shcherbatenko VI, Kondrashin ER. Estestvennaya rastitel'nost' otval'nokar'ernykh landshaftov Sibiri [Natural vegetation of waste quarry landscapes in Siberia]. In: *Vosstanovlenie taizhno-tekhnogennykh landshaftov Sibiri (teoriya i tekhnologiya)* [Restoration of taiga-technogenic landscapes of Siberia (theory and technology)]. Novosibirsk: Nauka Publ.; 1977. pp. 65-80. In Russian
16. Lavrinenko AT, Ostapova NA, Safronova OS, Shapovalenko GN, Evseeva IN, Morshnev EA. Some features of the floristic composition of the planned dumps of “Chernogorsky” open-pit mine “SUEK-Khakasia” LLC. *Ugol' – Russian Coal Journal*. 2020;9:68-71. In Russian, English summary. doi: 10.18796/0041-5790-2020-9-68-71.
17. Zhukov AA, Zhukova EYu. Successional properties of vegetation on the example of the recultivated open surface coil mine “Chernogorsky”. *Lesokhozyaystvennaya informatsiya – Forestry information*. 2022;3:114-124. In Russia, English summary. doi: 10.24419/LHI.2304-3083.2022.3.10
18. Kuminova AV, Zvereva GA, Maskaev YuM, Pavlova GG, Sedel'nikov VP, Koroleva AS, Neyfel'd EYa, Tanzybaev MG, Chizhikova NM, Lamanova TG. *Rastitel'nyy pokrov Khakasii* [Vegetation cover of Khakassia]. Novosibirsk: Nauka Publ.; 1976. 418 p. In Russian
19. *Polevaya geobotanika* [Field geobotany]. Lavrenko EM, Korchagin AA, editors. Leningrad: Nauka Publ.; 1959-1976. Vol. I-V. In Russian
20. Voronov AG. *Geobotanika* [Geobotanika]. Moscow: Vysshaya Shkola Publ.; 1973. 384 p. In Russian
21. *Konspekt flory Aziatskoj Rossii: sosudistye rastenija* [Conspectus Florae Rossiae Asiaticae: Plantae vasculares]. Novosibirsk: Siberian Branch Publ.; 2012. 640 p. In Russian
22. Alekseenko LN. Certain problems of the sward structure of some herbage phytocoenoses. *Botanicheskij zhurnal – Botanical Journal*. 1964;49(1):65-74. In Russian, English summary
23. Pavlova GG. *Sukhodol'nye luga Sredney Sibiri* [Dry meadows of Central Siberia]. Novosibirsk: Nauka Publ.; 1980. 213 p. In Russian
24. Korchagin AA, Lavrenko EM. *Morfologicheskoe stroenie soobshchestv (sinmorfologiya)* [Morphological structure of plant communities (Synmorphology)]. In: *Polevaya geobotanika* [Field Geobotany]. Moscow, Leningrad: Nauka Publ.; 1976. Vol. 5. pp. 28-130. In Russian
25. Uitteker R. *Communities and ecosystems*. Mirkin BM, Rosenberg GS, translated from English; Babintseva LB, editor. New York: Macmillian Publishing Co; 1975. 327 p. In Russian
26. Pesenko YuA. *Printsipy i metody kolichestvennogo analiza v faunisticheskikh issledovaniyakh* [Principles and methods of quantitative analysis in faunal studies]. Moscow: Nauka Publ.; 1982. 281 p. In Russian

27. Magurran A. Ecological diversity and its measurement. Matveeva NV, translated from English; Chernova YuI, editor. London: Crom Helm; 1983. 184 p. In Russian
28. Chernaya kniga flory Sibiri [Black book of flora of Siberia]. Novosibirsk: Geo Publ.; 2016. 440 p. In Russian
29. Lamanova TG. Analiz flory kamenistyykh stepey Khakasii [Analysis of the flora of the stony steppes of Khakassia]. In: *Geobotanicheskie issledovaniya v Zapadnoy i Sredney Sibiri* [Geobotanical research in Western and Central Siberia]. Novosibirsk: Nauka Publ.; 1978. pp. 193-209. In Russian
30. Antonov IS, Vinokurova OT, Gradoboeva NA, Ignatenko LP, Leonenko AN, Likhovid NI, Novak DD, Semshov AF, Sobetskaya LS, Chaptikov AG, Charkov SM, Shepelev VV. Biologicheskaya rekultivatsiya narushennykh zemel' v Respublike Khakasiya. Rekomendatsii i tekhnologicheskie skhemy [Biological reclamation of disturbed lands in the Republic of Khakassia. Recommendations and technological schemes]. Abakan: Khakassian State University Publ.; 2003. 68 p. In Russian
31. Titlyanova AA, Sambu AD. Sukcessii v travjanykh ekosistemah [Succession in Grasslands]. Novosibirsk: Siberian Branch Publ.; 2016. 191 p. In Russian
32. Blagoveshchenskiy EN. O kondensatsii vlagi v pochvakh pustyn' [On moisture condensation in desert soils]. In: *Pustyni SSSR i ikh osvoenie* [Deserts of the USSR and their development]. Moscow, Leningrad: USSR Academy of Sciences Publ.; 1954. pp. 508-519. In Russian
33. Sveshnikova VM. Vodnyy rezhim rasteniy i pochv vysokogornyykh pustyn' Pamira [Water regime of plants and soils of the high mountain deserts of the Pamirs]. Dushanbe: Tajik SSR Academy of Sciences Publ.; 1962. 245 p. In Russian
34. Shcherbakov YuA. Iz opyta izucheniya roli ekspozitsii v landshaftoobrazovaniya [From the experience of studying the role of exposure in landscape formation]. In: *Vliyaniye ekspozitsii na landshafty* [The influence of exposure on landscapes]. Perm: Perm State University Publ.; 1970. pp. 3-99. In Russian
35. Pyak AI. Petrofity Russkogo Altaya [Petrophytes of Russian Altai]. Tomsk: Tomsk State University Publ.; 2003. 200 p. In Russian
36. Zozulin GM. A scheme of the main directions and pathways of the evolution of the life forms of spermatophytes. *Botanicheskiy zhurnal – Botanical Journal*. 1968;53(2):223-232. In Russian, English summary
37. Dokhman GI. Eksperimental'no-fitotsenoticheskie osnovy issledovaniya zlakovo-bobovykh soobitaniy [Experimental phytocenotic basis for the study of cereal-legume habitats]. Moscow: Nauka Publ.; 1979. 199 p. In Russian

Информация об авторах:

Шерemet Наталия Владимировна, канд. биол. наук, н.с. лаборатории Гербарий, Центральный сибирский ботанический сад СО РАН (Новосибирск, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2973-3008>

E-mail: nsheremet@yandex.ru

Сафронова Ольга Сергеевна, м.н.с. лаборатории Рекультивации, Научно-исследовательский институт аграрных проблем Хакасии, филиал ФИЦ КНЦ СО РАН (Зеленое, Республика Хакасия, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1181-5224>

E-mail: olga_egoshina@mail.ru

Ламанова Татьяна Григорьевна, д-р биол. наук, с.н.с. лаборатории Гербарий, Центральный сибирский ботанический сад СО РАН (Новосибирск, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6691-3732>

E-mail: tlamanova@yandex.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Natalia V. Sheremet, Cand. Sci. (Biol.), researcher of the Herbarium Laboratory, Central Siberian Botanical Garden (Novosibirsk, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2973-3008>

E-mail: nsheremet@yandex.ru

Olga S. Safronova, junior researcher of the Laboratory of Recultivation, Research Institute of Agricultural Problems of Khakassia, FRC KSC SB RAS (Zelenoe, Republic of Khakassia, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1181-5224>

E-mail: olga_egoshina@mail.ru

Tatyana G. Lamanova, Dr. Sci. (Biol.), senior researcher of the Herbarium Laboratory, Central Siberian Botanical Garden (Novosibirsk, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6691-3732>

E-mail: tlamanova@yandex.ru

The Authors declare no conflict of interest.

*Статья поступила в редакцию 06.02.2023;
одобрена после рецензирования 27.03.2024; принята к публикации 04.09.2025*

*The article was submitted 06.02.2023;
approved after reviewing 27.03.2024; accepted for publication 04.09.2025*

ЗООЛОГИЯ

doi: 10.17223/19988591/71/6

Уважаемые читатели!

170 лет назад родился выдающийся исследователь природы Сибири, доктор медицины и доктор зоологии, заслуженный ординарный профессор Императорского Томского университета Николай Феофанович Кащенко. Он вошёл в историю зоологии как первый профессор-зоолог, начавший планомерные исследования животных Сибири.

Н.Ф. Кащенко получил медицинское образование в Императорском Харьковском университете и начал свою научную деятельность с гистологии, эмбриологии и микроскопической техники, хотя первый интерес к зоологии у него возник ещё при обучении на первом курсе медицинского факультета Императорского Московского университета в так называемом «рассаднике» зоологов России – научной школе профессора Анатолия Петровича Богданова. Однако именно в Сибири Николай Феофанович смог реализоваться как учёный-зоолог, поскольку понимал важность и необходимость исследования так слабо изученного в то время животного мира этой территории. В томский период своей научной деятельности он занялся вопросами фаунистики, систематики, паразитологии, палеозоологии, а объектами исследований выступили разные группы беспозвоночных, рыбы, птицы, но особое внимание было уделено земноводным, пресмыкающимся и млекопитающим. При этом Н.Ф. Кащенко всегда видел важность связи фундаментальной науки с задачами практики, подчёркивая необходимость изучения биологии промысловых видов, решения задач в области акклиматизации животных, разработке мер борьбы с эпизоотиями и других аспектов прикладной зоологии.

Н.Ф. Кащенко организовал работу кабинета зоологии и сравнительной анатомии, Зоологического музея Томского университета, которые вместе с препараторской именовались Зоологическим институтом, сформировал программу и подходы к исследованию животного мира Сибири, заложив тем самым основы для деятельности в этой области его последователей – представителей томской научной зоологической школы, которая, пройдя более чем 100-летний путь, в настоящее время представлена кафедрами зоологии беспозвоночных, зоологии позвоночных и экологии, ихтиологии и гидробиологии и Зоологическим музеем ТГУ.

В разделе «Зоология» выпуска № 71 журнала «Вестник Томского государственного университета. Биология» представлены работы исследователей из всех зоологических подразделений университета, подготовленные по отдельным направлениям, связанным с научным творчеством профессора Николая Феофановича Кащенко, – микроскопической анатомии животных, териологии, герпетологии, паразитологии и систематике животных.

В.В. Ярцев,

зав. кафедрой зоологии позвоночных и экологии,
зав. Зоологическим музеем ТГУ, канд. биол. наук, доцент

Научная статья
УДК 597.2/.5 : 591.67
doi: 10.17223/19988591/71/7

**Биологические особенности сибирского пескаря
Gobio sibiricus (Cyprinidae) и его зараженность
метацеркариями *Opisthorchis felineus* в бассейне
реки Томь (Томская область, Россия)**

**Ирина Борисовна Бабкина¹, Анастасия Викторовна Симакова²,
Александр Михайлович Бабкин³,
Марк Ясон Александрович Соловьев⁴**

^{1, 2, 3, 4} Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Томск, Россия

¹ <https://orcid.org/0000-0002-3302-6819>, bibsphera@gmail.com

² <https://orcid.org/0000-0003-0906-9496>, omikronlab@yandex.ru

³ babkin.alex1983@yandex.ru

⁴ scolopid@gmail.com

Аннотация. Непромысловые виды рыб часто остаются слабо изученными, сохраняются вопросы как по систематическому положению вида, так и по его биологии и экологии. Работа посвящена изучению биологических особенностей сибирского пескаря *Gobio sibiricus* Nikolsky, 1936 в бассейне реки Томь (средняя Обь, Томская область, Западная Сибирь). Томская область расположена в крупнейшем в мире Обь-Иртышском природном очаге описторхоза, вызываемого трематодами *Opisthorchis felineus* Rivolta, 1884. Сибирский пескарь относится к семейству карповых Cyprinidae и служит потенциальным носителем метацеркарий описторхид. На основе анализа многолетних данных (с 2000 по 2024 г.) по зараженности пескаря установлено, что рыбы в условиях бассейна Томи подвержены заражению. В исследованных водоемах наиболее зараженными оказались особи из Томи (экстенсивность инвазии – 16,6%). Наименее заражены рыбы из рек Басандайка и Ушайка (10%, 1,4% соответственно). Интенсивность инвазии во всех исследованных водоемах низкая (1–4 экз./особь). Зависимости уровня зараженности от размера и возраста не выявлено. Это может быть связано с экологией пескаря в условиях бассейна реки Томь.

Ключевые слова: размеры, возраст, плодовитость, экстенсивность и интенсивность инвазии

Источник финансирования: исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWM-2024-0006).

Для цитирования: Бабкина И.Б., Симакова А.В., Бабкин А.М., Соловьев М.Я.А. Биологические особенности сибирского пескаря *Gobio sibiricus* (Cyprinidae) и его зараженность метацеркариями *Opisthorchis felineus* в бассейне реки Томь (Томская область, Россия) // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2025. № 71. С. 123–137. doi: 10.17223/19988591/71/7

Original article

doi: 10.17223/19988591/71/7

**Biological characteristics of the Siberian gudgeon
Gobio sibiricus (Cyprinidae) and its infection
with metacercariae *Opisthorchis felineus*
in the Tom River basin (Tomsk Oblast, Russia)**

**Irina B. Babkina¹, Anastasia V. Simakova², Alexander M. Babkin³,
Mark Yason A. Soloviev⁴**

^{1, 2, 3, 4} Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

¹ <https://orcid.org/0000-0002-3302-6819>, bibsphera@gmail.com

² <https://orcid.org/0000-0003-0906-9496>, omikronlab@yandex.ru

³ babkin.alex1983@yandex.ru

⁴ scolopid@gmail.com

Summary. In the Ob basin, the Siberian gudgeon *Gobio sibiricus* Nikolsky, 1936 is widespread in the river system. This species is a typical rheophile; it prefers tributaries of the first and second orders and adheres to coastal areas of rivers with rocky-pebble, pebble-sandy soils. The biology and morphology of the Siberian gudgeon are currently poorly studied, and there are also questions related to the taxonomy of Siberian gudgeon. The species is also interesting from the point of view of its contribution to the circulation of trematodoses. Being representatives of the carp family, gudgeon can be intermediate hosts of trematode metacercariae, including opisthorchis. In this regard, an interesting fact is that the Siberian gudgeon is included in the opisthorchiasis outbreak operating in Tomsk Oblast. Almost all territories adjacent to the Ob-Irtysh basin are unfavorable for opisthorchiasis. Tomsk Oblast is one of the leaders in terms of population infected with cat fluke.

For reservoirs of Tomsk Oblast, it was previously indicated that gudgeon was free from opisthorchis invasion. In other regions within the Ob-Irtysh basin, infection of gudgeon with opisthorchis was noted in the Chumysh River (Kemerovo Oblast), in small rivers in the south of Tyumen Oblast, in Novosibirsk Oblast. The aim of the work was to study the biology of gudgeon and assess the level of its infection with opisthorchis metacercariae in tributaries of the Middle Ob. Gudgeons have no commercial value, they are objects of amateur fishing, they are used both as food for humans and domestic animals, although its share in human preferences is not large, about 1%, its share in catches in second-order tributaries is quite large, on average, about 25%.

The material for the study was obtained during monitoring studies of fish biodiversity in water bodies of Tomsk Oblast, in the south of Western Siberia. The Tom River is one of the major right tributaries of the Ob River. A significant part of the lower section of the river is located within Tomsk Oblast. The largest tributaries of the Tom (in the lower reaches) are the Basandaika and the Ushaika rivers (right-bank tributaries of the 1st order). The material on the gudgeon was collected from 2000 to 2024. The Ushaika River, 2000 - 71 specimens, the Basandaika River, 2010 - 35 specimens, 2020 - 10 specimens, the Tom River, 2004 - 78 specimens, 2005 - 38 specimens, 2009 - 43, 2024 - 17 specimens. The ichthyological material was analyzed using morphological and biological analysis methods. Muscle infestation of gudgeon with *Opisthorchis felineus* metacercariae was studied using the conventional compres-

method. Morphological characteristics of the Tom River gudgeon: SL 124.7 mm, D II 7, A II-III 6, V I 7, II 41.7; the antedorsal distance (47.4% SL (standard length)) is greater than the postdorsal (42.9% SL); the height of the caudal peduncle (8.4% SL) is 33.2% of the head length (25.0% SL) and 38.5% of the caudal peduncle length (18.7% SL).

Gudgeon in the Tom River basin are found at the age of up to 7+ years. The size characteristics of the gudgeon vary somewhat, so it can be noted that the gudgeon from the Tom River is larger, while the gudgeon from the Basandaika River is smaller (See Table 1). In the Ushaika River, gudgeon was noted with an average body length of 103.8 and a body weight of 16.8 g, in the Basandaika River with an average body length of 70.4 mm, a body weight of 6.4, and in the Tom River with an average body length of 110.7 mm, a weight of 23.2 g. The food spectrum of the gudgeon of the lower Tom River consisted of: chironomid larvae, mayflies, caddisflies, crustaceans, bivalves, beetles, and detritus. The majority of the gudgeon's food spectrum consisted of mayfly and caddisfly larvae (more than 50%). The gudgeon becomes sexually mature at the age of 2+ years. Spawning of the gudgeon in the Tom River is portioned, begins in the first ten days of July and can stretch until the end of July. Individual absolute fecundity varies considerably (3406-21984 eggs, average - 11588 ± 1502) (See Table 2), increasing with the size of the fish.

We have established that gudgeon, like most other carp fish, despite its confinement to fast-flowing water bodies and spawning in the summer period, is susceptible to invasion by *O. felineus* metacercariae. The average long-term infestation (PI prevalence of infection) of the gudgeon in the Tom River basin was 8.3%, the intensity of infestation was 1.75 metacercariae/individual. Some differences in infestation in different water bodies are observed; the gudgeon from the Tom River was more infested (See Table 3). An assessment of the dependence of the infection level on the size of the fish was made. According to our data, no such dependence was found, however, it can be noted that among the largest fish (Tom River, 2009) no infected individuals were noted (See Fig. 1).

The article contains 1 Figure, 3 Tables, 37 References.

Keywords: size, age, fertility, prevalence of infection and intensity of invasion

Fundings: this work was partially supported by Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FSWM-2024-0006).

For citation: Babkina IB, Simakova AV, Babkin AM, Soloviev MYA. Biological characteristics of the Siberian gudgeon *Gobio sibiricus* (Cyprinidae) and its infection with metacercariae *Opisthorchis felineus* in the Tom River basin (Tomsk Oblast, Russia). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2025;71:123-137. doi: 10.17223/19988591/71/7

Введение

Сибирский пескарь *Gobio sibiricus* Nikolsky, 1936 в бассейне Оби распространен в речной системе повсеместно, предпочитает притоки первого и второго порядков, придерживается прибрежных участков рек с каменисто-галечными, галечно-песчаными грунтами, является типичным реофилом. Биология и морфология сибирского пескаря в настоящее время изучена слабо, также остаются вопросы, связанные с его таксономией [1]. Сибирский пескарь интересен и с точки зрения его вклада в циркуляцию трематодозов. Являясь представителем семейства карповых, он может быть промежуточным хозяином метацеркарий трематод, в том числе описторхи-

са. В связи с этим интерес представляет включенность пескаря в действующий на территории Томской области очаг описторхоза. Неблагополучными по этому заболеванию являются практически все территории, относящиеся к Обь-Иртышскому бассейну. Томская область занимает одно из лидирующих мест по зараженности населения кошачьей двуусткой [2].

Пескари промыслового значения не имеют, являются объектами любительского лова, используются как в пищу человека, так и домашних животных, хотя их доля в предпочтениях человека составляет около 1% [3], в то время как доля в уловах в притоках второго порядка – в среднем около 25% [4, 5].

Трематоды семейства Opisthorchidae вызывают серьезные заболевания желчных протоков и печени у плотоядных животных и человека. Описторхоз может спровоцировать злокачественные новообразования гепатобилиарной системы [6–9]. Три вида печеночных сосальщиков представляют наибольшую опасность для населения планеты: *Opisthorchis viverrini* (Poirier, 1886) Stiles & Hassal, 1896, вызывающий заболевание в Юго-Восточной Азии (Вьетнам, Лаосская Народно-Демократическая Республика, Камбоджа, Таиланд); *Clonorchis sinensis* Looss, 1907, – в Китае, Северном Вьетнаме и Республике Корея; и, наконец, *O. felineus* Rivolta, 1884, – в Европе, России, Казахстане и Украине [10–15]. Риску заражения этими паразитами в мире подвержены около 700 миллионов человек, в том числе 12,5 миллионов – *O. felineus* [16, 17].

Для водоемов Томской области ранее указывалось, что пескарь свободен от инвазии описторхиса [18]. В других регионах в границах Обь-Иртышского бассейна зараженность этих рыб описторхидами была отмечена в р. Чумыш (Кемеровская область), в малых реках юга Тюменской области, в Новосибирской области [19–22].

Цель настоящей работы – изучение биологии пескаря и оценка уровня его зараженности метацеркариями *Opisthorchis felineus* в реке Томь и ее притоках.

Материалы и методы

Материал для исследования получен в ходе мониторинговых исследований биоразнообразия рыб в водных объектах Томской области. Река Томь является правым притоком первого порядка р. Обь, в пределах Томской области протекает около 700 км реки от с. Яр (56°06' с. ш., 84°47' в. д.) до устья (56°50' с. ш. и 84°29' в. д.).

Река Томь имеет полугорный характер, с достаточно высокими скоростями течения (0,5–0,6 м/с), которые к устью замедляются до 0,2 м/с [23], река приобретает равнинный характер. Выше г. Томска грунты каменисто-галечные, ниже – галечные и песчано-илистые. На исследованном участке реки ширина поймы может достигать 0,9 км, ширина русла достигает 0,6 км. Глубины небольшие, не превышают 5 м. Река Басандайка – правобережный приток р. Томь первого порядка, длиной около 85 км, впадает выше г. Томска. Река с глубинами до 1,0 м, имеет каменистые грунты. Река Ушайка – правобережный приток первого порядка, длиной 78 км, около

10 км реки протекает по территории г. Томска. Ширина русла в межень не превышает 15 м, в паводок 50 м. Глубины от 0,3 до 1,2 м, грунты преимущественно каменисто-галечные.

Материал по пескарю *Gobio sibiricus* Nikolsky, 1936 [1] собран в период с 2000 по 2024 г. В р. Ушайка в 2000 г. собран 71 экз., в р. Басандайка в 2010 г. – 35 экз., в 2020 г. – 10 экз., в р. Томь в 2004 г. – 78 экз., в 2005 г. – 38 экз., в 2009 г. – 43 экз., в 2024 г. – 17 экз. Для исследования рыб использован морфологический и биологический анализ. Материал проанализирован, согласно соответствующим ихтиологическим методикам [24, 25]. Морфологический анализ проведен на фиксированном 4%-ым раствором формальдегида материале. Изучен размерно-возрастной состав пескаря в бассейне Томи, оценен спектр питания по стандартной методике [26]. Для оценки репродуктивной системы пескарей рассчитаны индивидуальная абсолютная плодовитость (ИАП), индивидуальная относительная плодовитость (ИОП), коэффициенты зрелости гонад.

Мышечные ткани пескарей обследованы на наличие метацеркарий *Opisthorchis felineus* компрессорным методом, всего исследовано 141 экз. рыб. Мышцы от каждого экземпляра рыб просматривались полностью [27, 28]. Идентификацию *O. felineus* проводили с использованием патента № 2018144035 и «Определителя паразитов пресноводных рыб...» [29, 30]. Определяли экстенсивность инвазии (ЭИ, %), интенсивность инвазии (ИИ, экз./на зараженную рыбу) и индекс обилия (ИО, экз./особь).

Сравнение уровня зараженности в разных водоемах проведено с использованием точного теста Фишера (Fisher's Exact Test) и дисперсионного анализа (ANOVA, для попарного сравнения использовано PostHoc анализ TukeyHSD), различия считались статистически значимыми при $p < 0,05$ [31–34]. Анализ взаимосвязи количества метацеркарий в мышцах с биологическими параметрами пескаря проведен с использованием корреляционного анализа Пирсона. Статистический и графический анализ (пакет ggplot2 [35]) проведен с использованием программной среды R 4.0.2 [36].

Результаты исследования и обсуждение

Сибирский пескарь является одним из доминирующих видов рыб в придаточной системе водотоков р. Томь и в самой Томи, однако численность его высока не на всем протяжении реки, в основном его скопления отмечаются выше г. Томска, где преимущественно каменисто-галечные грунты и выше скорость течения. В р. Томь его доля в уловах (преимущественно в протоках) может достигать 20%, в уловах из малых рек (притоках р. Томь) достигает 60% [5].

SL 124,7 мм, D II 7, A II-III 6, V I 7, II 41,7; антедорсальное расстояние (47,4% SL) больше постдорсального (42,9% SL); высота хвостового стебля (8,4% SL) составляет 33,2% длины головы (25,0% SL) и 38,5% длины хвостового стебля (18,7% SL). В исследовании А.Л. Мартыновой и Е.Д. Васильевой [1] показано, что сибирский пескарь от пескаря из европейской части по большинству пластических признаков отличить затруднительно, значительные отличия выявлены только по отношению высоты хвостового

стебля к длине головы, для сибирских популяций это соотношение составляет более 30% (для европейских менее 30%).

Пескарь в бассейне Томи встречается в возрасте до 7+ лет. Размерные характеристики рыб несколько различаются. Так, можно отметить, что большие предельные размеры отмечены у них в р. Томь, меньшие – у особей из р. Басандайка и р. Ушайка (табл. 1). В р. Ушайка рыбы отмечены со средней длиной тела 103,8 (от 67 до 132 мм) и массой тела 16,8 г (от 3,2 до 30,4 г), средний возраст 3,0 (от 1+ до 4+ лет), в р. Басандайка – со средней длиной тела 70,4 мм (от 45 до 125 мм), массой тела 6,4 (от 1,2 до 32 г), средний возраст 2,3 (от 1+ до 4+ лет), в р. Томь – со средней длиной тела 110,7 мм (от 50 до 154 мм), массой 23,2 г (от 2,3 до 61 г), средний возраст 3,6 (от 1+ до 7+ лет).

Пескарь типичный бентофаг. В его пище встречаются личинки хирономид, поденок, ручейников, ракообразные, моллюски, изредка в кишечниках отмечается икра рыб. В питании молоди преобладает фито- и зоопланктон. В пищевом спектре этих рыб нижней Томи нами отмечено 7 компонентов (личинки хирономид, поденок, ручейников, ракообразные, двустворчатые моллюски, жуки, детрит). Около 50% спектра питания пескаря составляли личинки поденок и ручейников.

Половозрелость наступает в возрасте 2+–3+ лет. Нерест у пескаря в р. Томь порционный, начинается в первой декаде июля и может растягиваться до конца июля. Он откладывает икру на дно, преимущественно каменисто-галечное (лито-псаммофил). В первых числах июля (1–7, IV–V стадия зрелости гонад) коэффициент зрелости половых продуктов (отношение веса гонад к весу тела рыбы, выраженное в процентах) достигает максимальных величин от 10,4% до 15,4% (в разные годы), в конце июля (24) единично встречаются особи с коэффициентом зрелости гонад 6,6–8,7% (икра выметана частично). Индивидуальная абсолютная плодовитость варьирует от 3406 до 21 984 икринок (в среднем составляет 11 588). Икра некрупная – от 0,61 до 0,96 мм (табл. 2). Абсолютная индивидуальная плодовитость пескаря значительно увеличивается с увеличением возраста и размеров рыбы. Так, в пятилетнем возрасте плодовитость составляла 10 870 икринок, в восьмилетнем – 17 500 икринок.

Паразитологические исследования показали, что пескарь, как большинство других карповых рыб, несмотря на приуроченность его обитания к быстротекущим водоемам и нерест в летний период (более интенсивное заражение отмечается у весенне-нерестующих видов – ельца и язя), восприимчив к инвазии метацеркариями *O. felineus*. За исследованный период средняя экстенсивность инвазии (ЭИ) рыб в бассейне р. Томь составила 8,3%, интенсивность инвазии (ИИ) – 1,75 экз./на зараженную рыбу. Наблюдаются некоторые различия зараженности в разных водоемах, в целом более зараженным оказался пескарь из р. Томь (табл. 3). Точный критерий Фишера при сравнении соотношения количества зараженных и незараженных особей в трех водоемах показал статистически значимые различия (Fisher's Exact Test, p -value = 0,005). Дисперсионный анализ при сравнении

Таблица 1 [Table 1]

**Размерно-возрастные характеристики сибирского пескаря
в бассейне р. Томь**
[Size and age characteristics of the Siberian gudgeon in the Tom River basin]

Река [River]	Год [Year]	Параметр [Parameter]	Возраст, лет [Age, years]						
			1+	2+	3+	4+	5+	6+	7+
р. Ушайка [Ushaika river]	2000	SL, мм [SL, mm]	67,0	80,2	103,8	120,9	—	—	—
		W, г [W, g]	3,2	8,0	16,5	25,3	—	—	—
		n, экз. [n, ind.]	1	5	56	9	—	—	—
р. Басан- дайка [Basandaika river]	2010	SL, мм [SL, mm]	51,8	62,4	68,1	—	—	—	—
		W, г [W, g]	1,8	3,3	4,5	—	—	—	—
		n, экз. [n, ind.]	4	22	9	—	—	—	—
р. Басан- дайка [Basandaika river]	2020	SL, мм [SL, mm]	56,0	76,0	105,2	121,0	—	—	—
		W, г [W, g]	2,4	6,8	18,7	28,2	—	—	—
		n, экз. [n, ind.]	1	2	5	2	—	—	—
р. Томь [Tom river]	2004	SL, мм [SL, mm]	—	83,5	98,3	123,5	134,9	140,2	154,0
		W, г [W, g]	—	8,0	13,6	30,3	39,4	45,1	61,0
		n, экз. [n, ind.]	—	8	16	19	21	13	1
р. Томь [Tom river]	2005	SL, мм [SL, mm]	—	—	105,2	113,3	123,7	142,0	150,0
		W, г [W, g]	—	—	16,9	22,7	27,8	41,3	40,0
		n, экз. [n, ind.]	—	—	6	18	11	2	1
р. Томь [Tom river]	2009	SL, мм [SL, mm]	66,5	85,4	95,3	132,0	138,0	—	—
		W, г [W, g]	4,2	8,4	11,5	34,6	38,7	—	—
		n, экз. [n, ind.]	13	18	4	3	5	—	—
р. Томь [Tom river]	2024	SL, мм [SL, mm]	—	97,7	106,1	—	—	—	—
		W, г [W, g]	—	14,5	16,3	—	—	—	—
		n, экз. [n, ind.]	—	6	11	—	—	—	—

Примечание. SL – стандартная длина, W – масса тела, n – количество экземпляров.

[Note. SL - standard length, W - body weight, n - number of samples].

Таблица 2 [Table 2]

Показатели репродуктивной способности сибирского пескаря
(р. Томь, 2004 г.)
[Reproductive capacity indicators of gudgeon (Tom river, 2004)]

Показатели [Indicators]	<i>M</i>	min–max	<i>SD</i>	<i>Cv</i>	<i>n</i> , экз. [<i>n</i> , ind.]
ИАП, шт. икринок [individual absolute fecundity, eggs]	11 588	3406–21 984	5416,5	46,7	13
ИОП (г/г), шт. икринок [Individual relative fecundity, eggs]	279,2	77–419	106,5	38,1	
Коэффициент зрелости гонад, % [Gonadosomatic index (GSI, %)]	10,5	8,1–13,3	1,35	12,8	
Средний диаметр икринок, мм [Average diameter of eggs, mm]	0,83	0,61–0,96	13,99	0,11	
Вес гонад, г [Gonad weight, g]	5,2	3,50–6,85	0,81	16,9	

Примечание. *M* – среднее, min–max – минимальное и максимальное значение показателя, *SD* – стандартное отклонение, *Cv* – коэффициент вариации.

[*Note.* *M* - mean, min-max - minimum and maximum value of the indicator, *SD* - standard deviation, *Cv* - coefficient of variation].

Таблица 3 [Table 3]

Показатели зараженности сибирского пескаря в бассейне р. Томь
[Infection rates of minnows in the Tom River basin]

Река, год [River, year]	ЭИ, % [PI prevalence of infection, %]	ИИ, экз./на зараженную рыбу [II intensity of infection fish]			ИО, экз./особь [IA index of abundance, individual]	<i>n</i> , экз. [<i>n</i> , individuals]	
		<i>M</i>	min	max		Зараженных [infected]	Всего [all]
Ушайка, 2000 [Ushaika river, 2000]	1,41	2	2	2	0,03	1	71
Басандайка, 2020 [Basandaika river, 2020]	10,0	1,0	1	1	0,10	1	10
Томь, 2009 [Tom river, 2009]	18,6	1,88	1	4	0,35	8	43
Томь, 2024 [Tom river, 2024]	11,8	1,5	1	2	0,18	2	17

Примечание. ЭИ – экстенсивность инвазии, ИИ – интенсивность инвазии, ИО – индекс обилия, *M* – среднее, *n* – количество экземпляров.

[*Note.* PI - prevalence of infection, II - intensity of infection, IA - index of abundance, *M* - mean, *n* - number of samples].

индекса обилия в трех водоемах также показал наличие значимых различий (ANOVA: $df=2,138$; $F=4,04$; $p\text{-value}=0,019$). Попарные сравнения с помощью теста Тьюки выявили наличие значимых отличий у пескаря из р. Томь и р. Ушайка (TukeyHSD, $p\text{-value}=0,015$).

На всем массиве данных проведена оценка зависимости уровня зараженности от размеров рыбы (SL). По нашим данным такой зависимости не выявлено (коэффициент корреляции Пирсона: $r=-0,15$, $p\text{-value}=0,08$), также нет зависимости от массы тела ($r=-0,16$, $p\text{-value}=0,06$) и возраста ($r=-0,16$, $p\text{-value}=0,06$), наиболее крупные рыбы оказались свободны от паразитов (рис. 1).

Известно, что мышечные трематоды в местах постоянного контакта с местами обитания первых промежуточных хозяев (моллюски рода *Bithynia*) с возрастом накапливаются в мышцах [3]. В Томе зараженность пескаря несколько выше, чем в притоках. Это может быть связано с тем, что в этой реке много проток и пойменных водоемов, в которых нами были отмечены моллюски рода *Bithynia*, в реках Ушайка и Басандайка исключительно немного мест, где могли бы развиваться первые промежуточные хозяева. Также отсутствие зависимости с длиной тела и эффекта накопления метацеркарий в мышцах может свидетельствовать о случайном характере заражения, происходящего не каждый год и достаточно локально.

Ранее нами в водоемах Томской области был изучен уровень зараженности метацеркариями *O. felineus* у 11 видов карповых рыб. Из исследованных видов только 9 включены в циркуляцию описторхозной инвазии, тем самым

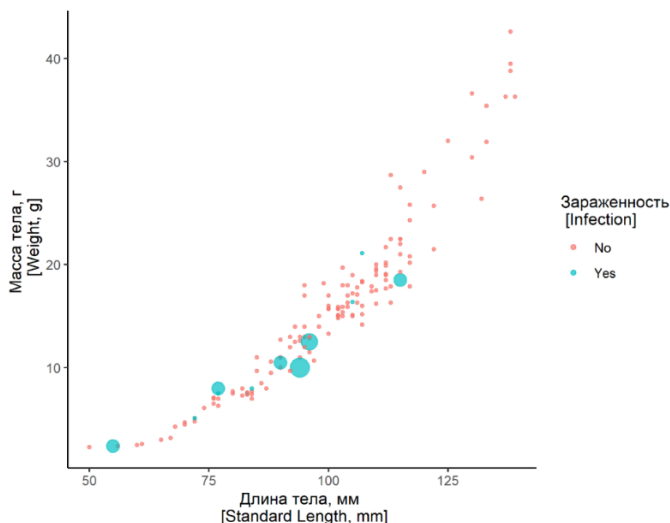


Рис. 1. Зависимость зараженности метацеркариями *Opisthorchis felineus* от размеров сибирского пескаря в бассейне р. Томь: No – рыба не заражена, Yes – рыба заражена, размер точек зависит от интенсивности инвазии (1–4)

[Fig. 1. Dependence of infection with metacercariae *Opisthorchis felineus* on gudgeon size in the Tom River basin: No - fish is not infected, Yes - fish is infected, the size of the dots depends on the intensity of infection (1-4)]

поддерживают очаг описторхоза [37]. В реках наибольшую эпизоотологическую нагрузку по описторхозу несут семь видов рыб: преимущественно язь и елец, значительно в меньшей степени плотва, гольян, пескарь, лещ и уклейка. Таким образом, пескарь вовлечен в циркуляцию описторхоза в р. Томь и ее притоках, в разных водоемах зараженность рыб может варьировать.

Заключение

В бассейне р. Томь сибирский пескарь *Gobio sibiricus* многочислен, обитает в протоках и курьях, предпочитает места с быстрым течением и каменисто-галечными грунтами. В Томи размерно-возрастной ряд рыб шире, чем в притоках. В питании рыб преобладают организмы бентоса реофильного спектра (личинки поденок и ручейников). Нерест на каменистом субстрате растянут с начала июля по конец июля. Плодовитость у рыб высокая, с увеличением размеров и возраста закономерно возрастает. Пескарь – представитель семейства карповых рыб и, соответственно, восприимчив к заражённости метацеркариями *O. felineus*, однако его обитание в водоемах с каменисто-галечными грунтами и поздний нерест в значительной степени ограничивают возможность заражения. Наши исследования показали, что пескарь является носителем метацеркарий *Opisthorchis felineus* в бассейне реки Томь, средняя экстенсивность инвазии невысока (8,3%). В разные годы и в разных водотоках зараженность рыб может варьировать.

Список источников

1. Мартынова А.Л., Васильева Е.Д. Проблемы таксономии и диагностики пескарей рода *Gobio* (Cyprinidae) Урала, Сибири, Казахстана и бассейна реки Амур // Вопросы ихтиологии. 2021. Т. 61, № 5. С. 529–544.
2. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2017 году : Государственный доклад. М. : Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2018. 268 с.
3. Simakova A.V., Chitnis N., Babkina I.B. Fedorova O.S., Fedotova M.M., Babkin A.M., Khodkevich N.E. Abundance of *Opisthorchis felineus* Metacercariae in cyprinid fish in the middle Ob River basin (Tomsk region, Russia) // Food and Waterborne Parasitology. 2021. Vol. 22. e00113. doi: 10.1016/j.fawpar.2021.e00113
4. Петлина А.П., Юракова Т.В., Залозный Н.А., Бочарова Т.А., Лукьянцева Л.В., Брусьянина Т.А., Шаманцова Н.А., Поджунас С.С. Гидробионты малых водотоков нижней Томи и их значение в оценке экологической ситуации водоемов // Сибирский экологический журнал. 2000. Т. 3. С. 323–335.
5. Петлина А.П., Бабкина И.Б., Юракова Т.В. Особенности популяционной структуры сибирского пескаря из бассейна Нижней Томи // Рыбоводство и рыбное хозяйство. 2012. № 7. С. 7–14.
6. Lim J.H. Liver flukes: The malady neglected // Korean Journal of Radiology. 2011. Vol. 12 (3). PP. 269–279. doi: 10.3348/kjr.2011.12.3.269
7. Thunyaharn N., Promthet S., Wiangnon S., Suwanrungruang K., Kamsa-ard S. Survival of cholangiocarcinoma patients in northeastern Thailand after supportive treatment //

- Asian Pacific Journal of Cancer Prevention. 2013. Vol. 14 (11). PP. 7029–7032. doi: 10.7314/apjcp.2012.14.11.7029
8. Fedorova O.S., Kovshirina Y.V., Kovshirina A.E., Fedotova M.M., Deev I.A., Petrovskii F.I., Filimonov A.V., Dmitrieva A.I., Kudyakov L.A., Saltykova I.V., Mikhailov E.V., Odermatt P., Ogorodova L.M. Analysis of the morbidity of *Opisthorchis felinus* infection and malignant neoplasms of the hepatobiliary system in the Russian Federation // Bulletin of Siberian Medicine. 2016. Vol. 15 (5). PP. 147–158. doi: 10.20538/1682-0363-2016-5
 9. Fedorova O.S., Kovshirina Y.V., Kovshirina A.E., Fedotova M.M., Deev I.A., Petrovskii F.I., Filimonov A.V., Dmitrieva A.I., Kudyakov L.A., Saltykova I.V., Odermatt P., Ogorodova L.M. *Opisthorchis felinus* infection and cholangiocarcinoma in the Russian Federation: A review of medical statistics // Parasitology International. 2017. Vol. 66 (4). PP. 365–371. doi: 10.1016/j.parint.2016.07.010
 10. Haswell-Elkins M.R., Levri E. Food-borne trematodes. Chapter 81. In Manson's Tropical Diseases / ed. by C.C. Cook, A. Zumla. 21st ed. London : W.B. Saunders Ltd., 2003. PP. 1471–1486.
 11. Control of foodborne trematode infections. Report of a WHO Study Group // World Health Organization Technical Report Series. 1995. Vol. 849. PP. 1–157.
 12. Marcos L.A., Terashima A., Gotuzzo E. Update on hepatobiliary flukes: Fascioliasis, opisthorchiasis and clonorchiasis // Current Opinion in Infectious Diseases. 2008. Vol. 21 (5). PP. 523–530. doi: 10.1097/QCO.0b013e32830f9818
 13. Mordvinov V.A., Yurlova N.I., Ogorodova L.M., Katokhin A.V. *Opisthorchis felinus* and *Metorchis bilis* are the main agents of liver fluke infection of humans in Russia // Parasitology International. 2012. Vol. 61 (1). PP. 25–31. doi: 10.1016/j.parint.2011.07.021
 14. Ogorodova L.M., Fedorova O.S., Sripa B., Mordvinov V.A., Katokhin A.V., Keiser J., Odermatt P., Brindley P.J., Mayboroda O.A., Velavan T.P., Freidin M.B., Sazonov A.E., Saltykova I.V., Pakharukova M.Y., Kovshirina Y.V., Kaloulis K., Krylova O.Y., Yazdanbakhsh M. Opisthorchiasis: An overlooked danger // PLoS Neglected Tropical Diseases. 2015. Vol. 9 (4). e0003563. doi: 10.1371/journal.pntd.0003563
 15. Petney T.N., Andrews R.H., Saijuntha W., Wenz-Mücke A., Sithithaworn P. The zoonotic, fish-borne liver flukes *Clonorchis sinensis*, *Opisthorchis felinus* and *Opisthorchis viverrine* // International Journal for Parasitology. 2013. Vol. 43 (12–13). PP. 1031–1046. doi: 10.1016/j.ijpara.2013.07.007
 16. Keiser J., Utzinger J. Emerging foodborne trematodiasis // Emerging Infectious Diseases. 2005. Vol. 11 (10). PP. 1507–1514. doi: 10.3201/eid1110.050614
 17. Keiser J., Utzinger J. Food-borne trematodiasis // Clinical Microbiology Reviews. 2009. Vol. 22 (3). PP. 466–483. doi: 10.1128/CMR.00012-09
 18. Бочарова Т.А. Возбудитель описторхоза и другие мышечные паразиты карповых рыб бассейна нижней Томи. Томск : Изд-во Томского государственного университета, 2007. 66 с.
 19. Бонина О.М., Зуйков С.А. Эпидемически и эпизоотически опасные виды рыб в отношении описторхозов в Новосибирской области // Российский паразитологический журнал. 2022. Т. 16, № 2. С. 147–153. doi: 10.31016/1998-8435-2022-16-2-147-153
 20. Ткачева Т.Г., Осипов А.С. Сравнительный анализ зараженности описторхидами карповых рыб из малых рек юга Тюменской области // Инновационное развитие АПК Северного Зауралья : Сборник материалов региональной научно-практической конференции молодых ученых (Тюмень, 18 апреля 2013 г.). Тюмень: Печатный цех «Ризограф», 2013. С. 347–351.
 21. Крылова Е.Н., Власов С.О., Катохин А.В., Кириллов В.В. Оценка зараженности карповых рыб метацеркариями описторхиса в водных объектах бассейна Верхней Оби // Мир науки, культуры, образования. 2014. № 6 (49). С. 559–563.

22. Карпенко С.В., Чечулин А.И., Юрлова Н.И., Сербина Е.А., Водяницкая С.Н., Кривопапов А.В., Федоров К.П. Характеристика очагов описторхоза юга Западной Сибири // Сибирский экологический журнал. 2008. Т. 15, № 5. С. 675–680.
23. Иоганзен Б.Г., Попов М.А., Якубова А.И. Водоемы окрестностей г. Томска // Тр. Томск. гос. ун-та. 1951. Т. 115. С. 121–190.
24. Правдин И.Ф. Руководство по изучению рыб. М.: Пищевая промышленность, 1966. 376 с.
25. Романов В.И., Петлина А.П., Бабкина И.Б. Методы исследования пресноводных рыб Сибири: Учебное пособие. Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та, 2012. 252 с.
26. Методическое пособие по изучению питания и пищевых отношений рыб в естественных условиях / под ред. Е.В. Боруцкого. М.: Наука, 1974. 254 с.
27. Бауер О.Н., Мусселиус В.А., Стрельников Ю.А. Болезни прудовых рыб. М.: Легкая пищевая промышленность, 1981. 320 с.
28. Бээр С.А. Биология возбудителя описторхоза. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2005. 336 с.
29. Определитель паразитов пресноводных рыб фауны СССР. Паразитические многоклеточные / под ред. О.Н. Бауера. Л.: Наука, 1987. Т. 3, Ч. 2. 583 с.
30. Воронин В.Н., Кудрявцева Т.М., Кузнецова Е.В., Дудин А.С. Патент № 2018144035. Способ прижизненной дифференциальной диагностики метацеркарий описторхид: пат. 2708990 Рос. Федерация: МПК A61D 99/00 (2006/01) / патентообладатель ФГБОУ ВО СПбГАВМ. № 2018144035; заявл. 12.12.18; опубл. 13.12.19, Бюл. № 35. 2019.
31. Agresti A. Categorical data analysis. 2nd ed. New York: Wiley, 2002. 710 p.
32. Fisher R.A. The logic of inductive inference // Journal of the Royal Statistical Society. 1935. Vol. 98 (1). PP. 39–82. doi: 10.2307/2342435
33. Statistical models in S / ed. by T.J. Hastie. New York: Routledge, 1992. 624 p.
34. Yandell B.S. Practical data analysis for designed experiments. London; New York: Chapman & Hall, 1997. 440 p. doi: 10.1201/9780203742563
35. Wickham H. ggplot2: Elegant graphics for data analysis. New York: Springer-Verlag, 2016. 260 p.
36. R Core TeamR: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2020 [Electronic resource]. Available at: <https://www.R-project.org/> (accessed 06.05.2025).
37. Симакова А.В., Бабкина И.Б., Бабкин А.М., Полторацкая Н.В., Полторацкая Т.Н., Шихин А.В. Современная ситуация по описторхозу в Томской области // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2024. № 67. С. 152–169. doi: 10.17223/19988591/67/9

References

1. Martynova AL, Vasil'eva ED. Problems of taxonomy and diagnostics of gudgeons of the Genus *Gobio* (Cyprinidae) from Ural, Siberia, Kazakhstan and the Amur River Basin. *Journal of Ichthyology*. 2021;61:685-700. doi: 10.1134/S0032945221050106
2. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2017 году: Государственный доклад [On the state of sanitary and epidemiological well-being of the population in the Russian Federation in 2017: State report]. Moscow: Federal'naya sluzhba po nadzoru v sfere zashchity prav potrebitel'ey i blagopoluchiya cheloveka; 2018. 268 p. In Russian
3. Simakova AV, Chitnis N, Babkina IB, Fedorova OS, Fedotova MM, Babkin AM, Khodkevich NE. Abundance of *Opisthorchis felineus* Metacercariae in cyprinid fish in the middle Ob River basin (Tomsk region, Russia). *Food and Waterborne Parasitology*. 2021;22:e00113. doi: 10.1016/j.fawpar.2021.e00113
4. Petlina AP, Yurakova TV, Zalozny NA, Bocharova TA, Lukyantseva LV, Brusyanina TA, Shamantsova NA, Podjunas SS. Hydrobionts of some small rivers of the Lower

- Tom and their importance for evaluation of ecological situation of water bodies. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal = Contemporary Problems of Ecology*. 2000;3:323-335. In Russian, English summary
5. Petlina AP, Babkina IB, Yurakova TV. Features of population frame the Siberian gudgeon from basin of the inferior Tom'. *Rybovodstvo i rybnoe khozyaystvo = Fish Breeding and Fisheries*. 2012;7:7-14. In Russian, English summary
 6. Lim JH. Liver flukes: The malady neglected. *Korean Journal of Radiology*. 2011;12(3): 269-279. doi: 10.3348/kjr.2011.12.3.269
 7. Thunyaharn N, Promthet S, Wiangnon S, Suwanrungruang K, Kamsa-ard S. Survival of cholangiocarcinoma patients in northeastern Thailand after supportive treatment. *Asian Pacific Journal of Cancer Prevention*. 2013;14(11):7029-7032. doi: 10.7314/apjcp.2012.14.11.7029
 8. Fedorova OS, Kovshirina YV, Kovshirina AE, Fedotova MM, Deev IA, Petrovskii FI, Filimonov AV, Dmitrieva AI, Kudyakov LA, Saltykova IV, Mikhalev EV, Odermatt P, Ogorodova LM. Analysis of the morbidity of *Opisthorchis felinus* infection and malignant neoplasms of the hepatobiliary system in the Russian Federation. *Bulletin of Siberian Medicine*. 2016;15(5):147-158. doi: 10.20538/1682-0363-2016-5
 9. Fedorova OS, Kovshirina YV, Kovshirina AE, Fedotova MM, Deev IA, Petrovskiy FI, Filimonov AV, Dmitrieva AI, Kudyakov LA, Saltykova IV, Odermatt P, Ogorodova LM. *Opisthorchis felinus* infection and cholangiocarcinoma in the Russian Federation: A review of medical statistics. *Parasitology International*. 2017;66(4):365-371. doi: 10.1016/j.parint.2016.07.010
 10. Haswell-Elkins MR, Levri E. Food-borne trematodes. Chapter 81. In: *Manson's Tropical Diseases*. Cook CC, Zumla A, editors. 21st ed. London: W.B. Saunders Ltd.; 2003. pp. 1471-1486.
 11. Control of foodborne trematode infections. Report of a WHO Study Group. *World Health Organization technical report series*. 1995;849:1-157.
 12. Marcos LA, Terashima A, Gotuzzo E. Update on hepatobiliary flukes: Fascioliasis, opisthorchiasis and clonorchiasis. *Current Opinion in Infectious Diseases*. 2008;21(5):523-530. doi: 10.1097/QCO.0b013e32830f9818
 13. Mordvinov VA, Yurlova NI, Ogorodova LM, Katokhin AV. *Opisthorchis felinus* and *Metorchis bilis* are the main agents of liver fluke infection of humans in Russia. *Parasitology International*. 2012;61(1):25-31. doi: 10.1016/j.parint.2011.07.021
 14. Ogorodova LM, Fedorova OS, Sriya B, Mordvinov VA, Katokhin AV, Keiser J, Odermatt P, Brindley PJ, Mayboroda OA, Velavan TP, Freidin MB, Sazonov AE, Saltykova IV, Pakharukova MY, Kovshirina YV, Kaloulis K, Krylova OY, Yazdanbakhsh M. Opisthorchiasis: An overlooked danger. *PLoS Neglected Tropical Diseases*. 2015;9(4): e0003563. doi: 10.1371/journal.pntd.0003563
 15. Petney TN, Andrews RH, Saijuntha W, Wenz-Mücke A, Sithithaworn P. The zoonotic, fish-borne liver flukes *Clonorchis sinensis*, *Opisthorchis felinus* and *Opisthorchis viverrine*. *International Journal for Parasitology*. 2013;43(12-13):1031-1046. doi: 10.1016/j.ijpara.2013.07.007
 16. Keiser J, Utzinger J. Emerging foodborne trematodiasis. *Emerging Infectious Diseases*. 2005;11(10):1507-1514. doi: 10.3201/eid1110.050614
 17. Keiser J, Utzinger J. Food-borne trematodiasis. *Clinical Microbiology Reviews*. 2009; 22(3):466-483. doi: 10.1128/CMR.00012-09
 18. Bocharova TA. Vozбудitel' opisthorkhoza i drugie myshechnye parazity karpovykh ryb basseyna nizhney Tomi [The causative agent of opisthorchiasis and other muscular parasites of carp fish in the lower Tom basin]. Tomsk: Tomsk State University Publ.; 2007. 66 p. In Russian
 19. Bonina OM, Zuykov SA. Epidemically and epizootically dangerous fish species for opisthorchosis in the Novosibirsk Region. *Rossiyskiy parazitologicheskiy zhurnal = Russian Journal of Parasitology*. 2022;16(2):147-153. In Russian, English summary. doi: 10.31016/1998-8435-2022-16-2-147-153.

20. Tkacheva TG, Osipov AS. Sravnitel'nyy analiz zarazhennosti opistorkhidami karpovykh ryb iz malykh rek yuga Tyumenskoy oblasti [Comparative analysis of opisthorchid infection of carp fish from small rivers in the south of the Tyumen region]. In: *Innovatsionnoe razvitiye APK Severnogo Zaural'ya*. Sbornik materialov regional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh [Collection of materials of the regional scientific and practical conference of young scientists (Tyumen', Russia, 18 April, 2013)]. Tyumen': Pechatnyy tsekh "Rizograf"; 2013. pp. 347-351. In Russian
21. Krylova YeN, Vlasov SO, Katokhin AV, Kirillov VV. Valuation of infection of cyprinid fishes by the metacercaries of opisthorchis in water bodies in the basin of the Upper Ob. *Mir nauki, kultury, obrazovaniya*. 2014;6(49):559-563. In Russian, English summary
22. Karpenko SV, Chechulin AI, Yurlova NI, Serbina EA, Vodyanitskaya SN, Krivopavlov AV, Fedorov KP. Characteristics of opisthorchosis nidus in the South of Western Siberia. *Sibirskiy Ekologicheskiy Zhurnal = Contemporary Problems of Ecology*. 2008;15(5):675-680. In Russian, English summary
23. Ioganzen BG, Popov MA, Yakubova AI. Vodoemy okrestnostey g. Tomsk [Water bodies in the vicinity of Tomsk]. *Trudy Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*. 1951; 115:121-190. In Russian
24. Pravdin IF. Rukovodstvo po izucheniyu ryb [Guide to the study of fish]. Moscow: Pishcheyaya promyshlennost'; 1966. 376 p. In Russian
25. Romanov VI, Petlina AP, Babkina IB. Metody issledovaniya presnovodnykh ryb Sibiri: Uchebnoe posobie [Methods of research of freshwater fishes of Siberia: A textbook]. Tomsk: Tomsk State University Publ.; 2012. 252 p. In Russian
26. Metodicheskoe posobie po izucheniyu pitaniya i pishchevykh otnosheniy ryb v estestvennykh usloviyakh [Methodological manual for studying the nutrition and food relationships of fish in natural conditions]. Borutskiy EV, editor. Moscow: Nauka Publ.; 1974. 254 p. In Russian
27. Bauer ON, Musselius VA, Strel'nikov YuA. Bolezni prudovykh ryb [Pond fish diseases]. Moscow: Legkaya pishcheyaya promyshlennost'; 1981. 320 p. In Russian
28. Beer SA. Biologiya vzbuditelya opistorkhoza [Biology of the opisthorchiasis pathogen]. Moscow: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK; 2005. 336 p. In Russian
29. Opredelitel' parazitov presnovodnykh ryb fauny SSSR. Paraziticheskie mnogokletochnye [Identifier of parasites of freshwater fish of the USSR fauna. Parasitic multicellular]. Bauer ON, editor. Leningrad: Nauka Publ.; 1987. Vol. 3, Ch. 2. 583 p. In Russian
30. Voronin VN, Kudryavtseva TM, Kuznetsova EV, Dudin AS. Patent № 2018144035. Method of life-time differential diagnostics of metacercariae of opisthorchid flukes: pat. 2708990 Ros. Federatsiya: MPK A61D 99/00 (2006/.01) / patentoobladatel' FGBOU VO SPbGAVM. № 2018144035; zayavl. 12.12.18; opubl. 13.12.19, Byul. 35. 2019. In Russian, English summary
31. Agresti A. Categorical Data Analysis. 2nd ed. New York: Wiley; 2002. 710 p.
32. Fisher RA. The logic of inductive inference. *Journal of the Royal Statistical Society*. 1935;98(1):39-82. doi: 10.2307/2342435
33. Statistical Models in S. Hastie TJ, editor. New York: Routledge; 1992. 624 p. doi: 10.1201/9780203738535
34. Yandell BS. Practical Data Analysis for Designed Experiments. London; New York: Chapman & Hall; 1997. 440 p. doi: 10.1201/9780203742563
35. Wickham H. ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. New York: Springer-Verlag; 2016. 260 p.
36. R Core Team. 2020. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria [Electronic resource]. Available at: <https://www.R-project.org/> (accessed 06.05.2025).
37. Simakova AV, Babkina IB, Babkin AM, Poltoratskaya NV, Poltoratskaya TN, Shikhin AV. The current situation of opisthorchiasis in the Tomsk region. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2024;67:152-169. doi: 10.17223/19988591/67/9

Информация об авторах:

Бабкина Ирина Борисовна, канд. биол. наук, доцент кафедры ихтиологии и гидро-биологии, Биологический институт, Национальный исследовательский Томский государственный университет (Томск, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3302-6819>

E-mail: bibsphera@gmail.com

Симакова Анастасия Викторовна, д-р биол. наук, доцент, зав. кафедрой зоологии беспозвоночных, Биологический институт, Национальный исследовательский Томский государственный университет (Томск, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0906-9496>

E-mail: omikronlab@yandex.ru

Бабкин Александр Михайлович, канд. биол. наук, доцент кафедры ихтиологии и гидробиологии, Биологический институт, Национальный исследовательский Томский государственный университет (Томск, Россия).

E-mail: babkin.alex1983@yandex.ru

Соловьев Марк Ясон Александрович, бакалавр кафедры зоологии беспозвоночных, Биологический институт, Национальный исследовательский Томский государственный университет (Томск, Россия).

E-mail: scolopid@gmail.com

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Irina B. Babkina, Cand. Sci. (Biol.), Assoc. Prof. of the Department of Ichthyology and Hydrobiology, Biological Institute, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3302-6819>

E-mail: bibsphera@gmail.com

Anastasia V. Simakova, Dr. Sci. (Biol.), Assoc. Prof., Head of the Department of Invertebrate Zoology, Biological Institute, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0906-9496>

E-mail: omikronlab@yandex.ru

Aleksander M. Babkin, Cand. Sci. (Biol.), Assoc. Prof. of the Department of Ichthyology and Hydrobiology, Biological Institute, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation).

E-mail: babkin.alex1983@yandex.ru

Mark Yason A. Soloviev, Bachelor's student of the Department of Invertebrate Zoology, Biological Institute, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation).

E-mail: scolopid@gmail.com

The Authors declare no conflict of interest.

*Статья поступила в редакцию 16.06.2025;
одобрена после рецензирования 11.08.2025; принята к публикации 04.09.2025*

*The article was submitted 16.06.2025;
approved after reviewing 11.08.2025; accepted for publication 04.09.2025*

Научная статья

УДК 591.156.1 [597.95(591.8:591.477)]

doi: 10.17223/19988591/71/8

Морфологические приспособления кожи уссурийского когтистого тритона *Onychodactylus fischeri* и сибирского углозуба *Salamandrella keyserlingii* (Amphibia: Caudata, Hynobiidae) к водной среде

София Сергеевна Евсеева¹, Вадим Вадимович Ярцев²,
Ирина Владимировна Маслова³, Дарья Андреевна Рогашевская⁴

^{1, 2} Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Томск, Россия

² Сибирский государственный медицинский университет, Томск, Россия

^{3, 4} Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты
Восточной Азии ДВО РАН, Владивосток, Россия

¹ <https://orcid.org/0000-0001-7789-7424>, vadim_yartsev@mail.ru

² <https://orcid.org/0000-0002-7644-8501>, sofiaewseewa@gmail.com

³ <https://orcid.org/0000-0002-6240-3812>, irinarana@yandex.ru

⁴ <https://orcid.org/0009-0004-1820-1385>, daria_1844@mail.ru

Аннотация. Изучены гистологические особенности кожи спины (КС), горлового мешка (КГМ), хвоста (КХ), брюха (КБ), голени (КГ) и клоаки (КК) половозрелых самцов и самок сибирского углозуба (*Salamandrella keyserlingii*) водного морфотипа и уссурийского когтистого тритона (*Onychodactylus fischeri*). С помощью гистологических и статистических методик оценены видовые различия по относительным площадям эпидермиса, гранулярных и слизистых желёз, элементов кориума. Кожа уссурийский когтистого тритона отличается плотным ороговевшим эпидермисом и многочисленными капиллярами в кориуме, вдающимися в эпидермис. Самцы *S. keyserlingii* отличаются от таковых *O. fischeri* большей относительной площадью эпидермиса дорсальной части КХ, гранулярных желёз КГМ, КБ, КГ и вентрального участка КХ, слизистых желёз КГ, компактного слоя дорсальной части КХ, рыхлой соединительной ткани КС, КХ, КК и КБ, но меньшей относительной площадью эпидермиса вентральной части КХ, КК и КГ, гранулярных желёз дорсальной части КХ, слизистых желёз КГ, КС, вентральной части КХ, КБ и компактного слоя в вентральной части КХ. Самки *S. keyserlingii* по сравнению с таковыми *O. fischeri* характеризуются увеличенными площадями эпидермиса дорсального участка КХ, гранулярных желёз КБ и вентрального участка КХ, слизистых желёз КГ, компактного слоя кориума дорсального участка хвоста, рыхлой соединительной ткани КХ и КК, но меньшей площадью эпидермиса КБ и вентральной части КХ, гранулярных желёз дорсальной части КХ и КК, слизистых желёз в КГ и вентральной части КХ, компактного слоя на всех участках кожи, кроме дорсальной КХ. Наблюдаемые различия связаны с разной степенью адаптации данных видов к водной среде.

Ключевые слова: амфибии, хвостатые земноводные, кожный покров, гистология, видовые различия

Источник финансирования: работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, номер государственной регистрации темы № 124012200182-1.

Для цитирования: Евсеева С.С., Ярцев В.В., Маслова И.В., Рогашевская Д.А. Морфологические приспособления кожи уссурийского когтистого тритона *Onychodactylus fischeri* и сибирского углозуба *Salamandrella keyserlingii* (Amphibia: Caudata, Hynobiidae) к водной среде // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2025. № 71. С. 138–155. doi: 10.17223/19988591/71/8

Original article

doi: 10.17223/19988591/71/8

Morphological adaptations of the skin of *Onychodactylus fischeri* and *Salamandrella keyserlingii* (Amphibia: Caudata, Hynobiidae) to the aquatic environment

Sofiya S. Evseeva¹, Vadim V. Yartsev², Irina V. Maslova³,
Daria A. Rogashevskaya⁴

^{1, 2} National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

² Siberian State Medical University, Tomsk, Russian Federation

^{3, 4} Federal Scientific Centre of the East Asia Terrestrial Biodiversity,
FEB RAS, Vladivostok, Russian Federation

¹ <https://orcid.org/0000-0001-7789-7424>, vadim_yartsev@mail.ru

² <https://orcid.org/0000-0002-7644-8501>, sofiaewseeva@gmail.com

³ <https://orcid.org/0000-0002-6240-3812>, irinarana@yandex.ru

⁴ <https://orcid.org/0009-0004-1820-1385>, daria_1844@mail.ru

Summary. To understand the role of skin in the formation of morphological adaptations in amphibians to different environmental conditions, we studied histological features of the skin from throat (TS), back (BS), dorsal part of the tail (DPTS), ventral part of the tail (VPTS), abdomen (AS), cloacal (CS), and shin (ShS) in *Salamandrella keyserlingii* males and females of the aquatic morphotypes and *Onychodactylus fischeri*. These hynobiid species have different ecological preferences: *S. keyserlingii* is a limnophylic salamander, while *O. fischeri* is a reophylic one. Using histological and statistical methods, interspecific differences in the relative areas of epidermis, strata compactum and spongiosum, connective tissue in the whole, granular and mucous glands were measured (See Figs. 1, 2).

Males of *S. keyserlingii*, in comparison with those of *O. fischeri*, have larger areas of the epidermis in DPTS, the granular glands in TS, AS, ShS, VPTS, the mucous glands in DPTS, the stratum spongiosum in BS, DPTS, VPTS, CS, AS, but smaller areas of the epidermis in VPTS, CS, ShS, the granular glands in DPTS, the mucous glands in TS, AS, VPTS, the stratum compactum in VPTS (See Table 1). Females of *S. keyserlingii*, in comparison with those of *O. fischeri*, have larger areas of the epidermis in DPTS, the granular glands in AS, VPTS, the mucous glands in TS, the stratum compactum in DPTS, the stratum spongiosum in DPTS, VPTS, CS, but smaller areas of the epidermis in AS, VPTS, the granular glands in DPTS, CS, the mucous glands in TS, VPTS, the stratum compactum in all studied skin areas except for DPTS and VPTS (See Table 2). The skin peculiarities of these species are the result of different levels of adaptation to the aquatic environment: *S. keyserlingii* changes aquatic habitat (short breeding season) to the terrestrial one during the year, but *O. fischeri* is constantly connected with the aquatic environment.

The article contains 2 Figures, 2 Tables, 31 References.

Keywords: amphibians, salamanders, integument, histology, species differences

Fundings: the research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, theme No. 124012200182-1.

For citation: Evseeva SS, Yartsev VV, Maslova IV, Rogashevskaya DA. Morphological adaptations of the skin of *Onychodactylus fischeri* and *Salamandrella keyserlingii* (Amphibia: Caudata, Hynobiidae) to the aquatic environment. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya* = *Tomsk State University Journal of Biology*. 2025;71:138-155. doi: 10.17223/19988591/71/8

Введение

Кожа земноводных – сложный орган, выполняющий разнообразные функции: защитную, дыхательную респираторную, транспортную и другие [1, 2]. Особенности её организации могут варьировать у разных видов, что связано с адаптацией к условиям обитания. Это проявляется в межвидовых отличиях по текстуре кожи, распределению кровеносных сосудов, организации эпителия, размерам и количеству гранулярных и слизистых желёз, а также составу выделяемого ими секрета [3–6].

Семейство углозубые (Hynobiidae) включает примитивных хвостатых земноводных с различной экологической специализацией [7], что позволяет использовать представителей данной группы для изучения общих закономерностей адаптивных изменений кожи земноводных к различным условиям среды. Среди углозубых межвидовая изменчивость мерных характеристик кожи взрослых животных изучена на примере двух видов: реофильного постоянно водного сычуаньского углозуба *Batrachuperus pinchonii* David, 1872 и лимнофильного китайского углозуба *Hynobius chinensis* Günther, 1889, находящегося в воде только в период размножения [8]. Выявлено, что кожа *B. pinchonii* богата кровеносными капиллярами и отличается толстым эпидермисом, а *H. chinensis* – мощным кориумом, крупными гранулярными и слизистыми железами. Все обнаруженные особенности покровов данных видов авторы связали с адаптацией к среде обитания. Однако сравнение проведено только на самцах, при этом особенности водного и наземного морфотипов *H. chinensis* не учитывались.

Более полное понимание специфики адаптации кожи углозубых к условиям среды обитания возможно при сравнении видов с разной степенью адаптации к водному образу жизни с учётом пола и морфотипа (при наличии бифазного годового цикла). В нашей работе использованы виды углозубых с выраженными экологическими отличиями – сибирский углозуб *Salamandrella keyserlingii* Dybowski, 1870 и уссурийский когтистый тритон *Onychodactylus fischeri* Boulenger, 1886. *S. keyserlingii* – лимнофильный вид, находящийся в водоёме только короткое время в период размножения, в то время как *O. fischeri* – высоко специализированный реофильный полуводный вид [9].

Цель работы – выявить морфологические приспособления кожи самцов и самок уссурийского когтистого тритона и сибирского углозуба водного морфотипа путём сравнения этих видов, имеющих разные экологические особенности.

Материалы и методы

Материалом для исследования послужили половозрелые самцы ($n = 5$, $L. = 55,2\text{--}60,3$ мм) и самки ($n = 5$, $L. = 52,1\text{--}66,0$ мм) *S. keyserlingii* водного морфотипа из коллекции кафедры зоологии позвоночных и экологии НИ ТГУ, использованные ранее в исследованиях сезонной изменчивости гистологических параметров кожи представителей обоих полов данного вида [10, 11]. Особи *S. keyserlingii* отловлены в окрестностях г. Томска (юго-восток Западной Сибири) в мае 2012 г. и апреле 2014 г. Сроки отловов соответствовали периоду размножения для популяции данного вида [12]. В работе использованы экземпляры *S. keyserlingii* только с признаками водного морфотипа.

Экземпляры половозрелых самцов ($n = 4$, $L. = 69,3\text{--}81,1$ мм) и самок ($n = 4$, $L. = 70,3\text{--}91,1$ мм) *O. fischeri* взяты из Биоресурсной коллекции Федерального научного центра биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН (регистрационный номер 2797657). Они получены в ходе полевых работ на юге Дальнего Востока в июле 2019 г. в Партизанском и Чугуевском районах Приморского края. Отлов особей данного вида проводился по разрешению Росприроднадзора РФ (№ АА-10-03-32/17476 от 03.07.2019) ручным способом в естественных укрытиях, расположенных в водоёме или непосредственной близости от него. Из всех встреченных особей когтистого тритона изымали только тех, которые по размерам тела и морфологическим признакам соответствовали половозрелым особям. Отловленных животных умерщвляли *in situ* инъекцией 2% лидокаина в брюшную полость. Все манипуляции с тритонами (отлов, транспортировка, умерщвление) проведены в соответствии с требованиями гуманного обращения с животными и Европейской конвенцией о защите позвоночных животных, используемых для экспериментов или в иных научных целях, что подтверждено заключением Комиссии по биоэтике ТГУ № 28 от 14.06.2019.

У экземпляров обоих видов, фиксированных в 10% кислотом (*S. keyserlingii*) и нейтральном (*O. fischeri*) растворах формалина, вырезали участки кожи размером $3 \times 3\text{--}10$ мм с середины спины, горла, брюха, голени, правой стороны хвоста и клоаки целиком. Гистологическую подготовку проб проводили по классической схеме [13, 14]: материал последовательно обезжизивали в 70%, 96% и абсолютном этаноле от 4 до 12 ч для каждой концентрации, просветляли в бутаноле (не менее 8 ч) и пропитывали в парафине (8 ч) с последующей заливкой в блок. Срезы толщиной 10 мкм изготавливали на ротационном микротоме RMD-3000 (MTPoint, Россия). От каждого образца получали от 1 до 5 стёкол со срезами. Всего изготовлено 300 микропрепаратов. Срезы для обзорных методов окрашивания монтировали на стекло с помощью белок-глицериновой смеси, для гистохимических методов окрашивания использовали стекла класса SuperFrost (Menzel, Германия).

Микропрепараты кожи для обзорной микроскопии окрашивали модифицированным азаном [13, 14]. Гистохимическое выявление углеводов проводили ШИК-реакцией, кислых мукополисахаридов – альциановым

синим (рН = 2,5), белков – синим Кумасси [13, 14]. Микрофотоснимки изготавливали с помощью микроскопа Axio Lab A1 с камерой AxioCam ERc 5s и программного обеспечения ZEN 2012 (Carl Zeiss, Германия).

Обзорную микроскопию проводили на всех срезах серии для выявления качественных особенностей микроструктуры кожи, а измерения площадей структур кожи – по микрофотографиям случайно отобранных из лучших по качеству срезов в начале и в конце серии. Измеряли (мкм²): площадь исследуемого участка среза (ПИУ), эпидермиса (ПЭ), компактного слоя дермы (ПКС), гранулярных (ПГЖ) и слизистых желёз (ПСЖ) в его пределах. На основе данных измерений рассчитывали площадь рыхлой соединительной ткани (ПРСТ) путём вычитания из ПИУ всех других измерений – ПЭ, ПКС, ПГЖ, ПСЖ. Все абсолютные значения показателей (мкм²) переводили в относительные путём их деления на площадь исследуемого участка среза.

Статистический анализ проводили с использованием программы Statistica 8.0 (StatSoft, США). Рассчитывали следующие описательные статистики: среднюю ($\bar{x}$), минимум (max) и максимум (min), стандартное отклонение (σ), стандартную ошибку средней ($m_{\bar{x}}$), коэффициент вариации (Cv). Ввиду использования малых выборок учитывали требования, необходимые для работы с такими данными [15–18], и подбирали соответствующие статистические методики: для оценки характера распределения использовали критерий Шапиро–Уилка, в зависимости от характера распределения – критерии Стьюдента (t_{st}) или Манна–Уитни (U-test) для парных сравнений и однофакторный дисперсионный анализ (One-way ANOVA) или критерий Краскела–Уоллиса (Kruskal–Wallis test) – для сравнения трёх и более выборок.

Результаты исследования

Общая структура кожи. Структура кожи самцов и самок *S. keyserlingii* и *O. fischeri* схожа. У *O. fischeri* она имеет более плотный ороговевающий эпидермис и более многочисленные капилляры в кориуме, вдающиеся в эпидермис (рис. 1). Напротив, у *S. keyserlingii* роговой слой эпидермиса не выражен, а капилляры встречаются реже и только в кориуме.

В коже обоих видов хорошо различимы многослойный эпидермис и кориум, в котором расположены железы, капилляры, нервные волокна и меланофоры (рис. 1). В кориуме выражены два слоя, отличающиеся по плотности и пространственной ориентации волокон: губчатый (*stratum spongiosum*) и компактный (*stratum compactum*). В субэпидермальном пространстве губчатого слоя хорошо визуализируется в виде тонкой яркой полоски его хромофильная область.

Кожные железы у *S. keyserlingii* и *O. fischeri* расположены в губчатом слое кориума и по характеру секрета делятся на слизистые и гранулярные. Все железы многоклеточные, моноптихимального типа, открываются на поверхность кожи. Слизистые железы небольшого размера и округлой формы. Они располагаются в непосредственной близости к эпидермису.

У обоих видов данные железы выделяют аморфный секрет, содержащий основные и кислые мукополисахариды, что подтверждается положительным окрашиванием альциановым синим и ШИК-реакцией, а также небольшое количество протеинов – слабая реакция с синим Кумасси (рис. 1а, 1b, 1d, 1e). Гранулярные железы округлые, крупные, располагаются по всему губчатому слою дермы. Независимо от вида, они характеризуются зернистым содержимым белковой природы, что выявляется положительной реакцией с синим Кумасси (рис. 1с, 1f).

Гистологические особенности строения кожи различных участков тела. Как было показано ранее, у самцов и самок *S. keyserlingii* водного морфотипа эпидермис кожи хвоста включает 5–8 клеточных слоёв, кожи горла и спины – 4–6 слоёв [10, 11], а в эпидермисе кожи голени нами выявлено

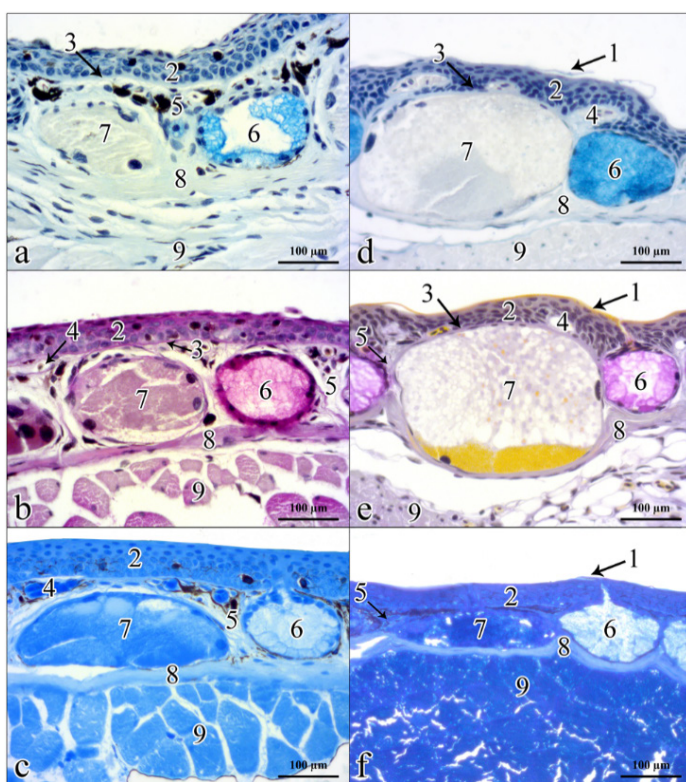


Рис. 1. Поперечные срезы кожи спины самок *Salamandrella keyserlingii* водного морфотипа (a–c) и *Onychodactylus fischeri* (d–f): 1 – роговой слой эпидермиса; 2 – эпидермис; 3 – хромофильная область губчатого слоя кориума; 4 – капилляр; 5 – губчатый слой дермы; 6 – слизистая железа; 7 – гранулярная железа; 8 – компактный слой кориума; 9 – мускулатура. Окрашивание: а, d – альциановый синий; b, e – ШИК реакция; c, f – синий Кумасси

[Fig. 1. Dermal skin of aquatic morphotype female of *Salamandrella keyserlingii* (a–c) and female of *Onychodactylus fischeri* (d–f): 1 - stratum corneum of epidermis; 2 - epidermis; 3 - chromophilic region of stratum spongiosum of dermis; 4 - capillary; 5 - stratum spongiosum of dermis; 6 - mucous gland; 7 - granular gland; 8 - stratum compactum of dermis; 9 - musculature. Staining: a, d - Alcian blue; b, e - PAS; c, f - Coomassie blue]

4–7 слоёв клеток, брюха и клоаки – 4–6. Для самцов и самок *O. fischeri* характерно 4–6 слоёв клеток в эпидермисе кожи хвоста, спины и голени, а для кожи горла, брюха и клоаки – 5–7 слоёв.

В коже хвоста, независимо от пола и вида, выделены два участка: дорсальный, характеризующийся крупными гранулярными железами неправильной формы, и вентральный – с более мелкими округлыми гранулярными железами (рис. 2c, 2d, 2e, 2f), в связи с чем все сравнения проводили отдельно для дорсальной и вентральной областей кожи хвоста. На других участках тела кожа однородна на всём протяжении и характеризуется округлыми железами независимо от типа.

Распределение и соотношение двух типов кожных желёз различается у исследуемых видов. В коже *S. keyserlingii* слизистые и гранулярные железы обнаружены на всех изученных участках кожи, но на вентральных (кожа горла и брюха) гранулярные железы встречаются реже (рис. 2a, 2b).

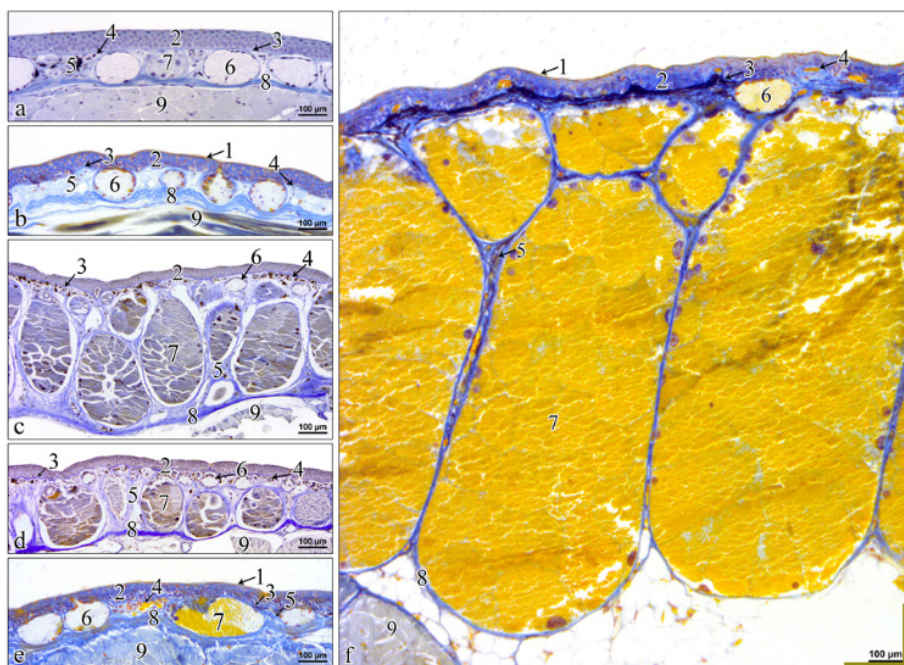


Рис. 2. Поперечные срезы кожи брюха (a, b), дорсальной (c, f) и вентральной (d, e) частей хвоста самок *Salamandrella keyserlingii* водного морфотипа (a, c, d) и *Onychodactylus fischeri* (b, e, f): 1 – роговой слой эпидермиса; 2 – эпидермис; 3 – хромофильная область губчатого слоя кориума; 4 – капилляр; 5 – губчатый слой дермы; 6 – слизистая железа; 7 – гранулярная железа; 8 – компактный слой кориума; 9 – мускулатура. Окрашивание: a, d – альциановый синий; b, e – ШИК реакция; c, f – синий Кумасси. Окрашивание: модифицированный азан

[Fig. 2. Transverse sections of the abdomen (a, b), dorsal (c, f) and ventral (d, e) parts of the tail skin of aquatic morphotype female of *Salamandrella keyserlingii* (a, c, d) and female of *Onychodactylus fischeri* (b, e, f): 1 - stratum corneum of epidermis; 2 - epidermis; 3 - chromophilic region of stratum spongiosum of dermis; 4 - capillary; 5 - stratum spongiosum of dermis; 6 - mucous gland; 7 - granular gland; 8 - stratum compactum of dermis; 9 - musculature. Modified azan staining]

У *O. fischeri* два типа желёз выявлены везде, за исключением кожи брюха, где обнаружены только слизистые железы.

Наличие различий в структурной организации кожи в зависимости от участка тела подтверждено результатами предварительных статистических сравнений. Кожа с разных частей тела у самцов и самок *S. keyserlingii* и *O. fischeri* отличаются по всем параметрам ($p < 0,05$), поэтому дальнейшие сравнения проводили отдельно для каждого участка.

Межвидовая изменчивость кожи самцов O. fischeri и S. keyserlingii. Кожа горла. Статистические различия на этом участке обнаружены по ПГЖ ($Z = 2,42$, $p \leq 0,05$) и ПСЖ ($t_{St} = -4,56$, $p < 0,05$) (табл. 1). Самцы *S. keyserlingii* по сравнению с *O. fischeri* характеризуются большей относительной площадью гранулярных желёз, но меньшей – слизистых.

Кожа спины. У самцов *S. keyserlingii* и *O. fischeri* различается по ПСЖ ($t_{St} = -3,56$, $p < 0,05$) и ПРСТ ($t_{St} = 3,55$, $p < 0,05$) (табл. 1). Самцы *S. keyserlingii* обладают большей относительной площадью рыхлой соединительной ткани, но меньшей – слизистых желёз.

Кожа хвоста. Установлено, что у изучаемых видов кожа дорсального участка хвоста различается по ПЭ ($t_{St} = 12,51$, $p < 0,05$), ПГЖ ($t_{St} = -17,49$, $p < 0,05$), ПКС ($Z = 2,52$, $p \leq 0,05$), ПРСТ ($t_{St} = 10,89$, $p < 0,05$) (табл. 1). Для кожи вентральных участков хвоста межвидовые различия выявлены по ПЭ ($t_{St} = -4,87$, $p < 0,05$), ПГЖ ($Z = 2,99$, $p \leq 0,05$), ПСЖ ($t_{St} = -4,09$, $p < 0,05$), ПКС ($t_{St} = -9,90$, $p < 0,05$), ПРСТ ($t_{St} = 4,85$, $p < 0,05$) (табл. 1). Самцы *S. keyserlingii* в коже дорсального участка хвоста имеют большие относительные площади эпидермиса и всех элементов соединительной ткани и меньшие размеры гранулярных желёз, чем самцы *O. fischeri*. Кожа вентрального участка хвоста *S. keyserlingii* в сравнении с таковой *O. fischeri* имеет большие размеры гранулярных желёз и рыхлой соединительной ткани и меньшие – эпидермиса и компактного слоя дермы.

Кожа брюха. Межвидовые различия выявлены по ПГЖ ($t_{St} = 5,32$, $p \leq 0,05$), ПСЖ ($t_{St} = -5,05$, $p < 0,05$) и ПРСТ ($t_{St} = 5,96$, $p \leq 0,05$) (табл. 1). Самцы *S. keyserlingii* по сравнению с таковыми *O. fischeri* обладают большей относительной площадью гранулярных желёз, рыхлой соединительной ткани, но меньшей – слизистых желёз.

Кожа клоаки. Значимые различия выявлены по ПЭ ($Z = -2,52$, $p \leq 0,05$) и ПРСТ ($t_{St} = 5,96$, $p \leq 0,05$) (табл. 1). Самцы *S. keyserlingii* в сравнении с таковыми *O. fischeri* имеют большую относительную площадь рыхлой соединительной ткани, но меньшую – эпидермиса.

Кожа голени. Межвидовые отличия обнаружены по ПЭ ($t_{St} = -3,01$, $p < 0,05$), ПГЖ ($Z = 2,15$, $p \leq 0,05$), ПСЖ ($t_{St} = 2,83$, $p < 0,05$) (табл. 1). Самцы *S. keyserlingii* характеризуются большей площадью гранулярных и слизистых желёз, но меньшей – эпидермиса.

Самцы *S. keyserlingii* в отличие от таковых *O. fischeri* обладают большей относительной площадью эпидермиса кожи дорсальной части хвоста, гранулярных желёз кожи горла, брюха, голени и вентрального участка хвоста, слизистых желёз кожи голени, компактного слоя кожи дорсальной части хвоста, рыхлой соединительной ткани кожи спины, хвоста, клоаки и брю-

ха, но меньшей относительной площадью эпидермиса кожи вентральной части хвоста, клоаки и голени, гранулярных желёз кожи дорсальной части хвоста, слизистых желёз кожи горла, спины, вентральной части хвоста, брюха и компактного слоя в коже вентральной части хвоста.

Межвидовая изменчивость кожи самок O. fischeri и S. keyserlingii водного морфотипа. Кожа горла. Кожа самок *S. keyserlingii* отличается от таковой *O. fischeri* по ПГЖ ($Z = 3,36, p \leq 0,05$), ПСЖ ($t_{St} = -2,53, p < 0,05$) и ПКС ($t_{St} = -5,67, p < 0,05$) (табл. 2). Самки *S. keyserlingii* обладают большей площадью гранулярных желёз, но меньшей слизистых желёз и компактного слоя кориума, по сравнению с самками *O. fischeri*.

Кожа спины. На данном участке различия выявлены только по ПКС ($t_{St} = -4,19, p < 0,05$) (табл. 2). Самки *S. keyserlingii* отличаются меньшей относительной площадью компактного слоя.

Кожа хвоста. Статистические различия на дорсальном участке хвоста выявлены по ПЭ ($Z = 3,36, p \leq 0,05$), ПГЖ ($t_{St} = -12,94, p < 0,05$), ПКС ($t_{St} = 6,64, p < 0,05$) и ПРСТ ($Z = 3,36, p \leq 0,05$) (табл. 2).

Вентральные участки хвоста различаются по ПЭ ($t_{St} = -7,33, p < 0,05$), ПГЖ ($t_{St} = 5,26, p < 0,05$), ПСЖ ($t_{St} = -6,60, p < 0,05$), ПКС ($t_{St} = -6,86, p < 0,05$), ПРСТ ($t_{St} = 4,52, p < 0,05$) (табл. 2). Для самок *S. keyserlingii* характерны большие относительные площади эпидермиса и всех элементов соединительной ткани на дорсальном участке хвоста, гранулярных желёз и рыхлой соединительной ткани в вентральном, но меньшие – эпидермиса, слизистых желёз и компактного слоя в вентральной части хвоста, а также гранулярных желёз в дорсальной части хвоста.

Кожа брюха. Видовые различия выявлены по ПЭ ($t_{St} = -3,23, p < 0,05$), ПГЖ ($t_{St} = 3,50, p < 0,05$), ПКС ($Z = -4,15, p \leq 0,05$) (табл. 2). Для самок *S. keyserlingii* характерны большие относительные площади гранулярных желёз, но меньшие – эпидермиса и компактного слоя кориума.

Кожа клоаки. Статистические различия параметров выявлены по ПГЖ ($t_{St} = -2,41, p < 0,05$), ПКС ($t_{St} = -4,89, p < 0,05$), ПРСТ ($t_{St} = 7,82, p < 0,05$) (табл. 2). Самки *S. keyserlingii* отличаются большей относительной площадью рыхлой соединительной ткани кориума, но меньшей – гранулярных желёз и компактного слоя кориума.

Кожа голени. Статистически значимые различия присутствуют только по ПСЖ ($t_{St} = 2,68, p < 0,05$) (табл. 2). Для самок *S. keyserlingii* по сравнению с *O. fischeri* характерна большая площадь слизистых желёз кожи голени.

Таким образом, кожа самок *S. keyserlingii* отличается от таковой самок *O. fischeri* большей относительной площадью эпидермиса кожи дорсального участка хвоста, гранулярных желёз кожи брюха и вентрального участка хвоста, слизистых желёз кожи голени, компактного слоя в коже дорсального участка хвоста, рыхлой соединительной ткани кожи хвоста и клоаки, но меньшей относительной площадью эпидермиса кожи брюха и вентральной части кожи хвоста, гранулярных желёз кожи дорсальной части хвоста и клоаки, слизистых желёз в коже горла и вентральной части хвоста, компактного слоя на всех участках кожи кроме дорсальной части хвоста.

Таблица 1 [Table 1]

Межвидовая изменчивость параметров кожи самцов *Onychodactylus fischeri* и *Salamandrella keyserlingii*
 [Interspecific variability of skin parameters in males of *Onychodactylus fischeri* and males of *Salamandrella keyserlingii*]

Участок кожи [Skin area]	Вид [Species]	Относительные площади, mean $\pm$ SE [Relative area]				
		Эпидермис [Epidermis]	Гранулярные железы [Granular glands]	Слизистые железы [Mucous gland]	Компактный слой дермы [Stratum compactum of dermis]	Рыхлая соединительная ткань дермы [Loose connective tissue of dermis]
Горло [Throat]	<i>O. fischeri</i>	0,34 $\pm$ 0,02	0,06 $\pm$ 0,03*	0,02*	0,17 $\pm$ 0,01	0,21 $\pm$ 0,02
	<i>S. keyserlingii</i>	0,33 $\pm$ 0,02	0,18 $\pm$ 0,03*	0,08 $\pm$ 0,02*	0,19 $\pm$ 0,01	0,21 $\pm$ 0,01
	<i>O. fischeri</i>	0,22 $\pm$ 0,02	0,24 $\pm$ 0,05	0,25 $\pm$ 0,03	0,15 $\pm$ 0,01	0,15 $\pm$ 0,03
Спина [Back]	<i>S. keyserlingii</i>	0,26 $\pm$ 0,01	0,23 $\pm$ 0,02	0,12 $\pm$ 0,01	0,12 $\pm$ 0,01	0,28 $\pm$ 0,02
Дорсальный участок хвоста [Dorsal part of the tail]	<i>O. fischeri</i>	0,03 $\pm$ 0,001*	0,90 $\pm$ 0,01*	0,01 $\pm$ 0,003	0,01 $\pm$ 0,002*	0,05 $\pm$ 0,00* ⁶
	<i>S. keyserlingii</i>	0,12 $\pm$ 0,01*	0,54 $\pm$ 0,02*	0,01 $\pm$ 0,003	0,03 $\pm$ 0,01*	0,30 $\pm$ 0,02*
Вентральный участок хвоста [Ventral part of the tail]	<i>O. fischeri</i>	0,34 $\pm$ 0,02*	0,13 $\pm$ 0,05*	0,23 $\pm$ 0,05*	0,16 $\pm$ 0,01*	0,15 $\pm$ 0,02*
	<i>S. keyserlingii</i>	0,21 $\pm$ 0,01*	0,45 $\pm$ 0,03*	0,03 $\pm$ 0,01*	0,05 $\pm$ 0,005*	0,26 $\pm$ 0,02*
Брюхо [Abdomen]	<i>O. fischeri</i>	0,35 $\pm$ 0,02	0 $\pm$ 0*	0,37 $\pm$ 0,03*	0,14 $\pm$ 0,01	0,14 $\pm$ 0,01*
	<i>S. keyserlingii</i>	0,31 $\pm$ 0,02	0,17 $\pm$ 0,03*	0,16 $\pm$ 0,02*	0,13 $\pm$ 0,01	0,23 $\pm$ 0,01*
Клюака [Cloaca]	<i>O. fischeri</i>	0,34 $\pm$ 0,02*	0,15 $\pm$ 0,03	0,28 $\pm$ 0,04	0,12 $\pm$ 0,01	0,24 $\pm$ 0,02*
	<i>S. keyserlingii</i>	0,23 $\pm$ 0,02*	0,23 $\pm$ 0,04	0,17 $\pm$ 0,04	0,13 $\pm$ 0,03	0,36 $\pm$ 0,01*
Голень [Shin]	<i>O. fischeri</i>	0,59 $\pm$ 0,06*	0,02 $\pm$ 0,01*	0,05 $\pm$ 0,01*	0,10 $\pm$ 0,01	0,25 $\pm$ 0,04
	<i>S. keyserlingii</i>	0,42 $\pm$ 0,01*	0,14 $\pm$ 0,04*	0,11 $\pm$ 0,02*	0,09 $\pm$ 0,01	0,25 $\pm$ 0,02

Примечание. * – $p < 0,05$.

[Note. * - $p < 0,05$].

Таблица 2 [Table 2]

Межвидовая изменчивость параметров кожи самок *Onychodactylus fischeri* и *Salamandrella keyserlingii*
 [Interspecific variability of skin parameters in females of *Onychodactylus fischeri* and males of *Salamandrella keyserlingii*]

Участок кожи [Skin area]	Вид [Species]	Относительные площади, mean $\pm$ SE [Relative area]				
		Эпидермис [Epidermis]	Гранулярные железы [Granular glands]	Слизистые железы [Mucous gland]	Компактный слой дермы [Stratum compactum of dermis]	Рыхлая соединительная ткань дермы [Loose connective tissue of dermis]
Горло [Throat]	<i>O. fischeri</i>	0,34 $\pm$ 0,03	0,01 $\pm$ 0,01 *	0,26 $\pm$ 0,03 *	0,24 $\pm$ 0,02 *	0,14 $\pm$ 0,02
	<i>S. keyserlingii</i>	0,30 $\pm$ 0,02	0,24 $\pm$ 0,03 *	0,15 $\pm$ 0,04 *	0,11 $\pm$ 0,01 *	0,20 $\pm$ 0,03
	<i>O. fischeri</i>	0,25 $\pm$ 0,02	0,17 $\pm$ 0,03	0,22 $\pm$ 0,02	0,15 $\pm$ 0,01 *	0,21 $\pm$ 0,02
	<i>S. keyserlingii</i>	0,27 $\pm$ 0,01	0,17 $\pm$ 0,03	0,16 $\pm$ 0,03	0,10 $\pm$ 0,01 *	0,30 $\pm$ 0,05
Дорсальный участок хвоста [Dorsal part of the tail]	<i>O. fischeri</i>	0,03 $\pm$ 0,003	0,89 $\pm$ 0,01	0,01 $\pm$ 0,004	0,01 $\pm$ 0,002	0,06 $\pm$ 0,01
	<i>S. keyserlingii</i>	0,09 $\pm$ 0,002	0,62 $\pm$ 0,02	0,01 $\pm$ 0,004	0,03 $\pm$ 0,002	0,25 $\pm$ 0,02
Вентральный участок хвоста [Ventral part of the tail]	<i>O. fischeri</i>	0,33 $\pm$ 0,02 *	0,17 $\pm$ 0,03 *	0,14 $\pm$ 0,02 *	0,18 $\pm$ 0,02 *	0,19 $\pm$ 0,02 *
	<i>S. keyserlingii</i>	0,17 $\pm$ 0,01 *	0,39 $\pm$ 0,03 *	0,05 $\pm$ 0,01 *	0,06 $\pm$ 0,002 *	0,33 $\pm$ 0,03 *
Брюхо [Abdomen]	<i>O. fischeri</i>	0,39 $\pm$ 0,02 *	0 $\pm$ 0 *	0,22 $\pm$ 0,01	0,21 $\pm$ 0,02 *	0,19 $\pm$ 0,01
	<i>S. keyserlingii</i>	0,31 $\pm$ 0,02 *	0,08 $\pm$ 0,02 *	0,26 $\pm$ 0,02	0,12 $\pm$ 0,01 *	0,23 $\pm$ 0,03
Клоака [Cloaca]	<i>O. fischeri</i>	0,31 $\pm$ 0,04	0,27 $\pm$ 0,04 *	0,14 $\pm$ 0,03	0,13 $\pm$ 0,01 *	0,15 $\pm$ 0,01 *
	<i>S. keyserlingii</i>	0,25 $\pm$ 0,01	0,17 $\pm$ 0,02 *	0,17 $\pm$ 0,02	0,09 $\pm$ 0,01 *	0,32 $\pm$ 0,02 *
Голень [Shin]	<i>O. fischeri</i>	0,46 $\pm$ 0,05	0,06 $\pm$ 0,02	0,07 $\pm$ 0,02 *	0,14 $\pm$ 0,01	0,27 $\pm$ 0,02
	<i>S. keyserlingii</i>	0,33 $\pm$ 0,02	0,09 $\pm$ 0,03	0,18 $\pm$ 0,03 *	0,10 $\pm$ 0,01	0,30 $\pm$ 0,02

Примечание. * – $p < 0,05$.

[Note. * - $p < 0,05$].

Обсуждение

Полученные результаты по структуре кожи самцов и самок *S. keyserlingii* и *O. fischeri* согласуются с данными о строении кожи земноводных в целом [3], за исключением выделения хромофильной области губчатого слоя дермы. Он описан М.Е. Дильмухамедовым для кожи *S. keyserlingii* [19] и выявлен нами у обоих видов.

Различная морфологическая организация кожи в зависимости от участка тела выявлена у хвостатых и бесхвостых земноводных. Кожа дорсальных и вентральных областей тела различается у земноводных по структуре эпидермиса, количеству и типам желёз [6, 19–23].

Обнаруженные в коже *O. fischeri* вдающиеся в эпидермис капилляры выявлены также у другого реофильного вида из семейства Hynobiidae – *B. pinchonii* [8] и ещё у ряда водных видов хвостатых и бесхвостых земноводных [3, 8, 24]. Это связано с увеличением роли кожного дыхания, являющегося эффективным в данных условиях. У *B. pinchonii*, как и у других реофильных земноводных, имеющих лёгкие, в водоёмах с низкой температурой или быстрых ручьях, насыщенных кислородом, интенсивность кожного дыхания увеличивается, с одной стороны, ввиду его большей эффективности, а с другой – из-за подавления частоты дыхательных сокращений [24]. У безлёгочного *O. fischeri* все потребности организма в транспорте газов обеспечивает только кожа, поэтому вид характеризуется самым интенсивным кожным газообменом среди исследованных представителей Hynobiidae и Salamandridae [25].

В целом выявленные нами тенденции межвидовой изменчивости кожи *O. fischeri* и *S. keyserlingii* водного морфотипа отличаются от результатов сравнений кожи спины самцов реофильного постоянно водного *B. pinchonii* и лимнофильного *H. chinensis*, находящегося в воде только в период размножения [8]. *B. pinchonii* отличается от *H. chinensis* более толстым эпидермисом и наличием крупных кровеносных капилляров в кориуме, а *H. chinensis* – большей толщиной соединительной ткани и компактного слоя кориума, более крупными гранулярными и слизистыми железами [8]. Однако в данной работе использовано по одной особи каждого вида, при этом для *H. chinensis* не указаны ни дата отлова, ни морфотип, что затрудняет сопоставление полученных авторами результатов с таковыми в нашей работе.

Наблюдаемые тенденции видовой изменчивости кожи *O. fischeri* и *S. keyserlingii* водного морфотипа, вероятно, связаны с разной степенью адаптации к наземной и водной средам. Как у самцов, так и у самок лимнофильного *S. keyserlingii* с высокой степенью наземности гранулярные железы большинства участков тела имеют большие относительные размеры, чем у *O. fischeri*, что может быть связано с выполнением ими защитной функции – выделением ядовитого секрета при нападении хищника, а также для антимикробной защиты [3, 26, 27]. Возможно, смена среды обитания в течение годового цикла приводит к столкновению *S. keyserlingii* с большим разнообразием как хищников, так и потенциально опасных микроорганизмов, в отличие от *O. fischeri*, у которых размножение происходит

в подземной части водотоков, недоступной для хищников, что обуславливает наблюдаемые межвидовые различия в относительных размерах гранулярных желёз. Для другого, связанного с горными ручьями вида углозубых – семиреченского лягушкозуба *Ranodon sibiricus* Kessler, 1866 также отмечено наличие большого количества гранулярных желёз в коже спины предположительно для защиты от хищников [28].

У представителей обоих полов относительные площади соединительной ткани кожи увеличены у *S. keyserlingii* в сравнении с *O. fischeri*, что, вероятно, обусловлено поглощением ею большого количества воды, поступившей из окружающей среды через эпидермис до формирования барьерных механизмов в коже. Ранее показано, что у самцов и самок *S. keyserlingii* водного морфотипа в сравнении с таковыми наземного морфотипа увеличена относительная площадь соединительной ткани кожи хвоста и компактного слоя дермы в коже горла – только у самцов [10, 11]. Подобный эффект гидратации кожи в водную фазу сезонного цикла описан для самцов чёрного углозуба *H. nigrescens* Stejneger, 1907 [29, 30].

У реофильного, полуводного *O. fischeri* наличие плотного эпидермиса с выраженным роговым слоем и утолщенного компактного слоя кориума обусловлено, с одной стороны, защитной функцией от повреждения кожи и подлежащих структур, а с другой – предотвращением избыточной гидратации организма, что показано ранее на примере *H. retardatus* [29]. У *O. fischeri* слизистые железы крупные, вероятно, ввиду их постоянной активности, которая может быть связана с интенсивным кожным дыханием, а также в защите от избыточной гидратации организма. Кроме того, слизь на поверхности кожи уменьшает сопротивление во время плавания, что показано на примере бесхвостых земноводных [3]. Гранулярные железы дорсальной части хвоста *O. fischeri* так же, как и у *S. keyserlingii*, увеличены вследствие выполнения ими защитных функций, что отчасти подтверждено тем, что хищники, как правило, не съедают хвосты когтистого тритона [31].

Заключение

Для кожи лимнофильного *S. keyserlingii* водного морфотипа в сравнении с реофильным *O. fischeri* характерно наличие увеличенной рыхлой соединительной ткани кориума, что связано, вероятно, с поступлением в неё воды до формирования барьера. Кроме того, будучи большую часть годового цикла наземным обитателем *S. keyserlingii* в водной фазе в сравнении с полуводным *O. fischeri* имеет большие относительные площади гранулярных желёз. Для *O. fischeri* на большинстве участков тела характерны утолщённые компактный слой кориума и эпидермис, а также крупные слизистые железы. Последние две особенности позволяют эффективнее формировать барьер, защищающий от избыточного поступления воды в организм в условиях постоянного нахождения в ней. Наблюдаемые особенности связаны с разной степенью адаптации данных видов к водной среде.

Список источников

1. Fox H. The skin of Amphibia // Biology of the Integument. 2. Vertebrates / ed. by J. Bereiter-Hahn, A.G. Matoltzky, K.S. Richards. Berlin; Heidelberg : Springer-Verlag, 1986. PP. 78–149.
2. Wells K.D. The ecology and behavior of amphibians. The University of Chicago Press, 2007. 1148 p.
3. Toledo R.C., Jared C. Cutaneous adaptations to water balance in amphibians // Comparative Biochemistry and Physiology. Part A: Physiology. 1993. Vol. 105, № 4. PP. 593–608. doi: 10.1016/0300-9629(93)90259-7
4. Barrionuevo J.S. Skin structure variation in water frogs of the genus *Telmatobius* (Anura: Telmatobiidae) // Salamandra. 2017. Vol. 53, № 2. PP. 183–192.
5. Zainudin R., Deka E.Q., Ojep D.N.A., Su'ut L., Puad A.S.A., Jayasilan M.A., Rasit A.H. Histological description of the bornean horned frog *Megophrys nasuta* (Amphibia: Anura: Megophryidae) skin structure from different body regions // Malaysian Applied Biology. 2018. Vol. 47, № 1. PP. 51–56.
6. Mailho-Fontana P.L., Titon Jr.B., Antoniazzi M.M., Gomes F.R., Jared C. Skin and poison glands in toads (*Rhinella*) and their role in defence and water balance // Acta Zoologica. 2022. Vol. 103, № 1. PP. 112–128. doi: 10.1111/azo.12390
7. Zhang P., Chen Y-Q., Zhou H., Liu Y-F., Wang X-L., Papenfuss T.J., Wake D.B. Phylogeny, evolution, and biogeography of Asiatic Salamanders (Hynobiidae) // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2006. Vol. 103, № 19. PP. 7360–7365. doi: 10.1073/pnas.0602325103
8. Xiong J., Dai C., Li M., Deng W., Li J. Morphological characteristics of the dorsal skin of two hynobiids and their adaptive role in aquatic and terrestrial habitats // Asian Herpetological Research. 2013. Vol. 4, № 1. PP. 62–67. doi: 10.3724/SP.J.1245.2013.00062
9. Кузьмин С.Л. Земноводные бывшего СССР. М. : Товарищество научных изданий КМК, 2012. 370 с.
10. Ярцев В.В., Евсеева С.С. Гистологическая характеристика кожи самцов сибирского углозуба, *Salamandrella keyserlingii* (Caudata, Hynobiidae) в водную и наземную фазы сезонного цикла // Современная герпетология. 2018. Т. 18, № 1–2. С. 54–63. doi: 10.18500/1814-6090-2018-18-1-2-54-63
11. Ярцев В.В., Евсеева С.С. Гистологическая характеристика кожи самок сибирского углозуба, *Salamandrella keyserlingii* (Caudata, Hynobiidae) в водную и наземную фазы сезонного цикла // Современная герпетология. 2018. Т. 18, № 3–4. С. 159–167. doi: 10.18500/1814-6090-2018-18-3-4-159-167
12. Yartsev V.V., Kuranova V.N. Seasonal dynamics of male and female reproductive systems in the Siberian salamander, *Salamandrella keyserlingii* (Caudata, Hynobiidae) // Asian Herpetological Research. 2015. Vol. 6, № 3. PP. 169–183. doi: 10.16373/j.cnki.ahr.140033
13. Exbrayat J.M. Histochemical and cytochemical methods of visualization. Boca Raton; London; New York : CRC Press Taylor and Francis Group, 2013. 367 p.
14. Ярцев В.В. Основы гистологической техники для зоологов : учебно-методическое пособие для биологических специальностей вузов. Томск : Издательский дом ТГУ, 2019. 84 с.
15. Михайлов Р.Е. Математические методы в биологии применительно к малым выборкам // Математические исследования в естественных науках. 2012. № 8. С. 100–103.
16. Носовский А.М., Пихлак А.Э., Логачев В.А., Чурсинова И.И., Мутьева Н.А. Статистика малых выборок в медицинских исследованиях // Российский медицинский журнал. 2013. № 6. С. 57–60.
17. Lazic S.E. Four simple ways to increase power without increasing the sample size // Laboratory animals. 2018. Vol. 52, № 6. PP. 621–629. doi: 10.1177/0023677218767478

18. Баврина А.П. Основные понятия статистики // Медицинский альманах. 2020. № 3 (64). С. 101–111.
19. Дильмухамедов М.Е. Кожный покров // Сибирский углозуб: Зоогеография. Систематика. Морфология. М. : Наука, 1994. С. 109–115.
20. Bingol-Ozakpinar O., Murathanoglu O. The morphology of the dorsal and ventral skin of *Triturus karelinii* (Caudata: Salamandridae) // Biologia. 2011. Vol. 66, № 2. PP. 349–356. doi: 10.2478/s11756-011-0009-2
21. Akat E., Arikan H. Morphology and biometric study of skin of *Hyla orientalis* Bedriaga, 1890 (Anura, Hylidae) // Russian Journal of Herpetology. 2013. Vol. 20, № 4. PP. 253–258. doi: 10.30906/1026-2296-2013-20-4-253-258
22. Akat E., Arikan H., Göçmen B. Investigation of dorsal/ventral skin and the parotoid region of *Lyciasalamandra billae* and *Lyciasalamandra luschani* basoglu (Urodela: Salamandridae) // Biologia. 2014. Vol. 69, № 3. PP. 389–394. doi: 10.2478/s11756-013-0313-0
23. Esra A., Arikan H.A. Histological Study on the Skin of *Hyla savignyi* (Anura: Hylidae) // Commagene Journal of Biology. Vol. 2, № 2. PP. 35–37. doi: 10.31594/commagene.479097
24. Noble G.K. The integumentary, pulmonary, and cardiac modifications correlated with increased cutaneous respiration in the amphibia: A solution of the 'hairy frog' problem // Journal of Morphology. 1925. Vol. 40, № 2. PP. 341–416. doi: 10.1002/jmor.1050400206
25. Kuzmin S.L. The Clawed Salamanders of Asia. Genus *Onychodactylus*. Biology, distribution, and conservation. Magdeburg : Westarp Wissenschaften, 1995. 108 p.
26. Brizzi R., Delfino G., Jantra S., Alvarez B.B., Sever D.M. The amphibian cutaneous glands: Some aspects of their structure and adaptive role // Herpetologia Candiana / ed. by P. Lymberakis, E. Valakos, P. Pafilis, M. Mylonas. Irakleio : Natural History Museum of Crete, 2001. PP. 43–49.
27. Соколов В.Е. Морфологические приспособления кожного покрова земноводных фауны СССР к наземному образу жизни // Зоологический журнал. 1964. Т. 18, № 9. С. 1410–1411.
28. Kobegenova S.S., Kuzmin S.L. A comparison of skin of the Semirechensk Salamander (*Ranodon sibiricus*) and the Siberian Newt (*Salamandrella keyserlingii*) // Advances in Amphibian Research in the Former Soviet Union. 1998. Vol. 3. PP. 143–157.
29. Aoto T. A remarkable swelling of male skin of a salamander (*Hynobius retardatus* Dunn) in the breeding season // Journal of the Faculty of Science Hokkaido University, Zoology. 1950. Vol. 10, № 1. PP. 45–53.
30. Hasumi M., Iwasawa H. Wandering behavior and cutaneous changes in winter–Dormant male salamanders (*Hynobius nigrescens*) // Herpetologica. 1992. Vol. 48, № 3. PP. 279–287.
31. Maslova I.V., Rogashevskaya D.A. New data on spawning site and group egg laying of *Onychodactylus fischeri* (Boulenger, 1886) (the Southern Sikhote-Alin Range, Russia) // Russian Journal of Herpetology. 2023. Vol. 30, № 6. PP. 477–492. doi: 10.30906/1026-2296-2023-30-6-477-49

References

1. Fox H. The skin of Amphibia. In: *Biology of the Integument. 2. Vertebrates*. Bereiter-Hahn J, Matoltsy AG, Richards KS, editors. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag; 1986. pp. 78–149.
2. Wells KD. *The Ecology and Behavior of Amphibians*. Chicago: The University of Chicago Press; 2007. 1148 p.
3. Toledo RC, Jared C. Cutaneous adaptations to water balance in amphibians. *Comparative Biochemistry and Physiology. Part A: Physiology*. 1993;1059(4):593–608. doi: 10.1016/0300-9629(93)90259-7

4. Barrionuevo JS. Skin structure variation in water frogs of the genus *Telmatobius* (Anura: Telmatobiidae). *Salamanca*. 2017;53(2):183-192.
5. Zainudin R, Deka EQ, Ojep DNA, Su'ut L, Puad ASA, Jayasilan MA, Rasit AH. Histological description of the bornean horned frog *Megophrys nasuta* (Amphibia: Anura: Megophryidae) skin structure from different body regions. *Malaysian Applied Biology*. 2018;47(1):51-56.
6. Mailho-Fontana PL, Titon JrB, Antoniazzi MM, Gomes FR, Jared C. Skin and poison glands in toads (*Rhinella*) and their role in defence and water balance. *Acta Zoologica*. 2022;103(1):112-128. doi: 10.1111/azo.12390
7. Zhang P, Chen Y-Q, Zhou H, Liu Y-F, Wang X-L, Papenfuss TJ, Wake DB. Phylogeny, evolution, and biogeography of Asiatic Salamanders (Hynobiidae). *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2006;103(19):7360-7365. doi: 10.1073/pnas.0602325103
8. Xiong J, Dai C, Li M, Deng W, Li J. Morphological characteristics of the dorsal skin of two hynobiids and their adaptive role in aquatic and terrestrial habitats. *Asian Herpetological Research*. 2013;4(1):62-67. doi: 10.3724/SP.J.1245.2013.00062
9. Kuzmin SL. Zemnovidnye byvshego SSSR [Amphibians of the former USSR]. Moscow: Tovarichestvo nauchnykh izdaniy KMK Publ.; 2012. 370 p. In Russian.
10. Yartsev VV, Evseyeva SS. Histological characteristics of the skin of *Salamandrella keyserlingii* (Caudata, Hynobiidae) males in the aquatic and terrestrial phases of their seasonal cycle. *Current Studies in Herpetology*. 2018;18(1-2):54-63. doi: 10.18500/1814-6090-2018-18-1-2-54-63
11. Yartsev VV, Evseyeva SS. Histological characteristics of the skin of *Salamandrella keyserlingii* (Caudata, Hynobiidae) females in the aquatic and terrestrial phases of their seasonal cycle. *Current Studies in Herpetology*. 2018;18(3-4):159-167. doi: 10.18500/1814-6090-2018-18-3-4-159-167
12. Yartsev VV, Kuranova VN. Seasonal dynamics of male and female reproductive systems in the Siberian salamander, *Salamandrella keyserlingii* (Caudata, Hynobiidae). *Asian Herpetological Research*. 2015;6(3):169-183. doi: 10.16373/j.cnki.ahr.140033
13. Exbrayat JM. Histochemical and Cytochemical Methods of Visualization. Boca Raton, London, New York: CRC Press Taylor and Francis Group; 2013. 367 p.
14. Yartsev VV. Osnovy gistologicheskoy tekhniki dlya zoologov: uchebno-metodicheskoe posobie dlya biologicheskikh special'nostej vuzov [Fundamentals of histological technology for zoologists: educational and methodological manual for biological specialties of universities]. Tomsk: Izdatelskiy dom TSU; 2019. 84 p. In Russian
15. Mihailov RE. Matematicheskie metody v biologii primenitelno k malym vyborkam [Mathematical methods in biology applied to small samples]. *Matematicheskie issledovaniya v estestvennykh naukakh*. 2012;(8):100-103. In Russian
16. Nosovskiy AM, Pikhlik AE, Logachev VA, Chursinova II, Muteva NA. Small-data statistics analysis in medical studies. *Russian Medical Journal*. 2013;(6):57-60. In Russian, English summary
17. Lazic SE. Four simple ways to increase power without increasing the sample size. *Laboratory Animals*. 2018;52(6):621-629. doi: 10.1177/0023677218767478
18. Bavrina AP. Basic concepts of statistics. *Medical Almanac*. 2020;3(64):101-111.
19. Dilmuhamedov ME. Kozhnyy pokrov [Skin]. In: *Sibirskiy uglozub: Zoogeografiya. Sistematika. Morfologiya*. Moscow: Nauka; 1994. pp. 109-115.
20. Bingol-Ozakpinar O, Murathanoglu O. The morphology of the dorsal and ventral skin of *Triturus karelinii* (Caudata: Salamandridae). *Biologia*. 2011;66(2):349-356. doi: 10.2478/s11756-011-0009-2
21. Akat E, Arian H. Morphology and biometric study of skin of *Hyla orientalis* Bedriaga, 1890 (Anura, Hylidae). *Russian Journal of Herpetology*. 2013;20(4):253-258. doi: 10.30906/1026-2296-2013-20-4-253-258
22. Akat E, Arian H, Göçmen B. Investigation of dorsal/ventral skin and the parotoid region of *Lyciasalamandra billae* and *Lyciasalamandra luschni* basoglu (Urodela: Salamandridae). *Biologia*. 2014;69(3):389-394. doi: 10.2478/s11756-013-0313-0

23. Esra A, Arikan HA. Histological study on the skin of *Hyla savignyi* (Anura: Hylidae). *Commagene Journal of Biology*. 2018;2(2):35-37. doi: 10.31594/commagene.479097
24. Noble GK. The integumentary, pulmonary, and cardiac modifications correlated with increased cutaneous respiration in the amphibia: A solution of the 'hairy frog' problem. *Journal of Morphology*. 1925;40(2):341-416. doi: 10.1002/jmor.1050400206
25. Kuzmin SL. The Clawed Salamanders of Asia. Genus *Onychodactylus*. Biology, Distribution, and Conservation. Magdeburg: Westarp Wissenschaften; 1995. 108 p.
26. Brizzi R, Delfino G, Jantra S, Alvarez BB, Sever DM. The amphibian cutaneous glands: Some aspects of their structure and adaptive role. In: *Herpetologia Candiana*. Lymberakis P, Valakos E, Pafilis P, Mylonas M, editors. Irakleio: Natural History Museum of Crete; 2001. pp. 43-49.
27. Sokolov VE. Morfologicheskie prispособleniya kozhnogo pokrova zemnovodnykh fauny SSSR k nazemnomu obrazu zhizni [Morphological adaptations of the amphibian skin in USSR fauna to the Terrestrial mode of life]. *Zoologicheskii zhurnal*. 1964;18(9):1410-1411. In Russian
28. Kobegenova SS, Kuzmin SL. A comparison of skin of the Semirechensk Salamander (*Ranodon sibiricus*) and the Siberian Newt (*Salamandrella keyserlingii*). In: *Advances in Amphibian Research in the Former Soviet Union*. 1998. Vol. 3. pp. 143-157.
29. Aoto T. A remarkable swelling of male skin of a salamander (*Hynobius retardatus* Dunn) in the breeding season. *Journal of the Faculty of Science Hokkaido University, Zoology*. 1950;10(1):45-53.
30. Hasumi M, Iwasawa H. Wandering behavior and cutaneous changes in winter-dormant male salamanders (*Hynobius nigrescens*). *Herpetologica*. 1992;48(3):279-287.
31. Maslova IV, Rogashevskaya DA. New data on spawning site and group egg laying of *Onychodactylus fischeri* (Boulenger, 1886) (the Southern Sikhote-Alin Range, Russia). *Russian Journal of Herpetology*. 2023;30(6):477-492. doi: 10.30906/1026-2296-2023-30-6-477-49

Информация об авторах:

Евсеева София Сергеевна, аспирант кафедры зоологии позвоночных и экологии, Биологический институт, Национальный исследовательский Томский государственный университет (Томск, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7644-8501>

E-mail: sofiaewseewa@gmail.com

Ярцев Вадим Вадимович, канд. биол. наук, и.о. заведующего, доцент кафедры зоологии позвоночных и экологии, заведующий Зоологическим музеем, Биологический институт, Национальный исследовательский Томский государственный университет; доцент кафедры биологии и генетики, Сибирский государственный медицинский университет (Томск, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7789-7424>

E-mail: vadim_yartsev@mail.ru

Маслова Ирина Владимировна, канд. биол. наук, с.н.с. лаборатории териологии, Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН (Владивосток, Россия)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6240-3812>

E-mail: irinarana@yandex.ru

Рогашевская Дарья Андреевна, аспирант лаборатории териологии, Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН (Владивосток, Россия)

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1820-1385>

E-mail: daria_1844@mail.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Sofiya S. Evseeva, PhD student of the Department of Vertebrate Zoology and Ecology, Institute of Biology, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7644-8501>

E-mail: sofiaewseewa@gmail.com

Vadim V. Yartsev, Cand. Sci. (Biol.), Acting Head, Assoc. Prof. of the Department of Vertebrate Zoology and Ecology, Head of the Museum of Zoology, Institute of Biology, National Research Tomsk State University; Assoc. Prof. of the Department of Biology and Genetics, Siberian State Medical University (Tomsk, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7789-7424>

E-mail: vadim_yartsev@mail.ru

Irina V. Maslova, Cand. Sci. (Biol.), senior researcher of the Laboratory of Theriology, Federal Scientific Centre of the East Asia Terrestrial Biodiversity, FEB RAS (Vladivostok, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6240-3812>

E-mail: irinarana@yandex.ru

Daria A. Rogashevskaya, PhD student of the Laboratory of Theriology, Federal Scientific Centre of the East Asia Terrestrial Biodiversity, FEB RAS (Vladivostok, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1820-1385>

E-mail: daria_1844@mail.ru

The Authors declare no conflict of interest.

*Статья поступила в редакцию 03.06.2025;
одобрена после рецензирования 28.07.2025; принята к публикации 04.09.2025*

*The article was submitted 03.06.2025;
approved after reviewing 28.07.2025; accepted for publication 04.09.2025*

Научная статья

УДК 597.211

doi: 10.17223/19988591/71/9

Выделение лектотипа сибирской миноги *Lethenteron kessleri* (Anikin, 1905) (Petromyzontiformes: Petromyzontidae)

Вадим Вадимович Ярцев¹, Дмитрий Александрович Деридов²,
Софья Сергеевна Соловьёва³, Андрей Викторович Батранин⁴,
Ирина Борисовна Бабкина⁵

^{1, 2, 3, 5} Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Томск, Россия

¹ Сибирский государственный медицинский университет, Томск, Россия

⁴ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Томск, Россия

¹ <https://orcid.org/0000-0001-7789-7424>, vadim_yartsev@mail.ru

² mr.deridov@gmail.com

³ sonya.soloveva.01@mail.ru

⁴ <https://orcid.org/0000-0001-9678-2905>, batranin@tpu.ru

⁵ <https://orcid.org/0000-0002-3302-6819>, bibspheera@gmail.com

Аннотация. Описание сибирской миноги, *Lethenteron kessleri* (Anikin, 1905), составлено на основании изучения 16 взрослых экземпляров без выделения голотипа. В результате этого все экземпляры типовой серии представляют собой синтипы в соответствии со статьей 73.2 Международного кодекса зоологической номенклатуры (МКЗН), что определяет необходимость проведения лектотипификации. В настоящей работе исследованы 8 сохранившихся экземпляров сибирской миноги из фондов Зоологического музея (ЗМ ТГУ) и кафедры ихтиологии и гидробиологии Томского государственного университета (КИиГ ТГУ), соответствующие первоописанию. Из двух выявленных экземпляров типовой серии один находится в неудовлетворительном состоянии сохранности и описан как паралектотип – из коллекции КИиГ ТГУ № 3699, в то время как другой экземпляр из коллекции ЗМ ТГУ № 3698 не повреждён, имеет все признаки принадлежности типовой серии, поэтому он выделен как лектотип сибирской миноги, *L. kessleri* (Anikin, 1905), в соответствии со статьями 74.1 и 74.7 МКЗН. Для него определены стандартные промеры, описаны состав зубов ротовой воронки, окраска покровов в фиксаторе, а также определён пол методом рентгеновской микрофотографии.

Ключевые слова: систематика, таксономия, номенклатура, синтипы, проходные миноги, непаразитические миноги

Для цитирования: Ярцев В.В., Деридов Д.А., Соловьёва С.С., Батранин А.В., Бабкина И.Б. Выделение лектотипа сибирской миноги *Lethenteron kessleri* (Anikin, 1905) (Petromyzontiformes: Petromyzontidae) // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2025. № 71. С. 156–168. doi: 10.17223/19988591/71/9

**Designation of a lectotype for Siberian lamprey
Lethenteron kessleri (Anikin, 1905)
(Petromyzotiformes: Petromyzontidae)**

**Vadim. V. Yartsev¹, Dmitriy A. Deridov², Sofia S. Soloveva³,
Andrei V. Batranin⁴, Irina B. Babkina⁵**

^{1, 2, 3, 5} National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

¹ Siberian State Medical University, Tomsk, Russia

⁴ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

¹ <https://orcid.org/0000-0001-7789-7424>, vadim_yartsev@mail.ru

² mr.deridov@gmail.com

³ sonya.soloveva.01@mail.ru

⁴ <https://orcid.org/0000-0001-9678-2905>, batranin@tpu.ru

⁵ bibsphera@gmail.com

Summary. The conservator of the Zoological Museum of Imperial Tomsk University V.P. Anikin described the Siberian lamprey, *Lethenteron kessleri* (Anikin, 1905), after studying 16 adult specimens from the Tom' River and the mouth of the Kirgizka River. In the original description, he did not designate a holotype. Due to Article 73.2 of the International Code of Zoological Nomenclature (ICZN), all these specimens are syntypes. In order to identify a lectotype, we studied all suitable specimens of the Siberian lamprey from the collections of the Zoological Museum (ZM TSU) and the Department of Ichthyology and Hydrobiology of National Research Tomsk State University (DIH TSU). As a result, we found eight lampreys, only two of which belong to the type series. We compared these specimens with those described in articles by B.G. Johansen (1935) and A.M. Naseka & C.B. Renuard (2020). In accordance with Articles 74.1 and 74.7 of the ICZN, we designated a specimen from the ZM TSU (No. 3698) as the lectotype for the Siberian lamprey, *L. kessleri* (Anikin, 1905). This lamprey specimen is in satisfactory condition and corresponds to the characteristics of the type series by date, locality of capture, and measurements. We measured the lectotype (See Table 1) with an electronic caliper, counted teeth of the oral disc using a stereoscopic microscope and described the color in the preservative. Additionally, we determined the sex of this specimen with micro-computed tomography (See Fig. 1). We also designated another specimen from the DIH TSU (No. 3699) as a paralectotype because of its unsatisfactory condition. Below we present the measurements and features of the lectotype.

Designation of the lectotype *Lethenteron kessleri* (Anikin, 1905). ZM TSU, No. 3698 (No. 8 in Iogansen, 1935b) (See Figs. 1A-1C), Russia, Tomsk Province, Tomsk, mouth of the Kirgizka River near Tomsk, the Tom' River system, the Ob' River drainage, the Kara Sea basin, the Arctic Ocean basin, 02.10.1900. Coll.: V.P. Anikin.

Description of lectotype *Lethenteron kessleri* (Anikin, 1905). Color of lectotype in preservative: plain beige. Adult male (See Fig. 2): snout length - 9.6 mm, eye length - 3.6 mm, postocular length - 5.1 mm, prebranchial length - 20.3 mm, branchial length - 17.4 mm, branchial depth - 9.3 mm, prenostril length - 11.2 mm, trunk length - 92 mm, total length - 188 mm, interocular width - 7.2 mm, disc length - 8.3 mm, trunk depth - 10.8 mm, first dorsal fin length - 30.4 mm, first dorsal fin depth - 5.4 mm, second dorsal fin length is impossible to measure, second dorsal fin depth - 4 mm, tail length -

52 mm, caudal fin length is impossible to measure, interbranchial opening length - 0.65 mm, tail depth at junction of second dorsal and caudal fins - 2.2 mm, maximum depth of caudal fin is impossible to measure, tail depth at maximum depth of caudal fin is impossible to measure. Teeth: 21 anterior teeth, supraoral lamina with 2 unicuspid teeth, infraoral lamina with 6 teeth: 2 bicuspid lateral teeth, 4 unicuspid intercalary teeth, 26 posterior teeth, 2 left anterior endolateral bicuspid teeth and one left anterior unicuspid endolateral tooth; 3 right anterior endolateral bicuspid teeth. Number of trunk myomeres - 69. The second dorsal fin and caudal fin are in poor condition; it is impossible to measure three associated characteristics.

The article contains 2 Figures, 22 References.

Keywords: systematics, taxonomy, nomenclature, syntypes, anadromous lampreys, non-parasitic lampreys

For citation: Yartsev VV, Deridov DA, Soloveva SS, Batranin AV, Babkina IB. Designation of a lectotype for Siberian lamprey *Lethenteron kessleri* (Anikin, 1905) (Petromyzotiformes: Petromyzontidae). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2025;71:156-168. doi: 10.17223/19988591/71/9

Введение

120 лет назад консерватор Зоологического музея Императорского Томского университета, находящегося под руководством профессора Н.Ф. Кащенко [1], Василий Петрович Аникин описывает в журнале «Известия Императорского Томского университета» сибирскую миногу – *Lethenteron kessleri* (Anikin, 1905) [2]. В.П. Аникин относит вид к роду *Petromyzon* L., 1758 – *P. kessleri* Anikin, 1905.

Сибирская минога – представитель непроходных пресноводных непаразитических видов бесчелюстных, который относится к группе арктических миног вместе с *Le. reissneri*, *Le. alaskense*, *Le. appendix*, *Le. matsubarai* [1–4]. Взаимоотношения вида с другими видами данной группы и с симпатричной ей тихоокеанской миногой – *Le. camchaticum* (Tilesius, 1811) – рассматриваются по-разному. Для большинства пресноводных видов группы арктических миног характерна генетическая близость друг к другу [5–8]. В связи с этим их обозначают как комплекс «видов-спутников» (satellite species), находящихся на разных этапах видообразования, поскольку в мтДНК не «накопилась критическая масса различий» [3, 4]. С другой стороны, митохондриальный геном *Le. kessleri* близок к таковому *Le. camchaticum*, поэтому ряд авторов рассматривают сибирскую миногу как подвид или пресноводную форму тихоокеанской миноги [6].

Вопрос о видовом статусе сибирской миноги возникал и ранее. Так, в работах Л.С. Берга [9, 10] и Б.Г. Иоганзена [11–13] вид рассматривался уже как подвид – *Lampraea japonica kessleri* (Anikin, 1905). А.Н. Полторыхина [10] предложила выделить *La. kessleri* в отдельный вид, несмотря на то, что он симпатричен с *La. japonica septentrionalis* Berg 1931, из-за различий в морфологии и экологии, что дополнено и признано позже другими авторами [3, 4, 7, 14, 15]. В монографии «Lampreys: Biology, Conservation and Control» [3, 4] *Le. kessleri* рассматривают в группе миног с относительно недавней дивергенцией. Исследования митохондриального маркера и

комплекса внешних морфологических признаков миног ($n=21$), отловленных в 2014 и 2019 г. в р. Томи и Оби, показало, что они имеют схожую структуру зубного аппарата и относятся к одной гаплогруппе с *Le. camchaticum*, на основании чего сделан вывод о невалидности вида *Le. kessleri* [6]. Однако, если предположить симпатрическое обитание *Le. kessleri* и *Le. camchaticum* в бассейне Томи, то наличие только одного вида не может означать полное отсутствие другого, ввиду того, что их численность может варьировать.

Все представленные факты указывают на важность исследования типовых экземпляров *Le. kessleri* для решения вопроса о самостоятельности вида. Однако для этого требуются выявление типовой серии, а также проведение лектотификации, что подчёркивалось ранее [16]. В.П. Аникин описал данный вид на основании 16 экземпляров из бассейна Томи, при этом не выделив голотип и не указав в протологе инвентарные номера син-типов.

В связи с этим цель данного исследования – выделение лектотипа *Le. kessleri*. Мы рассматриваем сибирскую миногу, *Le. kessleri*, как самостоятельный вид на основании литературных данных [3, 4, 7, 14, 15, 17], не ставя целью окончательного решения вопроса о его таксономическом статусе.

Материалы и методы

Материалом для настоящей работы послужили коллекционные экземпляры сибирской миноги из фондов Зоологического музея (ЗМ ТГУ) и научной коллекции кафедры ихтиологии и гидробиологии (КИИГ ТГУ) Национального исследовательского Томского государственного университета (ТГУ), отловленные до 1905 г. – времени выхода работы В.П. Аникина и с указанием локалитета (по информации на авторских этикетках). Всего изучено 8 экземпляров, все они зафиксированы в растворе формалина неизвестной концентрации: ЗМ ТГУ, № 3698, $n=1$, устье р. Киргизки, г. Томск, Томская область, Россия, 02.10.1900, Coll. В.П. Аникин; КИИГ ТГУ, № 3696, $n=6$, из зоба чайки, устье р. Томи у деревни Козюлино, Томская область, Россия, 15.06.1903, Coll. Г.Э. Иоганзен; КИИГ ТГУ, № 3699, $n=1$, р. Киргизка, окр. г. Томск, Томская область, Россия, 12.12.1899 г., Coll. А. Нейланд.

У исследуемых экземпляров описывали окраску в фиксированном состоянии, проводили снятие стандартных промеров и подсчёт зубов по наиболее полной схеме, используемой в систематике данной группы [18]. Все измерения делали мерной лентой или электронным штангенциркулем с точностью до 0,1 мм. Подсчёт зубов проводили с использованием стереоскопического микроскопа МСП-1 (ЛОМО, Россия).

Для неинвазивного определения пола у музейного экземпляра сибирской миноги использовали рентгеновскую микрокомпьютерную томографию, для которой ранее показана перспективность применения в области анатомии миног на примере изучения формы миоцент *P. marinus* L., 1758 [19]. Исследование проводили на экспериментальной рентгеновской томо-

графической установке «Орел-МТ» (Томск, Россия). Режим томографического сканирования: напряжение 70 кВ, ток 150 мкА, время экспозиции каждой проекции 1 с, число проекций 1200 шт., размер вокселя 30 мкм. Для контроля аналогичным методом определили пол у вскрытых взрослых самца и самки речной миноги, *La. fluviatilis* (L., 1758), отловленных 19.10.2023 г. в р. Нева, зафиксированных в 10% формалине и хранящихся в 70% этаноле в учебной коллекции кафедры зоологии позвоночных и экологии ТГУ.

Выявление синтипов проведено в соответствии со статьёй 73, а описание лектотипа – со статьями 72 и 74 Международного кодекса зоологической номенклатуры [20]. Публикация зарегистрирована в базе данных ZooBank под номером LSID: urn:lsid:zoobank.org:pub:7F80317A-C368-4F6E-9DE0-3AC1BF0DA3C3.

Результаты и обсуждение

Выявление синтипов. В ходе анализа коллекционного материала нами установлено, что в ТГУ из всех имеющихся в фондах Зоологического музея и кафедры ихтиологии и гидробиологии 8 экз. *Le. kessleri* только 2 по срокам и местам отлова потенциально могли бы соответствовать типовой серии вида.

Экземпляр из Ихтиологической коллекции Зоологического музея ТГУ (рис. 1A–1D) с этикеткой: «№ 3698. Минога. *Petromyzon Kessleri* An. Устье Киргизки около Томска. 2-ое Октября 1900 г. В. Аникинъ». Соответствует № 8 в работе Б.Г. Иоганзена [12: с. 503], которому он даёт пометку «тип *kessleri*», не исследован другими авторами [15]. Место и сроки находки полностью соответствуют таковым типовой серии [2: с. 10]. Экземпляр с данным «старым» инвентарным номером приведён в числе синтипов в онлайн базе по систематике «Eschmeyer's Catalog of Fishes» [21]. В статье Б.Г. Иоганзена [12] для данного экземпляра (рис. 1A) миноги приведена только часть промеров. Сопоставление наших данных с ними подтвердило соответствие этого экземпляра описанию Б.Г. Иоганзена, которое дано им в следующем виде [12: с. 503]: длина тела при измерении в 1914 г. – 192 мм, математически вычисленные прижизненная длина тела – 202 мм и расстояние между первым и вторым спинными плавниками – 9 мм, нижнечелюстные зубы: 2 крайних двухвершинных и 4 промежуточных. Это соответствует характеристикам типовых экземпляров в работе В.П. Аникина [2: с. 10].

Экземпляр из коллекции кафедры ихтиологии и гидробиологии ТГУ (рис. 1D) [12: № 9; 19: TGU 9] снабжён этикеткой со следующей информацией: «*Petromyzon kessleri* An. Минога. № 3699. Пойман в р. Киргизка. 12.12.1899 г. Артур Нейланд». По всем признакам он соответствует типовой серии, но в настоящее время находится в неудовлетворительном состоянии сохранности: отсутствует кожа, имеются многочисленные разрывы миомеров туловища, утрата миомеров на хвосте, где также на одном из боков отошёл от хорды пласт мускулатуры длиной около 1 см, отсутствуют плавники. В связи с этим для него нами не проведены измерения.



Рис. 1. Типовые экземпляры сибирской миноги *Lethenteron kessleri* (Anikin, 1905): *A* – лектотип (ЗМ ТГУ, № 3698, устье р. Киргизки, г. Томск, Томская область, Россия, 02.10.1900, Coll. В.П. Аникин), вид сбоку; *B* – оригинальная этикетка лектотипа *L. kessleri*; *C* – голова лектотипа, вид сбоку; *D* – ротовая воронка лектотипа, вид снизу; *E* – паралектотип (КИИГ ТГУ, № 3699, р. Киргизка, г. Томск, Томская область, Россия, 12.12.1899, Coll. Артур Нейланд). Авторы фото: В.В. Ярцев, С.С. Соловьева, Д.А. Деридов

[Fig. 1. Type specimen of Siberian lamprey, *Lethenteron kessleri* (Anikin, 1905): *A* - lectotype (ZM TSU, No. 3698, Russia, Tomsk Region, Tomsk, mouth of Kirgizka River, 02.10.1900, coll.: V.P. Anikin), sid view; *B* - original lectotype label; *C* - head of lectotype, side view; *D* - oral disc, bottom view; *E* - paralectotype (DIH TSU, No. 3699, Russia, Tomsk Region, Tomsk, Kirgizka River, 12.12.1899, Coll.: Arthur Neiland), side view. Photo by V.V. Yartsev, S.S. Soloveva, D.A. Deridov]

В близком к этому виде (без расщепления кончика хвоста) он приведён в работе А.М. Насека, К.Б. Рёно [15: р. 13], где авторы указывают для него длину тела 182 мм. В работе Б.Г. Иоганзена [12: с. 503] дано полное описание морфологических признаков этого экземпляра: длина тела при измерении в 1933 г. – 183 мм, математически вычисленные прижизненная длина тела – 191 мм и расстояние между первым и вторым спинными плавниками – 0 мм, первый спинной плавник «кончается очень полого, за ним продолжается жировая складка 6–7 мм», второй спинной плавник «медленно повышается» и «без перерыва переходит в спинную область» хвостового плавника, нижнечелюстные зубы: «желтые, роговые, заострённые; краевые хорошо выражены», крайний левый – двухвершинный, крайний правый – трёхвершинный, 4 промежуточных, «верхнегубные зубы многочисленны, острые, близко сходятся основаниями», «внешних боковых нет». Это позволяет утверждать, что он происходит из типовой серии, в связи с этим рассматривается нами, как и авторами ранее [15], в качестве синтипа.

Из исходной серии в 10 экз. (№ 3696), полученной из пищеварительного тракта сизой чайки, добытой в устье р. Томи в Козюлино 28.06.1903 г. (по старому стилю) Г.Э. Иоганzenым [12: № 3] к 2020 г. сохранилось только 6 экз. [15: TGU 3], которые сохранены до настоящего времени. Б.Г. Ио-

ганзен указывает, что эти миноги «Аникиным определены как *kessleri*» [12: с. 503]. Вероятно, именно это привело к тому, что они рассматривались ранее другими авторами как синтипы [15]. Однако в своей работе В.П. Аникин (1905) упоминает этих миног в сравнении с другими – собранными в р. Енисей у д. Гольчиха, указывая на характер их повреждений [2: с. 16]. Кроме того, длина тела типовых экземпляров, приводимая им [2: с. 10, 160–210 мм], не соответствует таковым данной серии [12: 126–177 мм, $n = 10$; 19: 128–165 мм, $n = 6$], происхождение типовых экземпляров («р. Томи и устье р. Киргизки») также не соответствует месту сбора миног, добытых Г.Э. Иоганzenым («устье р. Томи»). Всё это указывает на то, что их нельзя отнести к типовой серии. Упоминание Б.Г. Иоганzenым [12: с. 503] определения данных экземпляров В.П. Аникиным не указывает на использование серии для описания вида.

В.П. Аникин [2: с. 10] описал *Le. kessleri* по серии из 16 экз., длина тела которых варьировала от 160 до 210 мм, а места отлова соответствовали ближайшим окрестностям г. Томска: в р. Томи и в устье р. Киргизки, впадающей в Томь недалеко от Томска. Б.Г. Иоганzen [12], проанализировав весь материал по виду в коллекционном фонде ТГУ, описывал уже только 5 экз., соответствующих по датам и местам отлова типовой серии. А.Б. Насека, К.Б. Рёно [15] исследовали 7 экз., которые они отнесли к синтипам. Шесть из них соответствовали одной серии – миноги, полученные из пищеварительного тракта сизой чайки, *Larus canus* L., 1758.

Таким образом, из 16 экз., образующих номенклатурный тип, в настоящее время имеется лишь 2, которые можно однозначно рассматривать как принадлежащие к типовой серии – синтипы – в соответствии со статьёй 73, п. 2 Международного кодекса зоологической номенклатуры [20]: №№ 3698 и 3699. Из них лишь один – № 3698 – пригоден для морфологического исследования в настоящее время и может быть соотнесён с протологом, в связи с чем выбран нами как лектотип (см. рис. 1А–1С), тогда как экземпляр № 3699 рассматривается нами как паралектотип (см. рис. 1D).

Определение пола лектотипа. При рентгеновском микротомографическом обследовании миног выявлено, что чёткость картины у относительно недавно отловленных и более крупных *La. fluviatilis* выше, чем у *Le. kessleri*, хранящегося в фиксирующей жидкости 125 лет. У экземпляров *La. fluviatilis* чётко просматриваются кожа, миомеры, миосепты, хорда, гонады, в то время как у экз. *Le. kessleri* видны только, вероятно, более плотные и широкие миосепты и хорда. У экземпляров *La. fluviatilis* на компьютерных реконструкциях гонады хорошо отличаются друг от друга (рис. 2А, 2В): в яичнике можно чётко визуализировать овариальные фолликулы, по сравнению с ним семенник выглядит достаточно гомогенно, семенные фолликулы не просматриваются.

У исследуемого образца *Le. kessleri* содержимое полости тела в центре туловища гомогенно (рис. 2С) и соответствует таковому семенника самца *La. fluviatilis* (см. рис. 1В). На основании этого можно заключить, что экземпляр *Le. kessleri* (№ 3698) – самец. Кроме того, у него отсутствует анальный плавник, характерный для самок [6, 14, 17].

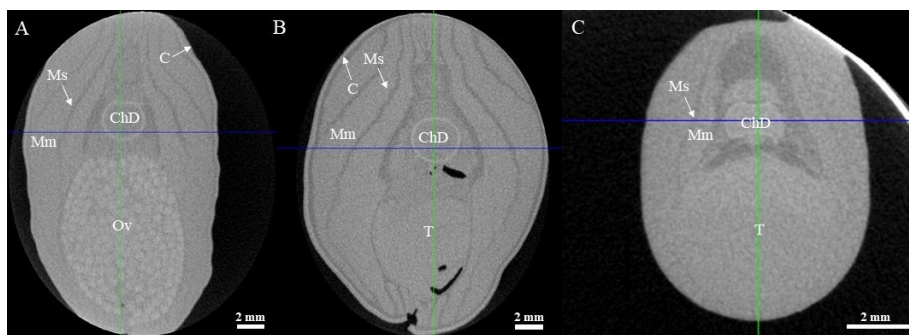


Рис. 2. Виртуальные поперечные срезы трёхмерных реконструкций рентгеновских микрофотограмм тела миног, полученных на томографической рентгеновской установке «Орел-МТ» (Томск, Россия) с размером вокселя 30 мкм: *A* – самки и *B* – самца *Lampetra fluviatilis* (отлов: 19.10.2023, р. Нева; фиксация: 10% формалин; хранение: 70% этанол), *C* – музейного образца *Lethenteron kessleri* (отлов: 02.10.1900, устье р. Киргизки, В.П. Аникин, ЗМ ТГУ, № 3698; фиксация: формалин; хранение: 70% этанол). *C* – кожа, *ChD* – хорда, *Mm* – миомер, *Ms* – миоसेпта, *Ov* – яичник, *T* – семенник. Авторы фото – А.В. Батранин, В.В. Ярцев

[Fig. 2. Microdissection and orthoslice of lamprey bodies based on X-ray microtomograms (voxel size 30 μ m) obtained with the tomographic X-ray instrument "Orel-MT" (Tomsk, Russia): *A* - male and *B* - female specimens of *Lampetra fluviatilis* (caught 19.10.2023, Neva River, fixation with 4% formaldehyde, preserving in 70% ethanol), *C* - *Lethenteron kessleri* from ZM TSU (caught 02.10.1900, mouth of Kirgizka River, V.P. Anikin, ZM TSU, No. 3698; fixation with formaldehyde, preserving in 70% ethanol). *C* - skin, *ChD* - chorda dorsalis, *Mm* - myomere, *Ms* - myosept, *Ov* - ovary, *T* - testis. Photo by A.V. Batranin, V.V. Yartsev]

Хотя имеющаяся к настоящему времени в работе [19] рентгеновская томография демонстрирует скромные возможности для изучения анатомии миног (*Petromyzon marinus*; DGH LAMP020), это может объясняться не оптимальным выбором оборудования и протокола сканирования. Проведение исследований на доступной авторам установке позволило получить более качественные изображения без применения контрастных веществ. Более высокое пространственное разрешение дает хорошую детализацию в томографии разнообразных организмов, что было показано ранее [22].

Обозначение лектотипа Lethenteron kessleri (Anikin, 1905). ЗМ ТГУ, № 3698 [12: № 8] (см. рис. 1*A*, 1*B*, 1*C*), Россия, Томская область, г. Томск, устье р. Киргизки, речной подбассейн Томи, бассейн реки Оби, бассейн Карского моря, бассейн Северного Ледовитого океана, 02.10.1900. Coll.: В.П. Аникин.

Designation of the lectotype Lethenteron kessleri (Anikin, 1905). ZM TSU, No. 3698 [12: № 8] (см. рис. 1*A*, 1*B*, 1*C*), Russia, Tomsk Region, Tomsk, mouth of Kirgizka River near Tomsk, Tom' River system, Ob' River drainage, Kara Sea basin, Arctic Ocean basin, 02.10.1900. Coll.: V.P. Anikin.

ZooBank LSID: urn:lsid:zoobank.org:act:03FEE0F1-D9AB-4A2B-A10B-2A9C324C68E3

Описание лектотипа Lethenteron kessleri (Anikin, 1905). Окраска фиксированного экземпляра однотонная бежевая. Метаморфизировавший самец: длина рыла – 9,6 мм, горизонтальный диаметр глаза – 3,6 мм, промежутков

между глазом и жаберным аппаратом – 5,1 мм, расстояние от конца рыла до первого жаберного отверстия – 20,3 мм, длина жаберного аппарата – 17,4 мм, высота жаберного аппарата – 9,3 мм, расстояние от конца рыла до ноздри – 11,2 мм, длина тушки без жаберного аппарата – 92 мм, длина всего тела – 188 мм, межглазничное пространство – 7,2 мм, продольный диаметр продольно сложенного ротового диска – 8,3 мм, наибольшая высота тела – 10,8 мм, длина основания первого спинного плавника – 30,4 мм, наибольшая высота первого спинного плавника – 5,4 мм, длина основания второго спинного плавника – невозможно измерить, наибольшая высота второго спинного плавника – 4 мм, расстояние от ануса до конца хвоста – 52 мм, длина спинной части хвостового плавника – невозможно измерить, длина промежутка между первой и второй жаберными щелями – 0,65 мм, высота хвоста в месте перехода второго спинного плавника в хвостовой – 2,2 мм, высота хвостового плавника и высота хвоста – невозможно измерить. Зубная формула: верхнегубных зубов – 21, верхнечелюстных зубов – 2, нижнечелюстных – 6, из них 2 двураздельных и 4 промежуточных, нижнегубных зубов – 26, боковых зубов: слева 2 двухвершинных и один одновершинный, справа 3 двухвершинных. Число миомеров – 69. Второй спинной и хвостовой плавники в плохом состоянии, из-за чего не представляется возможным точно измерить 3 связанных с ними характеристики.

Description of lectotype Lethenteron kessleri (Anikin, 1905). Color of lectotype in preservative: plain beige. Adult male: snout length - 9.6 mm, eye length - 3.6 mm, postocular length - 5.1 mm, prebranchial length - 20.3 mm, branchial length - 17.4 mm, branchial depth - 9.3 mm, prenostril length - 11.2 mm, trunk length - 92 mm, total length - 188 mm, interocular width - 7.2 mm, disc length - 8.3 mm, trunk depth - 10.8 mm, first dorsal fin length - 30.4 mm, first dorsal fin depth - 5.4 mm, second dorsal fin length - impossible to measure, second dorsal fin depth - 4 mm, tail length - 52 mm, caudal fin length - impossible to measure, interbranchial opening - length - 0.65 mm, tail depth at junction of second dorsal and caudal fins - 2.2 mm, maximum depth of caudal fin - impossible to measure, tail depth at maximum depth of caudal fin - impossible to measure. Teeth: 21 anterior teeth, supraoral lamina with 2 unicuspid teeth, infraoral lamina with 6 teeth: 2 bicuspid lateral teeth, 4 unicuspid intercalary teeth, 26 posterior teeth, 2 left anterior endolateral bicuspid teeth and one left anterior unicuspid endolateral tooth; 3 right anterior endolateral bicuspid teeth. Number of trunk myomeres - 69. The second dorsal fin and caudal fin are in poor condition; it is impossible to measure three associated characteristics.

Список источников

1. Фоминых С.Ф., Некрылов С.А. Кашенко Николай Феофанович – основатель зоологического музея // Томские музеи. Музеи университетов : Материалы к энциклопедии «Музеи и музейное дело Томской области» / под ред. С.Ф. Фоминых, Э.И. Черняка. Томск : Издательство Томского государственного университета, 2012. С. 237–238.
2. Аникин В.П. Описание новых азиатских пород рыб. Томск : Типо-литография П.И. Макушина, 1905. 18 с.

3. Docker M.F. Lampreys: Biology, Conservation and Control. Vol. 1. Dordrecht : Springer Science + Business Media, 2015. 438 p. doi: 10.1007/978-94-017-9306-3
4. Docker M.F. Lampreys: Biology, Conservation and Control. Vol. 2. Dordrecht : Springer Nature B.V., 2019. 590 p. doi: 10.1007/978-94-024-1684-8
5. Balakirev E.S., Parensky V.A., Ayala F.J. Complete mitochondrial genomes of the anadromous and resident forms of the lamprey *Lethenteron camtschaticum* // Mitochondrial DNA. Part A, DNA mapping, sequencing, and analysis Journal. 2016. Vol. 27, № 3. PP. 1730–1731. doi: 10.3109/19401736.2014.961143
6. Interesova E.A., Babkina I.B., Romanov V.I., Pozdnyak I.V., Davletshina G.I., Trifonov V.A. New data on small lampreys of the genus *Lethenteron* (Petromyzontidae) of the Tom River, a typical habitat of the Siberian brook lamprey *Lethenteron kessleri* // Journal of Ichthyology. 2022. № 62. PP. 1230–1236. doi: 10.1134/S003294522206011X
7. Li Y. Phylogeny of the lamprey genus *Lethenteron* Creaser and Hubbs 1922 and closely related genera using the mitochondrial cytochrome b gene and nuclear gene introns. Manitoba : Winnipeg, 2014. 228 p.
8. Yamazaki Y., Yokoyama R., Nishida M., Goto A. Taxonomy and molecular phylogeny of *Lethenteron* lampreys in eastern Eurasia // Journal of Fish Biology. 2006. Vol. 68. PP. 251–269. doi: 10.1111/j.0022-1112.2006.01070.x
9. Берг Л.С. Обзор миног северного полушария // Ежегодник Зоологического музея АН СССР. 1931. Т. 32, № 1. С. 87–116.
10. Берг Л.С. Рыбы пресных вод СССР и сопредельных стран. Л. : Всесоюзный институт озерного и речного рыбного хозяйства, 1932. 543 с.
11. Иоганзен Б.Г. Морфолого-биологические особенности круглоротых Сибири // Зоологический журнал. 1935. Т. 14, вып. 2. С. 353–370.
12. Иоганзен Б.Г. Морфолого-биологические особенности круглоротых Сибири (окончание) // Зоологический журнал. 1935. Т. 14, вып. 3. С. 501–522.
13. Иоганзен Б.Г. Рыбы Западной Сибири : дис. ... д-ра биол. наук. Томск : Томский государственный университет им. В.В. Куйбышева, 1944. 987 с.
14. Журавлев В.Б., Ломакин С.Л. Морфозоологическая характеристика сибирской миноги *Lethenteron kessleri* (Anikin) реки Белокурихи из бассейна Верхней Оби // Алтайский зоологический журнал. 2017. № 13. С. 3–8.
15. Naseka A.M., Renaud C.B. Morphology-based taxonomic re-assessment of the Arctic lamprey, *Lethenteron camtschaticum* (Tilesius, 1811) and taxonomic position of other members of the genus // ZooKeys. 2020. Vol. 991. PP. 1–67. doi: 10.3897/zookeys.991.54938
16. Дылдин Ю.В., Бабкина И.Б., Карманова О.Г., Романов В.И., Орлов А.М., Интересова Е.А., Ганель Л., Современное таксономическое положение миног рода *Lethenteron* Западной Сибири // Рыбоводство и рыбное хозяйство. 2019. № 12 (167). С. 8–12.
17. Полторыхина А.Н. Сибирская минога бассейна Верхнего Иртыша : дис. ... канд. биол. наук. Томск : Томский государственный педагогический институт им. Ленинского Комсомола, 1971. 151 с.
18. Naseka A.M., Tuniyev S.B., Renaud C.B. *Lethenteron ninae*, a new nonparasitic lamprey species from the north-eastern Black Sea basin (Petromyzontiformes: Petromyzontidae) // Zootaxa. 2009. Vol. 2198. PP. 16–26. doi: 10.11646/zootaxa.2198.1.2
19. Wood B.M., Jia G., Carmichael O., Mcklveen K., Homberger D.G. 3D MRI modeling of thin and spatially complex soft tissue structures without shrinkage: Lamprey myosepta as an example // The Anatomical Record. 2018. Vol. 301 (10). PP. 1745–1763. doi: 10.1002/ar.23857
20. Международный кодекс зоологической номенклатуры. 4-е изд. Принят Международным союзом биологических наук: пер. с англ. и фр. 2-е исп. изд. рус. перевода. М. : Т-во научных изданий КМК, 2004. 223 с.
21. Fricke R., Eschmeyer W.N., van der Laan R. (eds.) Eschmeyer's Catalog of Fishes: Genera, Species, References. 2025. URL: <http://researcharchive.calacademy.org/research/ichthyology/catalog/fishcatmain.asp> (дата обращения: 19.04.2025).

22. Bondarenko S.L., Batranin A.V., Smirnov S.V., Stuchebrov S.G. X-ray imaging and computed tomography of conifer tree rings for climatological purposes // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 211. PP. 1–6. doi: 10.1088/1755-1315/211/1/012044

References

1. Fominykh SF, Nekrylov SA. Kashchenko Nikolay Feofanovich - osnovatel' zoologicheskogo muzeya [Kashchenko Nikolay Feofanovich - founder of the zoological museum]. In: *Tomskie muzei. Muzei universitetov: Materialy k entsiklopedii "Muzei i muzeynoe delo Tomskoy oblasti"* [Tomsk Museums. University Museums: Materials for the Encyclopedia "Museums and Museum Affairs of the Tomsk Region"]. Fominykh SF, Chernyak EI, editors. Tomsk: Tomsk State University Publ.; 2012. pp. 237-238. In Russian
2. Anikin VP. Opisanie novykh aziatskikh porod ryb. [Description of new Asian fish species]. Tomsk: Tipo-litografiya PI Makushina Publ.; 1905. 18 p. In Russian
3. Docker MF. Lampreys: Biology, Conservation and Control. Vol. 1. Dordrecht: Springer Science + Business Media; 2015. 438 p. doi: 10.1007/978-94-017-9306-3
4. Docker MF. Lampreys: Biology, Conservation and Control. Vol. 2. Dordrecht: Springer Nature B.V.; 2019. 590 p. doi: 10.1007/978-94-024-1684-8
5. Balakirev ES, Parensky VA, Ayala FJ. Complete mitochondrial genomes of the anadromous and resident forms of the lamprey *Lethenteron camtschaticum*. *Mitochondrial DNA. Part A: DNA Mapping, Sequencing, and Analysis Journal*. 2016;27(3):1730-1731. doi: 10.3109/19401736.2014.961143
6. Interesova EA, Babkina IB, Romanov VI, Pozdnyak IV, Davletshina GI, Trifonov VA. New data on small lampreys of the genus *Lethenteron* (Petromyzontidae) of the Tom River, a typical habitat of the Siberian brook lamprey *Lethenteron kessleri*. *Journal of Ichthyology*. 2022;62:1230-1236. doi: 10.1134/S003294522206011X
7. Li Y. Phylogeny of the lamprey genus *Lethenteron* Creaser and Hubbs 1922 and closely related genera using the mitochondrial cytochrome b gene and nuclear gene introns. Manitoba: Winnipeg; 2014. 228 p.
8. Yamazaki Y, Yokoyama R, Nishida M, Goto A. Taxonomy and molecular phylogeny of *Lethenteron* lampreys in eastern Eurasia. *Journal of Fish Biology*. 2006;68:251-269. doi: 10.1111/j.0022-1112.2006.01070.x
9. Berg LS. Obzor minog severnogo polushariya [Overview of Northern Hemisphere Lampreys]. *Ezhegodnik Zoologicheskogo muzeya AN SSSR*. 1931;32(1):87-116. In Russian
10. Berg LS. Ryby presnykh vod SSSR i sopredel'nykh stran [Freshwater fish of the USSR and adjacent countries]. Leningrad: All-Union Institute of Lake and River Fisheries Publ.; 1932. 543 p. In Russian
11. Johansen BG. Morfologo-biologicheskie osobennosti kruglorotkyh Sibiri [Morphological and biological characteristics of Siberian cyclostomes]. *Zoologicheskii zhurnal*. 1935;14(2):353-370. In Russian, German summary
12. Johansen BG. Morfologo-biologicheskie osobennosti kruglorotkyh Sibiri (okonchanie) [Morphological and biological characteristics of Siberian cyclostomes]. *Zoologicheskii zhurnal*. 1935;14(3):501-522. In Russian, German summary
13. Johansen BG. Ryby Zapadnoy Sibiri [Fishes of Western Siberia] [DrSci. Dissertation, Biology]. Tomsk: Tomsk State University; 1944. 987 p. In Russian
14. Zhuravlev VB, Lomakin SL. Morphoecological characteristics of the Siberian lamprey *Lethenteron kessleri* (Anikin) in Belockurikha river from upper Ob' basin. *Altai Zoological Journal*. 2017;13:3-8. In Russian, English summary
15. Naseka AM, Renaud CB. Morphology-based taxonomic re-assessment of the Arctic lamprey, *Lethenteron camtschaticum* (Tilesius, 1811) and taxonomic position of other members of the genus. *ZooKeys*. 2020;991:1-67. doi: 10.3897/zookeys.991.54938

16. Dylidin YuV, Babkina IB, Karmanova OG, Romanov VI, Orlov AM, Interesova EA, Ganel' L. Current taxonomic position of lampreys of the genus *Lethenteron* in Western Siberia. *Fish breeding and fisheries*. 2019;12(167):8-12. In Russian, English summary
17. Poltorykhina AN. Sibirskaya minoga basseyna Verkhnego Irtysha [Siberian lamprey of the Upper Irtysh basin] [CandSci. Dissertation, Biology]. Tomsk: Tomsk State Pedagogical Institute; 1971. 151 p. In Russian
18. Naseka AM, Tuniyev SB, Renaud CB. *Lethenteron ninae*, a new nonparasitic lamprey species from the north-eastern Black Sea basin (Petromyzontiformes: Petromyzontidae). *Zootaxa*. 2009;2198:16-26. doi: 10.11646/zootaxa.2198.1.2
19. Wood BM, Jia G, Carmichael O, Mcklveen K, Homberger DG. 3D MRI modeling of thin and spatially complex soft tissue structures without shrinkage: Lamprey myosepta as an example. *The Anatomical Record*. 2018;301(10):1745-1763. doi: 10.1002/ar.23857
20. International code of zoological nomenclature. 4th ed. Adopted by the International Union of Biological Sciences. Kerzhner IM, translated from English and French; Andriyashev AP, Starobogatov YaI, editors. London: International Trust for Zoological Nomenclature; 1999. 223 p. In Russian
21. Fricke R, Eschmeyer WN, van der Laan R, editors. Eschmeyer's Catalog of Fishes: Genera, Species, References. 2025 [Electronic resource]. Available at: <http://researcharchive.calacademy.org/research/ichthyology/catalog/fishcatmain.asp> (accessed 19.04.2025).
22. Bondarenko SL, Batranin AV, Smirnov SV, Stuchebrov SG. X-ray imaging and computed tomography of conifer tree rings for climatological purposes. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018;211:1-6. doi:10.1088/1755-1315/211/1/012044

Информация об авторах:

Ярцев Вадим Вадимович, канд. биол. наук, и.о. заведующего, доцент кафедры зоологии позвоночных и экологии, заведующий Зоологическим музеем, Биологический институт, Национальный исследовательский Томский государственный университет; доцент кафедры биологии и генетики, Сибирский государственный медицинский университет (Томск, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7789-7424>

E-mail: vadim_yartsev@mail.ru

Деридов Дмитрий Александрович, магистрант, хранитель фондов Зоологического музея, Биологический институт, Национальный исследовательский Томский государственный университет (Томск, Россия).

E-mail: mr.deridov@gmail.com

Соловьёва Софья Сергеевна, магистрант, хранитель фондов Зоологического музея, Биологический институт, Национальный исследовательский Томский государственный университет (Томск, Россия).

E-mail: sonya.soloveva.01@mail.ru

Батранин Андрей Викторович, канд. техн. наук, доцент Школы неразрушающего контроля и безопасности, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Томск, Россия).

<https://orcid.org/0000-0001-9678-2905>

E-mail: batranin@tpu.ru

Бабкина Ирина Борисовна, канд. биол. наук, доцент кафедры ихтиологии и гидробиологии, Биологический институт, Национальный исследовательский Томский государственный университет (Томск, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3302-6819>

E-mail: bibsphera@gmail.com

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Vadim V. Yartsev, Cand. Sci. (Biol.), Acting Head, Assoc. Prof. of the Department of Vertebrate Zoology and Ecology, Head of the Museum of Zoology, Institute of Biology, National Research Tomsk State University; Assoc. Prof. of the Department of Biology and Genetics, Siberian State Medical University (Tomsk, Russia).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7789-7424>

E-mail: vadim_yartsev@mail.ru

Dmitriy A. Deridov, Master's student, curator of the Museum of Zoology, Institute of Biology, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russia).

E-mail: mr.deridov@gmail.com

Sofia S. Soloveva, Master's student, curator of the Museum of Zoology, Institute of Biology, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation).

E-mail: sonya.soloveva.01@mail.ru

Batranin A. Viktorovich, Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof. at School of Non-destructive Testing, National Research Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russia)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9678-2905>

E-mail: batranin@tpu.ru

Babkina I. Borisovna, Cand. Sci. (Biol.), Assoc. Prof. of the Department of Ichthyology and Hydrobiology, Institute of Biology, National Research Tomsk State University (Russia).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3302-6819>

E-mail: bibspheara@gmail.com

The Authors declare no conflict of interest.

*Статья поступила в редакцию 16.06.2025;
одобрена после рецензирования 11.07.2025; принята к публикации 04.09.2025*

*The article was submitted 16.06.2025;
approved after reviewing 11.07.2025; accepted for publication 04.09.2025*

Original article
UDC 599.322.2
doi: 10.17223/19988591/71/10

Current status of forest-steppe marmot *Marmota kastschenkoi* settlements on the northern periphery of its range (Tomsk Oblast) and problems of its protection

Polina A. Katasonova¹, Alexandr A. Shapovalov²,
Igor G. Korobitsyn³

^{1, 2, 3} National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

¹ <https://orcid.org/0009-0004-3646-607X>, polyakatsonova@gmail.com

² <https://orcid.org/0009-0006-3539-7986>, zenderdaddy@mail.ru

³ <https://orcid.org/0000-0001-7709-3004>, rozenpom@mail.ru

Abstract. The forest-steppe marmot, *Marmota kastschenkoi* was historically classified as a subspecies of the gray marmot *M. baibacina*. However, based on morphological, karyological, and ecological characteristics, it has been proposed to elevate its taxonomic status to that of a distinct species. This species was initially described as a subspecies from the vicinity of Tomsk, which represents the northern boundary of its geographic range. This marmot also inhabits Kemerovo and Novosibirsk Oblasts, as well as Altai Krai. It is estimated that the total population of forest-steppe marmots is approximately 13 000 individuals, which is the smallest number among all marmot species in Russia. The proposal to include this species in the Red Data Book of Russia has been put forward repeatedly, but unfortunately has not been implemented. The number of marmots in Tomsk Oblast is the smallest of all the regions where this species lives. Regrettably, contemporary data regarding this species in Tomsk Oblast are scarce. Population estimates ranging from several dozen to 200 individuals. The forest-steppe marmot is listed in the regional Red Data Book. The study is aimed to assess the current state of population of forest-steppe marmots within some existing colonies in Tomsk Oblast, as well as to quantify the number of burrows and family groups present within these colonies. The significance of this study is emphasised by the ongoing economic activities in proximity to marmot habitats. These activities, which include cottage construction and mining, pose a substantial threat to the survival of population of marmots in these rare settlements.

The article contains 5 Figures, 2 Tables, 23 References.

Keywords: marmots, colonies, number of families and animals, Western Siberia, conservation, Red Data Book

For citation: Katasonova PA, Shapovalov AA, Korobitsyn IG. Current status of forest-steppe marmot *Marmota kastschenkoi* settlements on the northern periphery of its range (Tomsk Oblast) and problems of its protection. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya* = *Tomsk State University Journal of Biology*. 2025;71:169-184. doi: 10.17223/19988591/71/10

Научная статья

УДК 599.322.2

doi: 10.17223/19988591/71/10

Современное состояние поселений лесостепного сурка *Marmota kastschenkoï* на северной периферии ареала (Томская область) и проблемы его охраны

Полина Александровна Катасонова¹,
Александр Андреевич Шаповалов²,
Игорь Геннадьевич Коробицын³

^{1, 2, 3} Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Томск, Россия

¹ <https://orcid.org/0009-0004-3646-607X>, polyakatsonova@gmail.com

² <https://orcid.org/0009-0006-3539-7986>, zenderdaddy@mail.ru

³ <https://orcid.org/0000-0001-7709-3004>, rozenpom@mail.ru

Аннотация. Лесостепной сурок *Marmota kastschenkoï* изначально был описан как подвид серого сурка *M. baibacina*. Однако на основании морфологических, кариологических и экологических характеристик было предложено повысить его таксономический статус до отдельного вида. Первоначально эта форма сурка была описана из окрестностей Томска, где и проходит северная граница его ареала. Лесостепной сурок также обитает в Кемеровской и Новосибирской областях, а также в Алтайском крае. Предполагается, что общая численность вида составляет около 13 000 особей, что является наименьшей численностью среди всех видов сурков в России. Неоднократно высказывалось предложение о включении этого вида в Красную книгу России, но, к сожалению, оно так и не было реализовано. Численность сурков в Томской области является наименьшей из всех регионов, где вид встречается. Современные данные об этом виде в Томской области фрагментарны. Оценки численности популяции в регионе варьируют от нескольких десятков до 200 особей. Вид занесен в региональную Красную книгу. Целью исследования является оценка современного состояния популяции лесостепного сурка в существующих колониях в Томской области, а также характеристика ряда колоний: количества нор и семейных групп, численность зверьков в них. Значимость данного исследования подчеркивается активизацией хозяйственной деятельностью вблизи мест обитания сурка. Эта деятельность включает дачное и коттеджное строительство, а также разработку полезных ископаемых и представляет существенную угрозу выживанию популяции сурков в этих редких поселениях.

Ключевые слова: сурки, колонии, число животных и их семей, Западная Сибирь, сохранение, Красная книга

Для цитирования: Katasonova P.A., Shapovalov A.A., Korobitsyn I.G. Current status of forest-steppe marmot *Marmota kastschenkoï* settlements on the northern periphery of its range (Tomsk Oblast) and problems of its protection // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2025. № 71. С. 169–184. doi: 10.17223/19988591/71/10

Introduction

The forest-steppe marmot *Marmota kastschenkoi* Stroganov et Yudin, 1956 was long regarded as a subspecies of the gray marmot *Marmota baibacina* Kastschenko, 1899. It exhibits distinct differences in fur coloration on the chin and tail compared to the nominative form *M. baibacina*, which inhabits the vicinity of the village Cherga in the Altai Republic of Russia. The holotype of the forest-steppe marmot subspecies was originally described from the vicinity of Tomsk [1]. Subsequent studies revealed that forest-steppe marmot also inhabits the Novosibirsk and Kemerovo regions, as well as Altai Krai. In addition, a complex of new features of their morphology was identified. Some differences separating *M. kastschenkoi* from *M. baibacina* were found in the form of skull bones and os penis [2]. It also was revealed that the forest-steppe marmot has 36 chromosomes in contrast to the 38 found in the gray marmot, which served as a reason to raise the taxonomic status of the forest-steppe marmot to species [3]. In addition to morphology and karyology, there were significant differences in ecology - the forest-steppe marmot is the only species that lives on forested slopes and almost never used flat landscapes [4], and also has a geographical gap from the range of the gray marmot [5]. However, some data suggest a relatively weak differentiation of the forest-steppe marmot when analyzing various molecular markers, indicating that its taxonomic status may be closer to that of a subspecies [6, 7]. Thus, both scenarios are possible, when the forest-steppe marmot is recognized as a species or subspecies [8]. For example, in IUCN Red List (International Union for Conservation of Nature), the forest-steppe marmot is not distinguished as a separate species. The status of this species remains a subject of ongoing discussion. Nevertheless, it is important to note that this particular form is the least numerous within our fauna and warrants consideration for protected status, as well as recommendations for inclusion in the Red Data Book of the Russian Federation [3]. Unfortunately, this proposal has not yet been implemented. As an exception, this species of marmot has been included in the regional Red Data Book of Tomsk Oblast since 2003. Similar proposals have been put forth for the Altai Krai [9], where its population has also experienced a decline; however, these proposals have not yet to receive support. It is estimated that the total population of forest-steppe marmots (*M. kastschenkoi*) within their range is approximately 13 000 individuals, representing the smallest population among all marmot species in Russia. Within Tomsk Oblast, which lies at the northern periphery of this range, the population density is notably lower than in other regions where this species is present [10]. The forest-steppe marmot was historically widespread in the south of Tomsk Oblast (Fig. 1), particularly along the southern slopes of the terraces of the Tom River and its tributaries, including the Ushaika, Basandayka, and Tugoyakovka rivers. Approximately 15-20 local settlements of marmots were documented [11]. The biology of this marmot (nowadays known as *M. kastschenkoi*) has been relatively well characterized, encompassing aspects such as phenology, diet, burrows and colony structure, and daily activity. Unfortunately, contemporary information regarding this species in the Tomsk Oblast is exceedingly limited; estimates of population sizes have fluctuated from several tens [12] to approximately 200 individuals [10].



Fig. 1. Forest-steppe marmot *M. kastschenkoi* and the typical habitat of marmots in the vicinity of the city of Tomsk

These estimates are primarily based on expert opinion, as there is no complete data on colony sizes and animal populations. Recent findings include new encounters that confirm the presence of marmots in previously known colonies, as well as their disappearance from habitats due to anthropogenic transformation [13]. Some recent data on the forest-steppe marmot are available from Kemerovo Oblast [14, 15] and Novosibirsk Oblast [5], with less information available from Altai Krai [15, 16]. In the Tomsk Oblast, aside from the aforementioned limited data, no systematic research has been conducted.

The objective of this study is to assess the current status of forest-steppe marmot population in both existing and newly identified colonies within the Tomsk Oblast. This includes estimating the number of burrows, family groups, and individual animals within colonies, as well as evaluating the risks posed by anthropogenic activities to the marmot's settlements. In certain instances, economic activities threaten the survival of marmots in local settlements that is already in need of protection.

Material and methods

The studies were conducted in 2022-2024 in the south of Tomsk Oblast, which corresponds to the sub-taiga forest subzone of Western Siberia, where the northern boundary of the forest-steppe marmot distribution passes. We examined three colonies on the right bank of the Tom River south of Tomsk in the vicinity of the villages of Kolarovo, Baturino, and Vershinino (Fig. 2). All colonies were located on the territory of regional protected areas. Two of them, such colonies as Kolarovo and Luchanovo, are located on the regional protected recreational area "Coastal Slope of the Tom River". The third is on the territory of the buffer zone of the Larinsky Sanctuary.

The first colony, Kolarovo, was located on the slope of a ravine running from the road Tomsk-Yarskoye towards the Tom River. The coordinates of the colony are 84.9542°N, 56.3581°E. The colony is located between the villages of Anikino and Kolarovo and is 6 and 2 km away from them, respectively. The second colony, Luchanovo, got its name because it was located opposite the turnoff from the Tomsk-Yarskoye highway towards the village of Luchanovo. The colony is 0.7 km south of the previous one and is located in the next ravine.

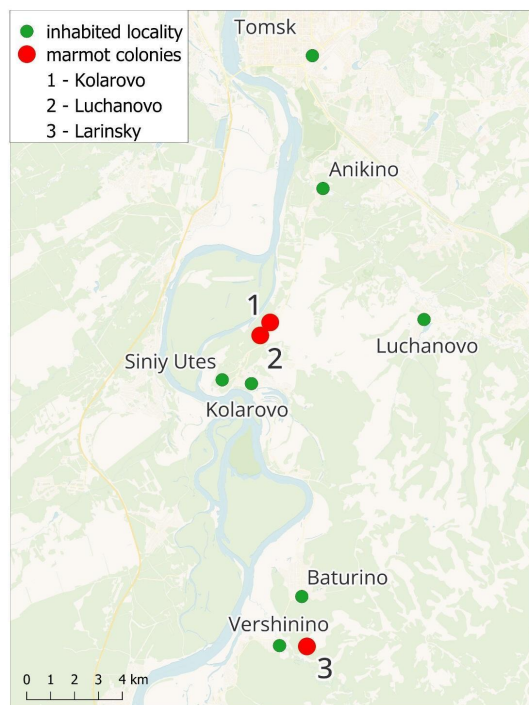


Fig. 2. Scheme of the study area and location of marmot colonies

Its coordinates are 56.3528°N, 84.9468°E. Both slopes inhabited by marmots have a southern orientation, covered with aspen *Populus tremula* L., silver birch *Betula pendula* Roth., and pine *Pinus sylvestris* L. The area around the colony is bounded by a damp lowland below, by bushes and a dirt road running through the forest towards the river bank above, and by a highway and arable land in the east. The third colony, Larinsky, was located in the buffer zone of the Larinsky Sanctuary approximately 2-2.5 km from Baturino and Vershinino in close proximity to another protected area, the Natural Monument "Zvezdny Klyuch". The coordinates of the colony are 56.2351°N, 84.9791°E. To the north, the colony is bounded by agricultural lands, and below by a path to the Natural Monument "Zvezdny Klyuch". The colony is located on a steep slope, also facing south and southwest. The slope is also covered with rare trees - pine, birch and aspen, as well as rosehip *Rosa majalis* Herrm, caragana *Caragana arborescens* Lam., rowan *Sorbus aucuparia* L. and bird cherry *Prunus padus* L. bushes.

The burrows were counted in autumn (October), when the grass had lodged, or in spring, when, on the contrary, the grass was flattened after the snow had melted. In each colony, the burrows were counted and mapped using GPS. The distances between the burrows were then measured in GoogleEarth.pro. The soil ejected in front of the burrows (the width of the burrow mounds) were measured using a tape measure with an accuracy of 0.5 m. Differences in the distances between the burrows within family groups and between individual family groups were compared using the Mann-Whitney test in the STATISTICA 8.0 program.

Observations began in the spring, namely in early or mid-April. The emergence of animals from hibernation was determined visually or by the appearance of paw prints and excrement near the holes. In all studied colonies first individuals were recorded in 2023 in the second ten days of April, and in 2024, in early April. Observations of the number of animals, family composition, and daily activity were carried out in April-May by visual observation method, using binoculars (BPC 12-40 TENTO) and Filin 120 camera traps. The camera traps were configured to operate continuously, capturing images and video both during daylight hours and at night. Observations were primarily focused on the colonies of Kolarovo and Luchanovo, selected for their accessibility and relatively compact size, which facilitated comprehensive data collection. The devices were triggered by any movement of individuals, which did not allow recognizing marmots individually, but was effective for analyzing the daily activity of *M. kastschenkoi* and identifying the number of animals in individual families. Such video registrations were conducted on May 2023 and April-May 2024 during a week every year. The term "family" was used to refer to a group of marmots of 2 and more individuals of different ages and sexes, jointly occupying a habitat with burrows of different types and guarding its boundaries from the appearance of strangers. The term "colony" is understood to refer to a settlement of 2 or more individuals, constituting 1 or more family groups, living in separate territories and having visual-auditory communication. The term "settlement" is understood to refer to a set of functionally interconnected individual families, concentrated in a certain type of landscape [17]. Colony and settlement in our case were the same concept.

The boundaries of the colony and its ranges were established based on the identification of the most peripheral observed burrows. Burrow classifications - namely wintering, feeding, and protective - were assigned in accordance with the criteria outlined by Bibikov [18]. Schemes of the maps of marmot colonies within the Tomsk Oblast were generated utilizing the QGIS software, with the OpenStreetMap (OSM) Standard serving as the foundational reference for these maps. Family group structures were ascertained either through direct visual observation or, in cases involving larger colonies with extensive areas, by noting the presence of significant burrow emissions. Each group had wintering burrows with several exits, grouped by 4-8 and located close to each other with a common burrow mound of significant size. A relatively precise enumeration of animals was achievable in only two colonies (Kolarovo and Luchanovo), where observational conditions permitted accurate assessments. In the Larinsky colony, the number of animals estimated was derived through expert extrapolation, utilizing the count of wintering burrows here and identified family groups, in conjunction with the average number of individuals per family observed in other colonies. This methodology allows for a systematic estimation of the total marmot population within the Tomsk Oblast, predicated on the approximate number of known and identified settlements.

Anthropogenic factors were identified on the basis of observations during the study period and data accumulated in previous years on human activities in the region, supplemented by information obtained from various regional open media.

Results

Description of colonies, number of burrows, families and individuals. In the study area we examined three colonies - Larinsky, Kolarovo and Luchanovo (Table 1, Figs. 2 and 3). The colonies in the table are listed in order of their area. In the largest colony - Larinsky, 143 burrows and 8 family groups were noted, in Kolarovo 36 burrows and 2 family groups (some of the burrows in this colony were uninhabited), in Luchanovo there were 26 burrows and 3 families. Thus, the average number of families in the colonies was 3.3 and the average number of burrows was 68. The length of the slopes occupied by the colonies ranged from 200 to 500 m.

In each family area, groups of 4-8 closely spaced burrows were noted on the elevated parts of the slope and were characterized by dense trampled platforms merging into a common burrow mound, forming the core (center) of the family plot. We suggest that 1-2 of these burrows in each group were wintering burrows. From them, paths went to single burrows (feeding, protective, some served as latrines) on the family plot, and paths also went to neighboring family groups. The distances between the nearest burrows within family groups ($\bar{x} = 13.4 \pm 1.8$) were significantly smaller than the distance between the nearest burrows of neighboring families ($\bar{x} = 63.3 \pm 31.5$, $Z = -2.12$, $p < 0.05$).

Almost all burrows had burrow mounds. Some were small - from 0.5 to 1.5 m, but in all three colonies at least one of the families had a large mound, reaching 5-6 m in width, which indicates the longevity of the colonies [19]. The Kolarovo colony was discovered in 2009, i.e. it has existed for at least 15 years. The number of animals in one of the families living in it was also maximum - 8 (later one of the animals from this family was hit by a car on the highway). In other colonies (Luchanovo and Larinsky) in families we observed in spring a maximum of 2-3 marmots at a time. Based on the number of family groups and registered animals in individual families, we calculated that up to 25 animals live in the Larinsky colony, 4-5 animals in the Luchanovo colony, and 9 animals in the Kolarovo colony. Hence, the average animal number in the colony was 13.3 and the average number of animals in one family was 3.2.

Comparison of different characteristics of studied colonies

Table 1

Colony	Number of burrows	Square of the colony (ha)	Number of families	Burrow mound width lim (min-max); $M \pm SE$, m	Number of individuals
Larinsky	143	2.7	8	(0.5-5.0); 1.51 ± 0.11	up to 25
Kolarovo	36	0.63	2	(0.5-6.0); 1.55 ± 0.56	9
Luchanovo	26	0.22	3	(1.5-5.0); 2.2 ± 0.48	4-5

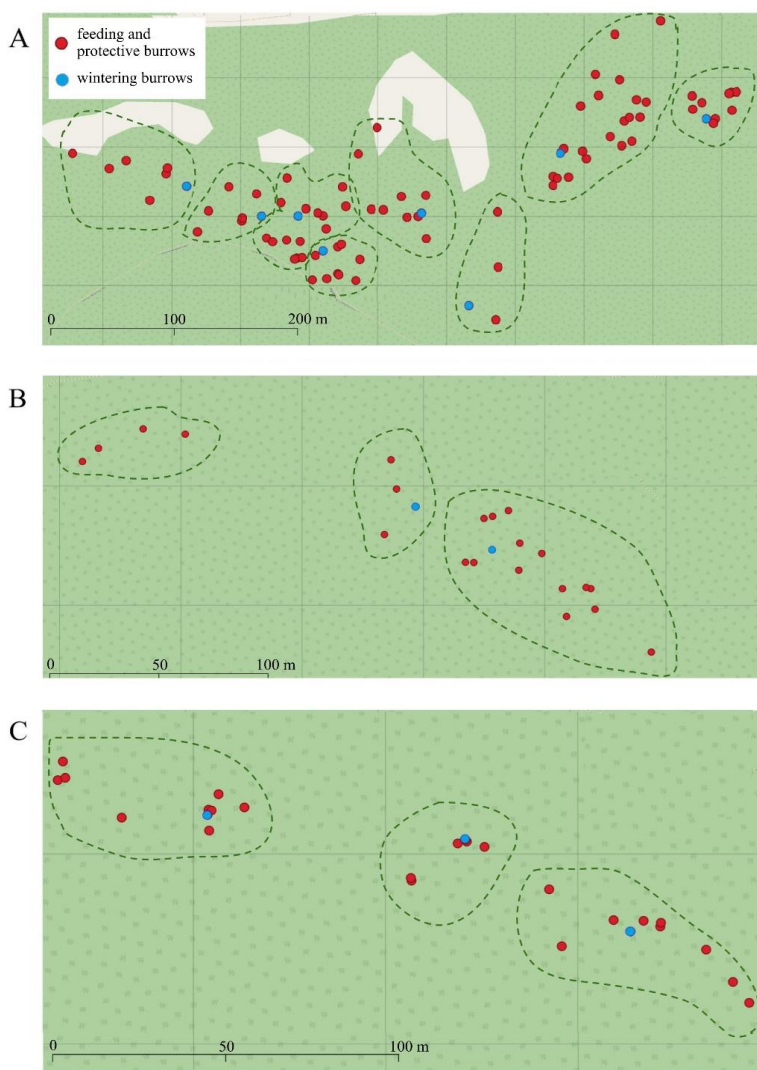


Fig. 3. Scheme of the colonies studied with family groups outlined, where *A* - Larinsky colony, *B* - Kolarovo colony, *C* - Luchanovo colony

Anthropogenic activity, predators and protection. A variety of anthropogenic impacts, directly and indirectly affecting marmots, were identified in the colonies we studied (Table 2). Among the factors, we highlight the presence of stray dogs both single and in packs barking at the marmot burrows, and uncontrolled dog walking, riding enduro motorbikes, and ATVs on the slopes, occupied by marmots. The potential threats that can lead to the loss of the colonies are the expansion of the cottage construction near Luchanovo and Kolarovo colonies as well as exploration and development of gold dangerously close to the Larinsky colony (Figs. 4 and 5).

Table 2

Types of economic activities on the territory of marmot colonies in Tomsk Oblast

Type of activity	Kolarovo colony	Luchanovo colony	Larinsky colony
Birch sap collection	+	+	-
Dogs walking with owners, stray dogs and free range dogs	+	+	+
Recreation (excursions, mushroom and berry picking)	+	+	+
Riding enduro motorbikes and ATV's	+	+	-
Animal deaths on the road	+	+	-
Waste dumping	+	+	-
Cottage and country house construction	+	+	-
Developing of gold mining	-	-	+

Of the natural predators which are potentially dangerous to the marmots we revealed a nest of a black kite *Milvus migrans* (Boddaert, 1783), which was found near the colonies, and camera traps recorded foxes *Vulpes vulpes* Linnaeus, 1758 visiting the colony at night and early morning hours in two colonies (Kolarovo and Luchanovo). A badger *Meles leucurus* Hodgson, 1847 was also recorded at night in one of the colonies.

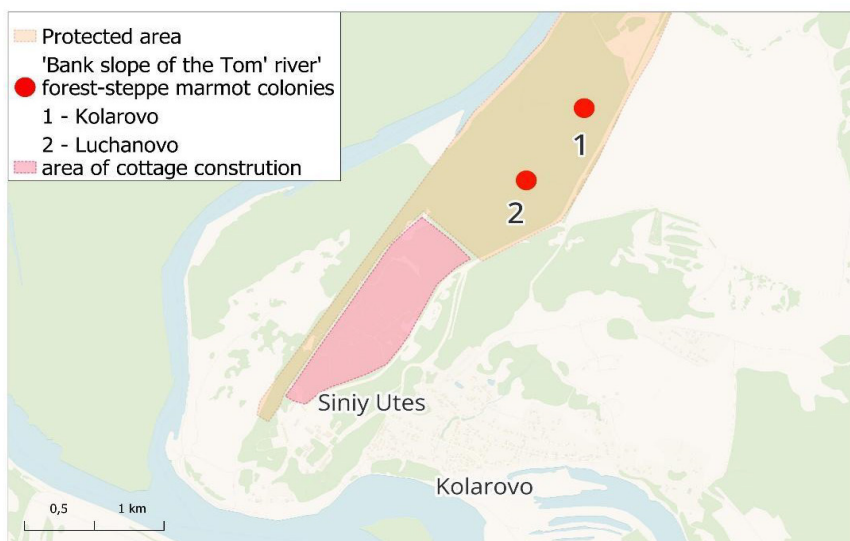


Fig. 4. Kolarovo and Luchanovo colonies of forest-steppe marmots on the protected area and anthropogenic activity

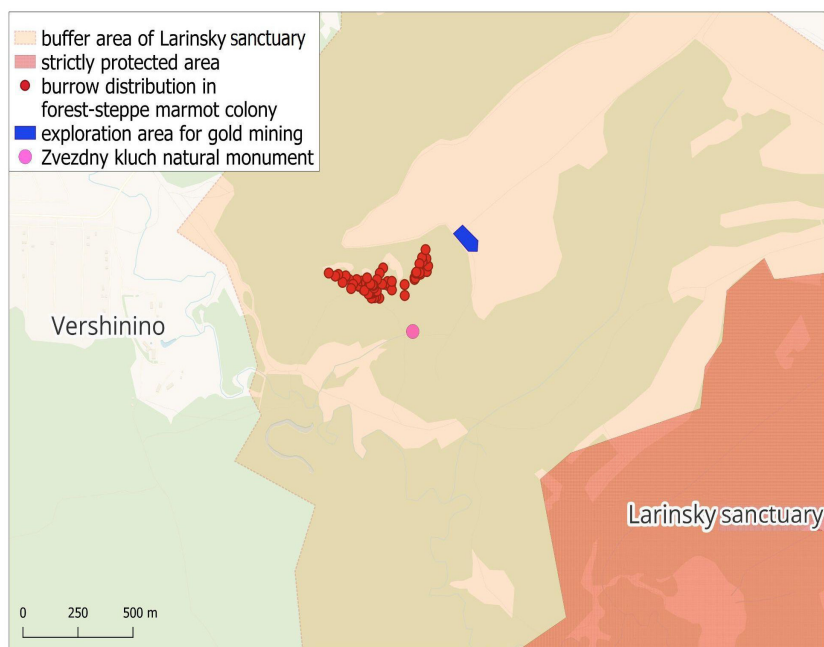


Fig. 5. Larinsky colony of forest-steppe marmot and anthropogenic activity nearby

Discussion

The current state of the forest-steppe marmot in the Tomsk Oblast remains poorly studied. From the beginning of the 20th century to the present day, literature provides data on about 25 known colony sites in the vicinity of Tomsk. All of them are located in the Tomsk Oblast on the right bank of the Tom River and its tributaries - Ushaika, Basandaika, Tugoyakovka. In the past the colonies of marmots were known near villages Lyazgino, Kornilovo, Novo-Mikhailovka, Zavarzino, Bodazhkovo, Safronovo, Arkashovo, Bogashovo, Petukhovo, Rodionovo, Anikino, Luchanovo, Kolarovo, Kazanka, Vershinino, Baturino, Yarskoye, Larino, Plotnikovo [1, 11, 12, 20, 21].

Each of the subsequent publications, referring to the previous one, stated the disappearance of marmots from previously known colony sites. Thus, in the work Moskvitin and Moskvitina [20] it is mentioned that marmots survived only in the area of the villages of Yarskoye and Vershinino. But in recent years, relying on our own observations, as well as due to the facts of photo registration of marmots and the posting of photographs by zoologists and nature lovers on database sites, such as Inaturalist.org, several new marmot habitats have been identified, for example, in the area of the Kolarovo biological station of the Tomsk state university, and in the area of the Bakhtin cemetery [12]. These new findings, when compared with previous data, actually rediscover marmot old habitats [11]. On the one hand, it can be assumed that marmots continued to live in the mentioned territory all this time, remaining barely noticeable, or slightly

changing the position of their settlements. Compared to other marmot species living in open biotopes, finding colonies of forest-steppe marmots and counting them is much more difficult. This is explained by the habitat of this species on rather steep forested hills, which in the summer are covered with tall grass, making them inconspicuous. Therefore, it is best to search for settlements and count the animals only in the spring - specifically in April and May - since in June the tall grass no longer allows this. On the other hand, marmots from a number of colonies could really disappear for a while due to extermination and disturbance, but could later restore their numbers and return, having settled from other places. Unfortunately, we cannot answer this question unequivocally. In different cases, these can be different scenarios. The fact that marmots could continue to live in the same territory is indicated by the presence of large burrow mounds in all the colonies found - in the Kolarovo colony marmots were found in 2009 - there is a car road and tramped people's paths nearby, people collect mushrooms and birch sap every year, facts of the presence of dogs have been revealed, and despite the disturbance factor, the colony has existed for at least 15 years. The following facts support another hypothesis, according to which the number of marmots has increased in the Tomsk Oblast in recent years and, as a result, it has become more noticeable, has settled and returned to its former places and is developing new ones. For example, this is consistent with the fact that a marmot was discovered in the vicinity of the village of Nikolaevka, 30 km northeast of Tomsk [12]. This is 20 km further from the nearest places of known colonies found in the last century near the villages of Lyazgino, Novo-Mikhailovka [1], although it is known that marmots are capable of covering such distances in about a day [14]. We assume that when examining previously known habitats of the forest-steppe marmot to the northeast, east and south of Tomsk, we can both find it in its former habitats and discover new, previously unknown settlements. It is important to note that both historically and currently, in the vicinity of villages that serve as reference points for locating marmot colonies, there may exist multiple colonies rather than a singular one. Consequently, our two identified colonies - Luchanovo and Kolarovo - are designated by different names for the sake of convenience; however, both are situated near Kolarovo. Furthermore, it is acknowledged that there is a third colony in this area that has not been studied, indicating that within the vicinity of a single village, there may be three distinct colonies. At the same time, the presence of colonies to the south of Tomsk, approximately 10 km on the right bank of the Tom was mentioned in the work of Laptev and Yudin [11], but currently it is difficult to say whether they existed all this time or not. Compared to other areas where the marmots existed in Tomsk region previously, this territory (Kolarovo and Luchanovo colonies) has been less exposed to anthropogenic impact, and since the beginning of the 21st century, a protected natural area has been organized here - "The coastal slope of the Tom River". Larinsky colony is in the Larinsky sanctuary and the Natural monument "Zvezdny Klyuch".

Comparing the sizes of the identified colonies with data on marmot colonies in other areas, we can state that in Tomsk they are relatively small. Thus, the number of families in Luchanovo and Kolarovo is 3 and 2 with the number of

animals up to 10, slightly more in Larinsky colony - 8 families and about 25 animals. For example, in the Topkinsky district of the Kemerovo Oblast, forest-steppe marmot colonies with the number of animals up to 85 and the number of families - 10-24 have been described [14]. Also, our colonies are smaller compared to the colonies of the bobak *Marmota bobak* Müller, 1776 in Chuvashia [22], where the number of families in the colonies ranged from 14 to 46, and the number of burrows from 168 to 558 (including uninhabited). Our colonies had from 26 to 143 burrows. If we compare modern colonies with those in the same territory in the last century [11], then judging by the size of one of the colonies given in the work, the number of burrows in it reached 73, of which 12 were wintering and 61 were protective and feeding. From this we can conclude that the colonies in the studied territory are generally comparable. One of our colonies - Larinsky is larger, with 143 burrows, the other two (with 26 and 36 burrows) are smaller. Also, if we judge the size of the colonies by the length of the slopes on which they were located, then in the same work [11] it is said that the slope with one of the colonies in the area of the village of Lyazgino could reach 1 km, which is more than our colony in the area of the Larinsky sanctuary (0.5 km), and several times more than the colonies of Kolarovo and Luchanovo (Fig. 2).

According to a number of sources, the number of forest-steppe marmots in the Tomsk region is estimated at approximately several dozen [12] to 0.2 thousand individuals [10], however, this is rather an expert assessment based on the number of previously known colonies and facts of confirmation of new finds, but no work provides data on real survey data. Based on the number of animals in the identified colonies - an average of 13, and the number of known settlements - about 10 and possibly more, the number may be close to the estimate proposed by V.I. Mashkin [10], who estimated the number of marmots in the Tomsk region at about 200 individuals.

The timing of the spring awakening of marmots in the Tomsk Oblast has changed little compared to the last century; depending on the weather, this could occur throughout April [23]. It was found that, compared to previous data [11], daily activity in one of our colonies was somewhat different. Marmots began to appear on the surface earlier - at 6-7 am, and hid later in the evening - at 8-9 pm. We did not observe night activity, as noted in the Kemerovo Oblast [14].

An assessment of anthropogenic activities in the vicinity of the studied marmot colonies revealed that disturbances resulting from human visitation for various non-hunting purposes (no instances of poaching were documented) exert a negligible impact on marmot populations. All surveyed colonies have coexisted with this level of disturbance over an extended period. In contrast, the presence of domestic dogs poses a more significant threat, as they can attack and potentially eliminate marmots; we have observed hunting dogs in the area. The regulation of dog presence is lacking in all protected areas, resulting in no formal violations, yet this factor could have an exceedingly detrimental effect on marmot survival. In recent years, a new recreational activity - extreme driving over rugged terrain using enduro motorcycles and ATVs - has emerged. Such activi-

ties have been noted in proximity to the Kolarovo and Luchanovo colonies, with one uninhabited marmot settlement identified near the village of Anikino, where riding on enduro motorbikes was registered. While the correlation between this recreational activity and the abandonment of the settlement remains speculative, we consider it to have a significant negative influence.

Furthermore, we would like to emphasize two potentially hazardous activities that, if pursued, could unequivocally lead to the extirpation of marmots from the studied colonies. The first involves the ongoing expansion of cottage construction along the Tomsk-Kolarovo road from the village Siny Utes direction. Over the past decade, construction has progressed rapidly from both Anikino and Siny Utes, with approximately 1 km separating the outermost residences from the boundaries of the Luchanovo colony. Historically, in the early 2000s, the protected area encompassing the coastal slope of the Tom River extended to Siny Utes [21], as indicated by signage; however, it appears that the boundaries have since changed, leading to increased development in this area and raising concerns about further encroachment on marmot habitats. The second critical economic activity posing a threat is occurring in proximity to the Larinsky colony. The TISK Geogold company has initiated exploratory drilling for gold within the buffer zone of the Larinsky sanctuary, adjacent to the "Zvezdny Klyuch" nature monument, which houses a marmot colony. While such activities are legally permissible within this zone, they raise concerns due to the unique ecological value of "Zvezdny Klyuch" - a spring characterized by a small waterfall cascading down travertine steps - which could be endangered. Notably, neither the regulations governing the natural monument nor other documentation acknowledges one of the largest nearby colonies of the rare forest-steppe marmot, which is listed in the regional Red Data Book.

Conclusion

We conducted an estimation of burrow numbers, family units, and individual forest-steppe marmots across three colonies located in the southern Tomsk Oblast, within the subtaiga subzone. Based on the average number of animals in the colonies (13.3) and data indicating approximately 10 meeting places associated with marmot settlements in recent years, we estimate that the total population of forest-steppe marmots in the region could approximate 150 individuals. Future surveys are planned for additional sites where marmots have been previously documented. Given that populations in other areas of Western Siberia - namely, the Kemerovo Oblast, Novosibirsk Oblast, and Altai Krai - are also reported to be low, and considering that this species represents the smallest of the marmot taxa, we advocate for the potential inclusion of this form in the Red Data Book of the Russian Federation. Each of the surveyed colonies possesses significant aesthetic, educational, and scientific value, thereby warranting recommendations for the establishment of small protected areas designated as Natural Monuments to enhance their conservation. Currently, several anthropogenic activities posing threats to marmot populations have been identified within the vicinity of the

surveyed colonies. These include recreational enduro motorbiking and ATV usage on slopes inhabited by marmots, the expansion of cottage construction in the Bank Slope area of the Tom River Protected Area, and the potential initiation of gold extraction activities within the Larinsky sanctuary. Through this publication, we aim to raise awareness regarding the risk of losing one of the largest colonies of this rare species in our region.

References

1. Stroganov SU, Yudin BS. K sistematike nekotoryh vidov gryzunov Zapadnoj Sibiri [On the systematics of some rodent species of Western Siberia]. In: *Trudy Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta*. Buntin AP, editor. Tomsk: Tomsk State University Publ.; 1956. pp. 291-294. In Russian
2. Galkina LI. Ocenka nekotoryh sistematicheskikh osobennostej surkov i geograficheskaya izmenchivost' gornoaziatskogo surka [Assessment of some systematic characteristics of marmots and the geographical variation of Asian mountain marmot (*Marmota baibacina* Kastschenko, 1899)]. In: *Fauna Sibiri* [Fauna of Siberia]. Cherepanov AI, editor. Novosibirsk: Nauka, Sib. Otd.; 1970. pp. 267-279. In Russian
3. Brandler OV. K vidovoj samostoyatel'nosti lesostepnogo surka *Marmota kastschenkoi* (Rodentia, Marmotinae) [On species status of the forest-steppe marmot *Marmota kastschenkoi* (Rodentia, Marmotinae)]. *Zoologicheskii zhurnal*. 2003;82(12):1498-1505. In Russian
4. Řičánková VP, Riegert J, Semančíková E, Hais M, Čejková A, Prach K. Habitat preferences in gray marmots (*Marmota baibacina*). *Acta Theriologica*. 2014;59:317-324. doi: 10.1007/s13364-013-0161-x
5. Taranenko DE. The Spatial relationships in two species of marmots: *Marmota kastschenkoi* and *Marmota baibacina* (Rodentia, Sciuridae)]. *Journal of Siberian Federal University. Biology*. 2011;3:220-228. In Russian, English summary
6. Stepan SJ, Akhverdyan MR, Lyapunova EA, Fraser DG, Vorontsov NN, Hoffmann RS, Braun MJ. Molecular phylogeny of the marmots (Rodentia: Sciuridae): Tests of evolutionary and biogeographic hypotheses. *Systematic Biology*. 1999;48:715-734. doi: 10.1080/106351599259988
7. Stepan SJ, Kenagy GJ, Zawadzki C, Robles R, Lyapunova EA, Hoffmann RS. Molecular data resolve placement of the Olympic marmot and estimate dates of trans-Beringian interchange. *Journal of Mammalogy*. 2011;92:1028-1037. doi: 10.1644/10-MAMM-A-272.1
8. Kryštufek B, Vohralík V. Taxonomic revision of the Palaearctic rodents (Rodentia). Part 2. Sciuridae: Urocitellus, Marmota and Sciurotamias. *Lynx, new series*. 2013;44:27-138.
9. Vazhov SV, Bakhtin RF, Vazhov VM. O neobhodimosti vneseniya lesostepnogo surka v krasnyu knigu Altajskogo kraya [On the need to include Forest-steppe marmot in the Red Book of Altai Krai]. *Modern trends in the development of science and technology*. 2016;3:55-57. In Russian
10. Mashkin VI. Proshloe nastoyashchee i budushchee surkov Rossii [Past, present and future of Eurasian marmots]. In: *Proshloe nastoyashchee i budushchee surkov Rossii* [Past, present and future of Eurasian marmots: collection of scientific works]. Brandler OV, editor. Moscow: ABF Media; 2015. pp. 13-28. In Russian
11. Laptev IP, Yudin BS. Surok Tomskoj oblasti i ego ohrana [Marmot of the Tomsk region and its protection]. In: *Trudy Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Vol. 118* [Proceedings of Tomsk State University. Vol. 118]. Tomsk: Tomsk State University Publ.; 1952. pp. 107-130. In Russian
12. Krasnaya kniga Tomskoj oblasti [The Red Data Book of Tomsk region]. Pyak AI, editor. Elista: Prosvet; 2023. 580 p. In Russian

13. Moskvitina NS, Zhigalin AV, Kovalevsky AV. Dynamics and current status of ground squirrel species - *Marmota kastschenkoi* Stroganov et Yudin, 1956 and *Spermophilus erythrogenys* Brandt, 1841 - in the south-east of Western Siberia. *Ekosistemy*. 2023;34:99-103. In Russian, English summary
14. Polyakov AD. Problemy sohraneniya lesostepnogo surka v promyshlennyyh regionah na primere Kuzbassa [Problems of conservation of Forest-steppe marmot in industrial regions on the example of Kuzbass]. *Advances in current natural science*. 2004;2:125-126. In Russian
15. Polyakov AD, Baranova VV. Biologiya lesostepnogo surka v usloviyah ekologicheskogo pressing [Biology of the Forest-steppe marmot under environmental pressure]. *Advances in current natural science*. 2007;2:73-76. In Russian
16. Bepalova YA. K voprosu ob ohrane nekotoryh vidov gryzunov v Altajskom krae [On the issue of protecting some species of rodents in Altai Krai]. In: *Sovremennyye tendentsii razvitiya nauki i tekhnologii* [Modern trends in the development of science and technology. 2016.5:29-32. In Russian
17. Naumov NP. Tipy poselenij gryzunov i ih ekologicheskoe znachenie [Types of rodent settlements and their ecological significance]. *Zoologicheskii zhurnal*. 1954;2:68-88. In Russian
18. Bibikov DI. Surki [Marmots]. Moscow: Agropromizdat; 1989. 253 p. In Russian
19. Dubrovsky YA. Razmery butanov stepnyh surkov kak indikator vozrasta ih poselenij [The sizes of steppe marmots' burrow mounds as an indicator of the age of their colonies]. In: *Issledovanie geografii prirodny'x resursov zhivotnogo i rastitel'nogo mira* [Study of the geography of natural resources of the animal and plant world]. Isakov YuA, editor. Moscow: Izdatelstvo Akademii nauk SSSR; 1962. pp. 80-94. In Russian
20. Moskvitin SS, Moskvitina NS. Analiz izmenenij arealov mlekopitayushchih na yugovostoke Zapadnoj Sibiri [Analysis of changes in mammal range in the South-east of Western Siberia]. In: *Biologicheskoe raznoobrazie zhivotny'h sibiri*. Materialy nauch. konf. [Biodiversity of animals of Siberia. Proc. of the Sci. Conf. (Tomsk, Russia, 28-30 October, 1998)]. Tomsk: Deltaplan; 1998. pp. 206-208. In Russian
21. Adam AM, Revushkina TV, Nehoroshev OG, Babenko AS. Osobo ohranyaemye prirodnye territorii Tomskoj oblasti [Specially protected natural areas of Tomsk region]. Tomsk: NTL Publishing House; 2001. 252 p. In Russian
22. Vorobjov DN, Dimitriev AV. Surki na territorii civil'skogo surkovogo zakaznika v Chuvashii [Marmots on the territory of the Tsvil'sky marmot sanctuary in Chuvashia]. In: *Teriofauna Rossii i sopredel'ny'x territorij* [Theriofauna of Russia and adjacent territories. Proc. of the Sci. Conf. (Moscow, Russia, 1-6 February, 2016)]. Moscow: KMK; 2016. p. 79. In Russian
23. Lapt'ev IP. Mlekopitayushchie taevnoy zony Zapadnoj Sibiri [Mammals of taiga zone of Western Siberia]. Tomsk: Tomsk State University Publ.; 1958. 286 p.

Информация об авторах:

Катасонова Полина Александровна, магистр биологии, Биологический институт, Национальный исследовательский Томский государственный университет (Томск, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3646-607X>

E-mail: polyakatasonova@gmail.com

Шапoвалов Александр Андреевич, студент кафедры зоологии позвоночных и экологии, Биологический институт, Национальный исследовательский Томский государственный университет (Томск, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3539-7986>

E-mail: zenderdaddy@mail.ru

Коробицын Игорь Геннадьевич, канд. биол. наук, доцент кафедры зоологии позвоночных и экологии, Биологический институт, Национальный исследовательский Томский государственный университет (Томск, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7709-3004>

E-mail: rozenpom@mail.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Polina A. Katasonova, Master of Biological Sciences, Biological Institute, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3646-607X>

E-mail: polyakatsonova@gmail.com

Alexandr A. Shapovalov, student of the Department of Vertebrate zoology and Ecology, Biological Institute, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3539-7986>

E-mail: zenderdaddy@mail.ru

Igor G. Korobitsyn, Cand. Sci. (Biol.), Assoc. Prof. of the Department of Vertebrate zoology and ecology, Biological Institute, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7709-3004>

E-mail: rozenpom@mail.ru

The Authors declare no conflict of interest.

*Статья поступила в редакцию 02.06.2025;
одобрена после рецензирования 15.08.2025; принята к публикации 04.09.2025*

*The article was submitted 02.06.2025;
approved after reviewing 15.08.2025; accepted for publication 04.09.2025*

Original article

UDC 598.1 : 504.05

doi: 10.17223/19988591/71/11

Microplastics in reptiles: Assessment of particle content in viviparous and sand lizard populations (*Zootoca vivipara*, *Lacerta agilis*, Lacertidae) and common adder (*Vipera berus*, Viperidae) from Western Siberia

Valentina N. Kuranova¹, Aleksandra V. Zaiko², Yulia A. Frank³

^{1, 2, 3} National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

¹ <https://orcid.org/0000-0003-1952-9310>, kuranova49@mail.ru

² aleksandrazaiko2003@icloud.com

³ <https://orcid.org/0000-0001-6347-4009>, yulia.a.frank@gmail.com

Abstract. The paper presents the results of quantitative assessment of the content and morphological characterization of microplastics (MPs) accumulated in the organs of adult individuals ($n = 43$) from three reptile species: the viviparous lizard *Zootoca vivipara* Lichtenstein, 1823, the sand lizard *Lacerta agilis* Linnaeus, 1758, and the common adder *Vipera berus* Linnaeus, 1758. The species inhabit overlapping ranges, are often syntopic, and exhibit zoophagous behavior. The studied individuals were collected in the spring-summer period of 2021-2023 from various localities in Tomsk Oblast (southeast of Western Siberia). MPs in the size range of 0.15-5 mm were detected in the gastrointestinal tract (GIT) of both lizard species (100%), as well as in the GIT and skin of *V. berus*. The maximum average MP content in the GIT was 6.80 ± 11.4 , with a range of 0 to 32 particles in *Z. vivipara* collected in 2022. Interannual variations were noted in the contamination level of *Z. vivipara*: the average MP content in the GIT was 3.2-fold lower in 2023 versus 2022. The differences in MP content between *Z. vivipara* and *L. agilis* were not statistically significant ($p > 0.05$), as were the differences in MP content between the GIT and the skin of *V. berus*. In the GIT of adult individuals of the three species, MPs were represented by microspheres, microfilms, irregularly shaped fragments, with microfibers being predominant, comprising 64.5% in *Z. vivipara* and 82.0% in *L. agilis*, respectively. The study revealed the prevalence of MPs with sizes ranging from 0.3 to 1 mm, with the exception of *Z. vivipara*, where most particles did not exceed 300 μm (43.5%). The proportion of larger particles (> 3 mm) in the organs of *V. berus* was higher compared to *Z. vivipara* and *L. agilis*. MP detection in the GIT and skin of adult individuals indicates plastic pollution in the taiga zone of Western Siberia. The data obtained represent the first evidence of the presence of MPs in Palearctic reptiles in Russia.

The article contains 2 Figures, 1 Table, 40 References.

Keywords: microplastics, reptiles, bioindication, Western Siberia

Funding: the work was supported by the “Priority-2030” (Project No. 2.2.3.22 ONG).

Acknowledgments: the authors thank V.V. Yartsev, Associate Professor of the Biological Institute of Tomsk State University, and students for their participating in catching reptiles, and S.N. Vorobieva, a postgraduate student, for her technical assistance in laboratory processing of samples.

For citation: Kuranova VN, Zaiko AV, Frank YA. Microplastics in reptiles: Assessment of particle content in viviparous and sand lizard populations (*Zootoca vivipara*, *Lacerta agilis*, Lacertidae) and common adder (*Vipera berus*, Viperidae) from Western Siberia. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya* = *Tomsk State University Journal of Biology*. 2025;71:185-198. doi: 10.17223/19988591/71/11

Научная статья

УДК 598.1 : 504.05

doi: 10.17223/19988591/71/11

Микропластик в пресмыкающихся: Оценка содержания частиц в популяциях живородящей и прыткой ящерицы (*Zootoca vivipara*, *Lacerta agilis*, Lacertidae) и обыкновенной гадюки (*Vipera berus*, Viperidae) Западной Сибири

Валентина Николаевна Куранова¹,
Александра Вячеславовна Зайко²,
Юлия Александровна Франк³

^{1, 2, 3} Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Томск, Россия

¹ <https://orcid.org/0000-0003-1952-9310>, kuranova49@mail.ru

² aleksandrazaiko2003@icloud.com

³ <https://orcid.org/0000-0001-6347-4009>, yulia.a.frank@gmail.com

Аннотация. Представлены результаты исследований по количественной оценке содержания и характеристике морфологии микропластика (МП) в органах взрослых особей ($n = 43$) трех видов пресмыкающихся – прыткой ящерицы *Lacerta agilis* L., 1758, живородящей ящерицы *Zootoca vivipara* Lichtenstein, 1823 и обыкновенной гадюки *Vipera berus* L., 1758. Виды имеют перекрывающиеся ареалы, часто синтопичны, зоофаги. Исследованные особи отловлены в весенне-летний период 2021–2023 гг. в ряде локалитетов Томской области (юго-восток Западной Сибири). Частицы МП размерного диапазона 0,15–5 мм обнаружены в ЖКТ всех особей ящериц (100%), а также в ЖКТ и шкурах гадюки. Максимальное среднее содержание МП в ЖКТ составило $6,80 \pm 11,4$ с разбросом от 0 до 32 частиц у *Z. vivipara*, отловленных в 2022 г. Отмечены межгодовые отличия в уровне загрязнения *Z. vivipara*: в 2023 г. среднее содержание МП в ЖКТ в 3,2 раза ниже по сравнению с 2022 г. Различия между выборками живородящей ящерицы и прыткой ящерицы были незначимыми ($p > 0,05$), также как и различия в содержании МП между ЖКТ и кожей обыкновенной гадюки. В ЖКТ взрослых особей трех видов МП представлен микросферами, микропленками, фрагментами неправильной формы, но преобладают микроволокна: от 64,5% у *Z. vivipara* до 82,0% у *L. agilis*. В исследованных выборках преобладал МП размерами от 0,3 до 1 мм за исключением ЖКТ живородящей ящерицы, где большинство частиц меньше 300 мкм (43,5%). Доля более крупных частиц (> 3 мм) в органах змей выше по сравнению с ящерицами. Детекция микропластика в ЖКТ и коже взрослых особей ящериц и змей указывает на загрязнение таежной зоны Западной Сибири. Полученные данные являются первым доказательством наличия МП у пресмыкающихся Палеарктики на территории России.

Ключевые слова: микропластик, пресмыкающиеся, биоиндикация, Западная Сибирь

Источник финансирования: работа выполнена при поддержке Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (Проект № 2.2. 3.22 ОНГ).

Благодарности: авторы благодарят доцента Биологического института НИ ТГУ В.В. Ярцева и студентов за участие в отлове рептилий, аспиранта С.Н. Воробьева за техническую помощь при проведении лабораторной обработки проб.

Для цитирования: Kuranova V.N., Zaiko A.V., Frank Y.A. Microplastics in reptiles: Assessment of particle content in viviparous and sand lizard populations (*Zootoca vivipara*, *Lacerta agilis*, Lacertidae) and common adder (*Vipera berus*, Viperidae) from Western Siberia // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2025. № 71. С. 185–198. doi: 10.17223/19988591/71/11

Introduction

Plastic pollution is one of the most pressing environmental challenges of our time. Plastics exhibit high durability, exceptional wear resistance, and limited natural degradation; however, their widespread use leads to a concerning accumulation of plastic waste and its release into the natural environment. In recent years, there has been mounting concern about MPs, small plastic pieces ranging in size from 1 μm to 5 mm [1]. MPs found in the environment are classified as either primary or secondary. Primary MPs are mainly produced in the form of tiny granules and are used in production as a raw material for manufacturing plastic products [2]. Microgranules are components of cosmetics, household chemicals, and industrial abrasives. Secondary MPs, such as films and irregularly shaped fragments, are formed during degradation of larger plastic objects into smaller pieces under the influence of various environmental factors [2]. Plastic microfibers, originating from textiles (clothing, geotextiles) and fishing gear, are also widespread in the environment [3].

The atmosphere, waterways, ocean currents, and animals can transport MPs over great distances. MPs have been found in various parts of the globe, including marine and freshwater habitats, as well as in soil, and they have a long residence time in the environment [4]. MPs can react with other pollutants to form more complex secondary pollutants with higher toxicity, facilitating their transport and transfer along the food chains [5-7].

MPs can directly or indirectly affect organisms and pose health risks to both animals and humans. Reptiles can easily become entangled in plastic nets and ingest bottles, caps, bags or straws, which can lead to physical injuries including asphyxiation, organ damage, and even death [8, 9]. The health risks posed by MPs to reptiles remain poorly understood. Studies are limited and primarily focus on aquatic reptiles, such as marine and freshwater turtles [10-15] and crocodiles [16]. The loggerhead sea turtle *Caretta caretta* is recognized as an indicator species to monitor MP pollution globally. It was found that MPs (polypropylene, polyethylene, and cotton fibers) accumulate not only in the GIT of *C. caretta*, but also in its reproductive organs and heart [15]. The impact of MPs on lizards and snakes in terrestrial ecosystems remains poorly studied, and the available data are extremely fragmentary [17-19].

The aim of this study was to identify the presence of MPs and assess their content in specific organs of three widespread Palearctic reptile species: the viviparous lizard, the sand lizard, and the common adder.

Material and methods

The subjects of the study were adult individuals of two lizard species *Zootoca vivipara* Lichtenstein, 1823 and *Lacerta agilis* Linnaeus, 1758, as well as the common adder *Vipera berus* Linnaeus, 1758. All the species are widespread in Eurasia, including Western Siberia.

Lacerta agilis, an oviparous species, inhabits a vast range of the territory that includes the European part of Russia and extends southward in Siberia to Lake Baikal. The sand lizard thrives in the steppe zone, where it inhabits open sunny areas. It is commonly found in pine forests, power line clearings, gardens and vegetable gardens, roadsides and embankments of roads and railways, as well as drained raised bogs, copses, hillsides, and ravines. In forested areas, it often lives near human settlements. In soft soil, the sand lizard digs shallow burrows up to 70 cm long and uses rodent burrows, voids in piles of stones, old stumps, and brushwood piles as shelters [20].

Ovoviviparous species, the viviparous lizard and the common adder, inhabit almost the entire forest zone of the Palearctic. In terms of biotopic distribution, both species prefer mesic habitats. The viviparous lizard prefers humid lowlands with natural shelters. It abundantly inhabits deciduous and coniferous forests, overgrown clearings, glades, forest edges, and swamps. In the south of Tomsk Ob region and the environs of Tomsk, it often shares the habitat with the sand lizard in the transitional zones between dry and humid biotopes. The viviparous lizard is often found near fallen logs, old stumps, and at the bases of large tree trunks. The species does not dig its own burrows, but uses voids between roots, moss hummocks, and abandoned burrows of small rodents as shelters. Of the 54 described winter burrows of *Z. vivipara*, 75.9% were found in agrogenic soil (vegetable gardens, arable land, and orchards). In soil at a depth of 15-25 cm, the number of winter burrows is 2.8-fold higher, and the number of hibernating lizards in these shelters is 1.5-fold higher than at a depth of 0-15 cm ($p < 0.01$) [21].

The common adder is unevenly distributed in the forest and forest-steppe zone, forming high-density clusters in certain areas known as hotbeds. It inhabits forest edges, glades, overgrown burnt areas, peat bogs, banks of reservoirs, and abandoned villages. The species hibernates at depths ranging from 40 cm to 2 m, below the freezing zone. It uses rodent burrows, soil cracks, voids among tree roots and peat bogs as winter burrows [20].

Lizards and snakes were collected in the first half of summer (June 2021-2023) from three localities of Tomsk district, Tomsk Oblast: localities 1 and 2 are situated on the right bank of the Tom River: the villages of Anikino (56°24'N, 84°59'E) and Zonalny (56°25'N; 85°01'E); locality 3 is located on the left bank of the Tom River: the village of Timiryazevsky (56°29'N, 84°52'E). The study areas are part of the Tomsk suburban area and are subject to anthropic load (arable land, garden plots, highways and railways, holiday homes and chil-

dren's camps, and construction of microdistricts). Lizards were captured by hand or with a net; a stick with a hook was used to catch snakes. Fabric bags and specialized containers were employed to transport the specimens to the laboratory for further processing. Within 24-48 hours after capture, 43 individuals of lizards and snakes were anesthetized with tricaine; their body weight (g) was determined and body length (L - *Longitudo corporis*) was measured. For lizards, measurements were taken using a digital caliper (CHIZ SHTCTC-1-150-0.01) with an accuracy of 0.1 mm, and a tape measure was used for measuring snakes. Fixation of individuals and organs (skin, lungs, liver, intestines) was performed in 70% ethanol or a 10% formalin solution to determine the accumulation of MPs and sub-micron plastics (SMPs) using specialized methods. The procedures adhered to international and national requirements for appropriate and humane treatment of animals.

Sample preparations from reptile organs and MP extraction were performed using a method previously developed and tested for fish organs [22] with some modifications. The procedure included the following stages: (a) alkaline hydrolysis of organs in a 10% KOH solution at 55°C for 48 h with periodic stirring; (b) separation of particles by density in a saturated NaCl solution for 24 h; (c) treatment of the upper phase with 96% ethyl alcohol (10% v/v) at 50°C to remove saponified lipids; (d) vacuum filtration to collect particles on a glass fiber filter with a pore size of 1 µm (Membrane Solutions, China) for subsequent quantitative and qualitative analyses. Blank samples containing reagent solutions (KOH, NaCl, ethanol) and undergoing the above processing stages were analyzed in parallel to assess external contamination during sample preparation. For each series of 10 samples of reptile organs, 5 control samples were prepared and examined. The content of fibers within the target size range of 0.15-5 mm in the control samples varied from 0 to 2 items/filter. When fibers were detected in the control samples, the results of quantitative assessment of MPs in the entire series of natural samples were corrected accordingly.

Microscopic, morphological and photomicrographic analyses of particles were conducted using an MSP-1 stereomicroscope (LOMO, Russian Federation), a ToupView USB 2.0 CMO S digital camera (ToupTek Photonics, China), and ToupView 3.7.6273 software. The hot needle test was employed to identify MPs among particles extracted from the reptiles. This method enables the classification of synthetic polymer particles based on the plastic/non-plastic principle [23, 24]. A heated dissecting needle was brought into contact with the suspected particle under microscopic control; plastic particles melted, while organic particles darkened or burned. The MP content was expressed in terms of MP items per individual. MPs exhibited a variety of shapes, including spheres, films, fibers, and irregularly shaped fragments. Depending on their size, MPs were divided into small particles of 150-300, 301-1000 µm and further up to the maximum size of 5000 µm with a step of 1000 µm, as was previously described [25].

Primary data processing was performed using Microsoft Excel 2010. The statistical analysis was conducted with Statistica 8.0 (Statsoft). The following indicators were calculated: sample size (n), arithmetic mean ($\bar{x}$), standard deviation (SD), standard error of mean ($m_{\bar{x}}$), range of values (lim). For pairwise comparison,

Student's t-tests ($p < 0.05$) were employed for variables with a normal distribution, and the Mann-Whitney test ($p \leq 0.05$) was used for comparison when data were not normally distributed.

Results and discussion

MPs with different sizes (0.15-5 mm) and morphologies were found in the GIT and skin of *V. berus*, as well as in the GIT of both lizards, *Z. vivipara* and *L. agilis* (Fig. 1).

The results of quantitative assessment of MPs accumulated in the organs of reptiles are summarized in Table 1. The MP content in the GIT of *Z. vivipara* collected in 2022 attained 6.80 ± 11.4 . Interannual variations were recorded in the contamination level of *Z. vivipara*: the average MP content in the GIT was

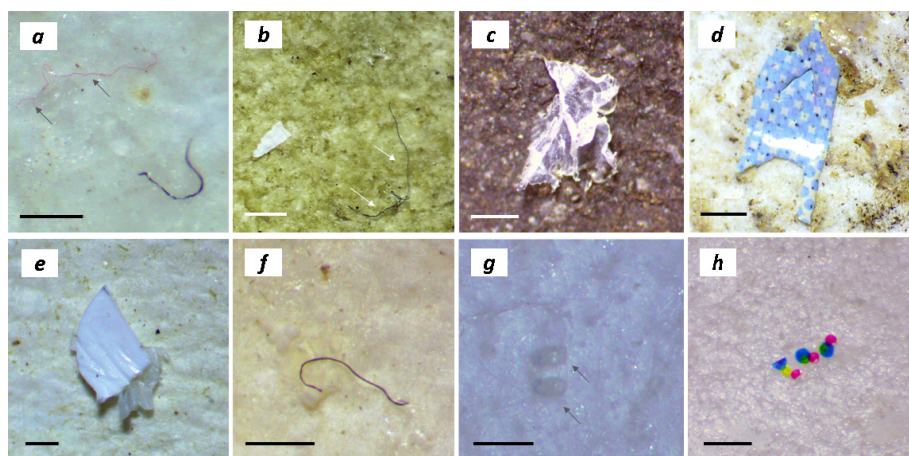


Fig. 1. Light micrographs of MPs: fibers and fragment from the GIT of *V. berus* (a, b); a film (c) and a fragment from the skin of *V. berus* (d), a fragment (e) and a fiber (f) from the GIT of *Z. vivipara*; spheres (g) and a fragment (h) from the GIT of *L. agilis*. Scale bar: 500 μ m

Table 1

Quantitative content of MPs in the organs of reptiles (Tomsk district, Tomsk Oblast, 2021-2023)

Indicator	GIT				<i>V. berus</i> (skin)
	<i>L. agilis</i>	<i>Z. vivipara</i> (2022)	<i>Z. vivipara</i> (2023)	<i>V. berus</i>	
<i>n</i>	20	7	4	12	12
$\bar{x}$	3.42	6.80	2.10	3.86	5.64
<i>SD</i>	4.40	11.4	0.96	2.43	6.37
$m_{\bar{x}}$	0.98	4.32	0.48	0.70	1.84
lim	0-19	0-32	1-3	1-8	0-20

Note. *n* - sample size, $\bar{x}$ - arithmetic mean, *SD* - standard deviation, $m_{\bar{x}}$ - standard error of mean, lim - range of values.

3.2-fold lower in 2023 versus 2022. The differences in MP content between *Z. vivipara* and *L. agilis* were not statistically significant ($p > 0.05$), nor were the differences in MP content between the GIT and skin of the common adder.

The studied reptiles exhibit different ingestion patterns for MPs of different shapes and sizes (Fig. 2). The majority of ingested MPs were fibers (from 64.5% in *Z. vivipara* to 82% in *L. agilis*). The GIT of *Z. vivipara* was found to contain 2-fold more fragments compared to *V. berus* and almost 5-fold more fragments compared to *L. agilis* (Fig. 2a). Spheres were identified only in the GIT of both lizards. The revealed differences are associated with different dietary patterns, trophic links, and habitat conditions.

Zootoca vivipara from the studied sample consumed more MPs < 0.3 mm (43.5% of the total MPs) compared to *L. agilis* with only 16.2% of the fine particles and the majority of larger MPs of 0.3-1 mm in size (Fig. 2). In the GIT and skin of *V. berus*, 0.3-1 mm MPs were the most abundant. Compared to both lizards, the common adder consumed and accumulated in the skin were the most abundant. Compared to both lizards, the common adder consumed and accumulated in the skin more particles of 3-4 and 4-5 mm in size ($p < 0.05$). Moreover, the proportion of larger MPs (> 3 mm) accumulated in different organs of the common adder was approximately the same, amounting to 13.6% in the GT tract and 13% in skin (Fig. 2).

In the taiga zone of Western Siberia, reptiles, being poikilotherms, spend most of their annual cycle hibernating, with the active period lasting 4.4-5.5 months. Sand and viviparous lizards, as well as the common adder, are diurnal. The daily time budget divided into nighttime sleep and daytime activity is affected by different environmental factors. The soil characteristics are of great importance. Body temperature is regulated behaviorally, primarily via daily movements between shaded and sunny areas, or out and into the shelter. Active

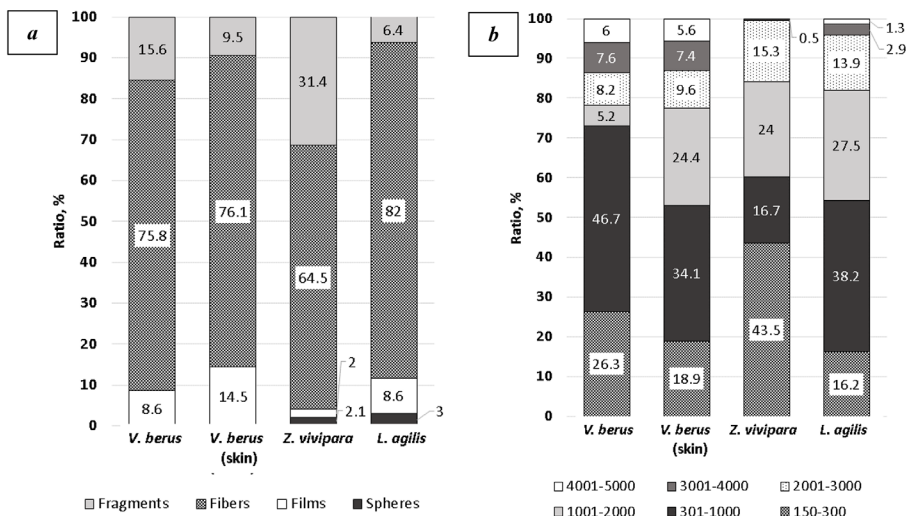


Fig. 2. Percentage of MPs from the GIT and skin of *V. berus* and the GIT of *Z. vivipara* and *L. agilis* by shape (a) and size (b)

behavioral forms include mating games, feeding, basking, and locomotor activity (foraging behavior) during molting. Inactive behavior includes nighttime sleep and daytime rest in the shelter. At the Timiryazev site, we have estimated the time budget (24 hours) for lizards. Adult males and females of the sand lizard ($n = 7$) spend 78-89% of their time resting in the shelter, 2% basking, 2-4% moving, 3-5% hunting, and 2-13% slumbering during the daytime [26].

In all the studied species, MPs of different shapes and sizes were detected in the GIT and (in the common adder) in the skin. This indicates plastic contamination of the substrate surfaces, shelters and winter burrows, and most importantly, food items.

The atmosphere is an important transport medium for anthropogenic polymeric particles, including MPs [27]. Analysis of particles deposited to snow cover allows for tracking the amount and transport of atmospheric MPs. For example, anthropogenic polymeric particles, including various types of plastic and viscose fibers and microfragments, were identified in snow samples from Western Siberia [28]. The maximum estimated particle mass loading was $4444 \pm 1530 \text{ mg/m}^2$ or $2817 \pm 915 \text{ items/m}^2$. Fibers were the dominant shape of MPs, accounting for more than 90% of the total particles, due to their aerodynamic properties and large atmospheric transport potential. Fibers are the most abundant form of MPs found in the environment. Compared to secondary forms of particles (fragments, films) and spheres, microfibers are one of the most common microparticle pollutants in surface water bodies of Western Siberia and other regions of the Russian part of Eurasia [29].

MPs were found in samples of agrogenic gray and dark gray forest soils from the taiga forest zone, as well as in samples of southern and ordinary agrogenic chernozems from the steppe region of Western Siberia taken from a depth of 0-10 cm. The most common MPs (>80%) in samples of agrogenic soils from the two natural climatic zones were transparent fibers of different sizes [30, 31]. MPs are readily transported in soil layers by invertebrates, including termites, ants, and earthworms [32]. Invertebrates facilitate the transfer of organic and inorganic substances within and between soil systems. In plastic-contaminated environments, insects and worms moving through the soil horizons facilitate the dissemination of plastic particles and synthetic fibers via active transportation of soil and debris between habitats [33].

Both lizards and young snakes feed on various systematic and ecological groups of invertebrates that can be involved in MP circulation. Reptiles are not apex consumers in trophic chains, being prey items for numerous vertebrates and hosts for ecto- and endoparasites.

The sand lizard predominantly inhabits artificial pine plantations and coastal slopes. The viviparous lizard prefers humid lowlands with well-developed herbaceous vegetation and diverse and abundant invertebrates. The sand lizard and the viviparous lizard often live together, but their diet varies significantly. The study conducted in Tomsk Ob region has revealed that the sand lizard's diet primarily consists of invertebrates: herpetobionts (38.7%) and chortobionts (47.1%) (hymenopterans, orthopterans, and coleopterans); less common are herpetobiont arthropods (10.3%) and hydrobionts (mollusks) (3.5%). The diet de-

depends on the season, the type of biotope, and the sex and age of the lizard. Juvenile lizards generally prefer smaller and softer food items: spiders, caterpillars and cicada larvae. The average weight of a food bolus is 500 mg (max 1530 mg). Compared to *L. agilis*, about 40% of the viviparous lizard's diet consists of forest pests (leaf beetles, click beetles, weevils, leafhoppers, aphids, bugs, and caterpillars), mollusks, cicadas, as well as aphids, stoneflies, mosquitoes, and millipedes. An adult lizard consumes from 121 to 295 mg of invertebrates per day. Juvenile lizards prefer small spiders, leafhopper larvae, and caterpillars. Lizards primarily affect zoo- and phytophages, with the annual instantaneous consumption up to 20% of the available prey biomass [20].

Data on the interaction between insects and MPs in terrestrial and aquatic ecosystems, as well as the associated ecotoxicological consequences, are fragmentary. Recent studies have shown various adverse effects of MPs on the diet, growth, reproduction, and behavior of insects [34]. It has been revealed that MP consumption is detrimental to growth and development of some insect species, while others exhibit tolerance to MP exposure. For example, mosquitoes provide a new pathway for MP accumulation from aquatic to terrestrial environments, preserving particles during metamorphosis and exacerbating the issue of plastic contamination [35]. Certain representatives of beetles and lepidopterans can digest plastic. *Zophobas morio* larvae can survive and even thrive on a diet consisting solely of plastic, which is assimilated with the help of their gut microbiota [36]. Significant amounts of MPs have been found in insect larvae from natural populations [37] and in bee products [38]. Since many invertebrates are part of the diet of amphibians, reptiles and birds, MPs can be easily transferred through the food chain.

The common viper primarily feeds on small mammals, amphibians (brown frogs, newts), less often shrews, lizards, small passerines and their chicks. Juvenile snakes prefer insects, worms, mollusks, and underyearling frogs. In certain years, the common viper's diet is dominated by mouse-like rodents (up to 62%), amphibians (sharp-nosed frogs, 43-72%), with reptiles (viviparous lizards), shrews, and chicks of small passerines being less frequently consumed. The common viper's diet composition increases due to the stomach content of prey species. In years when the primary food source (mouse-like rodents) is scarce, the diet mainly consists of amphibians. Insect and arachnid remains, as well as plant remains consisting of sphagnum, cranberry leaves, and wild rosemary were found in 35% of stomachs and guts. In addition, four red-backed vole cubs, five common whitethroat chicks, three adult moor frogs, and juvenile viviparous lizards were identified in the GIT of the common adder [20].

In 2022-2023, a quantitative and qualitative analysis was conducted on the composition of MPs of similar size found in the GIT of rodents (order Rodentia) ($n = 45$) from areas where individuals of the common adder were collected. These included the striped field mouse *Apodemus agrarius* Pallas, 1771, common tundra vole *Myocrotus oeconomus* Palas, 1776, gray red-backed vole *Clethrionomys rufocanus* Sundevall, 1846, and northern red-backed vole *Cl. rutilus* (order Rodentia) [39, 40]. It was shown that in the striped field mouse with a high valence for food items, the average MP content in the GIT was 1.7-fold higher

than that in the common tundra vole. The GIT of the field mouse contained an average of 0.6 film-shaped particles, 0.5 fibers, and 0.1 fragments, while the corresponding figures for the root vole were 0.1, 0.2, and 0.4 [39]. In the forest vole (genus *Clethionomys*), MPs were detected in 27% of cases ($n = 24$): 0.3-1 and 2-3 mm films were found in *Cl. rutilus* (plant polyphage), and 0.3-1 mm films and 1-2 mm fibers dominated in *Cl. rufocanus* (phytophagous) [40]. The common adder can consume both juvenile and adult amphibians that have ingested MPs [25].

Thus, the entry of MPs into the organism of reptiles living in the study area can occur both directly from the environment and indirectly through trophic chains.

Conclusion

The study was the first to describe accumulation of MPs ranging from 0.15 to 5 mm in size in the GIT and skin of widespread Palearctic reptile species, in particular, the viviparous lizard, the sand lizard, and the common adder. The presence and accumulation of MPs of various shapes and sizes in the GIT of two lizard species, as well as in the GIT and skin of the common adder, are most likely associated with the dietary patterns, trophic links, and habitat conditions. MP consumption by reptiles is affected by the level of plastic pollution of food items, substrate surfaces for insolation and hunting, shelters, and winter burrows in the soil. The MPs detected in the GIT and skin of reptiles restricted to the study area were mainly represented by irregularly shaped fragments, spheres, and films, with fibers being predominant (64.5-82.0%), which is consistent with data previously reported for soils, snow cover, and surface waters in Western Siberia. In general, MP accumulation in the GIT and skin of reptiles indirectly indicates the terrestrial ecosystem pollution within the taiga zone. Lizards and snakes are involved in the MP circulation in Western Siberia and can serve as biological indicators of environmental pollution.

References

1. Thompson RC, Olsen Y, Mitchell RP, Davis F, Rowland S, John A, Mcgonigle DF, Russellet A. Lost at sea: Where is all the plastic? *Science*. 2004;304:838. doi: 10.1126/science.1094559
2. Geilfusa NX, Munsona KM, Sousab J, Germanova Y, Bhugaloo S, Babb D, Wang F. Distribution and impacts of microplastic incorporation within sea ice. *Marine Pollution Bulletin*. 2019;145:463-473. doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.06.029
3. Periyasamy AP, Tehrani-Bagha A. A review on microplastic emission from textile materials and its reduction techniques. *Polymer Degradation and Stability*. 2022;199:109901. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2022.1099
4. Wu P, Huang J, Zheng Y, Yang Y, Zhang Y, He F, Chen H, Quan G, Yan J, Li T, Gao B. Environmental occurrences, fate, and impacts of microplastics. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2019;184:109612. doi: 10.1016/j.ecoenv.2019.109612
5. Duncan EM, Arrowsmith J, Bain C, Broderick AC, Lee J, Metcalfe K, Godley BJ. The true depth of the Mediterranean plastic problem: Extreme microplastic pollution on marine turtle nesting beaches in Cyprus. *Marine Pollution Bulletin*. 2018;136:334-340. doi: 10.1016/j.marpolbul.2018.09.019

6. Sighicelli M, Pietrelli L, Lecce F, Iannilli V, Falconieri M, Coscia L, Di Vito S, Nuglio S and Zampetti G. Microplastic pollution in the surface waters of Italian subalpine lakes. *Environmental Pollution*. 2018;236:645-651. doi:10.1016/j.envpol.2018.02.008
7. Campanale C, Massarelli C, Savino I, Locaputo V, Uricchio VF. A detailed review study on potential effects of microplastics and additives of concern on human health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020;17(4):1212. doi: 10.3390/ijerph17041212
8. Strine CT, Silva I, Crane M, Nadolski B, Artchawakom T, Goode M, Suwanwaree P. Mortality of a wild King Cobra, *Ophiophagus Hannah cantor*, 1836 (Serpentes: Elapidae) from northeast Thailand after ingesting a plastic bag. *Asian Herpetological Research*. 2014;5:284-286. doi: 10.3724/SP.J.1245.2014.00284
9. Sindha P, Vyas R, Mistry V. Entanglement in fishing nets: Deaths of Indian Rock Pythons (*Python molurus*). *RCF Reptiles Amphibians*. 2020;26:248-249. doi: 10.17161/randa.v26i3.14427
10. Gregory MR. Environmental implications of plastic debris in marine settings-entanglement, ingestion, smothering, hangers-on, hitch-hiking and alien invasions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2009;364:2013-2025. doi: 10.1098/rstb.2008.026
11. Casale P, Affronte M, Insacco G, Freggi D, Vallini C, Pino d'Astore P, Basso R, Paolillo G, Abbate G, Argano R. Sea turtle strandings reveal high anthropogenic mortality in Italian waters. *Aquatic Conservation*. 2010;20:611-620. doi: 10.1002/aqc.1133
12. Müllera C, Townsendb K, Matschullat J. Experimental degradation of polymer shopping bags (standard and degradable plastic, and biodegradable) in the gastrointestinal fluids of sea turtles. *Science of the Total Environment*. 2012;416:464-467. doi: 10.1016/j.scitotenv.2011.10.069
13. Beckwith VK, Fuentes MMPB. Microplastic at nesting grounds used by the northern Gulf of Mexico loggerhead recovery unit. *Marine Pollution Bulletin*. 2018;131:32-37. doi: 10.1016/j.marpolbul.2018.04.001
14. Marn N, Jusup M, Kooijman SALM, Klanjscek T. Quantifying impacts of plastic debris on marine wildlife identifies ecological breakpoints. *Ecology Letters*. 2020;23:1479-1487. doi: 10.1111/ele.13574
15. Costello L, Zetterström A, Gardner P, Crespo-Picazo JL, Bussy C, Kane I, Shiels HA. Microplastics accumulate in all major organs of the mediterranean loggerhead sea turtle (*Caretta caretta*). *Marine Environmental Research*. 2025;208:107100. doi: 10.1016/j.marenvres.2025.107100
16. Gonzalez-Jauregui M, Borges-Ramirez M, BaraoNobrega JAL, Escamilla A, Dzul-Caamal R, Osten JR. Stomach flushing technique applied to quantify microplastics in Crocodilians. *MethodsX*. 2019;6:2677-2685. doi: 10.1016/j.mex.2019.11.013
17. Hou DM, Rao DQ. Microplastics: Their effects on Amphibians and Reptiles-A review. *Pakistan Journal of Zoology*. 2022;54(6):2931-2951. doi: 10.17582/journal.pjz/20210820080823
18. Altunışık A, Yıldız MZ, Tatlı HH. Microplastic accumulation in a lizard species: Observations from the terrestrial environments. *Environmental Pollution*. 2024;359:1-10. doi: 10.1016/j.envpol.2024.124754
19. Dursun C, Candan K, Karaoğlu K, Ilgaz C, Kumlutaş Y, Elif Yıldırım Caynak EY, Gul S. Microplastic accumulation in snake-eyed lizard (*Ophisops elegans* Menetries, 1832) after long-term monitoring: habitats matter, not years. *Environmental Sciences Europe*. 2025;37(8):1-10. doi: 10.1186/s12302-024-01042-0
20. Kuranova VN, Yartsev VV. Bioraznoobrazie Tomskogo Priob'ya. Zemnovodnye i presmykayushchiesya: uchebnoe posobie [Biodiversity of the Tomsk Ob Region. Amphibians and reptiles: A textbook]. Tomsk: Tomsk State University Publ.; 2020. 148 p. In Russian
21. Kuranova VN, Yakovlev VA. Places, times and wintering conditions of the viviparous lizard *Zootoca vivipara* (Lichtenstein, 1823) (Sauria: Lacertidae) in Western Siberia.

- Current Studies in Herpetology*. 2025;25(1-2):37-52. In Russian, English summary. doi: 10.18500/1814-6090-2025-25-1-2-37-52
22. Vorobiev DS, Frank YA, Rakhmatullina SN, Vorobiev ED, Poskrebysheva YR, Oladele O, Trifonov AA. Microplastic ingestion by fish with different feeding habits in the Ob and Yenisei Rivers. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya - Tomsk State University Journal of Biology*. 2024;66:252-266. In Russian, English summary. doi: 10.17223/19988591/66/13
23. Lusher AL, Bråte ILN, Munno K, Hurley RR, Welden NA. Is it or isn't it: The importance of visual classification in microplastic characterization. *Applied Spectroscopy*. 2020;74:1139-1153. doi: 10.1177/0003702820930733
24. Lusher AL, Welden NA, Sobral P, Cole M. Sampling, isolating and identifying microplastics ingested by fish and invertebrates. *Analytical Methods*. 2017;9:1346-1360. doi: 10.1039/C6AY02415G
25. Kuranova VN, Frank YA, Rakhmatullina SN, Epova LA. Accumulation of microplastics by the Siberian frog *Rana amurensis* (Anura, Amphibia) in the West Baikal region. *Inland Water Biology*. 2024;17:345-353. doi: 10.1134/S1995082924020081
26. Kuranova VN. Osobennosti aktivnosti i povedeniya dvukh blizkorodstvennykh vidov latserid - zhivorodyashchey (*Zootoca vivipara*) i prytkoy (*Lacerta agilis*) yashcherits [Peculiarities of activity and behavior of two closely related species of lacertids - viviparous (*Zootoca vivipara*) and sand lizards (*Lacerta agilis*)]. In: *Polevye i eksperimental'nyye issledovaniya nazemnykh pozvonochnykh: uchebno-metodicheskoye posobiye dlya biologicheskikh spetsial'nostey vuzov* [Field and experimental studies of terrestrial vertebrates: a teaching aid for biological specialties of universities]. Tomsk: Izdatelskiy dom TSU; 2019. pp. 42-53. In Russian
27. Batool I, Qadir A, Levermore JM, Kelly FJ. Dynamics of airborne microplastics, appraisal and distributional behaviour in atmosphere: A review. *Science of the Total Environment*. 2022;806:150745. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.15074529
28. Frank YA, Tatsii D, Rednikin AR, Plach A, Rakhmatullina SN, Vorobiev DS, Stoh A. It is snowing microplastics in Western Siberia. *Environmental Pollution*. 2025; 364(Pt.1):125293. doi: 10.1016/j.envpol.2024.125293
29. Frank Y, Ershova A, Batasheva S, Vorobiev E, Rakhmatullina S, Vorobiev D, Fakhruллин R. Microplastics in freshwater: A focus on the Russian inland waters. *Water*. 2022;14(23):3909. doi: 10.3390/w14233909
30. Merzlyakov OE, Ruchkina KV. Mikroplastik v pochvakh: razrabotka metodov obnaruzheniya na primere sel'skokhozyaystvennykh pochv Zapadnoy Sibiri [Microplastics in soils: development of detection methods using the example of agricultural soils in Western Siberia]. In: *Trudy I Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem po zagryazneniyu okruzhayushchey sredy mikroplastikom "Mikroplastik Okruzhayushchaya sreda-2022" (MPE-2022)*. [Proceedings of the I All-Russian Conference with international participation on environmental pollution with microplastics "MicroPlasticsEnvironment-2022" (MPE-2022). (Shira village, Khakassia, 02-06 August, 2022)]. Tomsk: Tomsk State University Publ.; 2022. pp. 91-94. In Russian
31. Ruchkina KV, Merzlyakov OE. Morfologicheskiye khrakteristiki mikroplastika v agropochvakh tayezhno-lesnoy i stepnoy zony Zapadnoy Sibiri [Morphological characteristics of microplastics in agrosols of the taiga-forest and steppe zones of Western Siberia]. In: *II Nikitinskiye chteniya "Aktual'nyye problemy pochvovedeniya, agrokhimii i ekologii v prirodnykh i antropogennykh landshaftakh"*. Materialy nauch. konf. [II Nikitin Readings "Current Problems of Soil Science, Agrochemistry and Ecology in Natural and Anthropogenic Landscapes". Proc. of the Sci. Conf.]. Perm; 2023. pp. 531-535. In Russian
32. Rillig M, Ziersch L, Hempel S. Microplastic transport in soil by earthworms. *Scientific Reports*. 2017;7:1362. doi: 10.1038/s41598-017-01594-7
33. Anderson JM. Invertebrate-mediated transport processes in soils Agriculture. *Ecosystems & Environment*. 1998;24:5-19. doi: 10.1016/0167-8809(88)90052-7

34. Li JY, Yu Y, Craig NJ, He W, Su L. Interactions between microplastics and insects in terrestrial ecosystems-A systematic review and meta-analysis. *Journal of Hazardous Materials*. 2024;462:132783. doi: 10.1016/j.jhazmat.2023.132783
35. Simakova AV, Varenitsina AA, Babkina IB, Andreeva YV, Frank YA. Ontogenetic transfer of microplastics in natural populations of malaria mosquitoes in Western Siberia. *Entomologia Experimentalis et Applicata*. 2024;172(11):1046-1053. doi: 10.1111/eea.13509
36. Hosseini FS, Asodeh A, Ostad Movahed S, Makhdoumi A. An integrated approach for plastic polymer degradation by the gut bacterial resident of superworm, *Zophobas morio* (Coleoptera: Tenebrionidae). *Environmental Science and Pollution Research*. 2024;31: 60359-60370. doi: 10.1007/s11356-024-35244-z
37. Windsor FM, Tilley RM, Tyler CR, Ormerod SJ. Microplastic ingestion by riverine macroinvertebrates. *Science of the Total Environment*. 2019;646:68-74. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.271.
38. Rani-Borges B, Arena MVN, Gomes IN, Lins LHFC, Cestaro LSC, Pompêo M, Ando RA, Alves-Dos-Santos I, Toppa RH, Martines MR, Queiroz LG. More than just sweet: Current insights into microplastics in honey products and a case study of *Melipona quadrifasciata* honey. *Environmental Science: Processes & Impacts*. 2024; 26(12):2132-2144. doi: 10.1039/d4em00262h
39. Polyakova MM. Soderzhanie mikroplastika v zheludochno-kishechnom trakte polevoj myshi i polevki - ekonomki g. Tomska i ego okrestnostej [Microplastic content in the gastrointestinal tract of striped field mouse and root voles in Tomsk and its environs]. In: *Materialy LXXIII studencheskoj konferencii Biologicheskogo instituta "Start v nauku"* [Proceedings of the LXXIII student conference of the Biological Institute "Start in Science" (Tomsk, Russia, 22-26 April, 2024)]. Tomsk: TSU; 2024. p. 32. In Russian
40. Shevchenko KA. Soderzhanie mikroplastika v zheludochno-kishechnom trakte lesnyh polevok g. Tomska i ego okrestnostej [Microplastic content in the gastrointestinal tract of forest voles in Tomsk and its environs]. In: *Materialy LXXIII studencheskoj konferencii Biologicheskogo instituta "Start v nauku"* [Proceedings of the LXXIII student conference of the Biological Institute "Start in Science" (Tomsk, Russia, 22-26 April, 2024)]. Tomsk: TSU; 2024. p. 39. In Russian

Информация об авторах:

Куранова Валентина Николаевна, канд. биол. наук, доцент кафедры зоологии позвоночных и экологии, Национальный исследовательский Томский государственный университет (Томск, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1952-9310>

E-mail: kuranova49@mail.ru

Зайко Александра Вячеславовна, магистрант, Биологический институт, Национальный исследовательский Томский государственный университет (Томск, Россия).

E-mail: zaikoaleksandra@yandex.ru

Франк Юлия Александровна, доктор биол. наук, доцент, профессор кафедры ихтиологии и гидробиологии, Национальный исследовательский Томский государственный университет (Томск, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6347-4009>

E-mail: yulia.a.frank@gmail.com

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Valentina N. Kuranova, Cand. Sci. (Biol.), Assoc. Prof. of the Department of Vertebrate Zoology and Ecology, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1952-9310>

E-mail: kuranova49@mail.ru

Aleksandra V. Zaiko, Master's student, Biological Institute, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation).

E-mail: zaikoaleksandra@yandex.ru

Yulia A. Frank, Dr. Sci. (Biol.), Prof. of the Department of Ichthyology and Hydrobiology, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6347-4009>

E-mail: yulia.a.frank@gmail.com

The Authors declare no conflict of interest.

*Статья поступила в редакцию 14.06.2025;
одобрена после рецензирования 10.08.2025; принята к публикации 04.09.2025*

*The article was submitted 14.06.2025;
approved after reviewing 10.08.2025; accepted for publication 04.09.2025*

КЛЕТОЧНАЯ БИОЛОГИЯ И ГЕНЕТИКА

Научная статья

УДК 579.252.2

doi: 10.17223/19988591/71/12

Характеристика генома штамма *Stutzerimonas stutzeri*, выделенного из нефтезагрязненной почвы Татарстана

Эдуард Викторович Бабынин¹, Юлия Равилевна Царькова²,
Ирина Александровна Дегтярева³

^{1, 2} Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

^{1, 3} Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр
Российской академии наук», Казань, Россия

¹ <https://orcid.org/0000-0003-2285-8879>, edward.b67@mail.ru

² <https://orcid.org/0009-0008-1658-4553>, ju.gusmanova@yandex.ru

³ <https://orcid.org/0000-0002-1575-8493>, peace-1963@mail.ru

Аннотация. Разливы нефти в результате антропогенной деятельности, такой как добыча, транспортировка или хранение нефтепродуктов, наносят серьезный вред биосфере и потенциально опасны для здоровья человека. Биоремедиация с использованием микроорганизмов является перспективной технологией очистки таких загрязненных участков, поскольку она экономически эффективна и приводит к полной минерализации вредных соединений. Обнаружение новых, способных к эффективной биодеградации нефти местных штаммов микроорганизмов, дает перспективу для создания надежной и экономичной стратегии рекультивации нефтезагрязненных почв. В работе представлены данные по определению и анализу нуклеотидной последовательности полного генома штамма DIA-8, выделенного из нефтезагрязненной почвы на территории Республики Татарстан. В ходе аннотации кодирующих последовательностей полного генома выявлен ряд генов, кодирующих белки, ответственные за катаболизм ароматических соединений. Показана принадлежность штамма к виду *Stutzerimonas stutzeri*. В геноме штамма *S. stutzeri* DIA-8 показано присутствие ключевого гена орто-расщепления катехолов – катехол-1,2-диоксигеназы, а также обнаружены гены, участвующие в синтезе гликолипидных биосурфактантов и устойчивости к тяжелым металлам. Аннотация генома показала, что данный штамм имеет низкий патогенный потенциал, сравнимый с невирулентными представителями рода *Pseudomonas*, что дает возможность использовать его в качестве биотехнологического продукта. Секвенированная нуклеотидная последовательность генома депонирована в международную базу данных GenBank под номером GCA_037081755.1.

Ключевые слова: полногеномное секвенирование, катехол-1,2-диоксигеназа, биоремедиация, *Stutzerimonas stutzeri*

Источник финансирования: работа выполнена в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» и в рамках Государственного задания № 1023033000409-3.

Для цитирования: Бабынин Э.В., Царькова Ю.Р., Дегтярева И.А. Характеристика генома штамма *Stutzerimonas stutzeri*, выделенного из нефтезагрязненной почвы Татарстана // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2025. № 71. С. 199–216. doi: 10.17223/19988591/71/12

Genome characterization of a *Stutzerimonas stutzeri* strain isolated from oil-contaminated soil in Tatarstan

Eduard V. Babynin¹, Yulia R. Tsarkova², Irina A. Degtyareva³

^{1,2} Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russian Federation

^{1,3} Federal Research Center "Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences", Kazan, Russian Federation

¹ <https://orcid.org/0000-0003-2285-8879>, edward.b67@mail.ru

² <https://orcid.org/0009-0008-1658-4553>, ju.gusmanova@yandex.ru

³ <https://orcid.org/0000-0002-1575-8493>, peace-1963@mail.ru

Summary. Oil spills resulting from anthropogenic activities such as extraction, transportation or storage of petroleum products cause serious harm to the biosphere and are potentially hazardous to human health. Bioremediation using microorganisms is a promising technology for cleaning up such contaminated sites, since it is cost-effective and leads to complete mineralization of harmful compounds. The discovery of new local microbial strains capable of effective oil biodegradation provides prospects for the development of a reliable and cost-effective strategy for the reclamation of oil-contaminated soils. This study presents data on the determination and analysis of the complete genome nucleotide sequence of the DIA-8 strain, which was isolated from oil-contaminated soil in the Republic of Tatarstan. Yellow, shiny, convex colonies with irregular edges, ranging from 0.5 to 3 mm in diameter, were observed when the *S. stutzeri* DIA-8 strain was cultured on dense LB nutrient agar (See Fig. 1). *Stutzerimonas stutzeri* is a non-fluorescent, denitrifying bacterium widely distributed in the environment. This bacterial species has attracted significant attention due to its unique metabolic properties, including denitrification, nitrogen fixation, and the degradation of aromatic compounds, and its resistance to metals and potential applications in bioremediation. Analysis of this strain's genome contributes to a better understanding of the genetic basis of oil degradation, the production of secondary metabolites, potential virulence, and other important physiological functions. Furthermore, the findings of this study may serve as the basis for the development of a cost-effective and environmentally friendly method for the remediation of crude oil-contaminated soils.

Genomic DNA was extracted using the ExtractDNA Blood & Cells kit (CJSC Eurogen, Russia). Sequencing was performed on a MiSeq genetic analyzer (Illumina, USA) in paired-end mode (2x300 bp). The MiSeq Reagent Kit v3 was used for sequencing. De novo genome assembly was performed using the Bacterial and Viral Bioinformatics Resource Center (BV-BRC) v3.6.2 (<https://www.bv-brc.org>). Digital DNA-DNA hybridization (dDDH) was calculated using the GGDC v3.0 genome distance calculator (<http://ggdc.dsmz.de/distcalc2.php>). Average Nucleotide Identity (ANI) values were calculated using the JSpeciesWS online service. A phylogenetic tree based on whole-genome data was constructed using the TYGS web server (<https://tygs.dsmz.de>). Functional genome annotation was performed using the RAST 2.0 server (<https://rast.nmpdr.org>) with default settings. The PathogenFinder web server (<https://cge.food.dtu.dk/services/PathogenFinder/>) and the Virulence Factor Database (VFDB) were used for the prediction of bacterial pathogenicity. Plasmid DNA was isolated using a LumiSpin® PLASMID kit (Lumiprob RUS LLC, Russia&EAEU).

Plasmid DNA sequencing was performed by the biotechnology company Cloning Facility (Moscow) using Nanopore technology.

The assembled genome of *S. stutzeri* strain DIA-8 consisted of 28 contigs (> 500 bp) with an N50 of 648,363 bp and a total length of 4,496,503 bp. ANI and dDDH results between *S. stutzeri* DIA-8 and other *S. stutzeri* species showed genome similarity values ranging from 97.31% to 97.90% for ANI and from 80.60% to 85.60% for dDDH (See Table 1). These values are above the recommended threshold values of 95% (ANI) and 70% (dDDH) for prokaryotic species delineation, respectively. The TYGS results showed that the DIA-8 strain branch clustered within the *S. stutzeri* species clade. This indicates that the DIA-8 strain belongs to the *S. stutzeri* species (See Fig. 2).

During the mapping of the complete genome nucleotide sequence, we identified several genes encoding proteins responsible for the catabolism of aromatic compounds. According to RAST server annotation, the *S. stutzeri* DIA-8 genome contains 60 genes involved in aromatic compound metabolism (See Fig. 3), with 31 genes involved in peripheral pathways and 27 genes involved in the central pathways of aromatic compound catabolism. Aromatic ring cleavage enzymes identified in DIA-8 included benzoate-1,2-dioxygenase (EC 1.14.12.10), 1,6-dihydroxycyclohexa-2,4-diene-1-carboxylate dehydrogenase (EC 1.3.1.25), catechol-1,2-dioxygenase (EC 1.13.11.1), muconate cycloisomerase (EC 5.5.1.1), muconolactone Δ -isomerase (EC 5.3.3.4), 3-oxoadipate-enol-lactonase (EC 3.1.1.24), 3-oxoadipate-CoA transferase (EC 2.8.3.6), and 3-oxoadipyl-CoA thiolase (EC 2.3.1.174) (See Fig. 4). Bioinformatic analysis of the *S. stutzeri* DIA-8 genome sequence also revealed genes involved in the synthesis of glycolipid biosurfactants and heavy metal resistance. The genome analysis indicated that this strain has a low pathogenic potential, similar to other non-virulent environmental isolates of the genus *Pseudomonas*, which suggests its potential use as a biotechnological product. Sequencing of the isolated plasmid DNA sample revealed that it is a mixture of two plasmids. One plasmid was 15,416 bp in size and contained 20 protein-coding genes and one gene encoding a non-coding RNA molecule (PrrB/RsmZ). The genes on this plasmid, identified through annotation, are responsible for replication and plasmid transfer between bacterial cells. The second plasmid was 2,450 bp in size and contained three genes encoding proteins of unknown function.

Based on our genomic analysis, *Stutzerimonas stutzeri* DIA-8, isolated from oil-contaminated soil in the Republic of Tatarstan, shows promise for the development of bioremediation agents for polluted ecosystems. The strain's genome contains genes that play a crucial role in the degradation of hydrocarbon compounds. The obtained results will contribute to further research of the physiological properties of the strain and its potential for restoring the productivity of disturbed lands. The complete genome nucleotide sequence has been deposited in the international GenBank database under accession number GCA_037081755.1.

The article contains 4 Figures, 1 Table, 36 References.

Keywords: genome-wide sequencing, catechol-1,2-dioxygenase, bioremediation, *Stutzerimonas stutzeri*

Fundings: the study was carried out within the framework of "Priority-2030" Strategic Academic Leadership Program. The work was performed within the framework of the State Assignment No. 1023033000409-3.

For citation: Babynin EV, Tsarkova YuR, Degtyareva IA. Genome characteristics of the *Stutzerimonas stutzeri* strain isolated from oil-contaminated soil of Tatarstan. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya* = *Tomsk State University Journal of Biology*. 2025;71:199-216. doi: 10.17223/19988591/71/12

Введение

Stutzerimonas stutzeri – нефлуоресцирующая денитрифицирующая бактерия, широко распространенная в окружающей среде. Этот вид привлекает к себе большое внимание из-за своих особых метаболических свойств, таких как денитрификация [1], азотфиксация [2], деградация ароматических соединений [3], а также устойчивость к металлам и потенциальное применение в биоремедиации [4, 5]. Данный микроорганизм впервые описан Бурри и Штутцером в 1895 г. и был назван *Bacillus denitrificans* [6]. Леманн и Нейман включили данный организм в свой справочник под названием *Bacterium stutzeri* [7], а в 1952 г. Ван Нил и Аллен, обсудив фенотипические особенности, предложили обозначить его как *Pseudomonas stutzeri* [8]. Обнаружение все большего числа новых штаммов, относящихся к семейству *Pseudomonadaceae*, и накопление данных их секвенирования потребовали пересмотра таксономических единиц этого семейства. В результате в рамках этого семейства был выделен новый род *Stutzerimonas* [9], в который *Pseudomonas stutzeri* вошел уже как *Stutzerimonas stutzeri* [10].

Секвенирование генома стало рутинной практикой в микробиологических исследованиях благодаря достижениям в области технологий высокопроизводительного секвенирования и снижению затрат на его проведение. Все большее число полных геномов штаммов, выделенных из различных экосистем, накапливается в международной базе данных GenBank, что дает исследователям возможность тщательно анализировать генетическое разнообразие, оценивать таксономические связи, открывать новые таксоны и идентифицировать генетические детерминанты, связанные с конкретными видами физиологических свойств. Уже становится понятно, что при формировании микробных консорциумов как основы биопрепаратов для биоремедиации почв, загрязненных нефтью и нефтепродуктами, требуется оценка метаболического потенциала всех участников консорциума с использованием данных полногеномного секвенирования.

Для понимания роли и биоремедиационного потенциала каждого из штаммов, входящих в выделенный нами нефтеокисляющий консорциум, ранее уже был секвенирован геном одного из штаммов этого консорциума – *S. warneri* [11]. Штаммы *S. warneri* неоднократно идентифицировали среди почвенной микробиоты, более того, эти штаммы обладали полезными для биоремедиации свойствами [12–14]. На данном этапе мы перешли к анализу генома штамма *S. stutzeri* DIA-8, что будет способствовать лучшему пониманию его генетической основы для деградации нефти, производства вторичных метаболитов, возможной вирулентности и некоторых других его физиологических функций. Помимо этого, настоящее исследование может послужить основой для разработки экономически эффективного и экологически чистого метода восстановления почв, загрязненных сырой нефтью. Целью данной работы является анализ нуклеотидной последовательности генома штамма *S. stutzeri* DIA-8 – деструктора нефти, а также идентификация в геноме этого штамма генов, ответственных за катаболизм ароматических соединений.

Материалы и методы

Из нефтезагрязненной почвы на территории Ромашкинского месторождения Республики Татарстан выделены микроорганизмы-деструкторы, три из которых отобраны по их способности расти на среде с нефтью, а также являлись продуцентами биосурфактантов. Видовая принадлежность штаммов идентифицирована с помощью нуклеотидной последовательности 16S рРНК при депонировании в ведомственной коллекции полезных микроорганизмов сельскохозяйственного назначения ФГБНУ ВНИИСХМ (Санкт-Петербург). В состав консорциума вошли бактерии следующих видов: *Achromobacter xylosoxidans*, *Staphylococcus warneri* и *S. stutzeri*.

Штамм *Stutzerimonas stutzeri* DIA-8 выращивали либо в питательном бульоне ГРМ-бульон (ФБУН ГНЦ ПМБ, Оболенск, Россия), либо на питательной агаризованной среде ГРМ-агар (ФБУН ГНЦ ПМБ, Оболенск, Россия). Геномную ДНК штамма выделяли следующим образом: одиночную бактериальную колонию, выросшую на агаризованной питательной среде LB («Fluka», Швейцария), переносили стерильной петлей в питательный бульон NB («Serva», Германия) и инкубировали в течение суток при температуре 30°C. Клетки из бактериальной культуры, достигшей OD600, собирали при 13000×g в настольной микроцентрифуге в течение 5 мин. Далее экстракцию геномной ДНК осуществляли с помощью набора для выделения суммарной ДНК ExtractDNA Blood & Cells («ЗАО Евrogen», Россия) согласно рекомендациям производителя. Качество и количество ДНК определяли с помощью спектрометра NanoDrop ND-2000 («Thermo Scientific», США), а также визуализацией в 0,8% агарозном геле. Полученную ДНК в концентрации 100 нг/мкл (оптическое поглощение образца A260/280 – 2,08 и A260/230 – 2,46) использовали для секвенирования. Плазмидную ДНК выделяли с помощью набора LumiSpin® PLASMID (ООО «Люми-проб РУС», Россия&ЕАЭС).

Секвенирование генома выполнено в НИЛ «Мультиомиксные технологии живых систем» Казанского федерального университета. Фрагментацию 1 мкг ДНК проводили ультразвуком с помощью прибора Covaris S220 («Covaris Inc.», США) в соответствии с рекомендациями производителя. Диапазон размеров после фрагментирования по данным Bioanalyzer составил от 50 до 700 п.н. с пиком в 400 п.н. Подготовку ДНК-библиотеки проводили с использованием набора NEBNext Ultra II («NEB», США) согласно инструкции производителя. Оценку качества полученной библиотеки фрагментов ДНК осуществляли на приборе 2100 Bioanalyzer («Agilent Technologies», США). Секвенировали на генетическом анализаторе Miseq («Illumina», США) в режиме парных прочтений (2x300bp). Для секвенирования использовали набор MiSeq Reagent Kit v3. Секвенирование плазмидной ДНК проводили в биотехнологической компании Клонинг Фасилити (Москва) на основе технологий Nanopore.

Сборку генома *de novo* проводили через Ресурсный центр бактериальной и вирусной биоинформатики (BV-BRC) v3.6.2 (<https://www.bv-brc.org>) [15]. Полноту и уровень загрязнения генома оценивали с помощью CheckM v1.2.2 [16], представленного на сервере IPGA (<https://nmdc.cn/ipga/>) [17].

Таксономическую принадлежность генома определяли с помощью инструмента GTDB (Genome Taxonomy Database), который также представлен на сервере IPGA. Mash/MinHash использовали для идентификации ближайших эталонных геномов в BRC v.3.26.4 с настройками по умолчанию [18]. Тип входных данных: нуклеотидные последовательности. Секвенированная нуклеотидная последовательность генома депонирована в международную базу данных GenBank под номером GCA_037081755.1.

Цифровую гибридизацию ДНК-ДНК (dDDH) рассчитывали с помощью калькулятора расстояния между геномами GGDC v3.0 (<http://ggdc.dsmz.de/distcalc2.php>) [19]. Определение значений средней нуклеотидной идентичности (ANI) проводили с помощью онлайн-сервиса JSpeciesWS [20]. Филогенетическое дерево на основе полногеномных данных строили с использованием веб-сервера TYGS (<https://tygs.dsmz.de>) [19]. Далее филогенетические деревья скачивали с сайтов в формате Newick и визуализировали с использованием интерактивного онлайн-инструмента iTOL (<https://itol.embl.de>) [21].

Функциональную аннотацию генома проводили с помощью веб-сервиса RAST 2.0 (<https://rast.nmpdr.org>) с настройками по умолчанию [22]. Для прогнозирования патогенности использовали веб-сервер PathogenFinder (<https://cge.food.dtu.dk/services/PathogenFinder/>) [23], а также базу данных факторов вирулентности (VFDB) [24].

Результаты исследования и обсуждение

При расसेве штамма *S. stutzeri* DIA-8 на плотную питательную среду LB наблюдали желтые блестящие выпуклые колонии с неровными краями, от 0,5 до 3 мм в диаметре (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид колоний *S. stutzeri* DIA-8

[Fig. 1. External appearance of *S. stutzeri* DIA-8 colonies]

Полученный геном штамма *S. stutzeri* DIA-8 был собран в 28 контигов (> 500 п.н.) с N50 648 363 п.н. и общей длиной 4 496 503 п.н. Бактерии рода *Stutzerimonas* согласно базе данных NCBI имеют размер генома от 3,8 до 4,7 Мб. Содержание G + C геномной ДНК составило 63,9%. Конечная сборка имела показатели полноты 100% по присутствию маркерных генов и степень контаминации 0,14%, что свидетельствует о высоком качестве данного генома [16].

Геном классифицирован как принадлежащий *Stutzerimonas stutzeri* с помощью инструмента GTDB. Метод классификации бактерий с использованием полногеномных последовательностей стал хорошей альтернативой методу, основанному на сравнении последовательностей генов 16S рРНК, т.к. обеспечивает лучшее разрешение изолятов одного вида, имеющих идентичные последовательности 16S рРНК. В настоящее время такие показатели, как средняя идентичность нуклеотидов (ANI) и цифровая гибридизация ДНК-ДНК (dDDH), рассчитанные при сравнении нуклеотидных последовательностей полных геномов, наиболее широко применяют в качестве «золотого стандарта» для разграничения видов [24].

Результаты определения ANI и dDDH между *S. stutzeri* DIA-8 и другими представителями вида *S. stutzeri* показали, что значения сходства геномов варьировали от 97,31% до 97,90% для ANI и от 80,60% до 85,60% для dDDH (табл. 1), что выше рекомендуемых пороговых значений в 95% (ANI)

Таблица 1 [Table 1]

Значения ANI и dDDH между штаммом *Stutzerimonas stutzeri* DIA-8 и некоторыми штаммами *Stutzerimonas stutzeri*, а также типовыми штаммами других видов рода *Stutzerimonas*

[ANI and dDDH values between *Stutzerimonas stutzeri* strain DIA-8 and some *Stutzerimonas stutzeri* strains, as well as typical strains of other species of the genus *Stutzerimonas*]

ШТАММ [Strain]	ANI, %	dDDH, %
<i>Stutzerimonas stutzeri</i> F2a	97,90	85,60
<i>Stutzerimonas stutzeri</i> MJL19	97,88	85,50
<i>Stutzerimonas stutzeri</i> ZDHY95	97,85	85,10
<i>Stutzerimonas stutzeri</i> SLG510A3-8	97,81	84,20
<i>Stutzerimonas stutzeri</i> SDU10	97,60	82,00
<i>Stutzerimonas stutzeri</i> S116	97,31	80,60
<i>Stutzerimonas frequens</i> FDAARGOS_877	89,63	40,10
<i>Stutzerimonas kunmingensis</i> 7850S	86,31	32,00
<i>Stutzerimonas chloritidismutans</i> 6L11	86,14	31,40
<i>Stutzerimonas decontaminans</i> 19SMN4	86,12	31,60
<i>Stutzerimonas degradans</i> FDAARGOS_876	82,33	26,30
<i>Stutzerimonas balearica</i> DSM_6083	80,45	24,20
<i>Stutzerimonas nitrititolerans</i> GL14	80,29	24,30
<i>Stutzerimonas azotifigens</i> DSM_17556	78,81	23,30
<i>Stutzerimonas xanthomarina</i> DSM_18231	78,06	22,00
<i>Stutzerimonas kirkiae</i> P4C	77,51	23,20

и 70% (dDDH) для определения видов прокариот соответственно [25]. Это указывает на то, что штамм DIA-8 принадлежит к виду *S. stutzeri*.

Построение сбалансированного минимального эволюционного дерева проводили с использованием сервера TYGS. Деревья были укоренены посередине и визуализированы с помощью iTOL. Результаты TYGS показали, что ветвь штамма DIA-8 находится внутри кластера видов *S. stutzeri* (рис. 2).

С помощью сервера быстрой аннотации с использованием подсистемной технологии (RAST) в геноме штамма *S. stutzeri* DIA-8 обнаружено 4265 белок-кодирующих последовательностей (CDS), 54 гена тРНК и 3 гена рРНК. Подсистемами с наибольшим присутствием CDS оказались следующие: 1) аминокислоты и их производные (314 CDS); 2) белковый обмен (209 CDS); 3) углеводы (182 CDS); 4) кофакторы, витамины и простетические группы (170 CDS); 5) подвижность и хемотаксис (109 CDS) (рис. 3). Кроме того, идентифицированы подсистемы, связанные с устойчивостью бактерий к стрессу (77 CDS), подходящие для создания сельско-

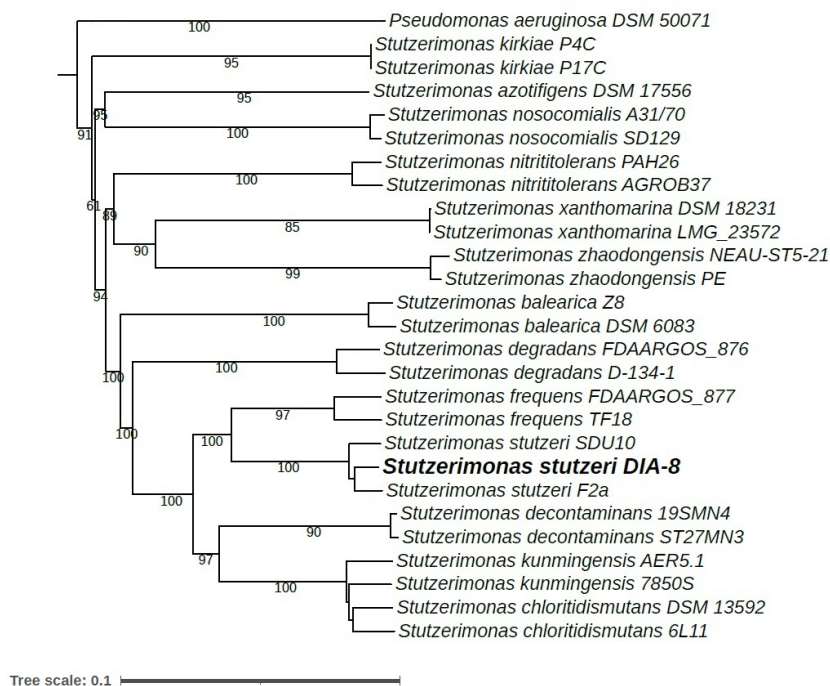


Рис. 2. Филогенетическое дерево, основанное на сравнении нуклеотидной последовательности генома штамма *Stutzerimonas stutzeri* DIA-8 и полных геномов других представителей рода *Stutzerimonas*. Геном *Pseudomonas aeruginosa* DSM 50071 использовался как внешняя группа
[Fig. 2. Phylogenetic tree based on portions of the nucleotide sequence of the genome of *Stutzerimonas stutzeri* DIA-8 and complete genomes of other representatives of the genus *Stutzerimonas*. The genome of *Pseudomonas aeruginosa* DSM 50071 is used as an outgroup]

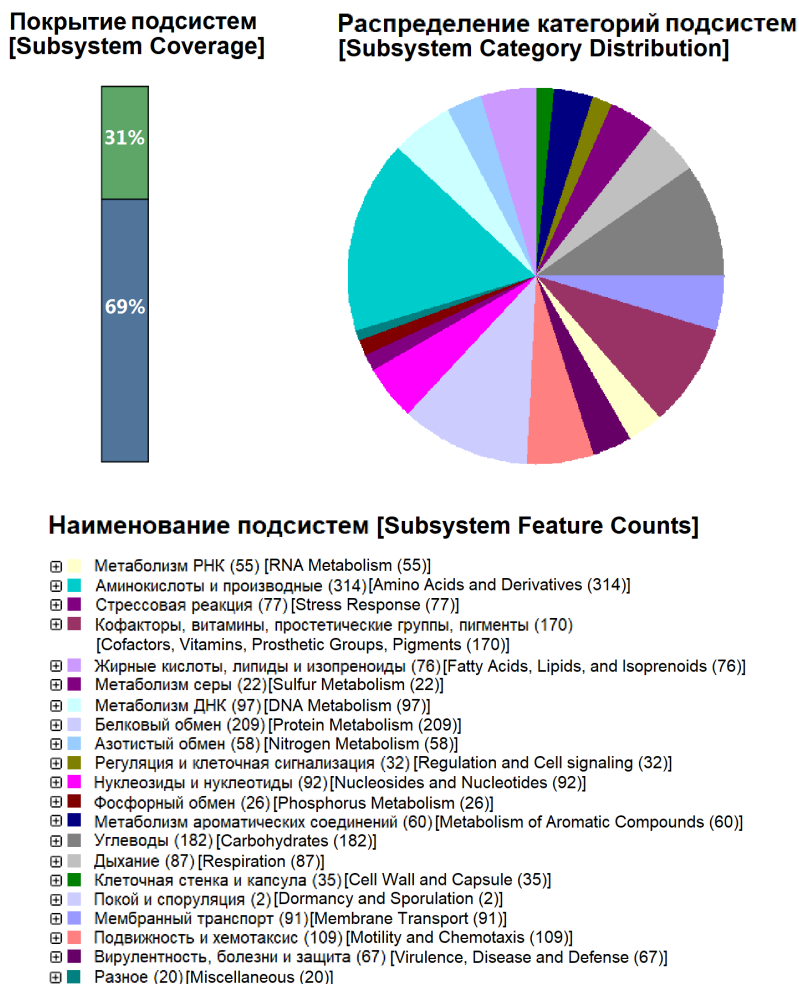


Рис. 3. Распределение категорий подсистем клеточного метаболизма у штамма *Stutzerimonas stutzeri* DIA-8 на основе результатов функциональной аннотации генома с помощью веб-сервиса RAST (<https://rast.nmpdr.org>). Круговая диаграмма представляет процентное содержание белков для каждой категории подсистем. Категории подсистем перечислены в легенде сверху вниз согласно направлению движения по круговой диаграмме по часовой стрелке. Цифры в скобках – число метаболических путей в соответствующей категории подсистемы. Покрытие подсистем – соотношение известных белков, которые могут быть помещены в существующие подсистемы (зеленый цвет), и неизвестных белков, которые не могут быть помещены ни в одну существующую подсистему (синий цвет)

[Fig. 3. Distribution of categories of subsystems of cellular metabolism in *Stutzerimonas stutzeri* strain DIA-8 based on the results of functional genome annotation using the RAST web service (<https://rast.nmpdr.org>). The pie chart represents the percentage of proteins for each category of subsystems. The categories of subsystems are listed in the legend from top to bottom according to the direction of movement on the pie chart clockwise. The numbers in parentheses are the number of metabolic pathways in the corresponding subsystem category. Subsystem coverage is the ratio of known proteins that can be placed in existing subsystems (green) and unknown proteins that cannot be placed in any existing subsystem (blue)]

хозяйственных биопродуктов, включая, среди прочего осмотический стресс (5 CDS), окислительный стресс (39 CDS) и детоксикацию (5 CDS).

Штаммы *Stutzerimonas* хорошо известны своим потенциалом в аэробной биоремедиации ароматических соединений [26]. Пути биodeградации ароматических соединений у различных бактерий сходятся к промежуточным соединениям, таким как катехол и его производные [27]. При аэробном пути деградации катехол и его замещенные производные впоследствии разлагаются катехолдиоксигеназами, которые расщепляют ароматическое кольцо путем введения двух атомов кислорода. По механизму расщепления ароматического кольца катехолдиоксигеназы подразделяются на два типа: индиолдиоксигеназы, к которым относится катехол-1,2-диоксигеназа (*catA*), и экстрадиолдиоксигеназы, ключевым ферментом этой группы является катехол-2,3-диоксигеназа (*xylE*) [28].

Из базы данных *NCBI* отобрано 77 полных геномов штаммов *S. stutzeri*, которые проанализированы на предмет наличия генов катехолдиоксигеназ. В геномах всех отобранных штаммов этого вида бактерий присутствовал ген *catA* (EC 1.13.11.1). Только 17% из обследованных штаммов помимо гена *catA* содержали также ген *xylE*.

Чтобы составить более полную картину потенциала *S. stutzeri* DIA-8 для биоремедиации был проведен поиск генов центральных и периферических путей катаболизма ароматических соединений. Согласно аннотации сервера RAST в геноме *S. stutzeri* DIA-8 обнаружено 60 генов, участвующих в метаболизме ароматических соединений (рис. 3), из которых 31 вовлечен в периферические пути и 27 – в центральные пути катаболизма ароматических соединений. Класс ферментов расщепления ароматического кольца у DIA-8 включал бензоат-1,2-диоксигеназу (EC 1.14.12.10), 1,6-дигидроксициклогекса-2,4-диен-1-карбоксилатдегидрогеназу (EC 1.3.1.25), катехол-1,2-диоксигеназу (EC 1.13.11.1), муконатциклоизомеразу (EC 5.5.1.1), муконолактон Δ-изомеразу (EC 5.3.3.4), 3-оксоадипат-енол-лактоназу (EC 3.1.1.24), 3-оксоадипат-КоА-трансферазу (EC 2.8.3.6), 3-оксоадипил-КоА тиолазу (EC 2.3.1.174) (рис. 4).

Биоинформатический анализ последовательности генома *S. stutzeri* DIA-8 выявил наличие генов, необходимых для биосинтеза гликолипидов. Такие гены, как фосфоманномутаза, глюкозо-1-фосфаттимидилтрансфераза, dTDP-глюкозо-4,6-дегидратаза, dTDP-4-дегидрорамнозо-3,5-эпимераза, dTDP-4-дегидрорамнозоредуктаза и ацилтрансфераза, присутствующие в геноме штамма DIA-8, участвуют в биосинтезе рамнолипидов [29]. Ранее было показано, что *S. stutzeri* способны продуцировать биосурфактанты, а также установлено, что эти биосурфактанты имеют рамнолипидную природу [30].

В геноме штамма *S. stutzeri* DIA-8 также идентифицированы гены, участвующие в выработке уреазы: альфа-субъединица, бетта-субъединица и гамма-субъединица уреазы. Именно уреазы играют важную роль в катализе одного из метаболических путей, участвующих в микробно-индуцированном осаждении кальцита (МИОК) [31]. МИОК является многообещающим подходом для связывания тяжелых металлов, таких как свинец и кадмий в загрязненных почвах [31].

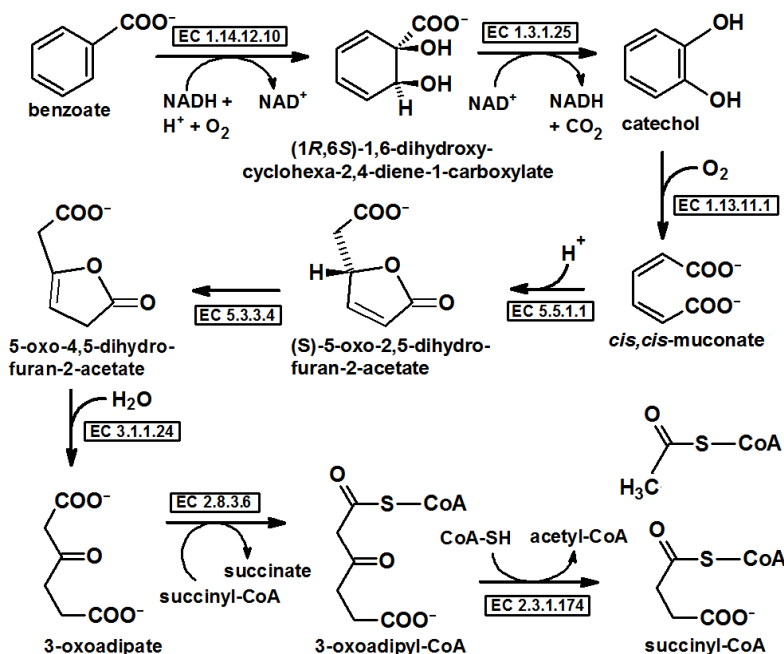


Рис. 4. Путь биodeградации бензола с указанием ферментов, гены которых присутствуют в геноме *S. stutzeri* DIA-8. Коды ферментов: EC 1.14.12.10 – бензоат-1,2-диоксигеназа, EC 1.3.1.25 – 1,6-дигидроксициклогекса-2,4-диен-1-карбоксилатдегидрогеназа, EC 1.13.11.1 – катехол-1,2-диоксигеназа, EC 5.5.1.1 – муконат-циклоизомераза, EC 5.3.3.4 – муконолактон Δ-изомераза, EC 3.1.1.24 – 3-оксоадипатенол-лактоназа, EC 2.8.3.6 – 3-оксоадипат-КоА-трансфераза, EC 2.3.1.174 – 3-оксоадипил-КоА тиолаза

[Fig. 4. The benzene biodegradation pathway with an indication of the enzymes whose genes are present in the genome of *S. stutzeri* DIA-8. Enzyme codes: EC 1.14.12.10 - benzoate 1,2-dioxygenase, EC 1.3.1.25 - 1,6-dihydroxycyclohexa-2,4-diene-1-carboxylate dehydrogenase, EC 1.13.11.1 - catechol 1,2-dioxygenase, EC 5.5.1.1 - muconate cycloisomerase, EC 5.3.3.4 - muconolactone Δ-isomerase, EC 3.1.1.24 - 3-oxoadipate enol lactonase, EC 2.8.3.6 - 3-oxoadipate CoA-transferase, EC 2.3.1.174 - 3-oxoadipyl-CoA thiolase]

Секвенирование выделенной плазмидной ДНК показало, что образец представляет собой смесь двух плазмид. Одна из плазмид имеет размер 15416 п.н. и несет на себе 20 генов, кодирующих белки, и один ген некодирующей РНК молекулы (PrrB/RsmZ). Среди генов на этой плазмиде нет генов, детерминирующих антибиотикоустойчивость, а также генов, которые обсуждались выше. Те гены на этой плазмиде, функции которых удалось установить путем аннотирования, отвечают за репликацию и перенос данной плазмиды между бактериальными клетками. Вторая плазида имеет размер 2450 п.н. и несет на себе три гена, кодирующих белки с неизвестной функцией. При поиске гомологичной нуклеотидной последовательности в базе данных NCBI для ДНК малой плазмиды из нашего штамма мы нашли плазмиду pRGRH1809 размером 1471 п.н., которая была выделена из некультивируемой прокариоты при метагеномном анализе мик-

робиоты кишечника крысы, выловленной в больничной канализации Копенгагена (Дания). Хотя эти плазмиды отличались размером, они имели очень высокую идентичность (99%) по всей протяженности плазмиды pRGRH1809.

Анализ на веб-сервисе PathogenFinder с использованием контигов в качестве входных файлов показал, что штамм не является патогенным для человека. Вероятность, что штамм DIA-8 может быть патогеном, по результатам анализа составила 0,094, что ниже пороговых значений. Также мы проанализировали геном штамма DIA-8 на наличие генов вирулентности с помощью базы данных VFDB [24]. В качестве сравнения мы использовали геном штамма *Pseudomonas putida* KT2440, который определен как непатогенный [32], а также геномы штаммов, вирулентных для млекопитающих: *P. aeruginosa* PAO1 и *P. aeruginosa* PA7 [33]. *P. putida* KT2440 – первая грамотрицательная бактерия, сертифицированная Консультативным комитетом по рекомбинантной ДНК для разработки биотехнологических приложений [32].

Количество генов различных категорий факторов вирулентности согласно базе VFDB существенно отличалось у штамма *S. stutzeri* DIA-8 (29 генов) и непатогенного *P. putida* KT2440 (27 генов) от вирулентных изолятов *P. aeruginosa* PA7 (182 генов) и *P. aeruginosa* PAO1 (248 генов). Гены ключевых факторов вирулентности *P. aeruginosa*, среди которых можно назвать систему секреции типа 3 и ее эффекторов, фосфолипазы, ферменты эластазы и протеазы IV, ферменты синтеза феназина, экзотоксина-A, а также синтеза сидорофора пиохелина у *S. stutzeri* DIA-8 и *P. putida* KT2440 отсутствуют [33].

Среди выявленных факторов вирулентности как у *S. stutzeri* DIA-8, так и у *P. putida* KT2440 присутствовали гены, участвующие в синтезе жгутиков, и гены синтеза альгината. Альгинаты представляют собой экзополисахариды, которые способствуют образованию биопленок, защищающих бактерии от антибиотиков [34]. Хотя подвижность и образование биопленок также характерны для непатогенных бактерий окружающей среды, их рассматривают как механизмы патогенности, поскольку они необходимы для многих биологических функций, таких как поиск питательных веществ и выживание в неблагоприятных условиях.

Установлено 10-кратное различие в количестве генов биосинтеза пилей IV типа в геномах *S. stutzeri* DIA-8 и *P. putida* KT2440. У штамма DIA-8 их выявлено 20, в то время как в геноме *P. putida* KT2440 обнаружено лишь 2 гена этой системы. Пили IV типа – наиболее распространенный класс пилей, которые позволяют бактериям взаимодействовать с абиотическими поверхностями, клетками других микроорганизмов, а также клетками их хозяев. Помимо адгезии бактерии используют пили IV типа для образования биопленок и обмена молекулами [35]. Однако пили IV типа встречаются как у патогенных, так и у непатогенных видов бактерий и архей [36]. Таким образом, полученные нами данные по анализу генома могут указывать на то, что *S. stutzeri* DIA-8 имеет низкий патогенный потенциал, срав-

нимый с другими невирулентными изолятами рода *Pseudomonas*. После проведения токсикологической экспертизы штамма *S. stutzeri* DIA-8 и подтверждения его безопасности для окружающей среды и человека можно будет использовать его в качестве ценного биотехнологического инструмента.

Заключение

В результате полногеномного секвенирования установлено, что геном штамма *S. stutzeri* DIA-8 представлен хромосомой (размером около 4,5 млн п.н.) и двумя плазидами (размером 15 416 и 2450 п.н.). Генов антибиотикорезистентности на плазидах не обнаружено. После аннотирования генома в нем было выявлено 60 генов, ответственных за катаболизм ароматических соединений. Показано, что геном штамма *S. stutzeri* DIA-8 содержит набор генов, участвующих в полном разложении бензола. Анализ профиля генов вирулентности показал, что *S. stutzeri* DIA-8 имеет низкий патогенный потенциал, сравнимый с другими невирулентными изолятами рода *Pseudomonas*. Выделенный нами штамм-деструктор представляет интерес для разработки биотехнологий, направленных на восстановление нефтезагрязненных почв, характеризующихся повышенным содержанием тяжелых металлов.

Список источников

1. Wang J., Gao P., Pan X.L., Fan K.Y., Li Y., Gao Y.F., Gao Y. An aerobic denitrifier *Pseudomonas stutzeri* Y23 from an oil reservoir and its heterotrophic denitrification performance in laboratory-scale sequencing batch reactors // *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2022. Vol. 174. 105471. doi: 10.1016/j.ibiod.2022.105471
2. Chen S., Han X., Xie S., Yang Y., Jing X., Luan T. Extracellular electron transfer drives ATP synthesis for nitrogen fixation by *Pseudomonas stutzeri* // *Electrochemistry Communications*. 2023. Vol. 154. 107562. doi: 10.1016/j.elecom.2023.107562
3. Brown L.M., Gunasekera T.S., Ruiz O.N. Draft genome sequence of *Pseudomonas stutzeri* strain 19, an isolate capable of efficient degradation of aromatic hydrocarbons // *Genome Announcements*. 2017. Vol. 5 (49). e01373-17. doi: 10.1128/genomeA.01113-14
4. Chakraborty R., Woo H., Dehal P., Walker R., Zemla M., Auer M. Complete genome sequence of *Pseudomonas stutzeri* strain RCH2 isolated from a hexavalent chromium [Cr(VI)] contaminated site // *Standards in Genomic Sciences*. 2017. Vol. 12. PP. 1–9. doi: 10.1186/s40793-017-0233-7
5. Zheng R., Wu S., Ma N., Sun C. Genetic and physiological adaptations of marine bacterium *Pseudomonas stutzeri* 273 to mercury stress // *Frontiers in Microbiology*. 2018. Vol. 9. 682. doi: 10.3389/fmicb.2018.00682
6. Burri R., Stutzer A. Ueber Nitrat zerstörende Bakterien und den durch dieselben bedingten Stickstoffverlust // *Zentralblatt für Bakteriologie. Abt. II*. 1895. Vol. 1. PP. 257–265.
7. Lehman K.B., Neumann O.R. Atlas und Grundriss der Bakteriologie und Lehrbuch der speziellen bakteriologischen Diagnostik. München : J.F. Lehman, 1896. 448 p. doi: 10.5962/bhl.title.117384
8. Van Niel C.B., Allen M.B. A note on *Pseudomonas stutzeri* // *Journal of Bacteriology*. 1952. Vol. 64 (3). PP. 413–422. doi: 10.1128/jb.64.3.413-422.1952
9. Lalucat J., Gomila M., Mulet M., Zaruma A., García-Valdés E. Past, present and future of the boundaries of the *Pseudomonas* genus: Proposal of *Stutzerimonas* gen nov. // *Sys-*

- tematic and Applied Microbiology. 2022. Vol. 45. 126289. doi: 10.1016/j.syapm.2021.126289
10. Gomila M., Mulet M., García-Valdés E., Lalucat J. Genome-based taxonomy of the genus *Stutzerimonas* and proposal of *S. frequens* sp. nov. and *S. degradans* sp. nov. and emended descriptions of *S. perfectomarina* and *S. chloritidismutans* // Microorganisms. 2022. Vol. 10. 1363. doi: 10.3390/microorganisms10071363
11. Дегтярева И.А., Бабынин Э.В., Мотина Т.Ю., Султанов М.И. Полногеномное секвенирование штамма *Staphylococcus warneri*, изолированного из загрязненной нефтью почвы // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2020. Т. 10, № 1. С. 48–55. doi: 10.21285/2227-2925-2020-10-1-48-55
12. Jahangi G.Z., Arshad Q.A., Shah A., Younas A., Naz S., Ali Q. BioFertilizing efficiency of phosphate solubilizing bacteria in natural environment: A trial field study on stress tolerant potato (*Solanum tuberosum* L.) // Applied Ecology and Environmental Research. 2019. Vol. 17. PP. 10845–10859. doi: 10.15666/aecer/1705_1084510859
13. Meignanalakshmi S., Charulatha M., Vijayarani K. A preliminary study to evaluate *S. warneri* MF612183 isolated from tannery effluent for bioremediation of heavy metals // Indian Journal of Pure & Applied Biosciences. 2018. Vol. 6. PP. 1347–1351. doi: 10.18782/2320-7051.6280
14. Mohsen L.Y., Jarallah E.M., Al-mamoori A.M.J. Screening and characterization of bio-surfactant-producing bacteria isolated from oil-contaminated soil // Journal of Pharmaceutical Negative Results. 2022. Vol. 13. PP. 1325–1331. doi: 10.47750/pnr.2022.13.S08.164
15. Olson R.D., Assaf R., Brettin T., Conrad N., Cucinell C., Davis J.J. Introducing the bacterial and viral bioinformatics resource center (BV-BRC): A resource combining PATRIC, IRD and ViPR // Nucleic Acids Research. 2023. Vol. 51. PP. D678–D689. doi: 10.1093/nar/gkac1003
16. Parks D.H., Imelfort M., Skennerton C.T., Hugenholtz P., Tyson G.W. Check M: assessing the quality of microbial genomes recovered from isolates, single cells, and metagenomes // Genome Biology. 2015. Vol. 25. PP. 1043–1055. doi: 10.1101/gr.186072.114
17. Liu D., Zhang Y., Fan G., Sun D., Zhang X., Yu Z., Wang J., Wu L., Shi W., Ma J. IPGA: A handy integrated prokaryotes genome and pan-genome analysis web service // iMeta. 2022. Vol. 1 (4). e55. doi: 10.1002/imt2.55
18. Ondov B.D., Treangen T.J., Melsted P., Mallonee A.B., Bergman N.H., Koren S., Phillippy A.M. Mash: Fast genome and metagenome distance estimation using MinHash // Genome Biology. 2016. Vol. 17. PP. 132–145. doi: 10.1186/s13059-016-0997-x
19. Meier-Kolthoff J.P., Sardà Carbasse J., Peinado-Olarte R.L., Göker M. TYGS and LPSN: a database tandem for fast and reliable genome-based classification and nomenclature of prokaryotes // Nucleic Acids Research. 2022. Vol. 50. PP. D801–D807. doi: 10.1093/nar/gkab902
20. Richter M., Rosselló-Móra R., Glöckner F.O., Peplies J. JSpeciesWS: A web server for prokaryotic species circumscription based on pairwise genome comparison // Bioinformatics. 2016. Vol. 32. PP. 929–931. doi: 10.1093/bioinformatics/btv681
21. Letunic I., Bork P. Interactive tree of life (iTOL) v4: Recent updates and new developments // Nucleic Acids Research. 2019. Vol. 47. PP. W256–W259. doi: 10.1093/nar/gkz239
22. Aziz R.K., Bartels D., Best A.A., DeJongh M., Disz T., Edwards A., Formsma K., Gerdes S., Glass E.M., Kubal M., Meyer F., Olsen G.J., Olson R., Osterman A.L., Overbeek R.A., McNeil L.K., Paarmann D., Paczian T., Parrello B., Pusch G.D., Reich C., Stevens R., Vassieva O., Vonstein V., Wilke A., Zagnitko O. The RAST Server: Rapid annotations using subsystems technology // BMC Genomics. 2008. Vol. 9. PP. 1–15. doi: 10.1186/1471-2164-9-75
23. Cosentino S., Voldby Larsen M., Møller Aarestrup F., Lund O. PathogenFinder – Distinguishing friend from foe using bacterial whole genome sequence data // PLoS ONE. 2013. Vol. 8. e77302. doi: 10.1371/journal.pone.0077302

24. Liu B., Zheng D., Jin Q., Chen L., Yang J. VFDB 2019: A comparative pathogenomic platform with an interactive web interface // *Nucleic Acids Research*. 2019. Vol. 47 (D1). PP. D687–D692. doi: 10.1093/nar/gky1080
25. Chun J., Oren A., Ventosa A., Christensen H., Arahal D.R., da Costa M.S., Rooney A.P., Yi H., Xu X.W., De Meyer S., Trujillo M.E. Proposed minimal standards for the use of genome data for the taxonomy of prokaryotes // *The International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*. 2018. Vol. 68. PP. 461–466. doi: 10.1099/ijsem.0.002516
26. Lalucat J., Bennasar A., Bosch R., García-Valdés E., Palleroni N. J. Biology of *Pseudomonas stutzeri* // *Molecular Biology Reviews*. 2006. Vol. 70. PP. 510–547. doi: 10.1128/MMBR.00047-05
27. Ladino-Orjuela G., Gomes E., da Silva R., Salt C., Parsons J.R. Metabolic pathways for degradation of aromatic hydrocarbons by bacteria // *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. 2016. Vol. 237. PP. 105–121. doi: 10.1007/978-3-319-23573-8_5
28. Rodríguez-Salazar J., Almeida-Juarez A.G., Ornelas-Ocampo K., Millán-López S., Raga-Carbajal E., Rodríguez-Mejía J.L., Muriel-Millán L.F., Godoy-Lozano E.E., Rivera-Gómez N., Rudiño-Piñera E., Pardo-López L. Characterization of a novel functional trimetric catechol 1,2-dioxygenase from a *Pseudomonas stutzeri* isolated from the Gulf of Mexico // *Frontiers in Microbiology*. 2020. Vol. 4. 1100. doi: 10.3389/fmicb.2020.01100
29. Pardhi D.S., Panchal R.R., Raval V.H., Joshi R.G., Poccai P., Almalki W.H., Rajput K.N. Microbial surfactants: A journey from fundamentals to recent advances // *Frontiers in Microbiology*. 2022. Vol. 4. 982603. doi: 10.3389/fmicb.2022.982603
30. Singh D.N., Tripathi A.K. Coal induced production of a rhamnolipid biosurfactant by *Pseudomonas stutzeri*, isolated from the formation water of Jharia coalbed // *Bioresource Technology*. 2013. Vol. 128. PP. 215–221. doi: 10.1016/j.biortech.2012.10.127
31. Anbu P., Kang C-H., Shin Y-J., So J-S. Formations of calcium carbonate minerals by bacteria and its multiple applications // *SpringerPlus*. 2016. Vol. 5. 250. doi: 10.1186/s40064-016-1869-2
32. Regenhardt D., Heuer H., Heim S., Fernandez D.U., Strompl C., Moore E.R., Timmis K.N. Pedigree and taxonomic credentials of *Pseudomonas putida* strain KT2440 // *Environmental Microbiology*. 2002. Vol. 4 (12). PP. 912–915. doi: 10.1046/j.1462-2920.2002.00368.x
33. Qin S., Xiao W., Zhou C., Pu Q., Deng X., Lan L., Wu M. *Pseudomonas aeruginosa*: pathogenesis, virulence factors, antibiotic resistance, interaction with host, technology advances and emerging therapeutics // *Signal Transduction and Targeted Therapy*. 2022. Vol. 7 (1). 199. doi: 10.1038/s41392-022-01056-1
34. Moradali M.F., Ghods S., Rehm B.H.A. *Pseudomonas aeruginosa* lifestyle: A paradigm for adaptation, survival, and persistence // *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*. 2017. Vol. 7. 39. doi: 10.3389/fcimb.2017.00039
35. Ligthart K., Belzer C., de Vos W.M., Tytgat H.L.P. Bridging bacteria and the gut: Functional aspects of type IV pili // *Trends in Microbiology*. 2020. Vol. 28 (5). PP. 340–348. doi: 10.1016/j.tim.2020.02.003
36. Singh P.K., Little J., Donnenberg M.S. Landmark discoveries and recent advances in type IV pilus research // *Microbiology and Molecular Biology Reviews*. 2022. Vol. 86 (3). e0007622. doi: 10.1128/mmbr.00076-22

References

1. Wang J, Gao P, Pan XL, Fan KY, Li Y, Gao YF, Gao Y. An aerobic denitrifier *Pseudomonas stutzeri* Y23 from an oil reservoir and its heterotrophic denitrification performance in laboratory-scale sequencing batch reactors. *International Biodeterioration and Biodegradation*. 2022;174:105471. doi: 10.1016/j.ibiod.2022.105471

2. Chen S, Han X, Xie S, Yang Y, Jing X, Luan T. Extracellular electron transfer drives ATP synthesis for nitrogen fixation by *Pseudomonas stutzeri*. *Electrochemistry Communications*. 2023;154:107562. doi: 10.1016/j.elecom.2023.107562
3. Brown LM, Gunasekera TS, Ruiz ON. Draft genome sequence of *Pseudomonas stutzeri* strain 19, an isolate capable of efficient degradation of aromatic hydrocarbons. *Genome Announcements*. 2017;5(49):e01373-17. doi: 10.1128/genomeA.01113-14
4. Chakraborty R, Woo H, Dehal P, Walker R, Zemla M, Auer M. Complete genome sequence of *Pseudomonas stutzeri* strain RCH2 isolated from a hexavalent chromium [Cr(VI)] contaminated site. *Standards in Genomic Sciences*. 2017;12:1-9. doi: 10.1186/s40793-017-0233-7
5. Zheng R, Wu S, Ma N, Sun C. Genetic and physiological adaptations of marine bacterium *Pseudomonas stutzeri* 273 to mercury stress. *Frontiers in Microbiology*. 2018; 9:682. doi: 10.3389/fmicb.2018.00682
6. Burri R, Stutzer A. Ueber Nitrat zerstörende Bakterien und den durch dieselben bedingten Stickstoffverlust. *Zentralblatt für Bakteriologie. Abt. II*. 1895;1:257-265.
7. Lehman KB, Neumann OR. *Atlas und Grundriss der Bakteriologie und Lehrbuch der speziellen bakteriologischen Diagnostik*. München: J.F. Lehman; 1896. 448 p. doi: 10.5962/bhl.title.117384
8. Van Niel CB, Allen MB. A note on *Pseudomonas stutzeri*. *Journal of Bacteriology*. 1952;64(3):413-422. doi: 10.1128/jb.64.3.413-422.1952
9. Lalucat J, Gomila M, Mulet M, Zaruma A, García-Valdés E. Past, present and future of the boundaries of the *Pseudomonas* genus: proposal of *Stutzerimonas* gen. nov. *Syst. Appl. Microbiol*. 2022;45:126289. doi: 10.1016/j.syapm.2021.126289
10. Gomila M, Mulet M, García-Valdés E, Lalucat J. Genome-based taxonomy of the genus *Stutzerimonas* and proposal of *S. frequens* sp. nov. and *S. degradans* sp. nov. and emended descriptions of *S. perfectomarina* and *S. chloritidismutans*. *Microorganisms*. 2022;10:1363. doi: 10.3390/microorganisms10071363
11. Degtyareva IA, Babynin EV, Motina TYu, Sultanov MI. Full-genome sequencing of the *Staphylococcus warneri* strain isolated from oil-contaminated soil. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2020;10(1):48-55. In Russian, English summary. doi: 10.21285/2227-2925-2020-10-1-48-55
12. Jahangi GZ, Arshad QA, Shah A, Younas A, Naz S, Ali Q. BioFertilizing efficiency of phosphate solubilizing bacteria in natural environment: A trial field study on stress tolerant potato (*Solanum tuberosum* L.). *Applied Ecology and Environmental Research*. 2019;17:10845-10859. doi: 10.15666/aecer/1705_1084510859
13. Meignanalakshmi S, Charulatha M, Vijayarani K. A preliminary study to evaluate *S. warneri* MF612183 isolated from tannery effluent for bioremediation of heavy metals. *Indian Journal of Pure & Applied Biosciences*. 2018;6:1347-1351. doi: 10.18782/2320-7051.6280
14. Mohsen LY, Jarallah EM, Al-mamoori AMJ. Screening and characterization of biosurfactant-producing bacteria isolated from oil-contaminated soil. *Journal of Pharmaceutical Negative Results*. 2022;13:1325-1331. doi: 10.47750/pnr.2022.13.S08.164
15. Olson RD, Assaf R, Brettin T, Conrad N, Cucinell C, Davis JJ. Introducing the bacterial and viral bioinformatics resource center (BV-BRC): A resource combining PATRIC, IRD and ViPR. *Nucleic Acids Research*. 2023;51:D678-D689. doi: 10.1093/nar/gkac1003
16. Parks DH, Imelfort M, Skennerton CT, Hugenholtz P, Tyson GW. Check M: Assessing the quality of microbial genomes recovered from isolates, single cells, and metagenomes. *Genome Research*. 2015;25:1043-1055. doi: 10.1101/gr.186072.114
17. Liu D, Zhang Y, Fan G, Sun D, Zhang X, Yu Z, Wang J, Wu L, Shi W, Ma J. IPGA: A handy integrated prokaryotes genome and pan-genome analysis web service. *iMeta*. 2022;1(4):e55. doi: 10.1002/imt2.55
18. Ondov BD, Treangen TJ, Melsted P, Mallonee AB, Bergman NH, Koren S, Phillippy AM. Mash: Fast genome and metagenome distance estimation using MinHash. *Genome Biology*. 2016;17:132-145. doi: 10.1186/s13059-016-0997-x

19. Meier-Kolthoff JP, Sardà Carbasse J, Peinado-Olarte RL, Göker M. TYGS and LPSN: A database tandem for fast and reliable genome-based classification and nomenclature of prokaryotes. *Nucleic Acids Research*. 2022;50:D801-D807. doi: 10.1093/nar/gkab902
20. Richter M, Rosselló-Móra R, Glöckner FO, Peplies J. JSpeciesWS: A web server for prokaryotic species circumscription based on pairwise genome comparison. *Bioinformatics*. 2016;32:929-931. doi: 10.1093/bioinformatics/btv681
21. Letunic I, Bork P. Interactive tree of life (iTOL) v4: Recent updates and new developments. *Nucleic Acids Research*. 2019;47:W256-W259. doi: 10.1093/nar/gkz239
22. Aziz RK, Bartels D, Best AA, DeJongh M, Disz T, R Edwards A, Formsma K, Gerdes S, Glass EM, Kubal M, Meyer F, Olsen GJ, Olson R, Osterman AL, Overbeek RA, McNeil LK, Paarmann D, Paczian T, Parrello B, Pusch GD, Reich C, Stevens R, Vassieva O, Vonstein V, Wilke A, Zagnitko O. The RAST Server: Rapid annotations using subsystems technology. *BMC Genomics*. 2008;9:1-15. doi: 10.1186/1471-2164-9-75
23. Cosentino S, Voldby Larsen M, Møller Aarestrup F, Lund O. PathogenFinder - distinguishing friend from foe using bacterial whole genome sequence data. *PLoS ONE*. 2013;8:e77302. doi: 10.1371/journal.pone.0077302
24. Liu B, Zheng D, Jin Q, Chen L, Yang J. VFDB 2019: A comparative pathogenomic platform with an interactive web interface. *Nucleic Acids Research*. 2019;47(D1):D687-D692. doi: 10.1093/nar/gky1080
25. Chun J, Oren A, Ventosa A, Christensen H, Arahal DR, da Costa MS, Rooney AP, Yi H, Xu XW, De Meyer S, Trujillo ME. Proposed minimal standards for the use of genome data for the taxonomy of prokaryotes. *The International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*. 2018;68:461-466. doi: 10.1099/ijsem.0.002516
26. Lalucat J, Bennisar A, Bosch R, García-Valdés E, Palleroni NJ. Biology of *Pseudomonas stutzeri*. *Molecular Biology Reviews*. 2006;70:510-547. doi: 10.1128/MMBR.00047-05
27. Ladino-Orjuela G, Gomes E, da Silva R, Salt C, Parsons JR. Metabolic pathways for degradation of aromatic hydrocarbons by bacteria. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. 2016;237:105-121. doi: 10.1007/978-3-319-23573-8_5
28. Rodríguez-Salazar J, Almeida-Juarez AG, Ornelas-Ocampo K, Millán-López S, Raga-Carbajal E, Rodríguez-Mejía JL, Muriel-Millán LF, Godoy-Lozano EE, Rivera-Gómez N, Rudiño-Piñera E, Pardo-López L. Characterization of a novel functional trimeric catechol 1,2-dioxygenase from a *Pseudomonas stutzeri* isolated from the Gulf of Mexico. *Frontiers in Microbiology*. 2020;4:1100. doi: 10.3389/fmicb.2020.01100
29. Pardhi DS, Panchal RR, Raval VH, Joshi RG, Pocai P, Almalki WH, Rajput KN. Microbial surfactants: A journey from fundamentals to recent advances. *Frontiers in Microbiology*. 2022;4:982603. doi: 10.3389/fmicb.2022.982603
30. Singh DN, Tripathi AK. Coal induced production of a rhamnolipid biosurfactant by *Pseudomonas stutzeri*, isolated from the formation water of Jharia coalbed. *Bioresource Technology*. 2013;128:215-221. doi: 10.1016/j.biortech.2012.10.127
31. Anbu P, Kang C-H, Shin Y-J, So J-S. Formations of calcium carbonate minerals by bacteria and its multiple applications. *SpringerPlus*. 2016;5:250. doi: 10.1186/s40064-016-1869-2
32. Regenhardt D, Heuer H, Heim S, Fernandez DU, Strompl C, Moore ER, Timmis KN. Pedigree and taxonomic credentials of *Pseudomonas putida* strain KT2440. *Environ. Microbiol.* 2002;4(12):912-915. doi: 10.1046/j.1462-2920.2002.00368.x
33. Qin S, Xiao W, Zhou C, Pu Q, Deng X, Lan L, Wu M. *Pseudomonas aeruginosa*: Pathogenesis, virulence factors, antibiotic resistance, interaction with host, technology advances and emerging therapeutics. *Signal Transduction and Targeted Therapy*. 2022;7(1):199. doi: 10.1038/s41392-022-01056-1
34. Moradali MF, Ghods S, Rehm BHA. *Pseudomonas aeruginosa* lifestyle: A paradigm for adaptation, survival, and persistence. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*. 2017;7:39. doi: 10.3389/fcimb.2017.00039

35. Ligthart K, Belzer C, de Vos WM, Tytgat HLP. Bridging bacteria and the gut: Functional aspects of type IV pili. *Trends in Microbiology*. 2020;28(5):340-348. doi: 10.1016/j.tim.2020.02.003
36. Singh PK, Little J, Donnenberg MS. Landmark discoveries and recent advances in type IV pilus research. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*. 2022;86(3):e0007622. doi: 10.1128/mmbr.00076-22

Информация об авторах:

Бабынин Эдуард Викторович, канд. биол. наук, доцент кафедры генетики, Институт фундаментальной медицины и биологии, Казанский (Приволжский) федеральный университет; с.н.с. лаборатории молекулярно-генетических и микробиологических методов, Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук» (Казань, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2285-8879>

E-mail: edward.b67@mail.ru

Царькова Юлия Равиловна, аспирант кафедры генетики, Институт фундаментальной медицины и биологии, Казанский (Приволжский) федеральный университет (Казань, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1658-4553>

E-mail: ju.gusmanova@yandex.ru

Дегтярева Ирина Александровна, д-р биол. наук, г.н.с. лаборатории молекулярно-генетических и микробиологических методов, Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук» (Казань, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1575-8493>

E-mail: peace-1963@mail.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Eduard V. Babynin, Cand. Sci. (Biol.), Assoc. Prof. of the Department of Genetics, Institute of Fundamental Medicine and Biology, Kazan (Volga Region) Federal University; senior researcher of the Laboratory of Molecular Genetics and Microbiological Methods, Federal Research Center "Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences" (Kazan, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2285-8879>

E-mail: edward.b67@mail.ru

Yulia R. Tsarkova, PhD student at the Department of Genetics, Institute of Fundamental Medicine and Biology, Kazan (Volga Region) Federal University (Kazan, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1658-4553>

E-mail: ju.gusmanova@yandex.ru

Irina A. Degtyareva, Dr. Sci. (Biol.), chief scientist of the Laboratory of Molecular Genetics and Microbiological Methods, Federal Research Center "Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences" (Kazan, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1575-8493>

E-mail: peace-1963@mail.ru

The Authors declare no conflict of interest.

*Статья поступила в редакцию 20.10.2024;
одобрена после рецензирования 16.12.2024; принята к публикации 04.09.2025*

*The article was submitted 20.10.2024;
approved after reviewing 16.12.2024; accepted for publication 04.09.2025*

Научная статья
УДК 575.22
doi: 10.17223/19988591/71/13

Оценка величины повреждений ядерной ДНК у работников угольных теплоэлектростанций с помощью микроядерного теста с цитокинетическим блоком в связи с индивидуальными вариантами генов системы репарации ДНК *XRCC1*, *XRCC3*, *XRCC4*

Анна Владимировна Марущак¹,
Анастасия Владимировна Торгунакова²,
Руслан Александрович Титов³, Ольга Александровна Соболева⁴,
Алексей Михайлович Елисейкин⁵,
Елена Александровна Киселева⁶, Яна Александровна Савченко⁷,
Варвара Ивановна Минина⁸

^{1, 2, 3, 4, 5, 7, 8} *Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН,
Кемерово, Россия*

^{2, 3, 4, 6, 7, 8} *Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия*

¹ <https://orcid.org/0000-0002-9560-7563>, marushchak.av@mail.ru

⁵ elisejkinam@ihe.sbras.ru

⁸ vminina@mail.ru

Аннотация. Работники угольных теплоэлектростанций подвергаются профессиональному воздействию высоких концентраций угольной пыли, содержащей взвешенные частицы, полициклические ароматические углеводороды, тяжелые металлы, которые могут способствовать окислительному стрессу, приводя к формированию нарушений ДНК, образованию аддуктов и хромосомных аномалий. Проведена оценка повреждений ядерной ДНК у 222 работников угольных теплоэлектростанций г. Кемерово и 219 жителей той же местности, не занятых на производстве. Для оценки генотоксической нагрузки использовался микроядерный тест на лимфоцитах крови с цитохалазиновым блоком. Для учета вклада генетических факторов в формирование нарушений ДНК методом полимеразной цепной реакции выполнен анализ герминальных вариантов генов, кодирующих белки репарации ДНК: *XRCC1 rs25489*, *XRCC3 rs861539*, *XRCC4 rs2075686*, *rs2075685*. Установлено повышение частоты встречаемости ($p < 0,002$) двуядерных лимфоцитов с микроядрами, мостами и протрузиями у рабочих по сравнению с контрольной группой. Показано, что наибольшей чувствительностью к повреждающему действию факторов производственной среды обладают рабочие с генотипами: *AA XRCC1 rs25489*, *CT, TT XRCC4 rs2075686*, *TT XRCC4 rs2075685*, *TT XRCC3 rs861539*. Полученные результаты свидетельствуют о значимом вкладе генетических и средовых факторов в формирование цитогенетических эффектов у рабочих угольных теплоэлектростанций.

Ключевые слова: микроядерный тест, рабочие, угольные теплоэлектростанции, гены репарации ДНК

Источник финансирования: исследование выполнено при поддержке гранта в форме субсидий на создание научных лабораторий под руководством молодых ученых (постановление Правительства от 19.09.22 № 632).

Для цитирования: Марущак А.В., Торгунакова А.В., Титов Р.А., Соболева О.А., Елисейкин А.М., Киселева Е.А., Савченко Я.А., Минина В.И. Оценка величины повреждений ядерной ДНК у работников угольных теплоэлектростанций с помощью микроядерного теста с цитокинетическим блоком в связи с индивидуальными вариантами генов системы репарации ДНК *XRCC1*, *XRCC3*, *XRCC4* // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2025. № 71. С. 217–236. doi: 10.17223/19988591/71/13

Original article

doi: 10.17223/19988591/71/13

Estimation of the magnitude of nuclear DNA damage in coal thermal power plant workers using a micronucleus test with a cytokinetic block in connection with individual variants of the genes of the DNA repair system *XRCC1*, *XRCC3*, *XRCC4*

Anna V. Marushchak¹, Anastasia V. Torgunakova², Ruslan A. Titov³, Olga A. Soboleva⁴, Aleksej M. Elisejkin⁵, Elena A. Kiseleva⁶, Yana A. Savchenko⁷, Varvara I. Minina⁸

^{1, 2, 3, 4, 5, 7, 8} *The Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of SB RAS, Kemerovo, Russia*

^{2, 3, 4, 6, 7, 8} *Kemerovo State University, Kemerovo, Russia*

¹ <https://orcid.org/0000-0002-9560-7563>, marushchak.av@mail.ru

⁵ elisejkinam@ihe.sbras.ru

⁸ vminina@mail.ru

Summary. Employees of coal-fired thermal power plants are exposed to high concentrations of coal dust containing suspended particles, polycyclic aromatic hydrocarbons, and heavy metals, which can contribute to oxidative stress, leading to DNA damage, adduct formation, and chromosomal abnormalities. Production conditions cause adverse effects that are dangerous for the human genome, thus, one of the directions of genetic toxicology tracks their effects. Workers of coal-fired thermal power plants have to have a professional contact with high level of concentrations of coal dust, food both organic and inorganic compounds, including suspended particles, polycyclic aromatic hydrocarbons, and heavy metals. An important risk factor for pathological changes in the genome is hereditary predisposition. In view of the goal, the analysis of coal-fired thermal power plants workers with an increased frequency of cytogenetic damage, detected using a micronucleus test with a cytochalasin block, began to work in connection with inherited variations of DNA repair enzymes: *XRCC1*, *XRCC3*, and *XRCC4*.

In this work, we assessed nuclear DNA damage in 222 employees of coal-fired thermal power plants in Kemerovo, whose average age was 52. The control group included 219 residents of the same area who were not employed in production, with their average age of 50. To analyze the genotoxic load, a micronucleus test on blood lymphocytes with a cytochalasin block was used. To take into account the contribution of genetic factors to the formation of disorders using the polymerase chain reaction, we analyzed the genes for DNA repair enzymes: *XRCC1 rs25489*, *XRCC3 rs861539*, *XRCC4 rs2075686*, and *rs2075685*.

An increase in the frequency of occurrence of binuclear lymphocytes with micronuclei, bridges and protrusions and the occurrence of cells in apoptosis was established. Proliferative parameters (mitosis frequency and replication index) were lower in workers compared to the control group (see Fig. 1). It was found that smoking did

not have a statistically significant effect on the performance both in the working and control groups (differences were not observed when comparing smokers and non-smokers). Most often, the cells with micronuclei and protrusions were registered in workers performing the main production operations in the fuel and transportation workshops (on average, 2,3% and 2,9%, respectively). The workers with genotypes *AA XRCC1 rs25489*, *CT, TT XRCC4 rs2075686*, *TT XRCC4 rs2075685*, and *TT rs861539 XRCC3* (see Table 1) were proved to be the most sensitive to the damaging effects of the production environment factors. The owners of these genotypic variants should become a priority group for the implementation of preventive measures. The accumulation of cytogenetic damage the immune system cells can lead to an increased risk of various (including cancer) diseases. In this study, the results obtained indicate a significant contribution of not only environmental, but also genetic factors to the formation of cytogenetic effects in workers at coal-fired thermal power plants. Understanding the complexity of relations at the genomic, epigenomic, proteomic, and metabolomic levels requires further large-scale studies using additional biomarkers of sensitivity and the effect of working environment factors on the body of the working population.

The article contains 3 Tables, 2 Figures, 37 References.

Keywords: micronucleus test, workers, coal-fired thermal power plants, DNA repair genes

For citation: Marushchak AV, Torgunakova AV, Titov RA, Soboleva OA, Elisejkin AM, Kiseleva EA, Savchenko YA, Minina VI. Estimation of the magnitude of nuclear DNA damage in coal thermal power plant workers using a micronucleus test with a cytokinetic block in connection with individual variants of the genes of the DNA repair system *XRCC1*, *XRCC3*, *XRCC4*. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya* = *Tomsk State University Journal of Biology*. 2025;71:217-236. doi: 10.17223/19988591/71/13

Введение

Производственные условия нередко оказывают неблагоприятные, опасные для генома человека воздействия, поэтому мониторинг их эффектов является важным направлением генетической токсикологии.

Работники угольных теплоэлектростанций подвергаются профессиональному воздействию высоких концентраций угольной пыли, содержащей как органические, так и неорганические соединения, в том числе взвешенные частицы (размером преимущественно от 20 до 50 мкм), полициклические ароматические углеводороды, тяжелые металлы. Кроме того, уголь содержит природные радиоактивные вещества уранового, актино-уранового и ториевого рядов [1]. Комплексное действие этих радиационных и химических факторов может способствовать воспалению и окислительному стрессу, приводя к формированию одно- и двунитевых разрывов ДНК, образованию аддуктов и хромосомных аномалий.

Методы оценки повреждения генома включают молекулярные, молекулярно-цитогенетические, кариологические и классические цитогенетические методы. Исследуется длина теломер, рассматривается статус метилирования промоторов ключевых генов контроля клеточного цикла, производится оценка копий мтДНК для анализа влияния промышленных факторов на геном работников [2]. Среди широкого спектра тестов для оценки повреждений генома особое место принадлежит микроядерному тесту. Этот

высококчувствительный метод биологической дозиметрии позволяет оценить наличие различных ядерных аномалий, дает ценную информацию о таких клеточных событиях, как пролиферация, гибель клеток путем апоптоза. К числу основных преимуществ микроядерного теста относят его информативность в сочетании с относительной простотой в выполнении. Измерение индекса клеточного деления представляет данные о цитостатическом эффекте определенного химического или физического агента [3], может применяться для оценки иммунокомпетентности путем измерения мутагенного ответа лимфоцитов [4]. Показатель нуклеоплазменных мостов является маркером влияния ионизирующего излучения на геном [5]. Микроядерный тест широко используется в таких областях медицины, как оценка индивидуальной восприимчивости к воздействию экзогенных и эндогенных генотоксических агентов, оценка риска развития рака и других хронических заболеваний, прогностический анализ на побочные эффекты облучения у лиц после лучевой терапии [6]. Немногочисленные работы, посвященные изучению генотоксических эффектов у работников промышленных предприятий с помощью микроядерного теста, подтверждают накопление у них повреждений ДНК [7, 8].

Важным внутренним фактором риска патологического изменения генома является наследственная предрасположенность. Известно, что полиморфизм генов, кодирующих различные варианты ферментов репарации ДНК, ассоциирован с риском накопления повреждений генома [9]. Описаны ассоциации вариантов генов, участвующих в репарации ДНК: *XRCC1*, *XRCC3*, *XRCC4* с высоким уровнем повреждений ДНК [10, 11].

В связи с этим целью данной работы стал анализ у рабочих угольных теплоэлектростанций частоты цитогенетических повреждений, выявляемых с помощью микроядерного теста с цитохалазиновым блоком, в связи с унаследованными вариантами генов ферментов репарации ДНК: *XRCC1*, *XRCC3*, *XRCC4*.

Материалы и методы

Исследование проводилось в соответствии с рекомендациями Хельсинской декларации Всемирной ассоциации «Этические принципы проведения научных медицинских исследований с участием человека» с поправками 2000 г. и «Правилами клинической практики в Российской Федерации» (утвержденными Приказом Минздрава РФ от 19.06.2003 г. № 2660). Дизайн исследования («случай-контроль») одобрен локальным этическим комитетом Федерального исследовательского центра угля и углехимии СО РАН (г. Кемерово). Участие людей в исследовании базировалось на принципах добровольности и информированности о целях, методах и результатах работы.

Материалами исследования стали образцы венозной периферической крови 441 неродственного индивида русской национальности, проживающих в г. Кемерово (Западная Сибирь, Россия). В том числе были обследованы 222 работника угольных теплоэлектростанций г. Кемерово, средний возраст – 52 года (0,5 – стандартная ошибка среднего (SEM)). Данная

выборка включала 176 мужчин и 46 женщин (средний возраст 51 год + 0,58 SEM и 56 лет + 0,7 SEM соответственно), 97 курящих и 125 – некурящих. В контрольную группу вошли 219 жителей той же местности, не работающих на производстве, средний возраст – 50 лет (0,47 SEM), из них 170 мужчин (средний возраст: 47 лет + 0,7 SEM) и 49 женщин (средний возраст: 51 год + 0,6 SEM), 83 курящих и 136 некурящих. *Критериями исключения* (для всех групп) стали: возраст старше 60 лет, приём лекарственных препаратов, рентгенологические обследования за 3 месяца и менее до исследования, наследственные, онкологические, инфекционно-воспалительные, аллергические заболевания.

Микроядерный тест в лимфоцитах периферической крови выполняли в соответствии с рекомендациями М. Fenech [12], с модификациями, предложенными Ф.И. Ингель [13]. С помощью микроскопов Axio Scope.A1 (Zeiss, Германия) и Eclipse E100 (Nikon, Япония) двумя независимыми исследователями на зашифрованных предметных стеклах проводили анализ 1000 двуядерных лимфоцитов, в которых регистрировали клетки с различными типами цитогенетических повреждений, таких как микроядра, мосты, протрузии. Критерии отбора двуядерных лимфоцитов, включаемых в анализ, и критерии для регистрации цитогенетических нарушений соответствовали общепринятым рекомендациям [14]. Кроме того, на каждом препарате подсчитывали по 500 клеток с различным количеством ядер (от одного до восьми), а также учитывали клетки, находящиеся на стадии апоптоза и митоза. В соответствие с рекомендациями Titenko–Holland [15] рассчитывали индекс репликации (ИР), который показывает долю завершённых циклов деления клеток, по формуле:

$$\text{ИР} = \frac{1\% \text{ одноклеточ. кл.} + 2\% \text{ двуядер. кл.} + 3\% \text{ 3-ядер. кл.} + 4\% \text{ 4-ядер. кл.}}{100}.$$

Выделение ДНК проводили методом фенол-хлороформной экстракции. Для анализа были отобраны гены, кодирующие белки репарации ДНК, имеющие функциональную значимость (исследовались по базам RegulomeDB Version 1.1 (<https://regulomedb.org>), SNPinfo Web Server (<https://snpinf.niehs.nih.gov>) и HaploReg v3, для которых ранее было показано наличие ассоциации с накоплением повреждений ДНК по результатам ранее проведенных исследований [10, 11]. Характеристика выбранных полиморфных вариантов генов (по данным базы National Center for Biotechnology Information, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/SNP/>) представлена в табл. 1.

Выявление однонуклеотидных полиморфизмов (SNP) в генах проводилось методом аллель-пецифической полимеразной цепной реакции (ПЦР) с помощью тест-систем, разработанных НПФ «Литех» (г. Москва). Анализ результатов амплификации осуществляли с помощью разделения продуктов методом горизонтального электрофореза в 3% агарозном геле. Результаты электрофореза были выявлены с помощью универсальной системы гель-документации Gel Doc (BioRad, США).

Статистическая обработка результатов проводилась с использованием программного обеспечения StatSoft STATISTICA 10.0. Для проверки

Таблица 1 [Table 1]

Характеристика выбранных для исследования полиморфных вариантов
[Characteristics of polymorphic variants selected for study]

Ген [Gene]	SNP	Локализация (GRCh38) [Localization]	Замена нуклеотидов [Nucleotide substitution]
<i>XRCC1</i>	rs25489	chr19:43552260	G > A
<i>XRCC3</i>	rs861539	chr14:103699416	C > T
<i>XRCC4</i>	rs2075686	chr5:83076927	C > T
<i>XRCC4</i>	rs2075685	chr5:83076846	G > T

Примечание. SNP – однонуклеотидный полиморфизм.
[Note. SNP - single nucleotide polymorphism]

соответствия полученных данных нормальному распределению использовали критерий Колмогорова–Смирнова. Учитывая полученные результаты, различия между выборками определялись непараметрическим U-критерием Манна–Уитни. Попарные сравнения проводили с использованием критерия Краскела–Уоллиса. Критический уровень значимости при проверке статистических гипотез принимали равным 0,05. При статистической обработке данных по частотам аллелей использовали таблицы сопряженности и критерий χ^2 с поправкой на критерий Фишера. Соответствие распределения частот генотипов равновесию Харди–Вайнберга (χ^2) проводили с помощью онлайн-ресурса: <https://www.had2know.org/academics/hardy-weinberg-equilibrium-calculator-2-alleles.html>.

Результаты исследования и обсуждение

Влияние производственной среды на частоту цитогенетических нарушений и показателей пролиферации оценивалось путем сопоставления показателей микроядерного теста между группами рабочих и контрольных доноров. Данные представлены на рис. 1.

Значения показателей микроядерного теста, полученные в контрольной группе, соответствовали фоновым показателям в регионе (согласно результатам ранее проведенных исследований в Кемеровской области) [16]. У рабочих теплоэлектростанций частота микроядер, протрузий, мостов и встречаемость клеток в апоптозе оказалась статистически значимо выше, а пролиферативные показатели (частота митозов и индекс репликации) ниже, чем у не занятых на производстве индивидов. Было установлено, что курение не оказывало статистически значимого влияния на показатели как в рабочей, так и контрольной группах (не наблюдали отличий при сравнении курящих и некурящих индивидов). Наиболее часто клетки с микроядрами и протрузиями регистрировались у работников, выполняющих основные производственные операции в топливно-транспортном цехе (в среднем 2,3% и 2,9% соответственно, $n = 124$). Это машинисты и слесари топливоподдачи топливно-транспортного цеха, подвергающиеся воздействию

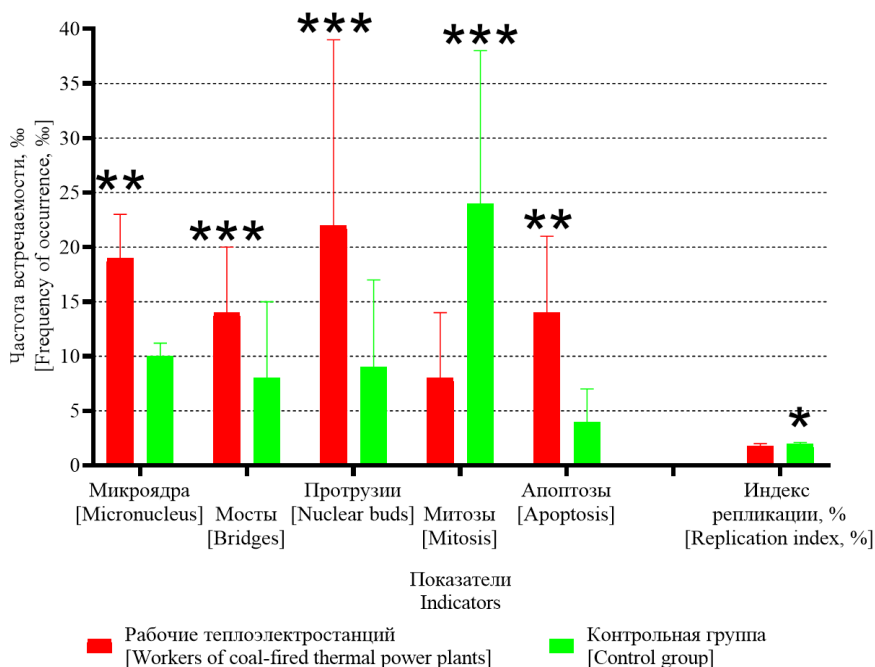


Рис. 1. Частота двухъядерных клеток с цитогенетическими нарушениями и пролиферативные показатели микроядерного теста в изученных группах: на оси X – показатели микроядерного теста, на оси Y – частота встречаемости, %. Отличается от группы сравнения по критерию Манна–Уитни: * $p = 0,01$; ** $p < 0,0002$; *** $p < 0,000001$ [Fig. 1. Frequency of binucleate cells with cytogenetic disorders and proliferative indicators of the micronucleus test in the studied groups: on the X-axis - indicators of micronucleus test, on the Y-axis - frequency of occurrence, %. Differs from the comparison group according to the Mann-Whitney test: * $p = 0.01$; ** $p < 0.0002$; *** $p < 0.000001$]

высоких концентраций угольной пыли (по данным заводской промышленной лаборатории концентрация пыли на рабочем месте составляла в среднем $23,0 \pm 16,4$ мг/м³), а также аэрозоля масел, шума, вибрации, перепада температур. Это указывает на то, что наблюдаемые нарушения связаны с воздействием факторов производственной среды.

Стаж работы оказывал влияние на частоту встречаемости двухъядерных лимфоцитов с микроядрами ($R = 0,42$, $p = 0,00001$), мостами ($R = 0,46$, $p = 0,00001$), протрузиями ($R = -0,17$, $p = 0,008$), а также клеток на стадии митоза ($R = -0,18$, $p = 0,005$) (рис. 2).

Микроядра и протрузии могут образовываться при разрывах и/или отставании хромосом при делении клетки из-за дисфункций сборки веретена деления или по причине ошибок механизмов репарации ДНК (в случае протрузий). Эти события могут быть вызваны окислительным стрессом, воздействием кластогенов или анеугенов, генетическими дефектами в контрольных точках клеточного цикла и/или генах репарации ДНК, а также дефицитом питательных веществ, необходимых в качестве сопутствующих факторов метаболизма ДНК и сегрегации хромосом. Повышенный уровень

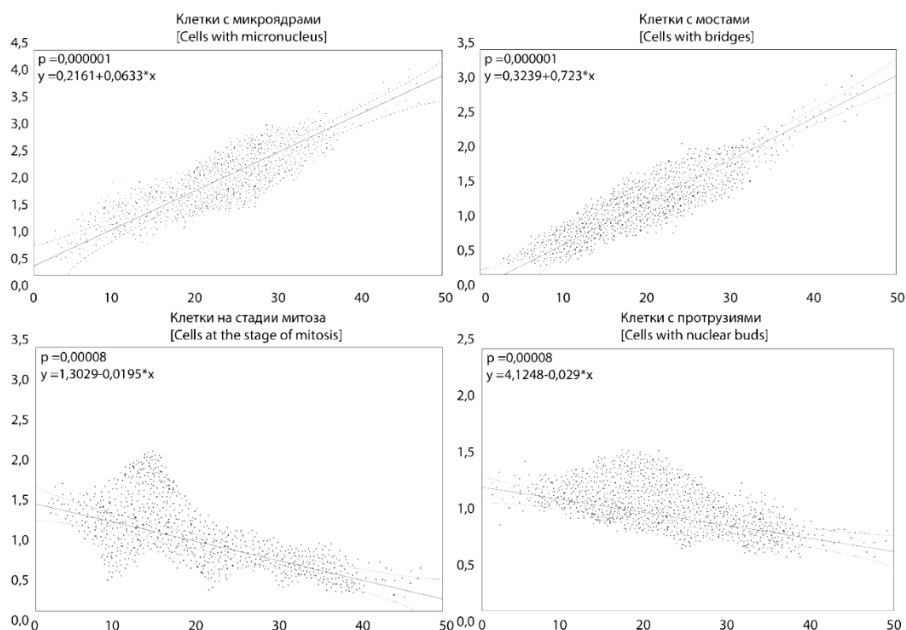


Рис. 2. Распределение частот встречаемости двухъядерных лимфоцитов с цитогенетическими нарушениями и на стадии митоза у работников угольных теплоэлектростанций в зависимости от стажа работы: на оси X – стаж работы, на оси Y – частота встречаемости клеток

[Fig. 2. Distribution of frequencies of occurrence of binucleate lymphocytes with cytogenetic disorders and at the mitosis stage in workers of coal-fired thermal power plants, depending on work experience: on the X-axis - length of service, on the Y-axis - frequency of occurrence of cells]

микроядер в лимфоцитах периферической крови связывают с риском развития рака [12].

М. Celik с соавторами [17] исследовали генотоксическую опасность для работников теплоэлектростанции Афсин-Эльбистан в Турции, которые профессионально контактируют с углём и его продуктами: пыль, зола, тяжёлые металлы и пр. Был проведён микроядерный тест у 48 некурящих и не употребляющих алкоголь работников и 30 условно-здоровых, схожих по возрасту и статусу курения, не подверженных влиянию генотоксических эффектов жителей того же региона. Исследователями выявлены повышенные показатели частоты микроядер среди группы работников, которые составили $0,8 \pm 0,1\%$, по сравнению с контрольными донорами – $0,7 \pm 0,4\%$ при $p < 0,05$.

В работе Р. Rohr с соавторами [18] было продемонстрировано, что рабочие теплоэлектростанций Бразилии, профессионально контактировавшие с угольной пылью, имели более высокую частоту не только микроядер, но и мостов, по сравнению с контрольной группой. Мосты происходят из дицентрических хромосом, в которых центромеры были оттянуты к противоположным полюсам клетки в анафазе, что указывает на неправильную репарацию ДНК, перестройку хромосом и/или слияние концов

теломер. Главной причиной формирования мостов в клетках называют радиационное воздействие, приводящее к формированию дицентрических хромосом [19].

У обследованных работников кемеровских ТЭС наблюдали повышенную ($p < 0,000001$) частоту клеток на стадии апоптоза (1,4% против 0,4%), пониженные ($p < 0,000001$) значения двухъядерных лимфоцитов на стадии митоза (0,8% против 2,4%) и сниженный индекс репликации (1,8% против 2%), по сравнению с не работающими на производстве донорами. Известно, что физические и химические мутагены, гипоксия и другие факторы клеточного стресса инициируют экспрессию белка p53, который, в свою очередь, ориентирует клетку на различные исходы в зависимости от фазы клеточного цикла, типа поражения и степени повреждения. Основными альтернативами при наличии генотоксических поражений являются толерантность к повреждению ДНК, генерация аномальной последовательности оснований, приводящие к выживанию клеток, остановка клеточного цикла для обеспечения репарации ДНК или апоптоз/некроз. Генотоксические события, которые способны вызвать апоптоз, могут включать аддукты ДНК, разрывы ДНК и/или белковые аддукты, которые накапливаются во время воздействия, и/или генотоксины, присутствующие в донорской сыворотке и, следовательно, в культуральной среде. Апоптоз может быть вызван специфическими стимулами, такими как негативные факторы, повреждающие ДНК, облучение, отсутствие рецепторов роста и другие [20].

Роль влияния однонуклеотидных полиморфизмов на частоту повреждений ДНК широко исследуется [21]. SNP изучаемых генов позволяет определить индивидуальную генетическую чувствительность к факторам окружающей среды. Для изучения влияния генетической изменчивости на частоты цитогенетических нарушений были изучены полиморфные варианты генов системы репарации ДНК *XRCC1 rs25489*, *XRCC3 rs861539*, *XRCC4 rs2075686*, *XRCC4 rs2075685*. У жителей Кемеровской области наблюдается сходство частот аллелей и генотипов с распределениями, характерными для европеоидов (по данным www.ncbi.nlm.nih.gov/SNP и www.ensembl.org). Распределение частот генотипов исследуемых групп соответствует равновесию Харди–Вайнберга. Частоты аллелей в исследуемых группах представлены в табл. 2. Цитогенетические показатели микроядерного теста в зависимости от индивидуальных генотипов представлены в табл. 3.

У работников ТЭС выявлены статистически значимые различия ($p < 0,05$) частоты встречаемости клеток с протрузиями у обладателей минорного генотипа *AA* по сравнению с мажорным и гетерозиготным вариантами гена *XRCC1 rs25489*. Ранее при обследовании рабочих, подвергающихся воздействию бензола, было отмечено значительное повышение частоты цитогенетических нарушений в производственной группе. Ассоциаций частоты микроядер с полиморфизмом гена *XRCC1* в производственной группе выявлено не было [22]. В то же время VS Dhillon с коллегами [23], обобщив результаты 37 публикаций, продемонстрировал потенциальную значимость ассоциаций вариантов генов *XRCC1 rs25489*, *ERCC2 (Lys751Gln)*, *CYP2E1 (c1/c2)*, *MTR (A2756G)* с формированием микроядер. Ген *XRCC1* локализован

Таблица 2 [Table 2]

Частоты аллелей в исследуемых группах
[Allele frequencies in the studied groups]

Ген [Gene]	Аллель [Allele]	Частота у работников ТЭС [Frequency among thermal power plant workers]	Частота у неработающих жителей Кузбасса [Frequency among non-working residents of Kuzbass]	χ^2	Уровень значимости (p) [significance level (p -value)]
<i>XRCC1</i> <i>rs25489</i>	G	0,8964	0,7626	13,99	<0,001
	A	0,1036	0,2374		
<i>XRCC3</i> <i>rs861539</i>	C	0,6509	0,7169	1,8	<0,216
	T	0,3419	0,2831		
<i>XRCC4</i> <i>rs2075686</i>	C	0,8716	0,8699	0,01	<0,957
	T	0,1284	0,1301		
<i>XRCC4</i> <i>rs2075685</i>	G	0,6779	0,7169	0,89	<0,403
	T	0,3221	0,2831		

в области хромосомы 19q13.2 и известен как молекулярный каркасный белок, участвующий в репарации одноцепочечных разрывов ДНК [24]. Накопленные данные показывают, что мутации в данном гене тесно связаны с различными патологиями, включая неврологические [25] и онкологические заболевания [26]. Кроме того, проводятся исследования по регуляции экспрессии белка XRCC1 и влиянию этого на результаты химиотерапии. Снижение экспрессии XRCC1 из-за гефитиниба, селективного ингибитора рецептора тирозинкиназы эпидермального фактора роста и ингибитора Hsp90 привело к синергетическим цитотоксическим эффектам на опухолевые клетки немелкоклеточного рака легкого [27].

В группе рабочих ТЭС отмечена повышенная ($p < 0,05$) частота микроядер у обладателей минорного генотипа *TT* гена *XRCC3 rs861539*. Ген *XRCC3* локализован в области хромосомы 14q32.3. Белок XRCC3 функционирует в процессах репарации разрывов ДНК путем гомологичной рекомбинации [28]. Он непосредственно взаимодействует с белком Rad51 и стабилизирует его [29]. Кроме того, было показано, что адекватная работа XRCC3 способствует стабильности хромосом [29] и их правильной сегрегации в клетках млекопитающих [30].

Повышенная частота микроядер и мостов была отмечена в данном исследовании также у рабочих ТЭС с минорными генотипами *TT* гена *XRCC4 rs2075686*. Также установлена повышенная ($p < 0,04$) частота встречаемости клеток с микроядрами, мостами и протрузиями у работников, обладающих минорным вариантом *TT* гена *XRCC4 rs2075685*. При этом в контроле ассоциаций выявлено не было ($p > 0,05$). Известно, что *XRCC4* не обладает ферментативной активностью, но может функционировать как каркасный белок, способствуя привлечению других молекул репарации

Таблица 3 [Table 3]

**Цитогенетические показатели микроядерного теста у рабочих
теплоэлектростанций с различными вариантами изученных генов**
[Cytogenetic parameters of the micronucleus test in workers of thermal power plants
with different variants of the studied genes]

Цитогенети- ческие пока- затели [Cytogenetic parameters]	Ме- диана [Median]	Квартили (25–75%) [Quartiles (25-75)]	Ме- диана [Median]	Квартили (25–75%) [Quartiles (25-75)]	Ме- диана [Median]	Квартили (25–75%) [Quartiles (25-75)]
<i>XRCCI rs25489</i>						
Генотип [Genotype]	GG (<i>n</i> = 181)		GA (<i>n</i> = 36)		AA (<i>n</i> = 5)	
Микроядра [Micronucleus]	19	13–30	23	14–34	42***	24–47
Мосты [Bridges]	13	7–25	15	7–25	15	9–25
Протрузии [Nuclear buds]	23	15–32	21	11–27	19	18–37
<i>XRCC3 rs861539</i>						
Генотип [Genotype]	CC (<i>n</i> = 94)		CT (<i>n</i> = 101)		TT (<i>n</i> = 27)	
Микроядра [Micronucleus]	19	13–30	19	13–32	38**	21–40
Мосты [Bridges]	15	6–27	14	9–23	8	5–21
Протрузии [Nuclear buds]	23	16–34	22	15–30	21	11–32
<i>XRCC4 rs2075686</i>						
Генотип [Genotype]	CC (<i>n</i> = 171)		CT (<i>n</i> = 45)		TT (<i>n</i> = 6)	
Микроядра [Micronucleus]	9*	7–11	15*	10–30	19***	15–45
Мосты [Bridges]	14	7–20	14	9–16	20***	15–30
Протрузии [Nuclear buds]	22	14–34	21	15–31	22	19–30
<i>XRCC4 rs2075685</i>						
Генотип [Genotype]	GG (<i>n</i> = 101)		GT (<i>n</i> = 99)		TT (<i>n</i> = 22)	
Микроядра [Micronucleus]	20	13–35	17	12–33	41***	21–50
Мосты [Bridges]	14	7–20	14	7–20	18**	10–25
Протрузии [Nuclear buds]	21	14–31	22	14–32	30**	21–56

Примечание. Статистически значимо различаются: * от мажорного и минорного генотипов $p < 0,04$; ** от мажорного и гетерозиготного генотипов $p < 0,04$; *** от мажорного и гетерозиготного генотипов $p < 0,01$; *n* – количество исследуемых.

[Note. Statistically significant differences: * from major and minor genotypes $p < 0.05$; ** from major and heterozygous genotypes $p < 0.05$; *** from major and heterozygous genotypes $p < 0.01$; *n* - number of additives].

двухнитевых разрывов путем негомологичного воссоединения концов. *XRCC4* представляет собой ядерный фосфопротеин, который связывает *LIG4* с комплексом ДНК–ПК, стабилизирует и стимулирует активность *LIG4* [31]. Комплекс *XRCC4*–*LIG4* может взаимодействовать с белками Ku, PNK, APLF, XLF и ДНК [32]. В исследованиях, проведенных ранее в группе шахтеров угольных шахт Кузбасса, изучалась значимость унаследованных вариантов гена *XRCC4* в формировании микроядер [33]. В работе М.У. Sinitsky с соавторами [33] продемонстрирован эффект комбинации генотипов: *XRCC4* (*rs6869366*) $\times$ *hOGG1* (*rs1052133*) $\times$ *ADPRT* (*rs1136410*), ассоциированный с высоким генотоксическим риском у угольщиков.

В работе не выявлено статистически значимых ассоциаций рассматриваемых вариантов генов с параметрами микроядерного теста в группе контроля, а также в рабочей группе с частотами клеток на стадии митоза, апоптоза и пролиферативными параметрами ($p > 0,05$).

Индивидуальная реакция на стресс может варьировать в зависимости от различных условий, таких как функционирование конкретной комбинации генов, скорость поглощения, метаболизма и элиминации генотоксических агентов, эффективность процессов репарации ДНК, контроль клеточного цикла и гибели клеток (апоптоз/некроз) и иммунный ответ [34].

Анализ работ, посвященных поиску ассоциаций между вариантами генов *XRCC1* *rs25489*, *XRCC3* *rs861539* и *XRCC4* (*rs2075686* и *rs2075685*) в группах лиц, подвергавшихся генотоксическому воздействию в производственных условиях, показывает неоднозначные результаты. В работе Milić M. с коллегами [35] была изучена связь между повреждением ДНК, выраженным в виде микроядер, протрузий и нуклеоплазматических мостов, и полиморфизмом генов *XRCC1* и *XRCC3* у 77 работников больниц, хронически подвергающихся воздействию низких доз ИК-излучения, и 70 работников административно-управленческого аппарата. Значительно более высокая частота микроядер была обнаружена в группе, подвергшейся воздействию низких доз ИК-излучения ($1,6 \pm 1\%$ против $1,2 \pm 0,9\%$, $p < 0,003$). Значимых ассоциаций частот микроядер с генетической изменчивостью у облученных лиц и контроля обнаружено не было. В исследовании Q. Wang с коллегами [36] группа из 317 рабочих, профессионально подвергшихся воздействию винилхлорида, и 166 неэкспонированных индивидов в провинции Шаньдун (Северный Китай) были обследованы с использованием микроядерного теста в лимфоцитах с блокировкой цитокинеза. Экспонированная группа показала более высокую частоту микроядер, чем группа сравнения ($p < 0,01$). У работников, подвергшихся воздействию винилхлорида и обладавших минорными вариантами *XRCC1* (*–77CT*, *Arg194Trp*, *Arg280His*, *Arg399Gln*), были зарегистрированы значительно более высокие частоты микроядер, по сравнению с гомозиготами дикого типа. Mateuca R.A. с коллегами был проведен [37] анализ пяти биомониторинговых исследований для оценки влияния полиморфизма генов *XRCC1* *rs25487* и *XRCC3* *rs861539* на частоту микроядер в лимфоцитах периферической крови человека. В каждом исследовании рассматривался определенный тип профессионального воздействия (стирол, ионизирующее излу-

чение, кобальт, сварочные пары и неорганические соединения арсенита), потенциально способного вызвать повреждение цепи ДНК и, следовательно, формирование микроядер. Влияние генотипа, возраста, воздействия генотоксических агентов и курения на индукцию микроядер было определено с помощью регрессионного анализа на выборках из 171 рабочего и 132 индивидов мужского пола, не подвергавшихся воздействию. Анализ взаимодействий генотип–генотип и генотип–воздействие линейными комбинациями параметров показал значительно более высокие частоты микроядер в следующих подмножествах: 1) работники, подвергшиеся профессиональному воздействию, несущие либо генотипы *TT*, либо *CT XRCC3 rs861539* по сравнению с *CC* ($p < 0,001$) и 2) носители генотипа *CC XRCC3 rs861539* по сравнению с носителями *TT XRCC3 rs861539*, если они не подвергаются воздействию.

Заключение

В работе продемонстрирован феномен значительного повышения частоты микроядер, мостов и протрузий у работников угольной теплоэлектростанции, что свидетельствует о генотоксической опасности условий труда.

Результаты, полученные в данном исследовании, свидетельствуют о значимом вкладе не только средовых, но и генетических факторов в формирование цитогенетических эффектов у рабочих угольных теплоэлектростанций. Выявлены ассоциации минорного варианта гена *XRCC1 rs25489* с повышенной частотой клеток с микроядрами, минорного варианта гена *XRCC3 rs861539* с повышенной частотой микроядер, гетерозиготного генотипа *XRCC4 rs2075686* с повышенной частотой микроядер, минорного варианта гена *XRCC4 C1475T* с повышенными частотами клеток с микроядрами и нуклеоплазменными мостами, минорного генотипа гена *XRCC4 rs2075685* с увеличенной частотой лимфоцитов с микроядрами, нуклеоплазменными мостами и протрузиями при воздействии на организм факторов производственной среды. Таким образом, обладатели данных генотипических вариантов должны стать приоритетной группой при проведении профилактических мероприятий.

Понимание сложности взаимосвязей на геномном, эпигеномном, протеомном, метаболомном уровнях требует дальнейших масштабных исследований с использованием дополнительных биомаркеров чувствительности и эффекта действия факторов производственной среды на организм трудоспособного населения.

Список источников

1. León-Mejía G., Rueda R.A., Pérez J., Miranda-Guevara A., Moreno O.F., Quintana-Sosa M., Trindade C., De Moya Y.S., Ruiz-Benitez M., Lemus Y.B., Rodríguez I.L., Oliveros-Ortiz L., Acosta-Hoyos A., Pacheco-Londoño L.C., Muñoz A., Hernández-Rivera S.P., Olivero-Verbel J., da Silva J., Henriques J.A.P. Analysis of the cytotoxic and genotoxic effects in a population chronically exposed to coal mining residues // Envi-

- ronmental Science and Pollution Research International. 2023. № 30 (18). PP. 54095–54105. doi: 10.1007/s11356-023-26136-9
2. Pavanello S., Dioni L., Hoxha M., Fedeli U., Mielzynska-Svach D., Baccarelli A.A. Mitochondrial DNA copy number and exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons // *Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention*. 2013. № 22 (10). PP. 1722–1729. doi: 10.1158/1055-9965.EPI-13-0118
 3. Kato T.A. Cytokinesis blocked micronuclei aberration analysis // *Methods in Molecular Biology*. 2023. Vol. 2519. PP. 83–91. doi: 10.1007/978-1-0716-2433-3_9
 4. Hall E.J., Giaccia A.J. Radiobiology for the radiologist. Philadelphia, PA, USA : Lippincott Williams & Wilkins, 2012. 576 p.
 5. Su C., Haskins A.H., Kato T.A. Micronuclei formation analysis after ionizing radiation // *Methods in Molecular Biology*. 2019. Vol. 1984. PP. 23–29. doi: 10.1007/978-1-4939-9432-8_3
 6. Fenech M. Cytokinesis-block micronucleus cytome assay evolution into a more comprehensive method to measure chromosomal instability // *Genes*. 2020. № 11 (10). 1203. doi: 10.3390/genes11101203
 7. Федосеев В.И., Степанов Д.Д., Минина В.И. Изучение генотоксических эффектов действия производственной среды на рабочих угольной теплоэлектростанции с помощью микроядерного теста на лимфоцитах крови // *Экологическая генетика*. 2021. № 19 (1). С. 77–88. doi: 10.17816/ecogen42363
 8. Celik M., Donbak L., Unal F., Yüzbaşıoğlu D., Aksoy H., Yilmaz S. Cytogenetic damage in workers from a coal-fired power plant // *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*. 2007. № 627 (2). PP. 158–163. doi: 10.1016/j.mrgentox.2006.11.003
 9. Stefanou D.T., Kouvela M., Stellas D., Voutetakis K., Papadodima O., Syrigos K., Souliotis V.L. Oxidative stress and deregulated DNA damage response network in lung cancer patients // *Biomedicines*. 2022. № 10 (6). 1248. doi: 10.3390/biomedicines10061248
 10. Minina V.I., Bakanova M.L., Soboleva O.A., Ryzhkova A.V., Titov R.A., Savchenko Y.A., Sinitsky M.Y., Voronina E.N., Titov V.A., Glushkov A.N. Polymorphisms in DNA repair genes in lung cancer patients living in a coal-mining region // *European Journal of Cancer Prevention*. 2019. № 28 (6). PP. 522–528. doi: 10.1097/CEJ.0000000000000504
 11. Sinitsky M.Y., Minina V.I., Asanov M.A., Yuzhalin A.E., Ponasenko A.V., Druzhinin V.G. Association of DNA repair gene polymorphisms with genotoxic stress in underground coal miners // *Mutagenesis*. 2017. № 32 (5). PP. 501–509. doi: 10.1093/mutage/gex018
 12. Fenech M. The cytokinesis-block micronucleus technique: A detailed description of the method and its application to genotoxicity studies in human populations // *Environmental Health Perspectives Supplements*. 1993. № 285 (1). PP. 35–44. doi: 10.1289/ehp.93101s3101
 13. Ингель Ф.И. Перспективы использования микроядерного теста на лимфоцитах крови человека, культивируемых в условиях цитокинетического блока. Часть 2. Факторы среды и индивидуальные особенности в системе нестабильности генома человека. Дополнительные возможности теста. Методика проведения экспериментов и цитогенетического анализа // *Экологическая генетика*. 2006. Т. 4, № 4. С. 38–54.
 14. Fenech M., Chang W.P., Kirsch-Volders M., Holland N., Bonassi S., Zeiger E. HUMN project: Detailed description of the scoring criteria for the cytokinesis-block micronucleus assay using isolated human lymphocyte cultures // *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*. 2003. № 534 (1–2). PP. 65–75. doi: 10.1016/S1383-5718(02)00249-8
 15. Titenko-Holland N., Jacob R.A., Shang N., Balaraman A., Smith M.T. Micronuclei in lymphocytes and exfoliated buccal cells of postmenopausal women with dietary changes

- in folate // *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*. 1998. № 417 (2–3). PP. 101–114. doi: 10.1016/S1383-5718(98)00104-1
16. Sinitsky M.Y., Minina V.I., Gafarov N.I., Asanov M.A., Larionov A.V., Ponasenko A.V., Volobaev V.P., Druzhinin V.G. Assessment of DNA damage in underground coal miners using the cytokinesis-block micronucleus assay in peripheral blood lymphocytes // *Mutagenesis*. 2016. № 31 (6). PP. 669–675. doi: 10.1093/mutage/gew038
 17. Celik M. Cytogenic damage in workers from a coal-fired power plant // *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*. 2007. № 627 (2). PP. 158–163. doi: 10.1016/j.mrgentox.2006.11.003
 18. Rohr P., Kvitko K., da Silva F.R., Menezes A.P., Porto C., Sarmento M., Decker N., Reyes J.M., Allgayer Mda C., Furtado T.C., Salvador M., Branco C., da Silva J. Genetic and oxidative damage of peripheral blood lymphocytes in workers with occupational exposure to coal // *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*. 2013. № 758 (1–2). PP. 23–31. doi: 10.1016/j.mrgentox.2013.08.006
 19. Heimers A. Chromosome aberration analysis in Concorde pilots // *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*. 2000. № 467 (2). PP. 169–176. doi: 10.1016/S1383-5718(00)00032-2
 20. Fenech M. Cytokinesis-block micronucleus assay evolves into a «cytome» assay of chromosomal instability, mitotic dysfunction and cell death // *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*. 2006. № 600 (1–2). PP. 58–66. doi: 10.1016/j.mrfmmm.2006.05.028
 21. Bonassi S., Ugolini D., Kirsch-Volders M., Strömberg U., Vermeulen R., Tucker J.D. Human population studies with cytogenetic biomarkers: Review of the literature and future perspectives // *Environmental and Molecular Mutagenesis*. 2005. № 45 (2–3). PP. 258–270. doi: 10.1002/em.20115
 22. Zhang J., Lü J.P., Zhang C., Zhou L.F., Ye Y.J., Sun P., Cheng Z.X., Xia Z.L. Polymorphism of XRCC1 and chromosome damage in workers occupationally exposed to benzene // *Zhonghua Lao Dong Wei Sheng Zhi Ye Bing Za Zhi*. 2012. № 30 (6). PP. 423–427.
 23. Dhillon V.S., Thomas P., Iarmarcovai G., Kirsch-Volders M., Bonassi S., Fenech M. Genetic polymorphisms of genes involved in DNA repair and metabolism influence micronucleus frequencies in human peripheral blood lymphocytes // *Mutagenesis*. 2011. № 26 (1). PP. 33–42. doi: 10.1093/mutage/geq076
 24. Bonassi S., Znaor A., Ceppi M., Lando C., Chang W.P., Holland N., Kirsch-Volders M., Zeiger E., Ban S., Barale R., Bigatti M.P., Bolognesi C., Cebulska-Wasilewska A., Fabianova E., Fucic A., Hagmar L., Joksic G., Martelli A., Migliore L., Mirkova E., Scarfi M.R., Zijno A., Norppa H., Fenech M. An increased micronucleus frequency in peripheral blood lymphocytes predicts the risk of cancer in humans // *Carcinogenesis*. 2007. № 28 (3). PP. 625–631. doi: 10.1093/carcin/bgl177
 25. O'Connor E., Vandrovcsa J., Bugiardini E., Chelban V., Manole A., Davagnanam I., Wiethoff S., Pittman A., Lynch D.S., Efthymiou S., Marino S., Manzur A.Y., Roberts M., Hanna M.G., Houlden H., Matthews E., Wood N.W. Mutations in XRCC1 cause cerebellar ataxia and peripheral neuropathy // *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*. 2018. № 89 (11). PP. 1230–1232. doi: 10.1136/jnnp-2017-317581
 26. Zhang N., Ouyang Y., Chang J., Liu P., Tian X., Yu J. Pharmacogenetic association between XRCC1 polymorphisms and response to platinum-based chemotherapy in Asian patients with NSCLC: A meta-analysis // *BioMed Research International*. 2020. 3520764. doi: 10.1155/2020/3520764
 27. Tung C.L., Jian Y.J., Syu J.J., Wang T.J., Chang P.Y., Chen C.Y., Jian Y.T., Lin Y.W. Down-regulation of ERK1/2 and AKT-mediated X-ray repair cross-complement group 1 protein (XRCC1) expression by Hsp90 inhibition enhances the gefitinib-induced cytotoxicity in human lung cancer cells // *Experimental Cell Research*. 2015. № 334 (1). PP. 126–135. doi: 10.1016/j.yexcr.2015.01.016
 28. O'Driscoll M., Jeggo P.A. The role of double-strand break repair—insights from human genetics // *Nature Reviews Genetic*. 2006. № 7 (1). PP. 45–54. doi: 10.1038/nrg1746

29. Liu N., Lamerdin J.E., Tebbs R.S., Schild D., Tucker J.D., Shen M.R., Brookman K.W., Siciliano M.J., Walter C.A., Fan W., Narayana L.S., Zhou Z.Q., Adamson A.W., Sorensen K.J., Chen D.J., Jones N.J., Thompson L.H. XRCC2 and XRCC3, new human Rad51-family members, promote chromosome stability and protect against DNA cross-links and other damages // *Molecular Cell*. 1998. № 1 (6). PP. 783–793. doi: 10.1016/s1097-2765(00)80078-7
30. Griffin C.S. Aneuploidy, centrosome activity and chromosome instability in cells deficient in homologous recombination repair // *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*. 2002. № 504 (1–2). PP. 149–155. doi: 10.1016/S0027-5107(02)00088-X
31. Chistiakov D.A. Ligase IV syndrome // *Advances in Experimental Medicine and Biology*. 2010. Vol. 685. PP. 175–185. doi: 10.1007/978-1-4419-6448-9_16
32. Bertolini L.R., Bertolini M., Anderson G.B., Maga E.A., Madden K.R., Murray J.D. Transient depletion of Ku70 and XRCC4 by RNAi as a means to manipulate the non-homologous end-joining pathway // *Journal of Biotechnology*. 2007. № 128 (2). PP. 246–257. doi: 10.1016/j.jbiotec.2006.10.003
33. Sinitsky M.Y., Minina V.I., Asanov M.A., Yuzhalin A.E., Ponasenko A.V., Druzhinin V.G. Association of DNA repair gene polymorphisms with genotoxic stress in underground coal miners // *Mutagenesis*. 2017. № 32 (5). PP. 501–509. doi: 10.1093/mutage/gex018
34. Goode E.L., Ulrich C.M., Potter J.D. Polymorphisms in DNA repair genes and associations with cancer risk // *Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention*. 2002. № 11 (12). PP. 1513–1530.
35. Milić M., Rozgaj R., Kašuba V., Jazbec A.M., Starčević B., Lyzbicki B., Ravegnini G., Zenesini C., Musti M., Hrelia P., Angelini S. Polymorphisms in DNA repair genes: Link with biomarkers of the CBMN cytome assay in hospital workers chronically exposed to low doses of ionising radiation // *Archives of Industrial Hygiene and Toxicology*. 2015. № 66 (2). PP. 109–120. doi: 10.1515/aiht-2015-66-2655
36. Wang Q., Tan H.S., Zhang F., Sun Y., Feng N.N., Zhou L.F., Ye Y.J., Zhu Y.L., Li Y.L., Brandt-Rauf P.W., Shao H., Xia Z.L. Polymorphisms in BER and NER pathway genes: Effects on micronucleus frequencies among vinyl chloride-exposed workers in Northern China // *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*. 2013. № 754 (1–2). PP. 7–14. doi: 10.1016/j.mrgentox.2013.03.007
37. Mateuca R.A., Roelants M., Iarmarcovai G., Aka P.V., Godderis L., Tremp A., Bonassi S., Fenech M., Bergé-Lefranc J.L., Kirsch-Volders M. *hOGG1*(326), *XRCC1*(399) and *XRCC3*(241) polymorphisms influence micronucleus frequencies in human lymphocytes in vivo // *Mutagenesis*. 2008. № 23 (1). PP. 35–41. doi: 10.1093/mutage/gem040

References

1. León-Mejía G, Rueda RA, Pérez J, Miranda-Guevara A, Moreno OF, Quintana-Sosa M, Trindade C, De Moya YS, Ruiz-Benitez M, Lemus YB, Rodríguez IL, Oliveros-Ortiz L, Acosta-Hoyos A, Pacheco-Londoño LC, Muñoz A, Hernández-Rivera SP, Olivero-Verbel J, da Silva J, Henriques JAP. Analysis of the cytotoxic and genotoxic effects in a population chronically exposed to coal mining residues. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int*. 2023;30(18):54095-54105. doi: 10.1007/s11356-023-26136-9
2. Pavanello S, Dioni L, Hoxha M, Fedeli U, Mielzynska-Svach D, Baccarelli AA. Mitochondrial DNA copy number and exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons. *Cancer Epidemiol. Biomarkers Prev*. 2013;22(10):1722-1729. doi: 10.1158/1055-9965.EPI-13-0118
3. Kato TA. Cytokinesis blocked micronuclei aberration analysis. *Methods in Molecular Biology*. 2023;2519:83-91. doi: 10.1007/978-1-0716-2433-3_9
4. *Radiobiology for the Radiologist*. Hall EJ, Giaccia AJ, editors. Philadelphia, PA, USA: Lippincott Williams & Wilkins; 2012. 576 p.

5. Su C, Haskins AH, Kato TA. Micronuclei formation analysis after ionizing radiation. *Methods in Molecular Biology*. 2019;1984:23-29. doi: 10.1007/978-1-4939-9432-8_3
6. Fenech M. Cytokinesis-block micronucleus cytome assay evolution into a more comprehensive method to measure chromosomal instability. *Genes*. 2020;11(10):1203. doi: 10.3390/genes11101203
7. Fedoseev VI, Stepanov DD, Minina VI. Examination of the working environment genotoxic effects on the workers of a coal-fired power plant using the micronucleus test in blood lymphocytes. *Ecological Genetics*. 2021;19(1):77-88. In Russian, English summary. doi: 10.17816/ecogen42363
8. Celik M, Donbak L, Unal F, Yüzbaşıoğlu D, Aksoy H, Yılmaz S. Cytogenetic damage in workers from a coal-fired power plant. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*. 2007;627(2):158-163. doi: 10.1016/j.mrgentox.2006.11.003
9. Stefanou DT, Kouvela M, Stellas D, Voutetakis K, Papadodima O, Syrigos K, Souliotis VL. Oxidative stress and deregulated DNA damage response network in lung cancer patients. *Biomedicines*. 2022;10(6):1248. doi: 10.3390/biomedicines10061248
10. Minina VI, Bakanova ML, Soboleva OA, Ryzhkova AV, Titov RA, Savchenko YA, Sinitsky MY, Voronina EN, Titov VA, Glushkov AN. Polymorphisms in DNA repair genes in lung cancer patients living in a coal-mining region. *Eur. J. Cancer Prev*. 2019;28(6):522-528. doi: 10.1097/CEJ.0000000000000504
11. Sinitsky MY, Minina VI, Asanov MA, Yuzhalin AE, Ponasenko AV, Druzhinin VG. Association of DNA repair gene polymorphisms with genotoxic stress in underground coal miners. *Mutagenesis*. 2017;32(5):501-509. doi: 10.1093/mutage/gex018
12. Fenech M. The cytokinesis-block micronucleus technique: A detailed description of the method and its application to genotoxicity studies in human populations. *Environmental Health Perspectives Supplements*. 1993;285(1):35-44. doi: 10.1289/ehp.93101s3101
13. Ingel FI. Prospects for using a micronucleus test on human blood lymphocytes cultured under cytokinetic block conditions. Part 2. Environmental factors and individual features in system of evaluation of human genome instability. Additional capability of the test. The technique for cytogenetic analysis. *Ecological Genetics*. 2006;4(4):38-54. In Russian, English summary. doi: 10.17816/ecogen4438-54
14. Fenech M, Chang WP, Kirsch-Volders M, Holland N, Bonassi S, Zeiger E. HUMN project: Detailed description of the scoring criteria for the cytokinesis-block micronucleus assay using isolated human lymphocyte cultures. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*. 2003;534(1-2):65-75. doi: 10.1016/S1383-5718(02)00249-8
15. Titenko-Holland N, Jacob RA, Shang N, Balaraman A, Smith MT. Micronuclei in lymphocytes and exfoliated buccal cells of postmenopausal women with dietary changes in folate. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*. 1998;417(2-3):101-114. doi: 10.1016/S1383-5718(98)00104-1
16. Sinitsky MY, Minina VI, Gafarov NI, Asanov MA, Larionov AV, Ponasenko AV, Volo-baev VP, Druzhinin VG. Assessment of DNA damage in underground coal miners using the cytokinesis-block micronucleus assay in peripheral blood lymphocytes. *Mutagenesis*. 2016;31(6):669-675. doi: 10.1093/mutage/gew038
17. Celik M. Cytogenic damage in workers from a coal-fired power plant. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*. 2007;627(2):158-163. doi: 10.1016/j.mrgentox.2006.11.003
18. Rohr P, Kvitko K, da Silva FR, Menezes AP, Porto C, Sarmiento M, Decker N, Reyes JM, Allgayer Mda C, Furtado TC, Salvador M, Branco C, da Silva J. Genetic and oxidative damage of peripheral blood lymphocytes in workers with occupational exposure to coal. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*. 2013;758(1-2):23-31. doi: 10.1016/j.mrgentox.2013.08.006
19. Heimers A. Chromosome aberration analysis in Concorde pilots. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*. 2000;467(2):169-176. doi: 10.1016/S1383-5718(00)00032-2

20. Fenech M. Cytokinesis-block micronucleus assay evolves into a “cytome” assay of chromosomal instability, mitotic dysfunction and cell death. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*. 2006;600(1-2):58-66. doi: 10.1016/j.mrfmmm.2006.05.028
21. Bonassi S, Ugolini D, Kirsch-Volders M, Strömberg U, Vermeulen R, Tucker JD. Human population studies with cytogenetic biomarkers: Review of the literature and future perspectives. *Environmental and Molecular Mutagenesis*. 2005;45(2-3):258-270. doi: 10.1002/em.20115
22. Zhang J, Lü JP, Zhang C, Zhou LF, Ye YJ, Sun P, Cheng ZX, Xia ZL. Polymorphism of *XRCC1* and chromosome damage in workers occupationally exposed to benzene. *Zhong-hua Lao Dong Wei Sheng Zhi Ye Bing Za Zhi*. 2012;30(6):423-427. In Chinese
23. Dhillon VS, Thomas P, Iarmarcovai G, Kirsch-Volders M, Bonassi S, Fenech M. Genetic polymorphisms of genes involved in DNA repair and metabolism influence micronucleus frequencies in human peripheral blood lymphocytes. *Mutagenesis*. 2011;26(1):33-42. doi: 10.1093/mutage/geq076
24. Bonassi S, Znaor A, Ceppi M, Lando C, Chang WP, Holland N, Kirsch-Volders M, Zeiger E, Ban S, Barale R, Bigatti MP, Bolognesi C, Cebulska-Wasilewska A, Fabianova E, Fucic A, Hagmar L, Joksic G, Martelli A, Migliore L, Mirkova E, Scarfi MR, Zijno A, Norppa H, Fenech M. An increased micronucleus frequency in peripheral blood lymphocytes predicts the risk of cancer in humans. *Carcinogenesis*. 2007;28(3):625-631. doi: 10.1093/carcin/bgl177
25. O'Connor E, Vandrovcova J, Bugiardini E, Chelban V, Manole A, Davagnanam I, Wietthoff S, Pittman A, Lynch DS, Efthymiou S, Marino S, Manzur AY, Roberts M, Hanna MG, Houlden H, Matthews E, Wood NW. Mutations in *XRCC1* cause cerebellar ataxia and peripheral neuropathy. *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry*. 2018;89(11):1230-1232. doi: 10.1136/jnnp-2017-317581
26. Zhang N, Ouyang Y, Chang J, Liu P, Tian X, Yu J. Pharmacogenetic association between *XRCC1* polymorphisms and response to platinum-based chemotherapy in Asian patients with NSCLC: A meta-analysis. *BioMed Research International*. 2020;3520764. doi: 10.1155/2020/3520764
27. Tung CL, Jian YJ, Syu JJ, Wang TJ, Chang PY, Chen CY, Jian YT, Lin YW. Down-regulation of ERK1/2 and AKT-mediated X-ray repair cross-complement group 1 protein (XRCC1) expression by Hsp90 inhibition enhances the gefitinib-induced cytotoxicity in human lung cancer cells. *Experimental Cell Research*. 2015;334(1):126-135. doi: 10.1016/j.yexcr.2015.01.016
28. O'Driscoll M, Jeggo PA. The role of double-strand break repair-insights from human genetics. *Nature Reviews Genetics*. 2006;7(1):45-54. doi: 10.1038/nrg1746
29. Liu N, Lamerdin JE, Tebbs RS, Schild D, Tucker JD, Shen MR, Brookman KW, Siciliano MJ, Walter CA, Fan W, Narayana LS, Zhou ZQ, Adamson AW, Sorensen KJ, Chen DJ, Jones NJ, Thompson LH. *XRCC2* and *XRCC3*, new human Rad51-family members, promote chromosome stability and protect against DNA cross-links and other damages. *Molecular Cell*. 1998;1(6):783-793. doi: 10.1016/s1097-2765(00)80078-7
30. Griffin CS. Aneuploidy, centrosome activity and chromosome instability in cells deficient in homologous recombination repair. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*. 2002;504(1-2):149-155. doi: 10.1016/S0027-5107(02)00088-X
31. Chistiakov DA. Ligase IV syndrome. *Advances in Experimental Medicine and Biology*. 2010;685:175-185. doi: 10.1007/978-1-4419-6448-9_16
32. Bertolini LR, Bertolini M, Anderson GB, Maga EA, Madden KR, Murray JD. Transient depletion of Ku70 and *XRCC4* by RNAi as a means to manipulate the non-homologous end-joining pathway. *Journal of Biotechnology*. 2007;128(2):246-257. doi: 10.1016/j.jbiotec.2006.10.003

33. Sinitsky MY, Minina VI, Asanov MA, Yuzhalin AE, Ponasenko AV, Druzhinin VG. Association of DNA repair gene polymorphisms with genotoxic stress in underground coal miners. *Mutagenesis*. 2017;32(5):501-509. doi: 10.1093/mutage/gex018
34. Goode EL, Ulrich CM, Potter JD. Polymorphisms in DNA repair genes and associations with cancer risk. *Cancer Epidemiol. Biomarkers Prev*. 2002;11(12):1513-1530.
35. Milić M, Rozgaj R, Kašuba V, Jazbec AM, Starčević B, Lyzbicki B, Ravegnini G, Zenesini C, Musti M, Hrelia P, Angelini S. Polymorphisms in DNA repair genes: Link with biomarkers of the CBMN cytome assay in hospital workers chronically exposed to low doses of ionising radiation. *Arh. Hig. Rada Toksikol*. 2015;66(2):109-120. doi: 10.1515/aiht-2015-66-2655
36. Wang Q, Tan HS, Zhang F, Sun Y, Feng NN, Zhou LF, Ye YJ, Zhu YL, Li YL, Brandt-Rauf PW, Shao H, Xia ZL. Polymorphisms in BER and NER pathway genes: Effects on micronucleus frequencies among vinyl chloride-exposed workers in Northern China. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*. 2013;754(1-2):7-14. doi: 10.1016/j.mrgentox.2013.03.007
37. Mateuca RA, Roelants M, Iarmarcovai G, Aka PV, Godderis L, Tremp A, Bonassi S, Fenech M, Bergé-Lefranc JL, Kirsch-Volders M. *hOGG1*(326), *XRCC1*(399) and *XRCC3*(241) polymorphisms influence micronucleus frequencies in human lymphocytes in vivo. *Mutagenesis*. 2008;23(1):35-41. doi: 10.1093/mutage/gem040

Информация об авторах:

Марущак Анна Владимировна, старший инженер-технолог лаборатории цитогенетики, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН (Кемерово, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9560-7563>

E-mail: marushchak.av@mail.ru

Торгунакова Анастасия Владимировна, ведущий инженер-технолог лаборатории цитогенетики, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН; инженер кафедры генетики и фундаментальной медицины, Кемеровский государственный университет (Кемерово, Россия).

Титов Руслан Александрович, ведущий инженер-технолог лаборатории цитогенетики, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН; инженер кафедры генетики и фундаментальной медицины, Кемеровский государственный университет (Кемерово, Россия).

Соболева Ольга Александровна, ведущий инженер-технолог лаборатории цитогенетики, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН; инженер кафедры генетики и фундаментальной медицины, Кемеровский государственный университет (Кемерово, Россия).

Елисейкин Алексей Михайлович, ведущий инженер-технолог лаборатории цитогенетики, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН (Кемерово, Россия).

E-mail: elisejkinam@ihe.sbras.ru

Киселева Елена Александровна, д-р мед. наук, доцент, зав. кафедрой стоматологии общей практики, Кемеровский государственный университет (Кемерово, Россия).

Савченко Яна Александровна, канд. биол. наук, с.н.с. лаборатории цитогенетики, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН; доцент кафедры генетики и фундаментальной медицины, Кемеровский государственный университет (Кемерово, Россия).

Минина Варвара Ивановна, д-р мед. наук, в.н.с. лаборатории цитогенетики, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН; доцент, зав. кафедрой генетики и фундаментальной медицины, Кемеровский государственный университет (Кемерово, Россия).

E-mail: vminina@mail.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Anna V. Marushchak, process engineer of the Laboratory of Cytogenetics, Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of SB RAS (Kemerovo, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9560-7563>

E-mail: marushchak.av@mail.ru

Anastasia V. Torgunakova, lead. process engineer of the Laboratory of Cytogenetics, Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of SB RAS; engineer of the Department of Genetics and Fundamental Medicine, Kemerovo State University (Kemerovo, Russian Federation).

Ruslan A. Titov, lead. process engineer of the Laboratory of Cytogenetics, Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of SB RAS; engineer of the Department of Genetics and Fundamental Medicine, Kemerovo State University (Kemerovo, Russian Federation).

Olga A. Soboleva, lead. process engineer of the Laboratory of Cytogenetics, Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of SB RAS; engineer of the Department of Genetics and Fundamental Medicine, Kemerovo State University (Kemerovo, Russian Federation).

Aleksej M. Elisejkin, lead. process engineer of the Laboratory of Biotechnology, Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of SB RAS (Kemerovo, Russian Federation).

E-mail: elisejkinam@ihe.sbras.ru

Elena A. Kiseleva, Dr. Sci. (Med.), Assoc. Prof., Head of the Department of General Practice Dentistry, Kemerovo State University (Kemerovo, Russian Federation).

Yana A. Savchenko, Cand. Sci. (Biol.), senior researcher of the Laboratory of Cytogenetics, Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of SB RAS; Assoc. Prof. of the Department of Genetics and Fundamental Medicine, Kemerovo State University (Kemerovo, Russian Federation).

Varvara I. Minina, Dr. Sci. (Biol.), Leading Researcher of the Laboratory of Cytogenetics, The Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of SB RAS; Assoc. Prof., Head of the Department of Genetics and Fundamental Medicine, Kemerovo State University (Kemerovo, Russian Federation).

E-mail: vminina@mail.ru

The Authors declare no conflict of interest.

*Статья поступила в редакцию 15.08.2023;
одобрена после рецензирования 16.03.2024; принята к публикации 04.09.2025*

*The article was submitted 15.08.2023;
approved after reviewing 16.03.2024; accepted for publication 04.09.2025*

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Научная статья

УДК 598.278

doi: 10.17223/19988591/71/14

О первой находке золотистой шурки *Merops apiaster* Linnaeus, 1758 на гнездовании в Томской области (Западная Сибирь)

Игорь Геннадьевич Коробицын¹, Мария Тимуровна Милешкина²

^{1, 2} Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Томск, Россия

¹ <https://orcid.org/0000-0001-7709-3004>, rozenpom@mail.ru

² <https://orcid.org/0009-0008-0619-8413>, marymileschkina@gmail.com

Аннотация. Описан первый факт гнездования золотистой шурки *Merops apiaster* Linnaeus, 1758 в Томской области, в подзоне подтаежных лесов. Этот вид традиционно относится к степным, однако в последние годы в Западной Сибири прослеживается расширение его ареала к северу, как и у ряда других птиц с преимущественно южным распространением. Найденное гнездо располагалось одиночно, но в пределах смешанной колонии ласточек рода *Riparia*. Это примерно на 140 км севернее по широте от ближайших известных мест размножения золотистой шурки в Западной Сибири. Данный факт меняет статус вида в регионе с залетного на гнездящийся.

Ключевые слова: подтайга, авифауна, колонии, расширение ареала, потепление климата

Для цитирования: Коробицын И.Г., Милешкина М.Т. О первой находке золотистой шурки *Merops apiaster* Linnaeus, 1758 на гнездовании в Томской области // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2025. № 71. С. 237–242. doi: 10.17223/19988591/71/14

Original article

doi: 10.17223/19988591/71/14

The first finding of nesting of the European Bee-eater *Merops apiaster* Linnaeus, 1758 in the Tomsk Oblast (Western Siberia)

Igor G. Korobitsyn¹, Maria T. Mileschkina²

^{1, 2} National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

¹ <https://orcid.org/0000-0001-7709-3004>, rozenpom@mail.ru

² <https://orcid.org/0009-0008-0619-8413>, marymileschkina@gmail.com

Summary. In recent decades, a trend towards expansion of the range of steppe and forest-steppe bird species to the north has been observed in the Trans-Urals and Sibe-

ria. In this report we confirm a new fact of nesting of the steppe species, the European Bee-eater *Merops apiaster* Linnaeus, 1758 in the south of the Tomsk region - in the subtaiga zone. We found only one nest visited by bee-eaters (see Figs. 1 and 2 in the Supplement). It was located in a mixed colony of two species of sand martins of the genus *Riparia* - Sand Martin *Riparia riparia* and Pale Sand Martin *R. diluta*. On August 1, 2025, there were 2 half-fledged chicks in the nest and about 10 young birds were already flying. It is impossible to say whether these flying birds were chicks from only this nest or another one, since many sand martin nests were already empty. This find is the northernmost of those known in Western Siberia. The coordinates of the find are 56°19'22.63"N, 84°55'22.84"E - this is 140 km north of the known nesting sites in latitude. This changes its status from a vagrant species to a nesting one in the Tomsk Oblast and continues the trend of expanding the range of southern species to the north. One of the reasons for this may be global warming.

The article contains 1 Supplement, 9 References.

Keywords: subtaiga zone, avifauna, colonies, expansion of range, climate warming

For citation: Korobitsyn IG, Mileschkina MT. The first finding of nesting of the European Bee-eater *Merops apiaster* Linnaeus, 1758 in the Tomsk Oblast (Western Siberia). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2025;71:237-242. doi: 10.17223/19988591/71/14

Введение

В последние десятилетия в Зауралье и Сибири отмечается тенденция расширения ареала степных и лесостепных видов птиц к северу [1–3]. Также подтверждает эту тенденцию и участвовавшие случаи залетов в таежную зону «южных» видов [4]. Небезосновательно это связывают с климатическими изменениями [5]. Одним из таких степных видов птиц, гнездящихся в норах в обрывистых берегах и карьерах, является золотистая шурка *Merops apiaster* Linnaeus, 1758. За последние несколько лет этому виду в связи с продвижением мест его гнездования к северу посвящено несколько работ по Омской и Новосибирской областям и в целом по изменению ареала в Западной Сибири [6, 7]. Для Томской области этот вид известен в качестве залетного [8], хотя в последние годы факты залетов не регистрировались [4]. Однако в 2024 г. в районе Биостанции ТГУ «Коларово» С.И. Гашков и еще ряд орнитологов слышали голоса этих птиц со стороны р. Томи. В 2025 г. примерно в том же месте вновь слышали и видели самих птиц. Об этом сообщил в том числе московский орнитолог В.Г. Гриньков. Это могли быть как залетные, так и гнездящиеся птицы. Поэтому целью настоящей работы стало обследование возможных мест гнездования. В ходе осмотра колоний береговых ласточек поблизости от с. Коларово и с. Синий Утёс мы обнаружили нору золотистой шурки.

Материалы и методика

Обследование вероятных мест гнездования золотистой шурки после появления сообщений о ее встречах проведено в конце июля–начале августа 2025 г. в районе сел Кафтанчиково, Коларово и Синий Утёс, примерно

в 15 км южнее г. Томска. В этом месте расположены 2 смешанные колонии береговых *Riparia riparia* (Linnaeus, 1758) и бледных *R. diluta* (Sharpe et Wyatt, 1893) ласточек, которых мы регулярно осматривали 3 последних года в целях изучения сравнительной биологии этих колониально гнездящихся в норках птиц и проводили их массовое кольцевание. Колония «Напротив Утёса» расположена на обрывистом берегу р. Томи с координатами 56°19'22,63"N, 84°55'22,84"E, высота обрыва составляет 2–3 м, протяженность – около 550 м, число нор ласточек в последние годы варьировало от 1900 до 2700. Колония «Кафтанчиково» расположена в 3 км к северо-востоку от нее (56°20'17,69"N, 84°52'54,77"E). Протяженность – около 500 м, высота обрыва на разных участках – 2–3 м, общее число нор здесь в последние годы менялось от 500 до 700. В районе колонии «Напротив Утёса» в ходе отловов ласточек слышали голоса щурок, после чего в ходе наблюдений обнаружены сами птицы, а позже и посещаемая ими нора. Сделаны подтверждающие этот факт фотографии с помощью фотоаппарата Nikon D3500 и объектива AF-S Nikkor 200–500 мм, фотоловушка Filin 120 Pro Edition. С помощью видеоскопа ADA ZVE150 с гибким зондом в найденной норе сделаны фото- и видеокдры полуоперенных птенцов.

Результаты и обсуждение

На обрывистом берегу, где было найдено гнездо щурок, расположена многолетняя колония береговой и бледной ласточек. До 2024 г., когда щурки впервые были зарегистрированы по голосам нашими коллегами, их здесь не наблюдали. В 2025 г. при отловах ласточек в первой половине лета в правой части колонии ни голосов щурок, ни самих птиц мы не отмечали. В конце июля отловы были смещены в левую часть колонии, где наше внимание привлекли голоса, раздававшиеся с противоположного берега р. Томи, предположительно издаваемые щурками. Ширина реки в этом месте составляет около 250 м. Противоположный берег покрыт кустами ив, и разглядеть птиц не удалось. Важно добавить, что вдоль песчаного обрыва, в котором расположены гнезда ласточек, протянулся галечный пляж – место отдыха местных и городских жителей, присутствие которых является существенным фактором беспокойства. Щурки в день их обнаружения появились у обрыва вскоре после того, как отдыхающие покинули место пикника, устроенного вблизи их гнезда. Среди щурок были как взрослые, более яркие, так и молодые особи с зелеными спинами и крыльями. Всего мы насчитали 13 птиц. Некоторые из них залетали в норку (рис. 1 и 2 в Приложении). Она была одиночной, глубиной 140–150 см и располагалась на незанятом ласточками участке, ближайшие норы которых были удалены от нее примерно на 50 м в обе стороны. На момент осмотра норы с помощью видеоскопа 1 августа 2025 г. в ней находились как минимум 2 полуоперенных птенца. Учитывая, что насиживание у щурок начинается с откладки первого яйца, молодые летные птицы вполне могли вывести в этом же гнезде. Многие ласточки, включая молодых, к этому времени покинули гнезда, и часть их нор опустела. Гнездились ли среди ласточек в этом месте другие щурки, неизвестно. Судя по числу летающих щурок,

можно предположить гнездование еще одной пары. Наши наблюдения представляют значительный интерес, поскольку меняют представление о региональной авифауне – из категории залетных видов золотистая шурка переходит в категорию гнездящихся. От известных мест ее гнездования в Кемеровской области [9] наша находка удалена на 220 км к северо-западу, от мест гнездования в Новосибирской области [6] – на 160 км к северо-востоку. Расстояние от этих точек к северу до нового места гнездования по широте составляет около 140 км.

Заключение

Описанная находка подтверждает наметившуюся в последние десятилетия тенденцию расширения к северу гнездовых ареалов целого ряда видов птиц с южным распространением. Это соотносится с утверждением о влиянии потепления климата на структуру населения. Полученные результаты потребуют более пристального внимания этому виду в регионе, а также пересмотра его статуса и границ ареала.

Приложение доступно по ссылке <https://doi.org/10.17223/19988591/71/14>

Список источников

1. Попов В.В. Расширение ареалов птиц в Иркутской области: северное направление // Природа Внутренней Азии. 2021. № 1 (17). С. 66–95.
2. Скалон Н.В., Скалон В.Н. Тенденции в изменении ареалов некоторых видов птиц на территории Кемеровской области – Кузбасса в 2000–2021 годах // Русский орнитологический журнал. 2022. Т. 31, вып. 2241. С. 4722–4726.
3. Тарасов В.В. Изменения в фауне и распространении птиц лесостепного Зауралья в конце XX – начале XXI веков под воздействием природных и антропогенных факторов // Труды Зоологического института РАН. 2023. Т. 327, № 4. С. 659–677. doi: 10.31610/trudyzin/2023.327.4.659
4. Гашков С.И., Коробицын И.Г., Баздырев А.В., Тютеньков О.Ю., Москвитин С.С. О залётах птиц в Томскую область в XXI веке // Русский орнитологический журнал. 2022. Т. 31, вып. 2232. С. 4302–4305.
5. Kirpotin S.N., Callaghan T.V., Peregon A.M., Babenko A.S., Berman D.I., Bulakhova N.A., Byzaakay A.A., Chernykh T.M., Chursin V., Interesova E.A., Gureev S.P., Karchev I.A., Kharuk V.I., Khovalyg A.O., Kolpashchikov L.A., Krivets S.A., Kvasnikova Z.N., Kuzhevskaya I.V., Merzlyakov O.E., Nekhoroshev O.G., Popkov V.K., Pyak A.I., Valevich T.O., Volkov I.V., Volkova I.I. Impacts of environmental change on biodiversity and vegetation dynamics in Siberia // Ambio. 2021. Vol. 50. PP. 1926–1952. doi: 10.1007/s13280-021-01570-6
6. Андреенков О.В., Карякин И.В., Жимулёв И.Ф. Продвижение на север ареала золотистой шурки *Merops apiaster* в южной части Западной Сибири // Русский орнитологический журнал. 2023, Т. 32, вып. 2276. С. 735–743.
7. Свириденко Б.Ф. Граница области гнездования золотистой шурки *Merops apiaster* в Омской области // Русский орнитологический журнал. 2023. Т. 32, вып. 2282. С. 1006–1008.
8. Миловидов С.П., Нехорошев О.Г., Куранов Б.Д. Птицы притоков реки Томи // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2015. № 4 (32). С. 91–106.

9. Белянкин А.Ф. Птицы равнинной части Кемеровской области / под. ред. В.К. Рябинцева // Материалы к распространению птиц на Урале, в Приуралье и Западной Сибири. Екатеринбург : Изд-во «Екатеринбург», 1999. С. 14–43.

References

1. Popov VV. Avian range expansion in Irkutsk oblast: A northerly direction. *Nature of Inner Asia*. 2021;1(17):66-95. In Russian, English summary. doi: 10.18101/2542-0623-2021-1-66-95
2. Skalon NV, Skalon VN. Tendencii v izmenenii arealov nekotoryx vidov ptic na territorii Kemerovskoj oblasti - Kuzbassa v 2000-2021 godax [Trends in changes in the ranges of some bird species in the Kemerovo region - Kuzbass in 2000-2021]. *The Russian Journal of Ornithology*. 2022;31(2241):4722-4726. In Russian.
3. Tarasov VV. Changes in the fauna and distribution of birds of the forest-steppe Trans-Urals in the late XX - early XXI centuries under the influence of natural and anthropogenic factors. *Proceedings of the Zoological Institute of the Russian Academy of Sciences*. 2023;327(4):659-677. In Russian, English summary. doi: 10.31610/trudyzin/2023.327.4.659
4. Gashkov SI, Korobitsyn IG, Bazdyrev AV, Tyuten'kov OY, Moskvitin SS. O zalyotah ptic v Tomskuyu oblast' v XXI veke [On the visitations of birds in Tomsk region in XXI century]. *The Russian Journal of Ornithology*. 2022;31(2232):4302-4305. In Russian.
5. Kirpotin SN, Callaghan TV, Peregon AM, Babenko AS, Berman DI, Bulakhova NA, Byzaakay AA, Chernykh TM, Chursin V, Interesova EA, Gureev SP, Kerchev IA, Kharuk VI, Khovalyg AO, Kolpashchikov LA, Krivets SA, Kvasnikova ZN, Kuzhevskaya IV, Merzlyakov OE, Nekhoroshev OG, Popkov VK, Pyak AI, Valevich TO, Volkov IV, Volkova II. Impacts of environmental change on biodiversity and vegetation dynamics in Siberia. *Ambio*. 2021;50:1926-1952. doi: 10.1007/s13280-021-01570-6
6. Andreenkov OV, Karyakin IV, Zhimulev IF. Prodvizhenie na sever areala zolotistoj shhurki *Merops apiaster* v yuzhnoj chasti Zapadnoj Sibiri [Northward expansion of the European Bee-eater *Merops apiaster* range in the southern part of Western Siberia]. *The Russian Journal of Ornithology*. 2023;32(2276):735-743. In Russian.
7. Sviridenko BF. Granicza oblasti gnezdovaniya zolotistoj shhurki *Merops apiaster* v Omskoj oblasti [Boundary of the European Bee-eater *Merops apiaster* nesting area in Omsk Oblast]. *The Russian Journal of Ornithology*. 2023;32(2282):1006-1008. In Russian.
8. Milovidov SP, Nekhoroshev OG, Kuranov BD. Birds of the valleys of the Tom River tributaries (Tomsk oblast). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya – Tomsk State University Journal of Biology*. 2015;4(32):91-106. In Russian, English summary. doi: 10.17223/19988591/32/5
9. Belyankin AF. Pticy ravninnoj chasti Kemerovskoj oblasti [Birds of the flat part of the Kemerovo region]. In: *Materialy k rasprostraneniyu ptits na Urale, v Priural'e i Zapadnoj Sibiri* [Materials on the bird distributions in the Urals, Cisurals and Western Siberia]. Ryabintsev VK, editor. Ekaterinburg: "Ekaterinburg" Publ.; 1999. pp. 14-43. In Russian.

Информация об авторах:

Коробицын Игорь Геннадьевич, канд. биол. наук, доцент кафедры зоологии позвоночных и экологии, Биологический институт, Национальный исследовательский Томский государственный университет (Томск, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7709-3004>

E-mail: rozenpom@mail.ru

Милешкина Мария Тимуровна, студент кафедры зоологии позвоночных и экологии, Биологический институт, Национальный исследовательский Томский государственный университет (Томск, Россия).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0619-8413>

E-mail: marymileshekina@gmail.com

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Igor G. Korobitsyn, Cand. Sci. (Biol.), Assoc. Prof. of the Department of Vertebrate Zoology and Ecology, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7709-3004>

E-mail: rozenpom@mail.ru

Maria T. Mileshekina, student of the Department of Vertebrate Zoology and Ecology, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation).

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0619-8413>

E-mail: marymileshekina@gmail.com

The Authors declare no conflict of interest.

*Статья поступила в редакцию 15.07.2025;
одобрена после рецензирования 05.08.2025; принята к публикации 04.09.2025*

*The article was submitted 15.07.2025;
approved after reviewing 05.08.2025; accepted for publication 04.09.2025*

Научная статья
УДК 598.278
doi: 10.17223/19988591/71/15

**Гнездовые находки малого баклана
Phalacrocorax pygmeus (Pallas, 1773) и каравайки
Plegadis falcinbellus (Linnaeus, 1766)
в Курганской области (Западная Сибирь)**

Владимир Васильевич Тарасов¹

¹ Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург, Россия
¹ <https://orcid.org/0000-0002-8576-3167>, grouse@bk.ru

Аннотация. Получены первые данные о гнездовании малого баклана и каравайки в лесостепной зоне Зауралья. Совместное поселение из 6 пар первого и 4 пар второй обнаружено 18 июля 2025 г. в колонии больших белых и серых цапель на оз. Малые Донки в Куртамышском районе Курганской области. В гнёздах обоих видов находились яйца и недавно вылупившиеся птенцы. От ближайших известных мест их размножения в Прикаспии и Центральном Казахстане эта находка удалена более чем на 1 тыс. км к северо-востоку.

Ключевые слова: распространение, птицы, гнездование, динамика ареалов, лимнофилы, изменение климата, глобальное потепление

Источник финансирования: работа выполнена в рамках госзадания Института экологии растений и животных УрО РАН № 122021000096-7.

Для цитирования: Тарасов В.В. Гнездовые находки малого баклана *Phalacrocorax pygmeus* (Pallas, 1773) и каравайки *Plegadis falcinbellus* (Linnaeus, 1766) в Курганской области (Западная Сибирь) // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2025. № 71. С. 243–248. doi: 10.17223/19988591/71/15

Original article
doi: 10.17223/19988591/71/15

Breeding records of the Pygmy Cormorant *Phalacrocorax pygmeus* (Pallas, 1773) and Glossy Ibis *Plegadis falcinbellus* (Linnaeus, 1766) in the Kurgan Oblast (Western Siberia)

Vladimir V. Tarasov¹

¹ Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the
Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation
¹ <https://orcid.org/0000-0002-8576-3167>, grouse@bk.ru

Summary. In June 2025, we conducted a survey of large joint colony of Great White Egret *Casmerodius albus* (about 100 pairs) and Grey Heron *Ardea cinerea*

(about 70 pairs) located on Lake Malye Donki in the Kurtamysh district of Kurgan Oblast (N54°36', E64°24'). It is one of the largest freshwater reservoirs in the region with the area of 43.7 km² and a characteristic floodplain type of overgrowing. A DJI Mavic 2 Zoom quadcopter (SZ DJI Technology Co., Ltd., China) was used for his examination. During the survey on June 18 was found a very compact settlement of the Pygmy Cormorant (6 nests) and Glossy Ibis (4 nests), which could fit on an area measuring 1.0 × 2.7 m (See Fig. 1 in the Supplement). The nests were built on reed beds in the most densely populated part of the heron's colony, at a distance of less than 1 m from the nearest nests of the latter (See Fig. 2 in the Supplement). The cormorants, frightened from their nests, did not fly up, but dived from them into the water, which indicates a fairly large depth in this place. Their nests towered above the water by more than 0.5 m (See Fig. 3 in the Supplement), the height of the nests of the Glossy Ibises was half as high (See Fig. 4 in the Supplement). The distance between any neighboring nests in the settlement was 0.2-0.3 m. It is characteristic that the Glossy Ibises did not settle next to each other, their nests were located between the nests of Cormorants - at a distance of 0.8-0.9 m from each other. The nests of both species contained eggs and newly hatched chicks. Complete clutches of the Pygmy Cormorants contained 4-6 eggs, clutches of the Glossy Ibises - 4-8 eggs (See Fig. 5 in the Supplement). Both species were found nesting in Kurgan Oblast and the entire Asian part of Russia for the first time. Our records indicate the expansion of the breeding ranges of the Pygmy Cormorant and Glossy Ibis to the forest-steppe Trans-Urals - more than one thousand km northeast of the nearest previously known breeding grounds, which are located in the lower reaches of the Volga, Ural rivers, and Central Kazakhstan. Since the beginning of this century, they have shown a clear tendency to settle. This confirms the general trend of changes in the distribution of birds of the wetland complex, which emerged in Western Siberia in the last 3-4 decades, and allows us to expect new similar records.

The article contains 1 Supplement, 9 References.

Keywords: distribution, birds, nesting, range dynamics, limnophilic species, climate change, global warming

Fundings: the study was implemented for the state contract of the Institute of Plant and Animal Ecology of the Ural branch of the RAS (No. 122021000096-7).

For citation: Tarasov VV. Breeding records of the Pygmy Cormorant *Phalacrocorax pygmeus* (Pallas, 1773) and Glossy Ibis *Plegadis falcinbellus* (Linnaeus, 1766) in the Kurgan Oblast (Western Siberia). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2025;71:243-248. doi: 10.17223/19988591/71/15

Введение

В последние десятилетия границы распространения многих видов птиц в Западной Сибири активно сдвигаются к северу. В Южном Зауралье эта тенденция отчётливо проявилась в 1990-е гг. и продолжилась в наступившем веке. За это время здесь зафиксировано проникновение из степной зоны в лесостепную 14 новых видов, ещё 13 видов с преимущественно бореальным распространением, имевших в лесостепи южные пределы области размножения, наоборот, практически перестали встречаться на гнездовании [1]. Такое смещение границ ареалов (у одних видов – северных, у других – южных) существенным образом меняет облик региональной авифау-

ны и проявляется в первую очередь у птиц, связанных с водной средой обитания (лимнофилов). Причиной происходящих изменений называется усиливающееся потепление климата. Предполагается, что процесс расселения «южных» видов птиц в северном направлении будет продолжаться, и среди новых для лесостепной зоны Западной Сибири гнездящихся видов могут оказаться в том числе малый баклан и каравайка [1, 2]. Эти предположения нашли своё подтверждение в 2025 г.

Материалы и методика

Наблюдения проведены в июне 2025 г. на оз. Малые Донки в Куртамышском районе Курганской области (54°36' с.ш., 64°24' в.д.). Это один из крупнейших в регионе пресных водоёмов площадью 43,7 км², который относится к озёрам займищного типа зарастания; местами по кромке плёсов выражен тростниковый бордюр шириной 50–100 м. Находится в древней долине р. Тобол. Географически район исследований расположен в южной подзоне лесостепной зоны Зауральской провинции Западносибирской области. Озеро является важным местом гнездования водоплавающих и околоводных птиц и остановок их в периоды миграций и входит в состав ключевой орнитологической территории международного значения «Озёра Большие и Малые Донки». В её пределах обитают 15 видов птиц, внесённых в Красные книги Российской Федерации [3] и (или) Курганской области [4]. Для обследования водоёма применяли квадрокоптер DJI Mavic 2 Zoom (SZ DJI Technology Co., Ltd., China).

Результаты и обсуждение

В мае–июне 2025 г. обследована крупная совместная колония больших белых *Casmerodius albus* (около 100 пар) и серых *Ardea cinerea* (около 70 пар) цапель, расположенная в одном из центральных тростниковых займищ оз. Мал. Донки. В ходе одного из осмотров озера 7 июня обнаружены 6 караваек, которые некоторое время кружили над озером, затем опустились в тростники, предположительно на гнёзда. При очередном визите на водоём 18 и 19 июня особое внимание уделили этому месту. Здесь оказалось весьма компактное поселение малых бакланов (6 гнёзд) и караваек (4 гнезда), умещавшееся на участке размером 1,0 × 2,7 м² (рис. 1 в Приложении). Гнёзда были устроены на заламах тростника в наиболее густонаселённой части колонии цапель, на расстоянии менее 1 м от ближайших гнёзд последних (рис. 2 в Приложении). Спугнутые с гнёзд бакланы не взлетали, а ныряли с них в воду, что свидетельствует о достаточно большой глубине озера в этом месте. Их гнёзда возвышались над водой более чем на 0,5 м (рис. 3 в Приложении), высота расположения гнёзд караваек была вдвое меньше (рис. 4 в Приложении). Расстояние между соседними

гнездами в поселении (безотносительно видовой принадлежности) составляло 0,2–0,3 м, при этом характерно, что каравайки рядом друг с другом не селились, их гнезда размещались между гнездами бакланов – на удалении 0,8–0,9 м одно от другого. Два гнезда бакланов содержали кладки из 4 и 5 яиц, третье – 6 слепых птенцов. Остальные 3 птицы с гнезд не сошли, но под одной из них были видны яйца, ещё под одной – маленькие птенцы. В гнездах караваек находились 8 яиц, 4 голых птенца (и рядом на воде плавало выпавшее из этого гнезда яйцо), 3 птенца и 2 яйца, 3 птенца и 1 яйцо (рис. 5 в Приложении). Эти наблюдения дают довольно полные представления как о величине кладок, так и сроках размножения птиц.

Оба вида найдены на гнездовании в Курганской области и всей азиатской части России впервые. Ближайшие известные места их размножения расположены в низовьях рек Волга, Урал и Центральном Казахстане [3, 5, 6], причём с начала текущего века они демонстрируют чётко выраженную тенденцию к расселению [6]. Есть сведения о залётах этих птиц в Западную Сибирь вплоть до лесной зоны. Так, каравайка в октябре 2010 г. была зарегистрирована на юге Тюменской области [7], в сентябре 2024 г. – в Сургутском районе ХМАО [8], малые бакланы весной 2022 г. – в нескольких местах Алтайского края, Новосибирской и Томской областей [9].

Заключение

Данная находка свидетельствует о расширении гнездовых ареалов малого баклана и каравайки до лесостепного Зауралья – более чем на 1 тыс. км к северо-востоку от ближайших известных ранее мест их размножения. Это подтверждает общую тенденцию изменений в распространении птиц водно-болотного комплекса, наметившуюся в Западной Сибири в последние 3–4 десятилетия, и позволяет ожидать новых подобных находок.

Приложение доступно по ссылке <https://doi.org/10.17223/19988591/71/15>

Список источников

1. Tarasov V.V. Changes in the fauna and distribution of birds of the forest-steppe Trans-Urals in the late 20th to early 21st centuries under the influence of natural and anthropogenic factors // Russian Journal of Ecology. 2024. Vol. 55, № 6. PP. 599–613. doi: 10.1134/S1067413624603610
2. Тарасов В.В. Новые регистрации редких птиц в Курганской области // Фауна Урала и Сибири. 2025. № 1. С. 129–137. doi: 10.5281/zenodo.17063245
3. Красная книга Российской Федерации. Животные / под ред. Д.С. Павлова и др. М. : ВНИИ Экология, 2021. 1128 с.
4. Красная книга Курганской области / под ред. В.Н. Большакова и др. Курган : Изд-во Курганского гос. ун-та, 2012. 448 с.

5. Рябицев В.К. Птицы Сибири : справочник-определитель: в 2 т. Москва; Екатеринбург : Кабинетный ученый, 2014. Т. 2. 452 с.
6. Берёзовиков Н.Н., Филимонов А.Н. Малый баклан *Phalacrocorax pygmaeus* – новый вид колониальных птиц на Алаколь-Сасыккольской системе озёр // Русский орнитологический журнал. 2016. Т. 25, вып. 1373. С. 4699–4701.
7. Гашев С.Н. Встреча каравайки на юге Тюменской области // Материалы к распространению птиц на Урале, в Приуралье и Западной Сибири. 2011. Вып. 16. С. 44.
8. В заповеднике Югры заметили редкую для северных широт птицу // КП-Югра. 2024. 26 сентября. URL: <https://www.ugra.kp.ru/daily/22929/4990009/> (дата обращения: 13.08.2025).
9. Эбель А.Л., Шнайдер Е.П., Маер В.Я. Залёт малого баклана *Phalacrocorax pygmaeus* в Западную Сибирь весной 2022 года // Русский орнитологический журнал. 2022. Т. 31, вып. 2232. С. 4285–4287.

References

1. Tarasov VV. Changes in the fauna and distribution of birds of the forest-steppe Trans-Urals in the late 20th to early 21st centuries under the influence of natural and anthropogenic factors. *Russian Journal of Ecology*. 2024;55(6):599-613. doi: 10.1134/S1067413624603610
2. Tarasov VV. New records of rare birds in the Kurgan region. *Fauna of the Urals and Siberia*. 2025;1:129-137. In Russian, English summary. doi: 10.5281/zenodo.17063245
3. Krasnaya kniga Rossiyskoy Federatsii. Zhivotnyye [Red Data Book of the Russian Federation. Animals]. Pavlov DS et al. editors. Moscow: All-Russian Research Institute Ekologiya; 2021. 1128 p. In Russian
4. Krasnaya kniga Kurganskoy oblasti [Red Data Book of Kurgan Region]. Bolshakov VN et al. editors. Kurgan: Kurgan State University Publ.; 2012. 448 p. In Russian
5. Ryabtsev VK. Ptitsy Sibiri [Birds of Siberia]: a guide in 2 volumes. Vol. 2. Moscow; Yekaterinburg: Kabinetnyy uchenyy; 2014. 452 p. In Russian
6. Berezovikov NN, Filimonov AN. Malyy baklan *Phalacrocorax pygmaeus* - novyy vid kolonial'nykh ptits na Alakol'-Sasykol'skoy sisteme ozor [Pygmy Cormorant *Phalacrocorax pygmaeus* - a new species of colonial birds in the Alakol-Sasykol lake system]. *The Russian Journal of Ornithology*. 2016;25(1373):4699-4701. In Russian
7. Gashev SN. Vstrecha karavayki na yuge Tyumenskoy oblasti [Record of the Glossy Ibis in the south of Tyumen region]. *Materials on the Distribution of Birds in the Urals, in the Urals and Western Siberia*. 2011;16:44. In Russian
8. A rare bird for northern latitudes was spotted in the Yugra nature reserve. KP-Yugra. 2024. September 26. Available at: <https://www.ugra.kp.ru/daily/22929/4990009/> (accessed: 13.08.2025).
9. Ebel AL, Schneider EP, Mayer VYa. Zalyot malogo baklana *Phalacrocorax pygmaeus* v Zapadnuyu Sibir' vesnoy 2022 goda [The Pygmy Cormorant *Phalacrocorax pygmaeus* vagrant to Western Siberia in the spring of 2022]. *The Russian Journal of Ornithology*. 2022;31(2232):4285-4287. In Russian

Информация об авторе:

Тарасов Владимир Васильевич, канд. биол. наук, доцент, с.н.с. Института экологии растений и животных УрО РАН (Екатеринбург, Россия)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8576-3167>

E-mail: grouse@bk.ru

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Information about the author:

Vladimir V. Tarasov, Cand. Sci. (Biol.), Assoc. Prof., senior researcher at the Institute of Plant and Animal Ecology of the UB RAS (Yekaterinburg, Russia)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8576-3167>

E-mail: grouse@bk.ru

The Author declares no conflict of interest.

*Статья поступила в редакцию 20.07.2025;
одобрена после рецензирования 15.08.2025; принята к публикации 04.09.2025*

*The article was submitted 20.07.2025;
approved after reviewing 15.08.2025; accepted for publication 04.09.2025*