



Почвоведение и агрохимия Soil science and agrochemistry







DOI: 10.22363/2312-797X-2024-19-3-431-446

УДК 631.461(571.51)

EDN BVDKCD


Научная статья / Research article

Микробные сообщества городских почв Норильской агломерации

М.В. Корнейкова¹  , Н.В. Салтан² , Е.В. Козлова¹ ,
М.В. Васильева¹ , П.Д. Давыдова¹ , Е. Бережной¹

¹Российский университет дружбы народов, г. Москва, Российская Федерация

²Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А. Аврорина — обособленное подразделение федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр» РАН, г. Анапиты, Российская Федерация

 korneykova.maria@mail.ru

Аннотация. Уникальное сочетание экстремальных природно-климатических условий и антропогенной нагрузки делает арктические города важным и актуальным объектом исследований. Микробные сообщества являются чувствительными индикаторами изменений процессов индустриализации и урбанизации, последствия которых в Арктической зоне мало изучены и слабо предсказуемы. Цель исследования — оценка микробиологического потенциала городских почв Норильской агломерации (Кайеркан, Норильск, Оганер и Талнах) к выполнению экологических функций на основе изучения некоторых микробиологических параметров. Изучены численность сапротрофных и олиготрофных бактерий, микроскопических грибов (метод микробиологического посева), микробная биомасса и дыхание (метод субстрат индуцированного дыхания), функциональное разнообразие микробных сообществ (техника MicroResp™), санитарно-гигиеническое состояние почв. Выявлено, что городские почвы характеризовались низкой микробной биомассой (от 107 до 159 мкг С г⁻¹) по сравнению с фоновыми, но достаточным микробным дыханием (от 0,28 до 0,64 мкг С г⁻¹ч⁻¹), что свиде-

© Корнейкова М.В., Салтан Н.В., Козлова Е.В., Васильева М.В., Давыдова П.Д., Бережной Е., 2024



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

тельствует об их высокой активности. В городских почвах отмечено увеличение численности культивируемых бактерий и микроскопических грибов, в отдельных районах — увеличение функционального разнообразия микробных сообществ по сравнению с фоном. В сообществе преобладали микроорганизмы, способные разлагать легкодоступные соединения: углеводы и карбоксильные кислоты, но также велика доля (до 20 %) микроорганизмов, утилизирующих труднорастворимые соединения. Санитарно-гигиеническое состояние городских почв агломерации оценено как умеренно опасное. Отмечено увеличение численности бактерий группы кишечной палочки, энтеробактерий и оппортунистических микромицетов, что в целом характерно для городских экосистем и не является критическим. Выявленные закономерности позволили предположить, что городская зеленая инфраструктура может формировать ниши для развития микроорганизмов, которые могут эффективно выполнять экологические функции, несмотря на стрессовые условия. Сделан вывод об особой актуальности комплексного экологического подхода к решению проблем озеленения и благоустройства арктических городов, подбора ассортимента растений и технологий ухода и содержания зеленых насаждений, способствующих формированию устойчивых и здоровых городских экосистем.

Ключевые слова: микробная биомасса, микробная активность, функциональное разнообразие, санитарно-гигиеническое состояние почв, арктические урбоэкосистемы

Вклад авторов: Корнейкова М.В. — формирование идеи исследования, выбор точек отбора образцов и методов анализа, анализ и сведение полученных результатов, подготовка текста статьи; Салтан Н.В. — подготовка литературного обзора по теме исследования, статистическая обработка полученных результатов; Козлова Е.В. — анализ микробной биомассы, базального дыхания, обработка полученных результатов и их визуализация; Васильева М.В. — анализ функционального разнообразия почвенного микробного сообщества, обработка полученных результатов и их визуализация; Давыдова П.Д. — анализ сообщества условно патогенных микроорганизмов, обработка полученных результатов и их визуализация; Бережной Е.Д. — отбор почвенных образцов, пробоподготовка для анализа.

Заявление о конфликте интересов. авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Полевые работы, отбор почвенных образцов и микробиологические анализы выполнены в рамках темы НИР по госзаданию FSSF-2024-0023. Анализ оппортунистической микробиоты городских почв проводили при поддержке гранта РФФ № 23-17-00118.

История статьи: поступила в редакцию 09.08.2024; принята к печати 29.08.2024.


Для цитирования: Корнейкова М.В., Салтан Н.В., Козлова Е.В., Васильева М.В., Давыдова П.Д., Бережной Е. Микробные сообщества городских почв Норильской агломерации // Вестник российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. 2024. Т. 19. № 3. С. 431–446. doi: 10.22363/2312-797X-2024-19-3-431-446

Microbial communities of urban soils in the Norilsk agglomeration

Maria V. Korneykova¹  , Natalia V. Saltan² , Ekaterina V. Kozlova¹ ,
Maria N. Vasileva¹ , Polina D. Davydova¹ , Egor D. Berezhnoi¹

¹RUDN University, Moscow, Russian Federation

²Polar Alpine Botanical Garden-Institute — Subdivision of the Federal Research Centre, Kola Science Centre of Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation

 korneykova.maria@mail.ru

Abstract. Arctic cities are an important and relevant object of research due to the unique combination of extreme natural and climatic conditions and anthropogenic impact. Microbial communities are sensitive indicators of changes occurring as a result of anthropogenic impact, including urbanization, the consequences

of which in the Arctic zone are poorly studied and poorly predictable. The aim of this study was to assess the microbiological potential of urban soils of the Norilsk agglomeration (Norilsk, Kayerkan, Oganer and Talnakh) to perform ecological functions based on the study of some microbiological parameters. The number of saprotrophic and oligotrophic bacteria, microscopic fungi (plating method), microbial biomass and respiration (substrate induced respiration method), functional diversity of microbial communities (MicroResp™ technique), and the sanitary and hygienic state of soils were studied. It was revealed that urban soils were characterized by low microbial biomass (from 107 to 159 $\mu\text{g C g}^{-1}$) compared to the background, but sufficient microbial respiration (from 0.28 to 0.64 $\mu\text{g C g}^{-1}\text{h}^{-1}$), which indicates their high activity. An increase in the number of culturable bacteria and microscopic fungi was noted in urban soils and, in some areas, an increase in the functional diversity of microbial communities compared to the background. Microorganisms capable of decomposing easily accessible compounds — carbohydrates and carboxylic acids — prevailed in the community, but the proportion of microorganisms utilizing difficult-to-decompose compounds was also high (up to 20%). The sanitary and hygienic condition of urban soils of the agglomeration was assessed as moderately hazardous. An increase in the number of coliform bacteria, enterobacteria and opportunistic microfungi has been noted, which is generally characteristic of urban ecosystems and is not critical. The identified patterns suggest that urban green infrastructure can form niches for the microorganisms that can effectively perform ecological functions despite stressful conditions. In this case, issues of an integrated environmental approach to solving the problems of landscaping and improvement of Arctic cities, selecting a range of plants and technologies for the care and maintenance of green infrastructure are becoming increasingly relevant, which will contribute to the formation of sustainable and healthy urban ecosystems.

Keywords: microbial biomass, microbial activity, functional diversity, sanitary and hygienic condition of soils, arctic urban ecosystems

Author contributions: Korneykova M.V. — designed the research, selected sampling points and analysis methods, analyzed the obtained results, prepared the manuscript; Saltan N.V. — prepared the literature review on the research topic, processed statistically the obtained results; Kozlova E.V. — analyzed microbial biomass, basal respiration, processed and visualized the obtained results; Vasilyeva M.V. — analyzed the functional diversity of the soil microbial community, processed and visualized the obtained results; Davydova P.D. — analyzed the community of opportunistic microorganisms, processed and visualized the obtained results; Berezhnoy E.D. — collected soil samples, prepared samples for analysis.

Conflict of interests. The authors declared no conflict of interests.

Funding. Field work, soil sampling and microbiological analyses were carried out within the framework of the state assignment FSSF-2024-0023. The analysis of opportunistic microbiota of urban soils was performed with the support of the Russian Science Foundation Grant No. 23-7-00118.

Article history: Received: 9 August 2024. Accepted: 29 August 2024.

For citation: Korneykova M.V., Saltan N.V., Kozlova E.V., Vasileva M.N., Davydova P.D., Berezhnoi E.D. Microbial communities of urban soils in the Norilsk agglomeration. *RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries*. 2024;19(3):431–446. (In Russ.). doi: 10.22363/2312-797X-2024-19-3-431-446

Введение

Почвы Арктического региона, являющиеся важнейшим депо органического углерода, составляющего около половины мировых почвенных запасов [1, 2], становятся основным объектом изучения в условиях изменения климата и интенсивной урбанизации. Норильская агломерация — уникальный пример сочетания суровых климатических условий и высокой антропогенной нагрузки. На естественные лимитирующие факторы (близкое залегание к поверхности многолетней мерзлоты,

сезонное переувлажнение, невысокое содержание органического вещества и макроэлементов) накладываются антропогенные процессы (загрязнение тяжелыми металлами, переуплотнение и запечатывание). В результате почвы Норильской агломерации отличаются очень высокой неоднородностью: от природных и квази-природных почв фоновых территорий на границе селитебных зон до почвоподобных образований из техногенных отложений (шлам, гравий, строительный мусор), перекрытых завезенными грунтами различного происхождения, свойств и экологического качества.

Известно, что микробиом арктических почв очень своеобразен [3, 4]. Понимание его состава, структуры и стабильности необходимо для прогнозирования изменений в функционировании экосистем в условиях потепления Арктики. Ожидается, что повышение температуры и сопряженное с ним изменение растительного покрова приведут к изменению скорости минерализации органического вещества, его гумификации и фундаментальным изменениям в микробном сообществе [5–7]. Отдельный интерес представляют почвы арктических городов, где помимо климатического фактора и антропогенной нагрузки существенное влияние на функционирование почвенного микробного сообщества могут оказывать субстраты, используемые для создания почвенных конструкций, ассортимент растений, используемых в озеленении, и технологии ухода за зелеными насаждениями. Кроме того, эффект «теплового острова» может создавать благоприятные условия для выживания и развития микроорганизмов, реализуя специфические ниши, которые могут превратиться в своеобразные очаги биоразнообразия микроорганизмов [4, 8].

Существуют работы, посвященные изучению химических и микробиологических свойств почв арктических регионов, однако большинство из них сосредоточены на роли почв в секвестрации и стабилизации органического вещества [9–11].

Мы в своем **исследовании** сделали акцент на **цели** изучения функциональной структуры почвенных микробных сообществ городских экосистем арктического региона на примере Норильской агломерации, в т. ч. на оценке структуры культивируемого микробного сообщества для последующей анализа долевого участия патогенных микроорганизмов, что является очень важным для здоровья городского населения.

Материалы и методы исследования

Объекты исследований

Норильская агломерация — это система отдельно расположенных жилых районов: собственно Норильск, Оганер, Талнах, Кайеркан — характеризуется крайне суровым климатом субарктического типа. Особенностью зимы является сочетание низких температур и сильного шквального ветра. Период устойчивых морозов (до $-56\text{ }^{\circ}\text{C}$) длится около 280 дней в году, при этом отмечается более 130 дней с метелями. Климатическая зима длится с начала второй декады сентября по первую декаду мая. Лето короткое (с конца июня по конец августа), прохладное ($+10,7\text{ }^{\circ}\text{C}$) и пасмурное; климатическое лето наступает лишь в отдельные теплые годы [12].

С учетом естественной почвенной неоднородности Норильской агломерации исследования проводили в названных выше четырех районах (рис. 1). На территории каждого района были выделены городские и фоновые объекты.



Рис. 1. Схема расположения и площадь объектов исследования

Источник: выполнил Н.В. Салтан с использованием Google Map



Fig. 1. Location and area of research plots

Source: created by N.V. Saltan using Google Map

Норильск ($69^{\circ}20'01''$ с.ш. $88^{\circ}12'49''$ в.д.), площадью $5,8 \text{ км}^2$, расположен на юге Таймырского полуострова, в 300 км к северу от Северного полярного круга в Арктической зоне Красноярского края (восточная Арктика), характеризуется развитым промышленным комплексом (предприятия цветной металлургии, горнодобывающей, топливно-энергетической, газовой и других отраслей промышленности).

Кайеркан ($69^{\circ}21'11''$ с.ш. $87^{\circ}45'22''$ в.д.), площадью $1,5 \text{ км}^2$, находится в 24 километрах к западу от центральной части. Входит в тройку самых загрязненных городов мира.

Оганер (69°21'32'' с.ш. 88°22'10'' в.д.) расположен в 8 км восточнее от центра Норильска, на левом берегу р. Норилки. Самое молодое жилое образование Норильской агломерации, небольшое по площади.

Талнах (69°30'38'' с.ш. 88°21'48'' в.д.) — район, находящийся в 25 км к северо-востоку от центра Норильска, характеризуется самой благополучной экологической ситуацией. Площадь — 4 км².

Отбор образцов и подготовка почвы к анализу. Отбор проб для микробиологического анализа и подготовку почвы для лабораторных исследований проводили согласно ГОСТ 17.4.3.01–2017¹; ГОСТ 17.4.4.02–2017². Образцы отбирали из верхнего слоя 0–10 см, транспортировали в лабораторию и хранили в холодильнике при температуре +4 °С.

Определение микробной биомассы, микробного метаболического коэффициента. Углерод микробной биомассы $C_{\text{мик}}$ определяли методом субстрат-индуцированного дыхания, который заключается в измерении эмиссии CO₂, продуцируемого почвенными микроорганизмами в течение 3–5 часов после добавления в почву 0,1 мл раствора 5 % легкодоступного субстрата — глюкозы — по стандартной методике [13]. Базальное дыхание (БД) измеряли аналогичным методом, добавляя воду (0,1 мл/г почвы) и инкубируя образцы 24 часа. Измерение CO₂ проводили на газовом хроматографе Crystal-5000.2. На основе базального дыхания и углерода микробной биомассы проводили расчет микробного метаболического коэффициента $q\text{CO}_2$.

Определение функционального разнообразия микробного сообщества. Физиологический профиль микробного сообщества почвы оценивали техникой MicroRespTM [14, 15]. Анализировали отклик на 14 субстратов, относящихся к группам аминокислот (лейцин, глицин, аргинин, аминокусусная и аспарагиновая), углеводов (глюкоза, фруктоза, галактоза), карбоновых (аскорбиновая, лимонная, уксусная) и фенольных (сиреневая, ванилиновая) кислот. Изменение окраски геля измеряли на микропланшетном ридере («Униплан», λ595 нм).

Определение численности культивируемых бактерий и микроскопических грибов. Численность сапротрофных бактерий определяли методом поверхностного посева на мясопептонный агар, численность олиготрофных бактерий — на слабоминерализованную среду Аристовской. Численность грибов определяли методом глубинного посева на среду Чапек-агар с добавлением молочной кислоты для подавления роста бактерий. Расчеты численности бактерий и грибов проводили на абсолютно сухую почву, прокаленную при 105 °С до постоянного веса. Выделение чистых культур микроорганизмов проводили из накопительных культур. Анализ видового разнообразия грибов выполняли на основе культурально-морфологических признаков с использованием определителей [16, 17].

Определение численности условно патогенных микроорганизмов. Оценку санитарно-гигиенического состояния почвы проводили на основе СанПиН 1.2.3685–21³. Численность бактерий группы кишечной палочки (БГКП)

¹ ГОСТ 17.4.3.01–2017. Почвы. Общие требования к отбору проб. М., 2018.

² ГОСТ 17.4.4.02–2017. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. М., 2018.

³ ГОСТ 17.4.4.02–2017. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. М., 2018.

определяли на среде Эндо, энтеробактерий — на специализированной лактозо-пептонной среде и среде Кода. Условно патогенные виды грибов идентифицировали по определителям [18, 19] и на основе нормативного документа СП 1.3.2322–08⁴.

Результаты исследования и обсуждение

Микробная биомасса и активность

В городских почвах районов Норильской агломерации величина микробной биомассы изменялась от 107 до 159 мкг С*г⁻¹ (рис. 2, а). Не выявлено существенной разницы между городскими почвами 4 изучаемых районов. Однако по сравнению с фоновой почвой микробная биомасса была существенно ниже: в Кайеркане и Талнахе в 4,5 и 6 раз соответственно, в центральном районе и Оганере приблизительно в 2 раза. В целом для городских почв Норильской агломерации характерны низкие значения микробной биомассы, по сравнению как с регионами, расположенными в средней полосе, например, Москва [20, 21], Курск [22], так и с северными городами, такими как Мурманск, Апатиты [23]. Низкие значения микробной биомассы можно объяснить слабо развитым растительным покровом в районах исследования, неблагоприятными физико-химическими свойствами почвы (переуплотнение, низкое содержанием органического вещества, рН и пр.), а также высоким уровнем содержания загрязняющих веществ, в первую очередь тяжелых металлов.

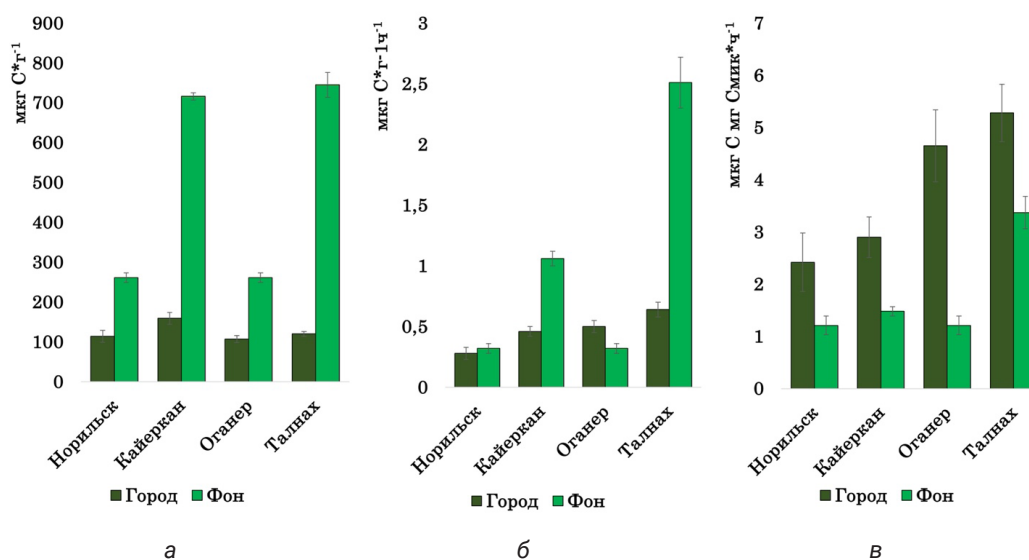


Рис. 2. Микробная биомасса (а), базальное дыхание (б) и микробный метаболический коэффициент (в) в почвах районов Норильской агломерации по сравнению с фоновыми

Источник: выполнила М.В. Корнейкова с помощью Microsoft Excel

⁴ СП 1.3.2322–08. Безопасность работы с микроорганизмами III–IV групп патогенности (опасности) и возбудителями паразитарных болезней. М., 2021.

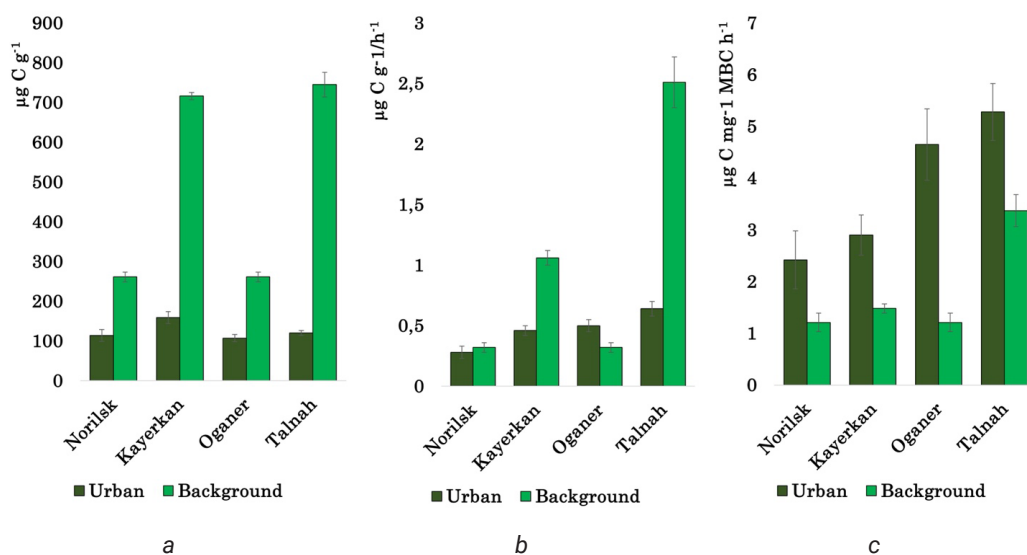


Fig. 2. Microbial biomass (a), basal respiration (b) and microbial metabolic quotient (c) in soils of the Norilsk agglomeration areas compared to background ones

Source: created by M.V. Korneykova using Microsoft Excel

Величина микробного дыхания в городских почвах изменялась от 0,28 до 0,64 и была ниже по сравнению с фоновой почвой во всех районах за исключением Оганера (см. рис. 2, б). В Талнахе отмечена наибольшая разница в значениях микробного дыхания между городскими и фоновыми почвами. В целом значения интенсивности микробного дыхания сопоставимы с таковыми для других северных городов [23]. Низкие значения содержания углерода микробной биомассы и достаточное микробное дыхание в почвах Норильской агломерации свидетельствуют о высокой активности почвенных микроорганизмов.

Значения микробного метаболического коэффициента (см. рис. 2, в), который является индикатором состояния почвенного микробного сообщества [24, 25], в городских почвах выше (от 2,4 до 5,3) по сравнению с фоновыми (от 1,2 до 3,4), что свидетельствует о неустойчивом состоянии почвенных микробных сообществ в условиях города. Ранее проведенные в других северных городах исследования выявили противоположные результаты и, например, в Апатитах и Мурманске значения микробного метаболического коэффициента были ниже, чем в фоне. Вероятно, мощная антропогенная нагрузка от близ расположенных промышленных предприятий и более суровый климат в Норильске неблагоприятно сказываются на почвенных микробных сообществах и затрудняют их развитие.

Функциональное разнообразие почвенных микробных сообществ

Функциональное разнообразие микробных сообществ определяется как «сумма экологических процессов и/или способности использовать различные субстраты, вырабатываемые организмами» [26]. Emmerling et al. отмечают, что если генетическое разнообразие микробных сообществ оценивает латентное разнообразие,

которое может не проявляться, то функциональное разнообразие связано с фактической деятельностью микроорганизмов, являющейся результатом этого потенциала, так что «функциональное, а не таксономическое разнообразие может обеспечить более глубокое понимание роли микробов в экосистемах» [27].

Кайеркан

Городские почвы Кайеркана характеризовались небольшим разнообразием функциональных групп почвенного микробного сообщества (рис. 3, а). В основном это микроорганизмы, способные разлагать углеводы и карбоксильные кислоты. Тогда как функциональное разнообразие микробных сообществ в фоновых почвах было существенно богаче. Выявлены отклики на все группы тестируемых субстратов. Активность микроорганизмов, анализируемая по силе отклика (интенсивности окраски на тепловой диаграмме), также была существенно больше, чем на городских объектах Кайеркана.

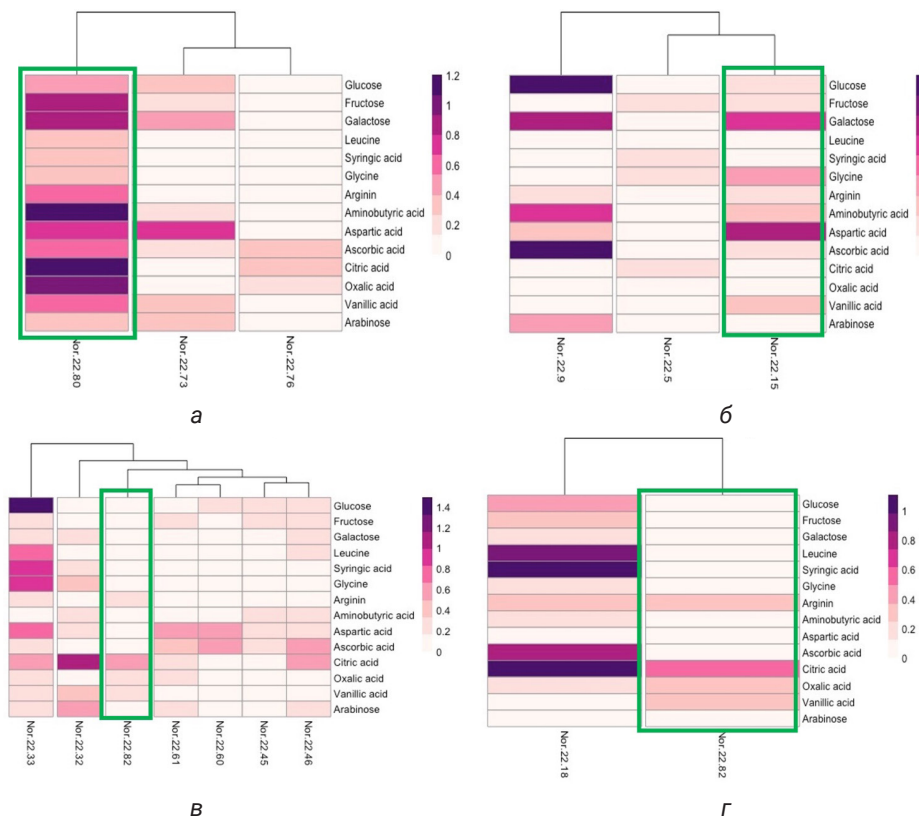


Рис. 3. Тепловая диаграмма функционального разнообразия почвенных микробных сообществ в почвах Норильской агломерации в сравнении с фоновыми: а – Кайеркан; б – Талнах; в – Норильск; г – Оганер. Зеленая линия – фоновый участок

Источник: выполнила М.Н. Васильева с помощью R 4.3.3, R studio

Fig. 3. Heat map of the functional diversity of soil microbial communities in the soils of the Norilsk agglomeration in comparison with the background ones: а – Kayerkan; б – Talnakh; в – Norilsk; г – Oganer. The green line is the background area

Source: created by M.N. Vasileva using R 4.3.3, R studio

Талнах

В Талнахе, как и в Кайеркане, в городских почвах выявлено угнетение разнообразия микробных сообществ по сравнению с фоном, однако на разных объектах Талнаха результаты существенно различались. Так, один из участков города отличался очень низким разнообразием и слабым откликом, а на втором разнообразие групп было больше, и величина отклика на некоторые из субстратов (глюкоза и аскорбиновая кислота) были выше, чем в фоновой почве, что, вероятно, вызвано наличием доступных субстратов в городских почвах.

Норильск

Функциональный профиль микробного сообщества в городских почвах Норильска отличался от двух предыдущих. В городских почвах разнообразие было существенно выше (отмечался отклик на 3...13 субстратов на разных участках), чем в фоновой, где отмечен отклик только на 4 субстрата. Однако, несмотря на большое разнообразие функциональных групп почвенных микроорганизмов, активность последних была слабой. Только на одном из городских участков сила отклика была значимой, в основном на группу углеводов.

Оганер

В Оганере, так же, как и в Норильске, функциональное разнообразие и активность была выше в городе по сравнению с фоном (11 и 4 отклика на субстраты соответственно). Наиболее сильный отклик отмечен для группы карбоксильных кислот, на лейцин (группа аминокислот) и сиреневую кислоту, относящуюся к группе фенольных трудноразлагаемых соединений.

Функциональное разнообразие почвенных микробных сообществ в разных районах Норильской агломерации по-разному изменялось в сравнении с фоновой почвой. Можно предположить, что в Кайеркане причиной низкого разнообразия микробных сообществ в городе является очень скудный растительный покров из-за сильных ветров, а в Талнахе — самом чистом районе и, казалось бы, с ожидаемо высоким разнообразием — причиной может быть более богатый растительностью фоновый участок, расположенный в зоне северной тайги. В Норильске и Оганере выявлено увеличение разнообразия функциональных групп микробных сообществ по сравнению с фоном, что согласуется с другими исследованиями, проведенными в городах [28—31].

Численность культивируемых микроорганизмов

Среди культивируемых прокариот олиготрофные бактерии преобладали над сапротрофными на всех участках как в городских условиях, так и в фоновых почвах (таблица). Вероятно, это связано с климатическими особенностями района исследований. В работах других авторов уже отмечалась подобная тенденция [32, 33]. Средняя численность сапротрофных бактерий в городских почвах колебалась в пределах от 20,2 до 73,7 тыс. КОЕ/г почвы, олиготрофных — от 35,7 до 102,0 тыс КОЕ/г и существенно не отличалась от фоновых почв, где значения изменялись от 13,2

до 28,8 тыс. КОЕ/г почвы для сапротрофов и от 25,8 до 83,2 тыс. КОЕ/г почвы — для олиготрофов. Во всех районах Норильской агломерации численность обеих групп бактерий в городских почвах была выше, чем в фоновых примерно в 1,5 раза.

Численность бактерий и микроскопических грибов в городских почвах

Объект	Тип	Бактерии				Микромицеты, тыс. КОЕ/г
		Сапротрофные	Олиготрофные	БГКП	Энтеробактерии	
		тыс. кл/г почвы		КОЕ/г почвы		
Норильск	Город	20,2 ± 0,5	47,8 ± 5,2	30,7 ± 2,5	16,5 ± 3,5	0,14 ± 0,03
	Фон	13,2 ± 1,5	26,2 ± 2,2	0	0	0,05 ± 0,005
Кайеркан	Город	32,2 ± 1,3	48,7 ± 4,3	7,25 ± 1,2	0,4 ± 0,05	0,32 ± 0,1
	Фон	24,9 ± 10,0	25,8 ± 8,2	4,0 ± 0,3	0,5 ± 0,1	0,01 ± 0,002
Оганер	Город	22,0 ± 9,3	35,7 ± 7,5	5,4 ± 0,2	0,04 ± 0,01	0
	Фон	13,2 ± 1,5	26,2 ± 2,2	0	0	0,05 ± 0,005
Талнах	Город	18,6 ± 5,3	43,5 ± 4,9	0,4 ± 0,02	39,1 ± 13,1	1,3 ± 0,05
	Фон	28,8 ± 9,0	83,2 ± 12,2	0	7,7 ± 1,5	0,05 ± 0,005

Number of bacteria and microscopic fungi in urban soils

Object	Type	Bacteria				Microfungi, thous. CFU/g
		Saprotrophic	Oligotrophic	Coliform bacteria	Enterobacteria	
		thous. cells/g of soil		CFU/g of soil		
Norilsk	City	20.2±0.5	47.8±5.2	30.7±2.5	16.5±3.5	0.14±0.03
	BG	13.2±1.5	26.2±2.2	0	0	0.05±0.005
Kayerkan	City	32.2±1.3	48.7±4.3	7.25±1.2	0.4±0.05	0.32±0.1
	BG	24.9±10.0	25.8±8.2	4.0±0.3	0.5±0.1	0.01±0.002
Oganer	City	22.0±9.3	35.7±7.5	5.4±0.2	0.04±0.01	0
	BG	13.2±1.5	26.2±2.2	0	0	0.05±0.005
Talnakh	City	18.6±5.3	43.5±4.9	0.4±0.02	39.1±13.1	1.3±0.05
	BG	28.8±9.0	83.2±12.2	0	7.7±1.5	0.05±0.005

Note. BG – background.

Численность микроскопических грибов в почвах районов Норильской агломерации достаточно низкая и изменялась от 0,14 до 2,60 тыс. КОЕ/г почвы, однако эти значения на 1–2 порядка превышали таковые в фоновой почве (0,01...0,05 тыс. КОЕ/г). Увеличение численности культивируемых бактерий и микроскопических грибов в городских почвах ранее отмечалось в работах других авторов, в т. ч. для северных городов [32, 33]. Вероятно, объекты зеленой инфраструктуры арктических городов формируют благоприятную нишу для развития почвенного микробного сообщества, как это ранее было показано по данным анализа микробного разнообразия и структуры микробного сообщества [34, 35].

Санитарно-гигиеническое состояние городских почв

Оценка санитарно-гигиенического состояния городских почв очень важна при проведении экологических исследований, так как наличие патогенных и условно патогенных для человека микроорганизмов может представлять потенциальную опасность для здоровья населения, в особенности для наиболее уязвимой ее части: детей дошкольного возраста, пожилых людей и людей с ослабленным иммунитетом.

По санитарно-гигиеническому состоянию городские почвы Норильской агломерации относились к категории умеренно опасных, за исключением района Оганер (допустимо чистые), тогда как фоновые были допустимо чистыми или чистыми. В городских почвах отмечено существенное увеличение групп условно патогенных бактерий (энтеробактерий и БГКП) по сравнению с фоновыми. Так, численность БГКП в разных районах Норильской агломерации изменялась от 5,4 до 47,3 КОЕ/г почвы, энтеробактерий от 0,04 до 16,50 КОЕ/г почвы, тогда как в фоне БГКП достигали максимальных значений 4,0 КОЕ/г, энтеробактерии — 7,7 КОЕ/г. Часто в фоновых почвах полностью отсутствовали бактерии, относящиеся к патогенным, что свидетельствует об их чистоте. В то же время увеличение доли условно патогенных микроорганизмов, как бактерий, так и микроскопических грибов, в городских почвах ранее уже отмечен рядом исследований [36—39].

Заключение

Норильская агломерация является интересным примером арктической городской экосистемы, поскольку характеризуется выраженной пространственной неоднородностью за счет выделения отдельных районов разной степени благоустроенности, обеспеченности зелеными насаждениями и уровнем антропогенной нагрузки. Это позволило нам провести комплексную оценку почвенных микробиологических показателей в районах исследования и сравнить их с фоновыми аналогами.

Выявлено, что городские почвы Норильской агломерации характеризовались низкими значениями микробной биомассы как по сравнению с фоновыми объектами, так и по сравнению с другими городами, расположенными в арктической зоне. При этом микробные сообщества обладали достаточной активностью, о чем свидетельствуют сопоставимые с фоном и другими регионами значения показателя базального дыхания. Несмотря на низкие значения микробной биомассы в отдельных районах выявлено увеличение функционального разнообразия сообществ по сравнению с фоновыми почвами. В городских почвах, как правило, преобладали микроорганизмы, способные разлагать легкодоступные соединения — углеводы и карбоксильные кислоты, но в то же время доля микроорганизмов, утилизирующих труднорастворимые соединения, на некоторых участках достигала 20 %.

В городских почвах выявлено увеличение численности культивируемых сапротрофных, олиготрофных бактерий и микроскопических грибов по сравнению с фоновыми, хотя фактические значения численности анализируемых групп микроорганизмов низкие. Санитарно-гигиеническое состояние городских почв агломерации оценено в большинстве случаев как умеренно опасное, отмечено

увеличение численности групп БГКП, энтеробактерий и оппортунистических микромицетов, что характерно для городских экосистем.

В целом, городские почвы Норильской агломерации имеют низкие значения количественных показателей микробных сообществ (численность культивируемых микроорганизмов, микробная биомасса), вероятно, из-за сочетания сурового климата и мощной антропогенной нагрузки развитой промышленности. Однако городская зеленая инфраструктура может формировать ниши для развития микроорганизмов, о чем свидетельствует увеличение численности культивируемых групп бактерий и микроскопических грибов в городских почвах по сравнению с фоном, высокая активность микроорганизмов, увеличение функционального разнообразия в отдельных районах. Полученные результаты еще больше подчеркивают важность разработки концепций озеленения и благоустройства городов Арктики с учетом комплексного подхода: анализ климатических условий, физико-химических свойств почв, подбор ассортимента растений и разработка технологий содержания и ухода за зелеными насаждениями.

Список литературы / References

1. Hugelius G, Strauss J, Zubrzycki S, Harden JW, Schuur EAG, Ping CL, et al. Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps. *Biogeosciences*. 2014;11(23):6573–6593. doi: 10.5194/bg-11-6573-2014.
2. Strauss J, Schirrmeister L, Grosse G, Fortier D, Hugelius G, Knoblauch C, et al. Deep Yedoma permafrost: A synthesis of depositional characteristics and carbon vulnerability. *Earth-Sci Rev*. 2017;172:75–86. doi: 10.1016/j.earscirev.2017.07.007
3. Blaud A, Lerch TZ, Phoenix GK, Osborn AM. Arctic soil microbial diversity in a changing world. *Research in microbiology*. 2015;166(10):796–813. doi: 10.1016/j.resmic.2015.07.013
4. Malard LA, Pearce DA. Microbial diversity and biogeography in Arctic soils. *Environmental microbiology reports*. 2018;10(6):611–625. doi:10.1111/1758-2229.12680
5. Lulakova P, Perez-Mon C, Santruckova H, Ruethi J, Frey B. High-alpine permafrost and active-layer soil microbiomes differ in their response to elevated temperatures. *Frontiers in microbiology*. 2019;10:668. doi: 10.3389/fmicb.2019.00668
6. Frossard A, De Maeyer L, Adamczyk M, Svenning M, Verleyen E, Frey B. Microbial carbon use and associated changes in microbial community structure in high-Arctic tundra soils under elevated temperature. *Soil Biology and Biochemistry*. 2021;162:108419. doi: 10.1016/j.soilbio.2021.108419
7. Son D, Lee EJ. Soil microbial communities associated with three arctic plants in different local environments in Ny-Alesund, Svalbard. *J Microbiol Biotechnol*. 2022;32(10):1275–1283. doi: 10.4014/jmb.2208.08009
8. Blume-Werry G, Klaminder J, Krab EJ, Monteux S. Ideas and perspectives: Alleviation of functional limitation by soil organisms is key to climate feedbacks from arctic soils. *Biogeosciences*. 2023;20:1979–1990. doi: 10.5194/bg-20-1979-2023
9. Pegoraro E, Mauritz M, Bracho R, Ebert C, Dijkstra P, Hungate BA, Konstantinidis KT, et al. Glucose addition increases the magnitude and decreases the age of soil respired carbon in a long-term permafrost incubation study. *Soil Biology and Biochemistry*. 2019;129:201–211. doi: 10.1016/j.soilbio.2018.10.009
10. Prater I, Zubrzycki S, Buegger F, Zoor-Füllgraff LC, Angst G, Dannenmann M, et al. From fibrous plant residues to mineral-associated organic carbon—the fate of organic matter in Arctic permafrost soils. *Biogeosciences*. 2020;17:3367–3383. doi: 10.5194/bg-17-3367-2020
11. Abakumov E, Petrov A, Polyakov V, Nizamutdinov T. Soil organic matter in urban areas of the Russian arctic: a review. *Atmosphere*. 2023;14(6):997. doi: 10.3390/atmos14060997
12. Sevastyanov DV, Isachenko TE, Guk EN. Norilsk region: from the peculiarities of nature to the practice of development. *Vestnik of Saint-Petersburg University. Earth Sciences*. 2014;(3):82–94. (In Russ.).
Севастьянов Д.В., Исаченко Т.Е., Гук Е.Н. Норильский регион: от природной специфики к практике освоения // Вестник СПбГУ. Сер. 7. 2014. Вып. 3. С. 82–94.

13. Ananyeva ND, Susyan EA, Chernova OV, Wirth S. Microbial respiration activities of soils from different climatic regions of European Russia. *Euro J Soil Biol.* 2008;44(2):147–157. doi: 10.1016/j.ejsobi.2007.05.002
14. Campbell CD, Chapman SJ, Cameron CM, Davidson MS, Potts JM. A rapid microtiter plate method to measure carbon dioxide evolved from carbon substrate amendments so as to determine the physiological profiles of soil microbial communities by using whole soil. *Appl Environ Microbiol.* 2003;69(6):3593–3599. doi: 10.1128/AEM.69.6.3593-3599.2003
15. Moscatelli MC, Secondi L, Marabottini R, Papp R, Stazi SR, Mania E, et al. Assessment of soil microbial functional diversity: land use and soil properties affect CLPP-MicroResp and enzymes responses. *Pedobiologia.* 2018;66:36–42. doi: 10.1016/j.pedobi.2018.01.001
16. Domsch KH, Gams W, Anderson TH. *Compendium of Soil Fungi.* 2nd ed. Ehing, Germany: IHW Verlag; 2007.
17. Seifert K, Morgan-Jones G, Gams W, Kendrick B. *The genera of Hyphomycetes.* Reus, Spain: Utrecht CBS; 2011.
18. De Hoog GS, Guarro J, Gene J, Ahmed S, Al-Hatmi AMS, Figueras MJ. *Atlas of Clinical Fungi.* 4th edition. Hilversum, Netherlands: Foundation Atlas of Clinical Fungi; 2020.
19. Satton D, Fotergill A, Rinaldi M. *Opredelitel' patogennykh i uslovno-patogennykh gribov* [Identifier of pathogenic and opportunistic fungi]. Moscow: Mir publ.; 2001. (In Russ.).
Саттон Д., Фотергилл А., Ринальди М. Определитель патогенных и условно-патогенных грибов. М.; Мир, 2001. 486 с.
20. Vasenev VI, Ananyeva ND, Makarov OA. Specific features of the ecological functioning of urban soils in Moscow and Moscow oblast. *Eurasian Soil Science.* 2012;(2):224–235. (In Russ.).
Васенев В.И., Ананьева Н.Д., Макаров О.А. Особенности эколого-гического функционирования кон-структоземов на территории Москвы и Московской области // Почвоведение. 2012. № 2. С. 224–235.
21. Ivashchenko KV, Ananyeva ND, Vasenev VI, Kudayarov VN, Valentini R. Biomass and respiration activity of soil microorganisms in anthropogenically transformed ecosystems (moscow region). *Eurasian Soil Science.* 2014;(9):1077–1088. (In Russ.). doi: 10.7868/S0032180X14090056
Иващенко К.В., Ананьева Н.Д., Васенев В.И., Кудяров В.Н., Валентини Р. Биомасса и дыхательная активность почвенных микроорганизмов в антропогенно преобразованных экосистемах (Московская область) // Поч-воведение. 2014. № 4. С. 892–903. doi:10.7868/S0032180X14090056
22. Ananyeva ND, Sushko SV, Ivashchenko KV, Vasenev VI. Soil microbial respiration in subtaiga and forest-steppe ecosystems of European Russia: field and laboratory approaches. *Eurasian Soil Science.* 2020;53(10):1492–1501. doi: 10.1134/S106422932010004X
23. Korneykova MV, Vasenev VI, Saltan NV, Slukovskaya MV, Soshina AS, Zavodskikh MS, et al. Analysis of CO₂ Emission from urban soils of the Kola Peninsula (European Arctic). *Eurasian Soil Science.* 2023;56(11):1653–1666. doi: 10.1134/S1064229323601749
24. Ananyeva ND, Blagodatskaya EV, Demkina TS. Estimating the resistance of soil microbial complexes to natural and anthropogenic impacts. *Eurasian Soil Science.* 2002;(5):580–587. (In Russ.).
Ананьева Н.Д., Благодатская Е.В., Демкина Т.С. Оценка устойчивости микробных комплексов почв к природным и антропогенным воздействиям // Почвоведение. 2002. № 5. С. 580–587.
25. Anderson TH, Domsch KH. Soil microbial biomass: The eco-physiological approach. *Soil Biol Biochem.* 2010;42(12):2039–2043. doi: 10.1016/j.soilbio.2010.06.026
26. Insam H, Parkinson D, Domsch KH. Influence of macroclimate on soil microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry.* 1989;21(2):211–221. doi: 10.1016/0038-0717(89)90097-7
27. Emmerling C, Schloter M, Hartmann A, Kandeler E. Functional diversity of soil organisms — a review of recent research activities in Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science.* 2002;165(4):408–420. doi: 10.1002/1522--2624(200208)165:4<408::AID-JPLN408>3.0.CO;2-3
28. Zak JC, Willig MR, Moorhead DL, Wildman HG. Functional diversity of microbial communities: A quantitative approach. *Soil Biology and Biochemistry.* 1994;26(9):1101–1108. doi: 10.1016/0038-0717(94)90131-7
29. Brodsky OL, Shek KL, Dinwiddie D, Bruner SG, Gill AS, Hoch JM, et al. Microbial communities in bioswale soils and their relationships to soil properties, plant species, and plant physiology. *Frontiers in Microbiology.* 2019;10:2368. doi: 10.3389/fmicb.2019.02368
30. Han X, Wang R, Guo W, Pang X, Zhou J, Wang Q, et al. Soil microbial community response to land use and various soil elements in a city landscape of north China. *Afr J Biotechnol.* 2011;10(73):16554–16565. doi: 10.5897/AJB10.1682

31. Tresh S, Moretti M, Le Bayon RC, Mader P, Zanetta A, Frey D, et al. Urban soil quality assessment — A comprehensive case study dataset of urban garden soils. *Frontiers Environ Sci*. 2018;6:136. doi: 10.3389/fenvs.2018.00136
32. Artamonova VS. *Mikrobiologicheskie osobennosti antropogenno preobrazovannykh pochv Zapadnoi Sibiri* [Microbiological features of anthropogenically transformed soils of Western Siberia]. Novosibirsk; 2002. (In Russ.).
- Артамонова В.С. Микробиологические особенности антропогенно преобразованных почв Западной Сибири. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2002. 225 с.
33. Lysak LV, Lapygina EV. The diversity of bacterial communities in urban soils. *Eurasian Soil Science*. 2018;(9):1108—1114. (In Russ.). doi: 10.1134/S0032180X18090071
- Лысак Л.В., Лапыгина Е.В. Разнообразие бактериальных сообществ городских почв // Почвоведение. 2018. № 9. С. 1108—1114. doi: 10.1134/S0032180X18090071
34. Korneykova MV, Vasenev VI, Nikitin DA, Soshina AS, Dolgikh AV, Sotnikova YL. Urbanization Affects soil microbiome profile distribution in the Russian arctic region. *Int J Environ Res Public Health*. 2021;18(21):11665. doi: 10.3390/ijerph182111665
35. Korneykova MV, Vasenev VI, Nikitin DA, Dolgikh AV, Soshina AS, Myazin VA, et al. Soil microbial community of urban green infrastructures in a polar city. *Urban Ecosyst*. 2022;25:1399—1415. doi: 10.1007/s11252-022-01233-8
36. Turchanovskaya NS, Bogdanova OY. Microbiological study of the soil of the city of Murmansk. *Advances in current natural sciences*. 2011;(8):72. (In Russ.).
- Турчановская Н.С., Богданова О.Ю. Микробиологическое исследование почвы города Мурманска // Успехи современного естествознания. 2011. № 8. С. 72.
37. Peretrukhina AT. Sanitary and microbiological studies of soils in Murmansk and Murmansk region. *International Journal of Experimental Education*. 2011;(6):14—16. (In Russ.).
- Перетрухина А.Т. Санитарно-микробиологические исследования почв в г. Мурманске и Мурманской области // Международный журнал экспериментального образования. 2011. № 6. С. 14—16.
38. Marfenina OE, Kulko AB, Ivanova AE, Sogonov MV. The microfungus communities in the urban outdoor environment. *Mycology and phytopathology*. 2002;36(4):22—32. (In Russ.).
- Марфенина О.Е., Кулько А.Б., Иванова А.Е., Согонов М.В. Мик-роскопические грибы во внешней среде города // Микология и фитопатология. 2002. Т. 36. № 4. С. 22—32.
39. Stoma GV, Manucharova NA, Belokopytova NA. Biological activity of microbial communities in soils of some Russian cities. *Eurasian Soil Science*. 2020;53:760—771. doi: org/10.1134/S1064229320060125

Об авторах:

Корнейкова Мария Владимировна — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник центра «Смарт технологии устойчивого развития городской среды в условиях глобальных изменений», заместитель директора по научной работе Аграрно-технологического института, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, г. Москва, ул. Миклухо Маклая, д. 6; e-mail: korneykova.maria@mail.ru
ORCID: 0000-0002-6167-1567 SPIN-код: 8258-4976

Салтан Наталья Владимировна — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории декоративного цветоводства и озеленения, Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А. Аврорина — обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр» Российской Академии наук, Российская Федерация, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкрн. Академгородок, д. 18а; e-mail: saltan.natalya@mail.ru
ORCID: 0000-0002-5905-9774 SPIN-код: 6405-0697

Козлова Екатерина Витальевна — кандидат биологических наук, младший научный сотрудник центра «Смарт технологии устойчивого развития городской среды в условиях глобальных изменений» Аграрно-технологического института, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, г. Москва, ул. Миклухо Маклая д. 6; e-mail: kozlova-ev@rudn.ru
ORCID: 0000-0003-4325-6930 SPIN-код: 8210-3343

Васильева Мария Николаевна — лаборант-исследователь центра «Смарт технологии устойчивого развития городской среды» в условиях глобальных изменений Аграрно-технологического института, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, г. Москва, ул. Миклухо Маклая, д. 6; e-mail: vasilyeva-mn@rudn.ru
ORCID: 0000-0002-3142-3781 SPIN-код: 9356-2089

Давыдова Полина Денисовна — лаборант центра «Смарт технологии устойчивого развития городской среды в условиях глобальных изменений» Аграрно-технологического института, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, г. Москва, ул. Миклухо Маклая, д. 6; e-mail: davydova-pd@rudn.ru
ORCID: 0000-0002-3127-8334

Бережной Егор Дмитриевич — лаборант центра «Смарт технологии устойчивого развития городской среды в условиях глобальных изменений» Аграрно-технологического института, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, г. Москва, ул. Миклухо Маклая, д. 6; e-mail: berezhnoy_ed@pfur.ru

About the authors:

Korneykova Maria Vladimirovna — Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Center for Smart Technologies for Sustainable Development of the Urban Environment under the Global Change, Deputy Director for Research, Agrarian and Technological Institute, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya st. Moscow, 117198, Russian Federation; e-mail: korneykova.maria@mail.ru
ORCID: 0000-0002-6167-1567 SPIN-code: 8258-4976

Saltan Natalia Vladimirovna — Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Decorative Floriculture and Landscaping, Polar Alpine Botanical Garden-Institute — Subdivision of the Federal Research Centre, Kola Science Centre of Russian Academy of Sciences, 18a Akademgorodok microdistrict, Apatity, Murmansk Region, 184209, Russian Federation; e-mail: saltan.natalya@mail.ru
ORCID: 0000-0002-5905-9774 SPIN-code: 6405-0697

Kozlova Ekaterina Vitalievna — Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Center for Smart Technologies for Sustainable Development of the Urban Environment under the Global Change, Agrarian and Technological Institute, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya st. Moscow, 117198, Russian Federation; e-mail: kozlova-ev@rudn.ru
ORCID 0000-0003-4325-6930 SPIN-code: 8210-3343

Vasilyeva Maria Nikolaevna — Laboratory Research Assistant, Center for Smart Technologies for Sustainable Development of the Urban Environment under the Global Change, Agrarian and Technological Institute, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya st. Moscow, 117198, Russian Federation; e-mail: vasilyeva-mn@rudn.ru
ORCID: 0000-0002-3142-3781 SPIN-code: 9356-2089

Davydova Polina Denisovna — Laboratory Assistant, Center for Smart Technologies for Sustainable Development of the Urban Environment under the Global Change, Agrarian and Technological Institute, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya st. Moscow, 117198, Russian Federation; e-mail: davydova-pd@rudn.ru
ORCID: 0000-0002-3127-8334

Berezhnoi Egor Dmitrievich — Laboratory Assistant, Center for Smart Technologies for Sustainable Development of the Urban Environment under the Global Change, Agrarian and Technological Institute, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya st. Moscow, 117198, Russian Federation; e-mail: berezhnoy_ed@pfur.ru