



## Почвоведение и агрохимия Soil science and agrochemistry

DOI: 10.22363/2312-797X-2025-20-3-417-432

EDN WFHECS

УДК 579.262:502.3(268.45)

Научная статья / Research article

### Микробное сообщество прибрежной зоны Кольского залива Баренцева моря в условиях антропогенной нагрузки

Е.В. Козлова  , В.А. Мязин , М.Ш. Мурзаева 

Российский университет дружбы народов, г. Москва, Российская Федерация

 kozlova\_ev@pfur.ru

**Аннотация.** Приведены результаты комплексного исследования состава и структуры микробных сообществ прибрежных грунтов Кольского залива Баренцева моря в условиях антропогенного загрязнения. Отмечено общее снижение таксономического и функционального разнообразия микробных сообществ. Наиболее разнообразное и устойчивое микробное сообщество зафиксировано в почве супралиторальной зоны, которая в меньшей степени подвержена химическому загрязнению и испытывает только рекреационную нагрузку. Таксономическая структура микробиома в зоне загрязнения нефтепродуктами отличалась повышением долевого участия классов *Proteobacteria* для бактерий и *Sordariomycetes* для грибов, отмечено снижение разнообразия и выравнивания сообществ. Высокий уровень загрязнения нефтепродуктами и тяжелыми металлами привел к увеличению долевого участия групп бактерий, адаптированных к анаэробным условиям, и паразитических групп микроскопических грибов. Показаны достоверные положительные корреляции содержания нефтепродуктов с группами бактерий, участвующими в окислении серы, и отрицательные — с микроорганизмами азотного цикла и микоризообразователями. Выявлена положительная связь микоризообразующих грибов с элементами минерального питания и отрицательная связь между функциональными группами азотного цикла и содержанием тяжелых металлов (Cr, Fe, Ni, As, Se, Mo). Отмечено сокращение обилия углеводородокисляющих бактерий на участке, загрязненном нефтепродуктами, что может указывать на высокую токсичность загрязнения и недостаточную эффективность анаэробной деградации.

**Ключевые слова:** Арктика, прибрежные грунты, нефтепродукты, тяжелые металлы, микробиом, функциональное разнообразие микробиома, высокопроизводительное секвенирование

© Козлова Е.В., Мязин В.А., Мурзаева М.Ш., 2025



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

**Вклад авторов:** Козлова Е.В. — анализ и обработка полученных данных, написание текста; Мязин В.А. — концепция и дизайн исследования; Мурзаева М.Ш. — сбор и обработка материалов. Все авторы ознакомились с окончательной версией рукописи и одобрили ее.

**Финансирование.** Полевые работы и химический анализ образцов выполнены в рамках темы НИР по госзаданию FSSF-2024–0023. Анализ данных секвенирования проведен при финансовой поддержке проекта № 202103–2–000 Системы грантовой поддержки научных проектов РУДН.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**История статьи:** поступила в редакцию 5 июня 2025 г., принята к публикации 14 июля 2025 г.

**Для цитирования:** Козлова Е.В., Мязин В.А., Мурзаева М.Ш. Микробное сообщество прибрежной зоны Кольского залива Баренцева моря в условиях антропогенной нагрузки // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. 2025. Т. 20. № 3. С. 417–432. doi: 10.22363/2312-797X-2025-20-3-417-432 EDN: WFHECS

## Microbial community of the Coastal Zone of Kola Bay under anthropogenic impact

Ekaterina V. Kozlova  , Vladimir A. Myazin , Milana Sh. Murzaeva 

RUDN University, Moscow, Russian Federation

 kozlova\_ev@pfur.ru

**Abstract.** This study presents the results of a comprehensive research of the composition and structure of microbial communities in the coastal soils of Kola Bay, Barents Sea, under conditions of anthropogenic pollution. A general decline in the taxonomic and functional diversity of microbial communities was observed. The most diverse and stable microbial community was found in the supralittoral zone soil, which is less affected by chemical pollution and subjected only to recreational pressure. The taxonomic structure of the microbiome in the oil-polluted zone showed an increased ratio of *Proteobacteria* among bacteria and *Sordariomycetes* among fungi, along with a decrease in community diversity and evenness. High levels of oil and heavy metal contamination led to an increased ratio of bacterial groups adapted to anaerobic conditions and parasitic groups of microscopic fungi. Significant positive correlations were found between oil product content and bacterial groups involved in sulfur oxidation, and negative correlations with nitrogen-cycle microorganisms and mycorrhizal fungi. A positive relationship was identified between mycorrhizal fungi and mineral nutrient elements, and a negative relationship between nitrogen-cycle functional groups and heavy metal content (Cr, Fe, Ni, As, Se, Mo). A decline in the abundance of hydrocarbon-oxidizing bacteria was noted in the oil-contaminated area, possibly indicating high toxicity of the pollution and insufficient efficiency of anaerobic degradation.

**Keywords:** Arctic, coastal substrates, oil, heavy metals, microbiome, functional diversity of microbiome, high-throughput sequencing

**Author contributions:** Kozlova E.V. — data analysis and processing, manuscript writing; Myazin V.A. — study concept and design; Murzaeva M.Sh. — data collection and processing. All authors reviewed and approved the final version of the manuscript.

**Funding.** Fieldwork and chemical analysis of samples were conducted within the framework of the research project under state contract FSSF-2024–0023. Sequencing data analysis was supported by project No. 202103–2–000 of the RUDN University Grant Support System for Scientific Projects.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interests.

**Article history:** received 5 June 2025; accepted 14 July 2025.

**For citation:** Kozlova EV, Myazin VA, Murzaeva MSh. Microbial community of the coastal zone of the Kola Bay of the Barents Sea under anthropogenic pressure. *RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries*. 2025;20(3):417–432. (In Russ.). doi: 10.22363/2312-797X-2025-20-3-417-432 EDN: WFHECS

## Введение

Прибрежные участки арктических морей на урбанизированных территориях подвергаются интенсивной техногенной нагрузке со стороны предприятий теплоэнергетики, городского коммунального хозяйства и транспорта, усиливая антропогенное давление на арктические экосистемы, характеризующиеся низкими температурами, ограниченной доступностью питательных веществ и специфическим составом микробных сообществ, метаболический потенциал которых становятся ключевым фактором, определяющим устойчивость экосистемы и их способность к восстановлению после загрязнения [1, 2]. В то же время длительное загрязнение территории может вызвать значительное изменение таксономического состава и метаболических функций микробных сообществ.

Микробиом прибрежных территорий арктических морей вызывает все больший интерес в условиях изменения климата и усиления антропогенного влияния [3–5]. Проведенные ранее исследования прибрежных грунтов Кольского залива были посвящены описанию количественных характеристик микробиома субаквальных почв [6] и разнообразию культивируемого сообщества микроскопических грибов [7] на антропогенно-измененных территориях. Использование высокопроизводительного секвенирования позволяет значительно расширить имеющиеся представления о составе, структуре, функциях и метаболических особенностях микроорганизмов.

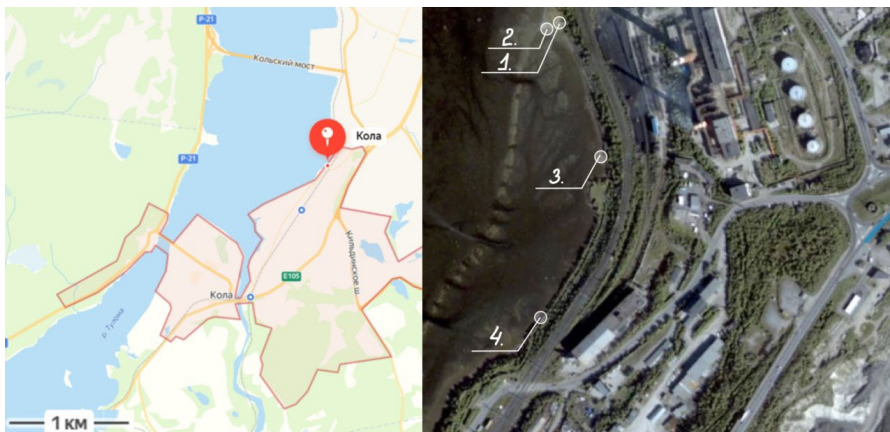
**Цель исследования** — оценка таксономического и функционального разнообразия микробиома почв и грунтов литоральной и супралиторальной зон Кольского залива в условиях антропогенной нагрузки.

## Материалы и методы исследования

**Участки исследования.** Объектами исследования стали прибрежные почвы и грунты литоральной и супралиторальной зон восточного побережья южного колена Кольского залива в районе города Кола (рис. 1). Территория характеризуется приморским рельефом с чередующимися песчано-илистыми и каменистыми участками. Климат района относится к умеренно-холодному морскому типу. Среднегодовая температура воздуха составляет около  $-1,2^{\circ}\text{C}$ , а среднегодовая сумма осадков достигает 500...600 мм.

На территории имеются признаки деградации прибрежных экосистем — фрагментация растительного покрова и эрозия береговой линии. В непосредственной близости от участков исследования располагаются Мурманская ТЭЦ, бетонный

завод и ряд других предприятий. Прибрежная зона частично используется местными жителями в рекреационных целях.



**Рис. 1.** Карта-схема расположения исследуемых участков с точками отбора проб  
Источник: выполнила М.Ш. Мурзаева с использованием сервиса Яндекс.Карты.

**Fig. 1.** Map showing the location of the study areas with sampling points  
Source: compiled by M.Sh. Murzaeva using the Yandex.Maps service.

**Отбор образцов.** Образцы почв и грунтов отбирали с участков, отличающихся степенью антропогенной нагрузки (табл. 1).

Таблица 1

**Характеристика участков отбора проб**

| Участок | Экологическая зона | Тип                                                | Растительность                                                                                  |
|---------|--------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1       | Литораль           | Песчаный субстрат                                  | Отсутствует                                                                                     |
| 2       | Супралитораль      | Песчаные маршевые дерновые почвы слабообразованные | <i>Carex</i> sp.<br><i>Plantago maritima</i> ssp. <i>subpolaris</i><br><i>Juncus atrofuscus</i> |
| 3       | Литораль           | Мелко-каменистый субстрат                          | Отсутствует                                                                                     |
| 4       | Литораль           | Мелко-каменистый субстрат                          | Отсутствует                                                                                     |

Источник: составлено В.А. Мязиным.

Table 1

**Characteristics of sampling sites**

| Site | Ecological zone | Type                                         | Plants                                                                                          |
|------|-----------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1    | Littoral        | Sand                                         | Absent                                                                                          |
| 2    | Supralittoral   | Underdeveloped sod soil on the sand deposits | <i>Carex</i> sp.<br><i>Plantago maritima</i> ssp. <i>subpolaris</i><br><i>Juncus atrofuscus</i> |
| 3    | Littoral        | Mixed (pebble, cobble, sand)                 | Absent                                                                                          |
| 4    | Littoral        | Mixed (pebble, cobble, sand)                 | Absent                                                                                          |

Source: compiled by V.A. Myazin.

Участки 1 и 2 испытывают преимущественно рекреационную нагрузку и не имеют явных признаков загрязнения. Участок 3 отличается выраженным загрязнением нефтепродуктами (наличие радужной пленки на воде, пятен на поверхности грунта и специфического запаха), обусловленным, вероятно, деятельностью Мурманской ТЭЦ (сброс неочищенных вод с территории предприятия). Участок 4 не имеет явных признаков загрязнения, не представляет рекреационной ценности, однако потенциально может подвергаться вторичному загрязнению с акватории Кольского залива.

Отбор образцов почв и грунтов осуществляли в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01–2017<sup>1</sup> и ГОСТ 17.4.4.02–2017<sup>2</sup>.

*Химический анализ.* Оценку состояния прибрежных почв и грунтов провели по следующим показателям: значение pH, содержание общего углерода, азота, подвижных форм калия и фосфора, валовое содержание Pb, Zn, Co, Cu, Ni, Cd, As, Mn, V, Cr, Fe, Se, Mo, содержание подвижных форм тяжелых металлов (Pb, Zn, Co, Cu, Ni, Cd) и нефтепродуктов.

Показатель pH определяли потенциометрическим методом в водной вытяжке согласно ГОСТ 26423–85<sup>3</sup>.

Содержание общего углерода определяли методом высокотемпературного каталитического сжигания проб (Vario TOC Select), содержание общего азота — методом Кьельдаля согласно ГОСТ Р 58596–2019<sup>4</sup>, подвижные формы калия и фосфора — методом Кирсанова согласно ГОСТ Р 54650–2011<sup>5</sup>.

Валовое содержание элементов оценивали с использованием портативного РФ-спектрометра Vanta согласно прилагаемой методике XRF Vanta.

Подвижные формы тяжелых металлов определяли согласно М–МВИ-80–2008<sup>6</sup> в ацетатно-аммонийной вытяжке с pH 4.8.

Измерение массовой доли нефтепродуктов в почве и грунтах проводили флуориметрическим методом, основанном на экстракции нефтепродуктов из образца хлористым метилом с последующим измерением интенсивности флуоресценции очищенного экстракта на анализаторе «Флюорат-02» согласно ПНД Ф 16.1:2.21–98<sup>7</sup>.

*Таксономический состав микробного сообщества* определяли с помощью высокопроизводительного секвенирования на платформе Illumina MiSeq в лаборатории BioSpark (Биоспарк).

<sup>1</sup> ГОСТ 17.4.3.01–2017. Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб. М. : Стандартинформ, 2018.

<sup>2</sup> ГОСТ 17.4.4.02–2017. Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. М. : Стандартинформ, 2018.

<sup>3</sup> ГОСТ 26423–85. Межгосударственный стандарт. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, pH и плотного остатка водной вытяжки. М. : Стандартинформ, 2011.

<sup>4</sup> ГОСТ Р 58596–2019. Национальный Стандарт Российской Федерации. Почвы. Методы определения общего азота. М. : Стандартинформ, 2019.

<sup>5</sup> ГОСТ Р 54650–2011. Национальный Стандарт Российской Федерации. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО. М. : Стандартинформ, 2013.

<sup>6</sup> М–МВИ-80–2008. Методика выполнения измерений массовой доли элементов в пробах почв, грунтов и донных отложениях методами атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектроскопии. СПб., 2008.

<sup>7</sup> ПНД Ф 16.1:2.21–98. Количественный химический анализ почв и отходов. Методика измерений массовой доли нефтепродуктов в пробах почв и грунтов флуориметрическим методом на анализаторе жидкости Флюорат-02. М., 2012.

*Статистическая обработка* и визуализация выполнены в среде R. Индексы  $\alpha$ -разнообразия (Шеннона, Симпсона, Пиелу, Чао1, Фишера и число выявленных операционных таксономических единиц) оценивали с помощью пакета *vegan* 2.6–8; для оценки  $\beta$ -разнообразия на уровне классов строили дендрограммы на основе матрицы несходства Брея — Кертиса. Функциональное разнообразие оценено с использованием баз данных *Functional Annotation of Prokaryotic Taxa* (для бактерий) и *FunGuild* (для грибов). Коэффициенты корреляции рассчитывали, используя коэффициент Спирмена, визуализацию выполняли с помощью функции *ggcorrplot*.

## Результаты исследования и обсуждение

*Оценка степени загрязнения прибрежных почв и грунтов.* Образцы почвы и грунтов с обследованных участков побережья Кольского залива различаются по содержанию основных элементов, тяжелых металлов и нефтепродуктов.

Участки 1 и 2, испытывающие в основном рекреационную и аэротехногенную нагрузку, характеризовались незначительным химическим загрязнением. Величина pH находилась в диапазоне от 7,38 (слабощелочная) до 6,21 (нейтральная). Степень обеспеченности почвы и грунтов подвижным фосфором и калием — от средней до очень высокой. Соотношение C/N в грунтах литорали составляло 5...7, в прибрежной почве — 13. Содержание нефтепродуктов в прибрежной почве — 0,031 г/кг, в грунтах литорали — 0,067 г/кг. Выявлены превышение установленных нормативов по содержанию Cd и As, а также повышенные относительно фоновых значений концентрации Mo, V и Mn.

На участке 3, загрязненном нефтепродуктами, величина pH находилась в среднекислом диапазоне (4,64). Степень обеспеченности загрязненного грунта подвижным фосфором и калием очень низкая. В загрязненном грунте соотношение C/N составляло 278, что обусловлено наличием большого количества углеводов. Содержание нефтепродуктов на участке достигало 137 г/кг. Химический анализ показал превышение установленных нормативов и фоновых концентраций ряда химических элементов: Ni, Cd, As, V, Mo, Fe, Mn, S, Se и Cr, что указывает на загрязнение тяжелыми нефтепродуктами (мазут). Данный тип загрязнения типичен для территорий, находящихся в зоне влияния предприятий теплоэнергетики [8, 9].

Участок 4 по содержанию основных элементов был сопоставим с участком 1, но отличался более высокими концентрациями Pb, Zn, Cu, Ni и As.

Таким образом, все обследованные участки подвержены антропогенному воздействию, но в разной степени. Индексы загрязнения, рассчитанные для каждого участка, показали, что наиболее загрязненным оказался участок 3, наименее загрязненными — участки 1 и 2. Наименьший показатель экологического риска характерен для песчаных маршевых слабозрелых дерновых почв, максимальный — для загрязненного нефтепродуктами участка литорали (табл. 2).

Таблица 2

**Степень химического загрязнения почв и грунтов (Zc, PLI и NPI)  
и показатель экологического риска (PERI) исследуемых участков**

| Участок | Степень химического загрязнения        |                                    |                                      | Показатель потенци-<br>ального экологического<br>риска PERI |
|---------|----------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
|         | Суммарный показатель<br>загрязнения Zc | Индекс нагрузки<br>загрязнения PLI | Индекс загрязне-<br>ния Немерова NPI |                                                             |
| 1       | 10 (допустимая)                        | 1,2 (умеренная)                    | 2,0 (средняя)                        | 189 (высокий)                                               |
| 2       | 11 (допустимая)                        | 1,3 (умеренная)                    | 2,2 (средняя)                        | 67 (низкий)                                                 |
| 3       | 179 (чрезвычайно<br>опасная)           | 7,7 (чрезвычай-<br>но высокая)     | 27 (сильная)                         | 1021 (чрезвычайно<br>высокий)                               |
| 4       | 25 (умеренно опасная)                  | 2,8 (высокая)                      | 2,7 (средняя)                        | 268 (высокий)                                               |

Источник: составлено В.А. Мязиным.

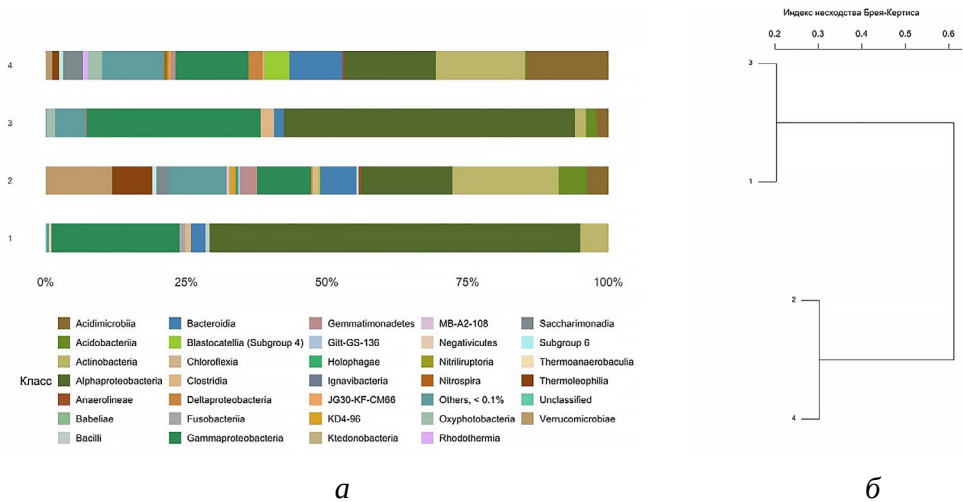
Table 2

**The degree of chemical contamination of soils and grounds (Zc, PLI and NPI)  
and the ecological risk index (PERI) of the studied sites**

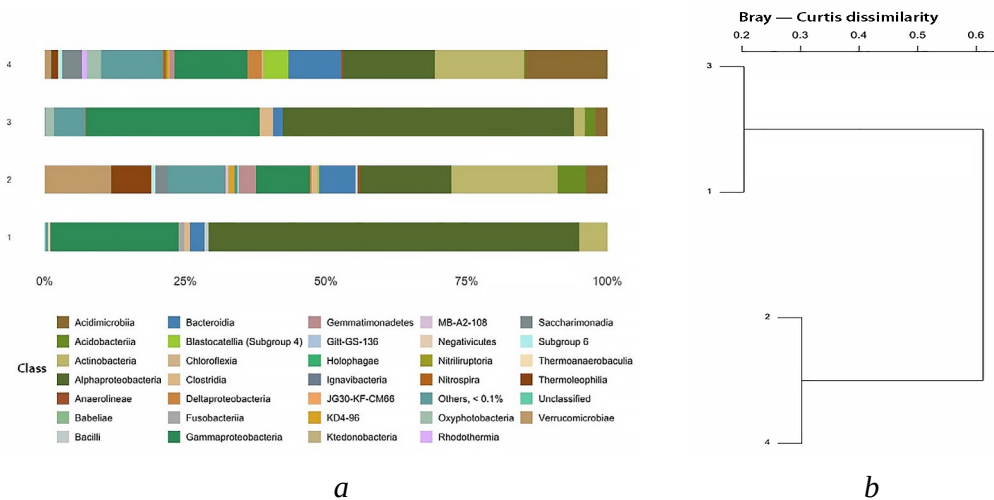
| Site | Degree of chemical contamination |                               |                                | Potential environmental risk<br>index (PERI) |
|------|----------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------|
|      | Total pollution index Zc         | Pollution load<br>index (PLI) | Nemerow pollution<br>index NPI |                                              |
| 1    | 10 (permissible)                 | 1.2 (moderate)                | 2.0 (medium)                   | 189 (high)                                   |
| 2    | 11 (permissible)                 | 1.3 (moderate)                | 2.2 (medium)                   | 67 (low)                                     |
| 3    | 179 (extremely hazardous)        | 7.7 (extremely<br>high)       | 27 (severe)                    | 1021 (extremely high)                        |
| 4    | 25 (moderately hazardous)        | 2.8 (high)                    | 2.7 (medium)                   | 268 (high)                                   |

Source: compiled by V.A. Myazin.

Таксономическая структура микробиома значительно различалась на участках с разной степенью загрязнения. Наибольшее разнообразие бактериального сообщества на уровне классов (рис. 2) выявлено в почве на участке 2: 28 классов с доминированием *Actinobacteria* (18,9 %) и *Alphaproteobacteria* (16,2 %). Бактериальное сообщество на участке 4 представлено 24 классами с доминированием *Alphaproteobacteria* (16,2 %), *Actinobacteria* (15,9 %) и *Acidimicrobiia* (14,6 %). Разнообразие бактериального сообщества аналогичного субстрата, но загрязненного нефтепродуктами (участок 3), снизилось до 12 классов, а в песке (участок 1) составило 10 классов. Оба этих участка характеризовались абсолютным доминированием класса *Alphaproteobacteria* (51,8 и 65,9 %), субдоминировал класс *Gammaproteobacteria* (30,8 и 22,7 %). По индексу Брея — Кертиса наиболее сходными оказались загрязненный нефтепродуктами мелко-каменистый субстрат и песок (индекс 0,2) и мелко-каменистый субстрат с почвой (индекс 0,3).



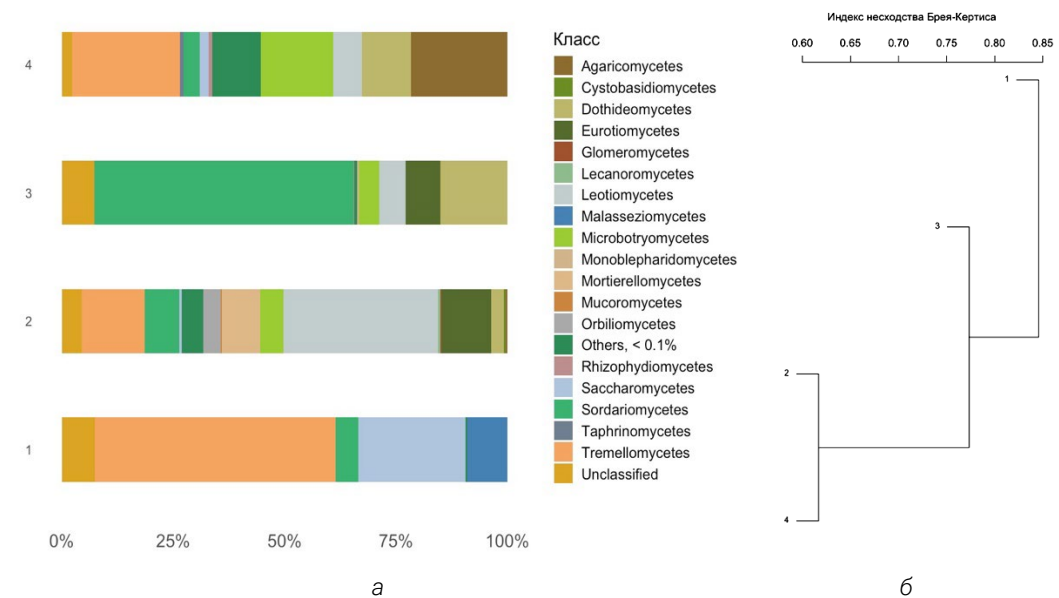
**Рис. 2.** Разнообразие бактериальных сообществ на уровне классов (а) и дендрограмма сходства структуры сообществ (б)  
Источник: выполнено Е.В. Козловой.



**Fig. 2.** Diversity of bacterial communities at the class level (a) and a dendrogram of community structure similarities (b)  
Source: compiled by E.V. Kozlova.

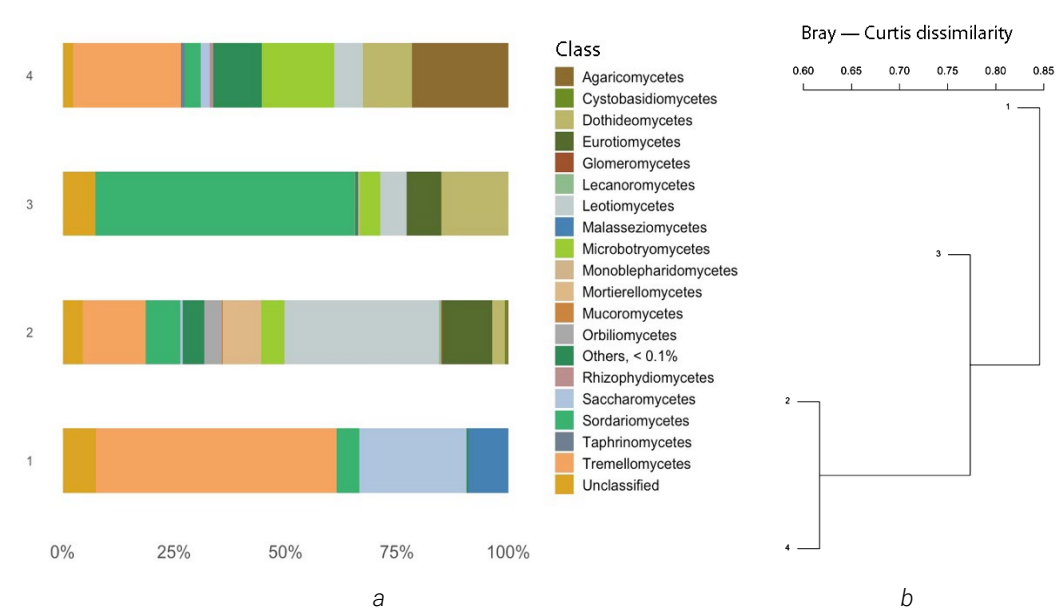
Для грибного сообщества разнообразие также снижалось в ряду: почва (16 классов) — мелко-каменистый субстрат (11 классов) — мелко-каменистый загрязненный субстрат (9 классов) — песок (6 классов). В образцах почвы на участке 2 доминировал класс *Leotiomycetes* (34,6 %), в мелко-каменистом субстрате участка 4 — *Tremellomycetes* (24,1 %) и *Agaricomycetes* (21,7 %). В образце песка на участке 1 доминировали представители класса *Tremellomycetes* (54 %), а на

загрязненном участке 3 — *Sordariomycetes* (58,2 %). Исследуемые участки имели низкое сходство (индексы Брея — Кертиса в диапазоне 0,6...0,88) (рис. 3).



**Рис. 3.** Разнообразие грибных сообществ на уровне классов (а) и дендрограмма сходства структуры сообществ (б)

Источник: выполнено Е.В. Козловой.



**Fig. 3.** Diversity of fungal communities at the class level (a) and a dendrogram of similarity of community structure (b)

Source: compiled by E.V. Kozlova.

Увеличение долевого участия Alpha- и Gamma-Proteobacteria на 35,6 и 17,8 % по сравнению с аналогичным незагрязненным участком 4 подтверждает полученные ранее данные об увеличении доли *Proteobacteria* в ответ на нефтяное загрязнение [10, 11]. На участке 3 отмечен рост обилия представителей класса *Sordariomycetes*, способных осуществлять трансформацию ПАУ [12]. На 12 % возросло обилие грибов класса *Dothideomycetes* в условиях загрязнения нефтепродуктами [10].

Оценка  $\alpha$ -разнообразия микробных сообществ показала, что общее число выявленных операционных таксономических единиц максимально в почве на участке 2 (590 для бактериального сообщества и 147 для грибного) и минимально в песке на участке 1 (88 для бактериального сообщества и 43 для грибного). Индекс разнообразия Шеннона варьировал от 2,2 до 4,4 для бактериального сообщества и от 1,3 до 3,6 для грибного. Доминирование в бактериальном сообществе (индекс Симпсона) было высоким для всех участков, кроме участка 1, и достигало 0,92...0,97. Структура грибного сообщества оказалась более чувствительной к загрязнению: высокие значения индекса Симпсона отмечены для участков 2 и 4, тогда как для участков 1 и 3 они снижались до 0,63...0,64. Показатель выравненности (индекс Пиелу) был невысоким — 0,5...0,71 для бактериального сообщества и 0,25...0,72 для грибного. Индекс Чао1 для бактериального сообщества варьировал от 34 до 168, число редких видов в сообществе было минимально для загрязненного нефтепродуктами участка 3, и максимально — для участка 2; для грибного сообщества значения индекса Чао1 снижались до 5...52, при этом минимальные значения отмечены для участка 1, максимальные — для участка 4. Индекс разнообразия Фишера изменялся от 9,5 до 38,5 для бактериального сообщества и от 1 до 31 для грибного с минимальными значениями для участка 1 и максимальными для участка 2.

Функциональное разнообразие микробиома изученных участков представлено 43 группами для бактерий (рис. 4) и 15 — для грибов (рис. 5). Максимальное разнообразие бактериального сообщества отмечено в почве на участке 2 (30 групп). Для всех участков характерно доминирование групп хемогетеротрофов (25...39 %), аэробных хемогетеротрофов (22...38 %) и неопределенных сапротрофов (49...94 %).

Для наиболее загрязненного участка 3 характерно сокращение функциональных групп до 17 с выпадением групп, ассоциированных с циклом азота (азотное дыхание, фиксация азота, нитритное дыхание, денитрификация, нитрификация, нитратное дыхание, восстановление нитрата), и появление групп, ассоциированных с циклом серы (окисление тиосульфата, серы, сульфидов, соединений серы). При этом доленое участие функциональных групп бактерий, ответственных за разложение углеводов в сообществе, сократилось с 8,5 до 0,27 % на загрязненном нефтепродуктами участке. Это может указывать на токсичный эффект загрязнения на эту группу, что не согласуется с данными, полученными ранее для донных отложений Баренцева моря [13].

Наблюдаемые изменения функциональной структуры бактериального сообщества обусловлены преобладанием анаэробных условий на загрязненном участке, что способствует росту сульфатредуцирующих микроорганизмов,

функционирующих в бескислородных, обогащенных углеводородами условиях. Сульфатредукторы способны осуществлять деструкцию углеводов, однако анаэробный процесс характеризуется низкими скоростями и ограничен доступностью питательных веществ, что не позволяет рассматривать эту группу в качестве эффективных нефтедеструкторов [14]. Сокращение доступного кислорода, токсичность углеводов в отношении отдельных групп микроорганизмов и конкуренция за субстраты (доноры и акцепторы электронов) приводит к сокращению группы бактерий, ассоциированных с азотным циклом.

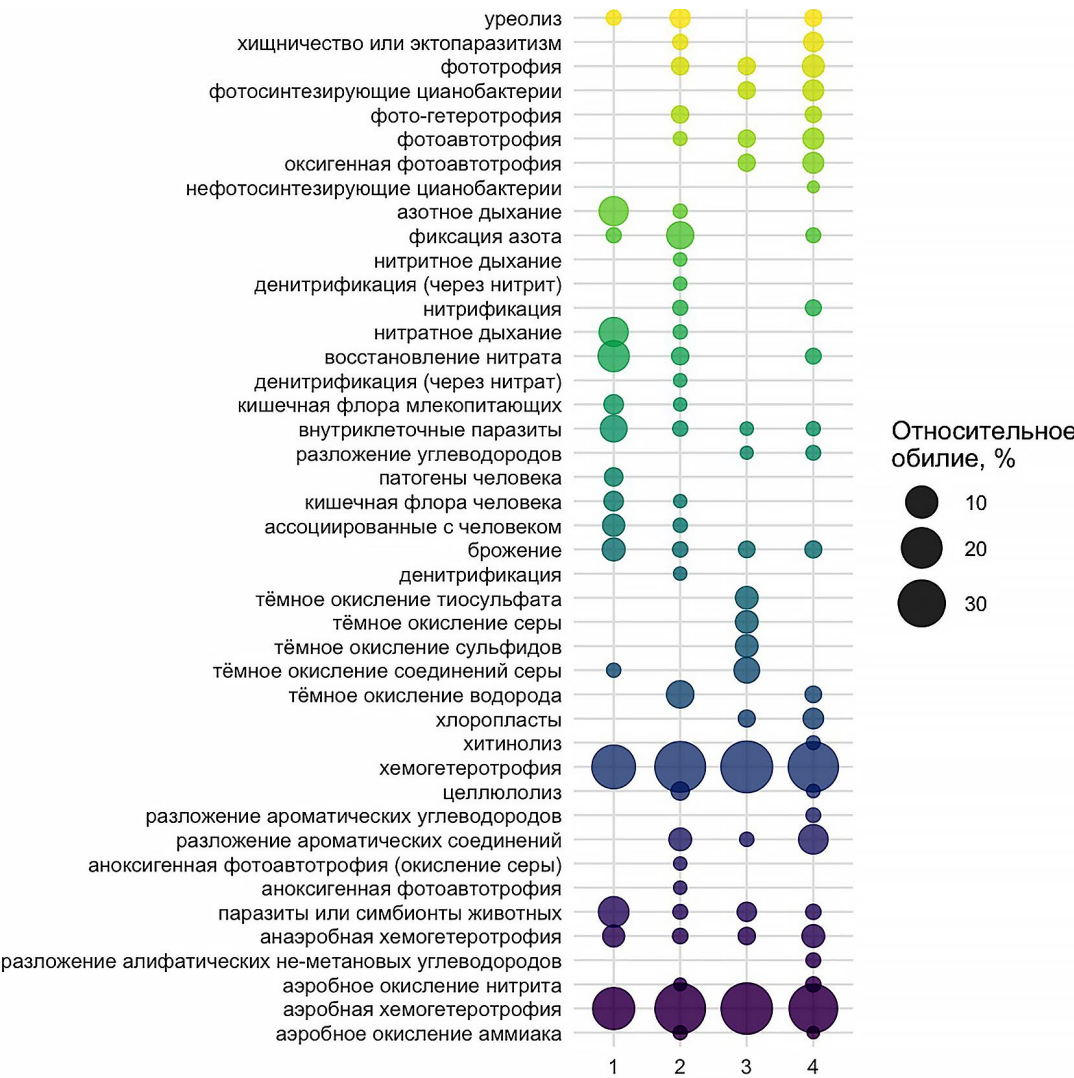
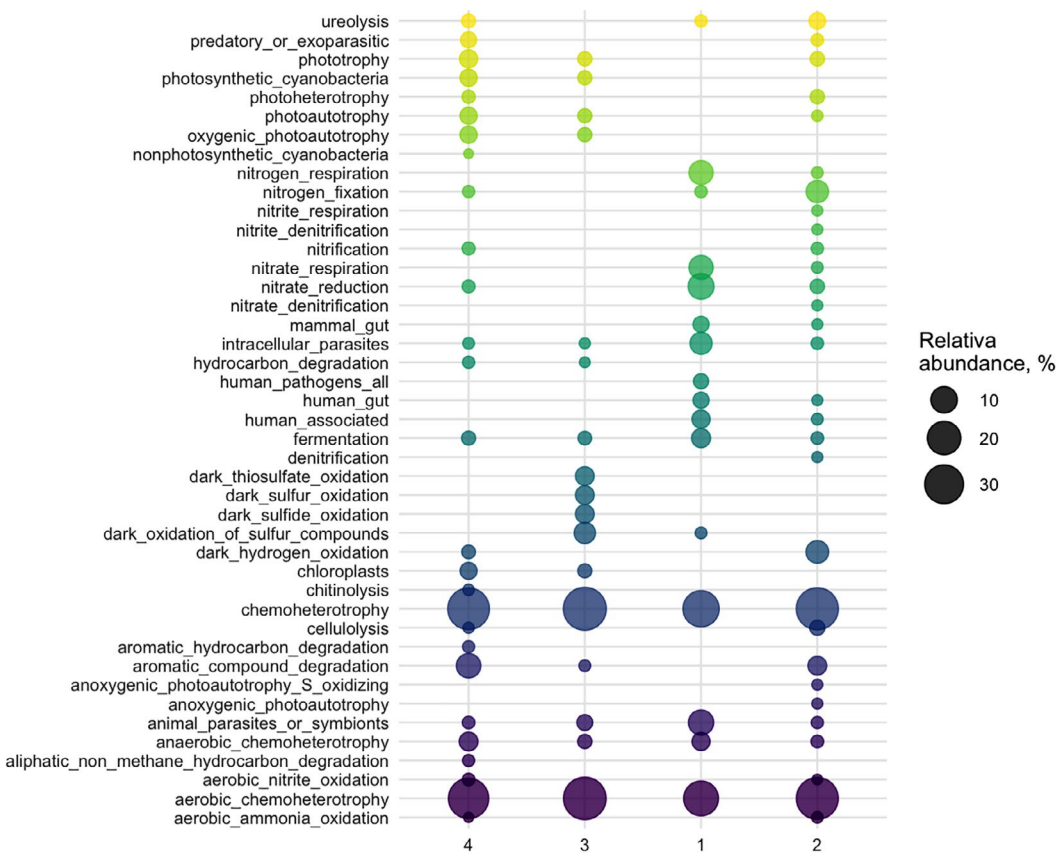
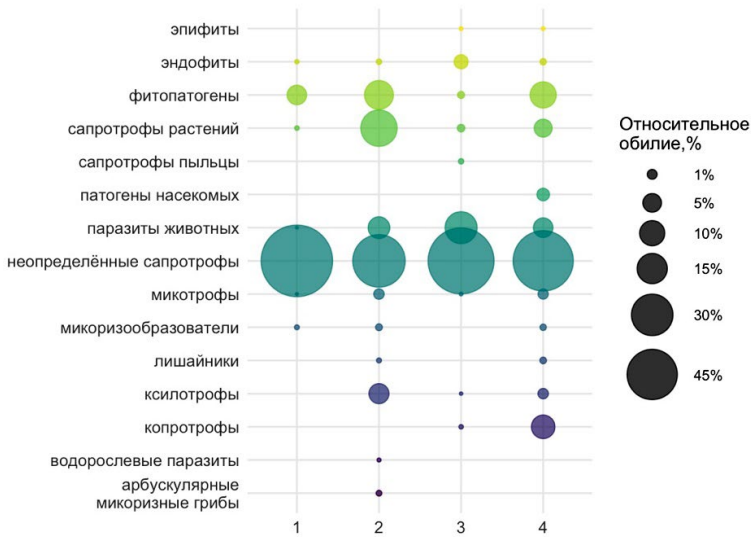


Рис. 4. Относительное обилие функциональных групп бактерий, оцененное с использованием базы данных FAPROTAX

Источник: выполнено Е.В. Козловой.



**Fig. 4.** Relative abundance of bacterial functional groups estimated using the FAPROTAX database  
*Source:* compiled by E.V. Kozlova.



**Рис. 5.** Относительное обилие функциональных групп грибов, оцененное с использованием базы данных FunGuild  
*Источник:* выполнено Е.В. Козловым.



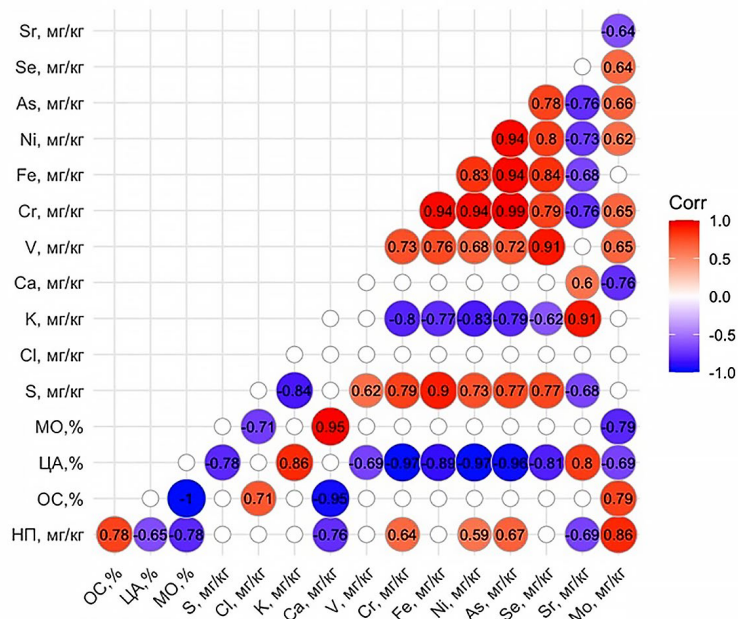
**Fig. 5.** Relative abundance of fungal functional groups estimated using the FUNGuild database

Source: compiled by E.V. Kozlova.

Максимальное разнообразие грибного сообщества отмечено на участке 4 (12 групп). Функциональная структура грибного сообщества представлена в основном неопределенными сапротрофами (49...94 %) и сапротрофами растений (0,06...22,5 %). Наблюдалось угнетение чувствительных и симбиотических групп микоризообразователей (0,09...0,32 %), лишенизированных грибов (0,1...0,3 %) и арбускулярных микоризных грибов (0,18 % только на участке 2) с полным их выпадением из структуры сообщества участка 3, загрязненного нефтепродуктами. При этом отмечено увеличение патогенных и паразитических групп различной природы, особенно фитопатогенов (0,3...13 %) и паразитов животных (0,01...17 %).

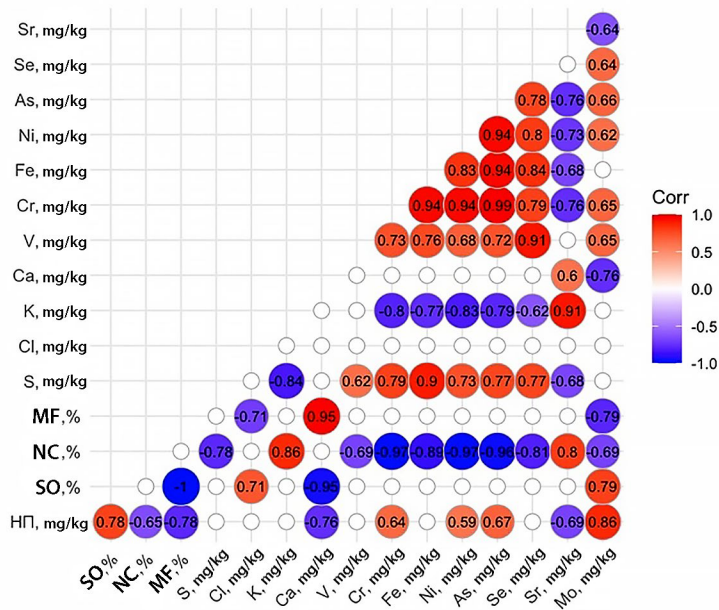
Выявленная функциональная структура показывает общую деградацию сообществ микроскопических грибов и снижение устойчивости экосистем.

Результаты корреляционного анализа демонстрируют значительное влияние содержания ряда элементов и нефтепродуктов на обилие микоризообразователей и бактерий, связанных с окислением серы и циклом азота (рис. 6). Содержание нефтепродуктов положительно коррелировало с бактериями, окисляющими серу ( $p = 0,78$ ) и отрицательно — с бактериями азотного цикла ( $p = -0,65$ ) и микоризообразователями ( $p = -0,78$ ). Сильная положительная корреляция микоризообразователей ( $p = 0,95$ ) с элементами питания демонстрирует важность состава грунтов для развития симбиотрофов. Отрицательные корреляционные связи ( $p = -0,69...-0,97$ ) микробных групп азотного цикла с тяжелыми металлами (Cr, Fe, Ni, As, Se и Mo) подчеркивают их высокую чувствительность к загрязнению [15].



**Рис. 6.** Матрица корреляций (коэффициент Спирмена) между содержанием нефтепродуктов (НП), макро- и микроэлементов и относительным обилием микроорганизмов различных функциональных групп: ОС – окисление серы; СА – цикл азота; МО – микоризообразователи. Отображены только статистически значимые корреляции ( $p < 0,05$ )

Источник: выполнено Е.В. Козловой.



**Fig. 6.** Correlation matrix (Spearman's coefficient) between the content of petroleum products (PP), macro- and microelements, and the relative abundance of microorganisms of various functional groups: SO – sulfur oxidation; NC – nitrogen cycle; MF – mycorrhiza-forming fungi. Only statistically significant correlations ( $p < 0.05$ ) are shown

Source: compiled by E.V. Kozlova.

## Заключение

Проведено исследование микробных сообществ почв и грунтов прибрежных участков Кольского залива, позволившее оценить влияние антропогенной нагрузки различной интенсивности на их состав, структуру и функциональный потенциал. Высокий уровень загрязнения нефтепродуктами и тяжелыми металлами привел к увеличению долевого участия групп бактерий, адаптированных к анаэробным условиям, и паразитических групп микроскопических грибов. Отмечено общее снижение таксономического и функционального разнообразия микробных сообществ. Несмотря на ожидаемый рост углеводородокисляющих бактерий на участке, загрязненном нефтепродуктами, наблюдается сокращение их обилия, что может указывать на высокую токсичность загрязнения и недостаточную эффективность анаэробной деградации. Наиболее разнообразное и устойчивое микробное сообщество зафиксировано в почве супралиторальной зоны, которая в меньшей степени подвержена загрязнению и испытывает только рекреационную нагрузку, поэтому может рассматриваться в качестве эталонной при мониторинге состояния прибрежных почв урбанизированных территорий региона.

## Список литературы / References

1. Yang S, Wen X, Shi Y, Liebner S, Jin H, Perfumo A. Hydrocarbon degraders establish at the costs of microbial richness, abundance and keystone taxa after crude oil contamination in permafrost environments. *Scientific Reports*. 2016;6:37473. doi: 10.1038/srep37473 EDN: YWTEJL
2. Freyria NJ, Gongora E, Greer CW, Whyte LG. High Arctic seawater and coastal soil microbiome co-occurrence and composition structure and their potential hydrocarbon biodegradation. *ISME Communications*. 2024;4(1):ycae100. doi: 10.1093/ismeco/ycae100 EDN: SVKSIA
3. Begmatov S, Savvichev AS, Kadnikov VV, Beletsky AV, Rusanov II, Klyuvitkin AA, Novichkova EA, Mardanov AV, Pimenov NV, Ravin NV. Microbial communities involved in methane, sulfur, and nitrogen cycling in the sediments of the Barents sea. *Microorganisms*. 2021;9(11):2362. doi: 10.3390/microorganisms9112362 EDN: ERPVZV
4. Brioukhanov AL, Kadnikov VV, Rusanov II. Phylogenetic diversity in sulphate-reducing bacterial communities from oxidised and reduced bottom sediments of the Barents sea. *Antonie van Leeuwenhoek*. 2022;115:801–820. doi: 10.1007/s10482-022-01733-9 EDN: COVZSR
5. Stroeva AR, Klyukina AA, Vidishcheva ON, Poludetkina EN, Solovyeva MA, Pyrkin VO, Gavirova LA, Birkeland N-K, Akhmanov GG, Bonch-Osmolovskaya EA, Merkel AY. Structure of benthic microbial communities in the northeastern part of the Barents sea. *Microorganisms*. 2024;12(2):387. doi: 10.3390/microorganisms12020387 EDN: OWGRPQ
6. Korneykova M, Nikitin D, Myazin V. Qualitative and quantitative characteristics of soil microbiome of Barents sea coast, Kola Peninsula. *Microorganisms*. 2021;9(10):2126. doi: 10.3390/microorganisms9102126
7. Isakova EA, Korneykova MV, Myazin VA. The number and species diversity of cultured microfungi on the Barents sea coast. *Mycology and Phytopathology*. 2023;57(4):231–246. (In Russ.). doi: 10.31857/S0026364823040037 EDN: VURGUI
- Исакова Е.А., Корнейкова М.В., Мязин В.А. Численность и видовое разнообразие культивируемых микроскопических грибов побережья Баренцева моря // Микология и фитопатология. 2023. Т. 57. № 4. С. 231–246. doi: 10.31857/S0026364823040037 EDN: VURGUI
8. Elizaryeva EN, Yanbaev YA, Redkina NN, Kudashkina NV, Baykov FG. Assessment of soil pollution in the impact zone of metallurgical industry enterprises. *Bulletin of Orenburg State University*. 2017;(9):8–13. (In Russ.). doi: 10.25198/1814-6457-209-8 EDN: YLQHPS
- Елизарьева Е.Н., Ямбаев Я.А., Редкина Н.Н., Кудашкина Н.В., Байков Ф.Г. Оценка загрязнения почв в зоне влияния предприятий металлургической отрасли // Вестник Оренбургского государственного университета. 2017. № 9 (209). С. 8–13. doi: 10.25198/1814-6457-209-8 EDN: YLQHPS

9. Goncharov G, Soktoev B, Farkhutdinov I, Matveenkov I. Heavy metals in urban soil: contamination levels, spatial distribution and human health risk assessment (the case of Ufa City, Russia). *Environmental Research*. 2024;257:119216. doi: 10.1016/j.envres.2024.119216 EDN: HDSFVS
10. Bell TH, Hassan SED, Lauron-Moreau A, Al-Otaibi F, Hijri M, Yergeau E. Linkage between bacterial and fungal rhizosphere communities in hydrocarbon-contaminated soils is related to plant phylogeny. *ISME Journal*. 2014;8(2):331–343. doi: 10.1038/ismej.2013.149
11. Semenova EM, Babich TL, Sokolova DS, Ershov AP, Raievska YI, Bidzhieva SK, Stepanov AL, Korneykova MV, Myazin VA, Nazina TN. Microbial communities of seawater and coastal soil of Russian Arctic region and their potential for bioremediation from hydrocarbon pollutants. *Microorganisms*. 2022;10(8):1490. doi: 10.3390/microorganisms10081490 EDN: PADTXG
12. Marchand C, St-Arnaud M, Hogland W, Bell TH, Hijri M. Petroleum biodegradation capacity of bacteria and fungi isolated from petroleum-contaminated soil. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2017;116:48–57.
13. Chen S-C, Musat F, Richnow H-H, Krüger M. Microbial diversity and oil biodegradation potential of northern Barents Sea sediments. *Journal of Environmental Sciences (China)*. 2024;146:283–297. doi: 10.1016/j.jes.2023.12.010 EDN: JJOPVO
14. Wartell B, Boufadel M, Rodriguez-Freire L. An effort to understand and improve the anaerobic biodegradation of petroleum hydrocarbons: a literature review. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2021;157:105156. doi: 10.1016/j.ibiod.2020.105156 EDN: BIERMU
15. Hu X, Liu X, Zhang S, Yu C. Nitrogen-cycling processes under long-term compound heavy metal (loids) pressure around a gold mine: Stimulation of nitrite reduction. *Journal of Environmental Sciences (China)*. 2025;147:571–581. doi: 10.1016/j.jes.2023.12.027 EDN: GFVXVY

#### Об авторах:

Козлова Екатерина Витальевна — кандидат биологических наук, младший научный сотрудник центра смарт технологий устойчивого развития городской среды в условиях глобальных изменений, аграрно-технологический институт, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; e-mail: kozlova-ev@rudn.ru  
ORCID: 0000-0003-4325-6930 SPIN-код: 8210-3343

Мязин Владимир Александрович — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник центра смарт технологии устойчивого развития городской среды в условиях глобальных изменений, доцент департамента техносферной безопасности, аграрно-технологический институт, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая д. 6; e-mail: myazin\_va@pfur.ru  
ORCID: 0000-0002-4155-3416 SPIN-код: 9009-0012

Мурзаева Милана Шотаевна — лаборант-исследователь центра Смарт технологии устойчивого развития городской среды в условиях глобальных изменений, ассистент департамента техносферной безопасности, аграрно-технологический институт, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая д. 6; e-mail: murzaeva\_msh@pfur.ru  
ORCID: 0009-0004-6643-0094 SPIN-код: 4766-9700

#### About the authors:

Kozlova Ekaterina Vitalievna — Candidate of Biological Sciences, Junior Researcher of the 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

Myazin Vladimir Alexandrovich — Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher at the Center for Smart Technologies for Sustainable Urban Development under Global Changes, Associate Professor at the Department of Technosphere Safety, Agrarian and Technological Institute, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117198, Russian Federation; e-mail: myazin\_va@pfur.ru  
ORCID: 0000-0002-4155-3416 SPIN-code: 9009-0012

Murzaeva Milana Shotaevna — Research Assistant at the Center for Smart Technologies for Sustainable Urban Development under Global Changes, Assistant at the Department of Technosphere Safety, Agrarian and Technological Institute, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117198, Russian Federation; e-mail: murzaeva\_msh@pfur.ru  
ORCID: 0009-0004-6643-0094 SPIN-code: 4766-9700