

ХИМИЧЕСКАЯ И МИКРОБИОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОЧВ, ОБРАЗОВАВШИХСЯ ПРИ САМОЗАРАСТАНИИ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ РУД В СУБАРКТИКЕ

© 2025 г. Е. А. Красавцева^{a, b, *}, А. С. Сошина^{b, d}, Т. К. Иванова^{a, c},
И. А. Мосендз^{a, c}, В. В. Максимова^{a, b}, М. В. Корнейкова^{b, d}, Н. В. Фокина^b,
А. А. Чапоргина^b, Е. С. Латюк^b, И. Р. Елизарова^b, А. А. Широкая^c,
А. В. Долгих^e, М. В. Слуковская^{a, c, d}

^aЦентр наноматериаловедения Федерального исследовательского центра “Кольский научный центр Российской академии наук”, ул. Ферсмана, 14, Апатиты, 184209 Россия

^bИнститут проблем промышленной экологии Севера Федерального исследовательского центра “Кольский научный центр Российской академии наук”, мкр. Академгородок, 14а, Апатиты, 184209 Россия

^cИнститут химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева Федерального исследовательского центра “Кольский научный центр Российской академии наук”, мкр. Академгородок, 26а, Апатиты, 184209 Россия

^dРоссийский университет дружбы народов, ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, 117198 Россия

^eИнститут географии Российской академии наук, Старомонетный пер., 29, стр. 4, Москва, 119017 Россия

*e-mail: e.krasavtseva@ksc.ru

Поступила в редакцию 27.05.2024 г.

После доработки 28.09.2024 г.

Принята к публикации 30.09.2024 г.

Разработка месторождения редкометалльных руд в Мурманской области в течение последних 70 лет сопровождалась складированием мелкозернистых отходов обогащения, что привело к образованию двух полей хвостохранилищ. На поле, выведенном из эксплуатации 35 лет назад, происходят процессы естественного зарастания. Проведены исследования минерального и химического состава, количественных и качественных характеристик микробиоты техногенных поверхностных образований (ТПО) и почв, сформировавшихся на отходах обогащения лопаритовых руд. С увеличением возраста ТПО наблюдалось разрушение слабоустойчивых щелочных минералов одновременно с увеличением содержания углерода от 0 до 4.5% в верхнем горизонте почвы. Дифференциальным термическим анализом установлено, что органическое вещество грубогумусового горизонта условно-фоновой почвы имело более сложный состав по сравнению с органическим веществом, образовавшимся на материале хвостохранилища редкометалльных руд. Отмечен рост численности и биомассы бактерий и микроскопических грибов, видового разнообразия микромицетов и выравнивание функционального профиля микроорганизмов при переходе от исходного материала хвостохранилища к участкам с растительностью. Полученные результаты могут лечь в основу природно-ориентированной технологии инициализации почвообразовательного процесса с применением аборигенных штаммов микроорганизмов, устойчивых к условиям редкометалльных хвостохранилищ.

Ключевые слова: Protic Arenosol (Tecnic), Gleyic Arenosol (Folic, Technic), Albic Podzol (Arenic, Folic), хвостохранилище, тяжелые металлы, редкоземельные элементы, почвенные бактерии, микроскопические грибы, физиологический профиль микробного сообщества

DOI: 10.31857/S0032180X25020108, **EDN:** COOEKD

ВВЕДЕНИЕ

Расширение горнодобывающей отрасли в промышленно развитых регионах неизбежно оказывает негативное воздействие на окружающую среду [45, 46, 57]. Образующиеся в процессе деятельности предприятий горнопромышленного комплекса многотонные отходы обогащения руд, вскрышные и пустые породы складированы на значительных площадях, изымаемых из хозяйственного оборота, загрязняют почвы, атмосферный воздух, водные объекты [48, 83, 87].

Проблема деградации почв и образования техногенных ландшафтов имеет глобальный характер, что находит отражение в многочисленных работах по разработке подходов к рекультивации и ремедиации деградированных почв и техногенных поверхностных образований (ТПО) [2, 18, 54]. Изучение процессов первичного почвообразования на техногенных материалах в сложных климатических условиях и/или связанных с техногенными воздействиями представляет собой отдельное новое научное направление — экстремальное почвоведение, причем поведение во времени и характер педогенной записи в экстремальных объектах может иметь как специфические черты, так и общие с обычными почвами [6].

Естественное зарастание нарушенных территорий в условиях Субарктики — процесс крайне медленный [24, 29]. Хвосты обогащения руд, как правило, обладают неблагоприятными характеристиками для активного самозарастания нарушенных территорий. В большинстве случаев они характеризуются аномально низкими либо высокими значениями pH, высокой минерализацией поровых вод, низкой водоудерживающей способностью, высоким содержанием тяжелых металлов, низким содержанием либо вовсе отсутствием органического вещества и биодоступных форм основных элементов питания (азота, калия, фосфора, кальция, магния) [82].

Важными индикаторами экологического состояния техногенно загрязненных почв являются количественные и качественные показатели микробного сообщества. Так, в последние годы активно изучаются районы складирования апатит-нефелиновых отходов обогащения и алюминиевого завода в Мурманской области [13, 20, 72]. К сожалению, работ, посвященных изучению микробных сообществ на участках хранилищ отходов обогащения редкометаллических руд с разной степенью самозарастания пока не встречается в литературе.

Как известно, основным процессом при первичном почвообразовании является аккумуляция органического вещества [1]. При этом на мощность образующихся органо-минеральных горизонтов влияют такие факторы, как климатические условия, pH среды, содержание биогенных элементов,

активность микроорганизмов, литологический состав и количество мелкозема, положение в рельефе [15, 23, 56]. Поверхность техногенных и техногенно нарушенных ландшафтов в Мурманской области лишена растительности в течение десятков лет, в связи с чем быстрый переход ТПО к органо-аккумулятивной стадии развития представляется практически невозможным без искусственной инициализации почвообразовательного процесса [2]. В то же время исследование процессов первичного почвообразования, включая развитие микробного сообщества, на отходах обогащения, характеризующихся высоким содержанием песчаной фракции и неблагоприятными гидрофизическими условиями [58], является важной научно-практической задачей, которая может лечь в основу разработки природно-ориентированной технологии инициализации почвообразовательного процесса с применением штаммов аборигенных микроорганизмов, устойчивых к неблагоприятным условиям ТПО.

Цель работы — изучение химических и микробиологических свойств разновозрастных ТПО и почв, сформировавшихся на участках хвостохранилища.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования являлась территория складирования хвостов обогащения редкометаллических руд. Предприятие, разрабатывающее месторождение лопаритовых руд ((Ce,Na,Ca)(Ti,Nb)O₃), располагается в центре Кольского полуострова и функционирует с 1951 г. (67.890076° N, 34.615571° E). За время работы предприятия образовалось два поля хвостохранилищ [61]. Первое поле функционировало с 1951 по 1985 гг., с декабря 1985 г. сброс хвостовой пульпы осуществляется на второе поле хвостохранилища. Общий объем твердых накопленных отходов превышает 18 млн т. Стабилизация дневной поверхности осложнена активными дефляционными процессами.

Образцы отбирали с четырех площадок, отличающихся по степени развития растительных сообществ и усложнения почвенного профиля от артииндустратов *Protic Arenosol* (Technic) до грубогумусированных иллювиально-железистых подзолов *Albic Podzol* (Arenic, Follic) (рис. 1, табл. 1). Исследованные почвы классифицированы согласно Классификации и диагностике почв России (2004) [17] и WRB (2022) [50].

AI — артииндустрат на песчаных отходах хвостохранилища, *Protic Arenosol* (Technic). ТПО, пылящий песок нефелинового состава; образец отобран непосредственно на хвостохранилище, в его южной части.

AV — артииндустрат на песчаных отходах хвостохранилища, *Protic Arenosol (Technic)*. ТПО под пионерным злаково-моховым покровом, слоистый светло-серый, местами серый песчаный материал нефелинового состава, на глубинах 5 и 14 см отмечаются погребенные уровни дневной поверхности хвостохранилища, выделяющиеся более бурым цветом, без других отличительных морфологических признаков; образец отобран в юго-восточной части хвостохранилища.

АО — псаммозем гумусовый глееватый артистратифицированный на песчаных отходах хвостохранилища, *Gleyic Arenosol (Folic, Technic)*. Слаборазвитая техногенная почва под мохово-злаково-разнотравным покровом; образец отобран в юго-западном направлении в 100 м от хвостохранилища.

W 0–4 см. Гумусово-слаборазвитый горизонт, серый бесструктурный песок, густо пронизан мелкими и средними корнями.

Сг 4–(30) см. Оглееный слоистый песок (техногенный осадок хвостохранилища), неоднородной окраски, выделяются отдельные рыжевато-бурые окисленные зоны на основном сизовато-светло-сером фоне.

АР — подзол грубогумусированный иллювиально-железистый, *Albic Podzol (Arenic, Folic)*. Условно-фоновая почва; образец отобран в северо-западном направлении в 300 м от хвостохранилища, естественный растительный покров, нарушений почвенного покрова не выявлено.

АО 0–15 см. Грубогумусовый горизонт темно-бурого цвета, гомогенная механическая смесь органического материала со светлыми песчаными отмытыми зернами, в нижней части горизонта отмечается потечно-гумусовый материал темно-серого цвета, в верхней части горизонта максимум включений светло-серых матовых песчаных зерен

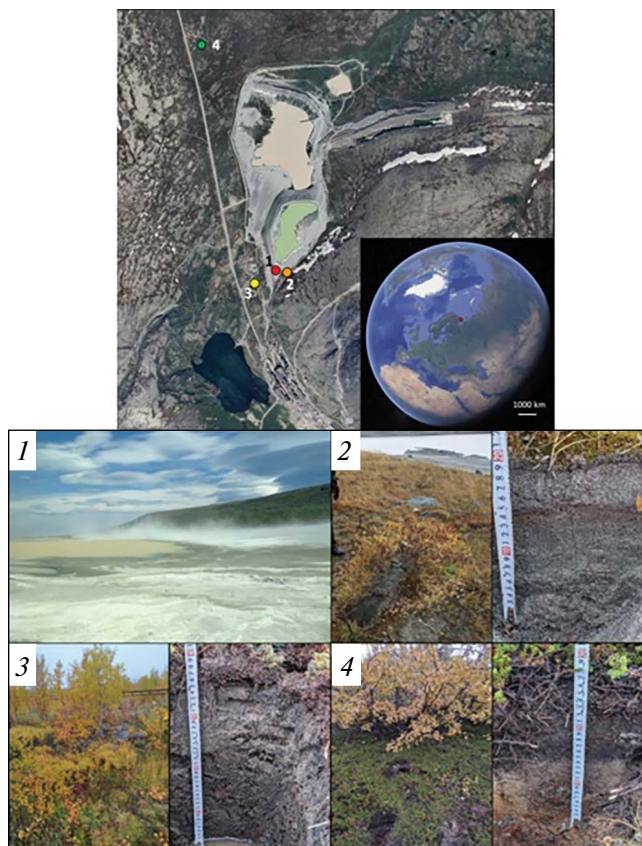


Рис. 1. Карта-схема расположения и внешний вид участков отбора образцов: 1 — AI, 2 — AV, 3 — АО, 4 — АР.

эолового происхождения из хвостохранилища, переход ясный, граница волнистая.

Е 15–20(23) см. Подзолистый горизонт, белесовато-светло-бурый песок, включения гравия и щебня, переход ясный, граница волнистая.

Таблица 1. Характеристика ключевых участков

Участок отбора образцов	Тип почвы	Растительное сообщество	Время с момента прекращения складирования хвостов, лет
AI	<i>Protic Arenosol (Technic)</i>	Отсутствует	~35 (с периодическими паводками)
AV	<i>Protic Arenosol (Technic)</i>	Злаковое пионерное с участием <i>Salix</i> sp. и доминированием <i>Polytrichum</i> spp. в моховом покрове	~35
АО	<i>Gleyic Arenosol (Folic, Technic)</i>	Злаково-разнотравное с куртинами <i>Salix</i> sp. и доминированием <i>Polytrichum commune</i> Hedw. в моховом покрове, рассеянно присутствует <i>Betula pubescens</i> Ehrh.	35–70
АР	<i>Albic Podzol (Arenic, Folic)</i>	Кустарничковая мохово-лишайниковая тундра с участием <i>Betula nana</i> L.	Условно-фоновая почва, хвосты не размещались

BF 20(23)–(30) см. Иллювиально-железистый горизонт, охристо-бурый бесструктурный песок, включения гравия и щебня.

Следует отметить, что несмотря на примерно одинаковый возраст ключевых точек AI и AV, сильные различия в растительном покрове связаны с нахождением ключевой точки отбора AI в котловине хвостохранилища ниже по рельефу, чем точка AV, в связи с чем здесь наблюдаются сезонные затопления, что, по всей видимости, препятствует развитию пионерной растительной группировки.

Отбор почвенных образцов. Образцы ТПО отбирали методом режущего кольца, образцы почв – методом конверта, для диагностики и классификации почв и почвоподобных тел закладывали прикопки глубиной до 50 см. Образцы для последующих анализов отбирали на определенную глубину: для всех точек – 0–5 см, для точки АО дополнительно отобрали 5–10 см. Образцы для микробиологического анализа отбирали по стандартной методике с применением возможных мер по предотвращению контаминаций (ISO 18400-206:2018). Образцы до проведения анализов хранили при температуре +4°C. Исследования проводили со свежими образцами в течение 2 сут после их отбора. Для проведения минерального и химического анализа образцы высушивали до воздушно-сухого состояния, измельчали и просеивали до размера частиц 2 мм (химический анализ) и 0.08 мм (рентгенофазовый анализ). Для микробиологических исследований образец AI отбирали из двух позиций в ландшафте – с аккумулятивной (дно) и транзитной (склон) частей котловины хвостохранилища. Минералогический и химический анализ выполняли для двух слоев, микробиологический – для поверхностного слоя 0–5 см.

Рентгенофазовый анализ. Рентгеновские спектры получены на дифрактометре Rigaku MiniFlex 600 (CuK_α -излучение, 40 кВ/15 мА) (Rigaku, Япония). Измерения проводили в диапазоне от 3° до 70° по 2 θ с шагом 0.02° при комнатной температуре на воздухе и скорости вращения 10 об/мин. Для идентификации фаз использовали программу SmartLab Studio II.

Сканирующая колориметрия. Дифференциально-термический анализ выполнен на приборе STA409 PC Luxx Netzsch (Германия), измерения проводили в токе воздуха (скорость потока 100 мл/мин), продувочный газ – аргон (скорость потока 50 мл/мин). Использовали платиновый тигль, скорость нагрева 10°C/мин.

Химический анализ. Определение актуальной кислотности проводили в соответствии с ГОСТ 26423-85 с помощью лабораторного иономера И-160МИ со стеклянным лабораторным электродом ЭС-10603 и электродом сравнения ЭСр-10103. Вытяжку для определения $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ готовили при

соотношении твердой и жидкой фазы (т : ж) – 1 : 5, перемешивали в течение 3 мин и отстаивали 5 мин.

Содержание органического углерода определяли методом сухого сжигания на анализаторе серы и углерода CS-2000 Eltra (Германия). Валовое содержание остальных химических элементов определяли в растворах после открытого кислотного разложения смесью фтористоводородной, азотной и соляной кислот по методике ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98 с помощью масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой ELAN 9000 DRC-e (PerkinElmer, США). Контроль и качество анализа обеспечивали одновременным разложением и анализом аттестованных стандартных образцов: ГСО 5360-90 ООК0153 (Почва дерново-подзолистая московская).

Фракционный состав микро- и макрокомпонентов в образцах определяли, выделяя водорастворимую (обработка дистиллированной водой), обменную (обработка 0.1 н. KNO_3), доступную для растений (последовательная трехкратная обработка аммонийно-ацетатным буферным раствором, pH 4.65), потенциально подвижную (обработка 0.1 н. HNO_3) и кислоторастворимую (обработка 1 н. HNO_3) фракции при соотношении почва:раствор равном 1:25 [22, 33, 66]. Растворы анализировали на атомно-абсорбционных спектрометрах Квант-2А (Кортек, Россия) и AAnalyst 400 (Perkin Elmer, США).

Численность и разнообразие культивируемых микроорганизмов. Численность и разнообразие микробиоты рассчитывали методом посева на плотные питательные среды [15]. Численность колониеобразующих единиц (КОЕ) культивируемых сапротрофных бактерий определяли на мясо-пептонном агаре; численность бактерий, использующих минеральные формы азота – на крахмало-аммиачном агаре; фосфатаккумулялирующих бактерий – на специфической среде следующего состава, (г): глюкоза – 10, NaNO_3 – 3, K_2HPO_4 – 1, KH_2PO_4 – 0.5, MgSO_4 – 0.5, KCl – 0.5, FeSO_4 – 0.001, дрожжевой экстракт – 0.5, агар-агар – 20 [73]. Численность культивируемых микромицетов определяли методом глубинного посева на среды сусло-агар для учета сахаролитической группы микромицетов и среду Уарда (дрожжевой экстракт – 1 г, пептон – 20 г, глюкоза – 20 г, агар-агар – 20 г, вода – 1 л) для учета группы сапротрофных микромицетов. Для подавления развития бактерий в среде добавляли концентрированную молочную кислоту (4 мл/л) [9]. Повторность каждого варианта трехкратная. Инкубацию проводили в термостатах при температуре 27°C в течение 3–10 сут для разных групп микроорганизмов. Расчеты численности культивируемых микроорганизмов проводили на абсолютно сухую почву, высушенную при 105°C до постоянного веса.

Анализ биологического разнообразия микроскопических грибов выполнен на основе культурально-морфологических признаков (микроскоп Olympus CX41, Olympus Optical, Япония) с использованием классических определителей [43, 55, 75]. Наименование видов и систематическое положение дано по базе данных CABI Bioscience Databases [49]. Представленность видов оценивали по показателю относительного обилия видов. Для оценки видового разнообразия использовали индекс Шеннона: $H = -\sum p_i \ln p_i$, где p_i – относительное обилие для каждого вида. [78].

Биомасса микроорганизмов. Численность и биомассу бактерий, длину грибного мицелия и его биомассу (без массы грибных спор) определяли методом флуоресцентной микроскопии на следующий день после отбора образцов с помощью микроскопа Zeiss (Carl Zeiss, Германия). Использовали темноокрашенные поликарбонатные мембранные фильтры Nucleopore Black с диаметром пор 0.2 мкм для бактерий и 0.8 мкм для грибов. Фильтры для учета бактерий окрашивали акридином оранжевым, а фильтры для учета грибов – красителем FITC (флуоресцин изотиоцианата) по методике [11].

Физиологическое разнообразие микробного сообщества. Физиологический профиль (англ. community level physiological profile, CLPP) микробного сообщества оценивали техникой MicroRespTM [39, 65, 67]. Перед началом анализов образцы увлажняли до 50–60% полной влагоемкости и предынкубировали 72 ч при 25°C. Дыхательный отклик (ДО) микроорганизмов определяли скоростью образования CO₂ после обогащения образцов низкомолекулярными органическими соединениями. В ячейки специального планшета вносили навески образцов, добавляли субстраты группы карбоновых кислот (аскорбиновая, лимонная, щавелевая), углеводов (глюкоза, фруктоза, галактоза), аминокислот (глицин, L-аргинин, L-лейцин, α-аминомасляная и L-аспарагиновая кислоты) и фенольных кислот (сиреневая и ванилиновая). Подготовленные планшеты с образцами и органическими субстратами инкубировали 6 ч при 25°C. ДО микробного сообщества оценивали колориметрически (изменение окраски индикационного геля при взаимодействии с выделившимся CO₂) с помощью микропланшетного ридера (Униплан, Россия; абсорбция при λ = 595 нм). Функциональное разнообразие микробного сообщества оценивали с помощью индекса Шеннона на основании данных о физиологическом профиле, где p_i означало отношение ДО на внесение отдельного субстрата к сумме такового для всех исследуемых субстратов [78].

Статистическая обработка данных. Статистический анализ проводили в программном пакете RStudio v4.3.3 [71] и в программе Microsoft Office

Excel 2016. Значимость различий экспериментальных данных между исследуемыми вариантами (независимыми группами) оценивали с помощью *t*-теста с предварительной проверкой гипотезы о нормальности распределения экспериментальных данных по критерию Шапиро–Уилка и равенства дисперсий выборок по критерию Фишера. Если гипотеза о нормальном распределении данных подтверждалась и дисперсии выборок были равны, то значимость различий определяли по критерию Стьюдента, при равенстве дисперсий применяли критерий Уэлча. Если данные не подчинялись закону нормального распределения, то выборки сравнивали по критерию Уилкоксона–Манна–Уитни.

Взаимосвязь между отдельными химическими и микробиологическими показателями оценивали корреляционным анализом с помощью коэффициента Пирсона (выборки подчиняются закону нормального распределения) и Спирмена (выборки не подчиняются закону нормального распределения). Факторный анализ данных проводили по методу главных компонент с помощью пакетов “FactoMineR” и “factoextra”. Сходство видового состава комплексов микроскопических грибов, а также физиологического профиля микробного сообщества анализировали с помощью кластерного анализа по методу минимальной дисперсии Уорда [84]. Дендрограммы сходства видового состава микокомплексов строили по метрике Серенсена, реализованной в пакете “vegan”. Результаты кластерного анализа физиологического профиля микробного сообщества визуализировали тепловой картой с использованием пакетов “pheatmap” и “RColorBrewer”.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Физико-химическая характеристика почв. Определен минеральный состав ТПО, образовавшихся на отходах обогащения лопаритовых руд, техногенной и условно-фоновой почв с прилегающей территории (рис. S1). Ранее установлено, что преобладающими минералами, слагающими хвосты обогащения лопаритовых руд, являются нефелин (до 48–50%), полевые шпаты (до 23–25%) и эгирин (до 15–16%) [4, 61]. Минеральный состав материала хвостохранилища (образец А1) представлен нефелином, содалитом, альбитом, микроклином, эгирином. Схожий минеральный состав диагностирован в образце АВ и слое 5–10 см образца АО. Уменьшение интенсивности и уширение рефлексов наблюдается для слоя 0–5 см образца АО по сравнению со слоем 5–10 см, что говорит об изменениях, происходящих в ходе гипергенеза в структуре основных минеральных фаз [31]. В минеральном составе образца условно-фоновой почвы (АР), отобранной на северо-западе от хвостохранилища,

преобладают кварц, альбит, нефелин и оксид калия железа. Состав образцов ТПО близок к лувэвиту, обогащенному нефелином, который является одной из основных пород Ловозерского щелочного массива [69]. Высокое содержание нефелина связано с процессами обогащения руд, когда тяжелые минералы, такие как лопарит, остаются в концентрате, а хвосты обогащаются относительно легкими минералами. Образец АР содержит значительное количество кварца, который мог образоваться при почвообразовании на архейских гранитах и гранит-гнейсах (вмещающие породы Ловозерского щелочного массива). В образце условно-фоновой почвы также присутствуют нефелин, эгирин и полевой шпат, тогда как содалит отсутствует, поскольку, вероятно, этот цеолитовый минерал является менее стабильным. С увеличением возраста почв щелочные минералы разрушаются в процессе выветривания породы одновременно с увеличением содержания углерода. Содержание органического углерода (%) в образце исходных хвостов АІ было ниже порога обнаружения (~0), в образце АV — 0.27, в слое 0–5 см образца АО — 4.5, в слое 5–10 см образца АО — 1.5, в образце АР — 5.4.

Проведен термический анализ отобранных почвенных образцов (рис. 2). На кривых образцов АО и АР зафиксирован растянутый экзотермический эффект с двумя перегибами в области температур от 200 до 580°C, который соответствует выгоранию органического вещества древесно-травяного происхождения, наиболее близкого к торфу [21]. Низкотемпературная часть экзотермической области около 300–350°C относится к сжиганию углеводородов и других алифатических соединений, в то время как пики с максимумом при 400–450°C являлись результатом потери более сложных и конденсированных органических молекул — ароматических соединений, таких как лигнин или

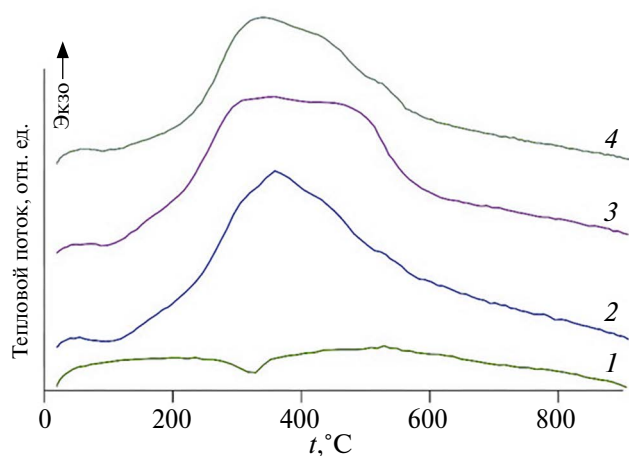


Рис. 2. Кривые ДСК образцов: 1 — АV, 2 — АО (слой 5–10 см), 3 — АО (слой 0–5 см), 4 — АР.

другие полифенолы (гумифицированные соединения) [70]. Соотношение между потерями массы, связанными со второй и первой экзотермической реакциями ($R_1 = Exo_2/Exo_1$) — индекс термостабильности, представляющий собой относительное количество термически стабильной фракции органического вещества по сравнению с менее стабильной независимо от уровня влажности или зольности в любом образце [36]. Индекс термостабильности образца АР составил 0.85, тогда как слоя 0–5 см образца АО — 0.78, что подтверждает более сложный состав органического вещества грубогумусового горизонта условно-фоновой почвы в сравнении с органическим веществом слаборазвитой техногенной почвы. Для слоя 5–10 см образца АО на термограмме зарегистрирован широкий экзотермический эффект с одним максимумом при температуре 360°C, отвечающий за менее стабильную органическую фракцию. Кривая ДСК образца АV характеризовалась отсутствием органической фазы.

Валовое содержание химических элементов представлено в табл. 2. Обращает на себя внимание аккумуляция лантаноидов в образцах ТПО на начальной стадии зарастания и техногенной почвы (участки АV и АО соответственно) — содержание редкоземельных элементов (РЗЭ) легкой группы в этих образцах превышало их содержание в исходном материале АІ. Данный факт можно объяснить фракционированием минерального состава отходов обогащения в процессе транспортировки, а также ассоциированием РЗЭ с органическим веществом и образованием металлоорганических комплексов [8, 44]. Высокие содержания лантаноидов в образце АО, особенно в нижнем слое, вероятно, связаны с работами по созданию и вводу в эксплуатацию второго поля хвостохранилища, проводимыми до 1985 г. Повышенное содержание РЗЭ и ТМ (Sr, Zn) в поверхностном слое образца АО обусловлено загрязнением вследствие пыления незакрепленных хвостов обогащения [60]. Содержание этих же элементов в образце условно-фоновой почвы АР, отобранной на удалении от хвостохранилища, было закономерно ниже. Вместе с тем во всех изученных образцах содержание металлов, характерных для хвостов обогащения лопаритовых руд, превышало таковые в почвах Европы [74] и дерново-подзолистых почвах европейской части России [30, 59].

Хвосты обогащения лопаритовых руд (АІ) характеризовались слабощелочной средой (рН 7.6–8.4), вследствие чего они имели относительно невысокое содержание потенциально токсичных элементов (Cu, Ni, Al, Fe, Mn, Zn) в биодоступной форме. Величина рН АV составляла 7.31, АО — 6.92, АР — 6.65. Актуальная кислотность условно-фоновой почвы значительно ниже значений, определенных для верхнего горизонта О иллювиально-железистых

Таблица 2. Валовое содержание элементов в образцах

Образец	Массовая доля, мг/кг							
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Cu	Zn	Th
AP	167.4	264.1	19.50	92.70	14.95	77.57	195.10	18.64
АО (слой 0–5 см)	1121	1774	218.8	596.5	79.45	51.48	183.83	97.01
АО (слой 5–10 см)	1859	3021	361.6	961.8	121.3	59.0	267.2	165.8
AV	932.6	1813	223.0	607.1	78.11	50.45	231.66	62.78
AI	160	852	33.9	106	12.4	5.36	171	16.5

Образец	Массовая доля, %							
	Na	K	Ca	Mg	Mn	Al	Fe	Sr
AP	6.339	3.824	2.497	1.237	0.144	14.98	6.328	0.098
АО (слой 0–5 см)	7.095	2.493	0.757	0.213	0.141	10.34	3.397	0.151
АО (слой 5–10 см)	7.875	2.520	0.911	0.267	0.195	10.56	3.887	0.194
AV	9.081	2.986	0.893	0.245	0.186	10.57	4.405	0.196
AI	9.890	3.519	1.165	0.271	0.135	7.86	3.01	0.279

подзолов лесотундры и горной тайги (4.9–5.4) Хибинского горного массива [28], что обусловлено антропогенным воздействием функционирующего хвостохранилища. Слабощелочные значения pH_{H_2O} 6.8–7.5 верхних слоев новообразованных почв, сформировавшихся на отходах апатит-нефелинового хвостохранилища, имеющего схожий минеральный состав, также были отмечены ранее в работе [29].

Определены доли содержания микро- и макроэлементов в биодоступных формах (водорастворимая, обменная и доступная для растений фракции) и характеризующих техногенное загрязнение образцов (потенциально подвижная и кислоторастворимая фракции) (рис. 3). В образцах ТПО и почв Cu и Ni (обнаружен только в вытяжке образцов AI и AP), преимущественно, находился в биодоступной форме в отличие от исходного техногенного материала образцов AI и АО (слой 5–10 см). Zn, Mn, Fe, Al в основном присутствовал в связанной форме – потенциально подвижной и кислоторастворимой фракциях. Из рассматриваемых в настоящей работе элементов нормируется содержание в почвах подвижных форм Cu (3.0 мг/кг), Ni (4.0 мг/кг), Zn (23 мг/кг) и Mn (100 мг/кг) согласно ГН 2.1.7.2041–06 (Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве). Превышений предельно допустимых концентраций металлов в изученных образцах ТПО и почв не выявлено. Отдельно стоит отметить повышенное содержание Na как в валовом составе исходного материала хвостохранилища, так и в подвижной форме, что может быть обусловлено минеральным составом хвостов обогащения лопаритовых руд с

преобладанием в их составе нефелина и полевых шпатов. Доля водорастворимой фракции элементов питания составляла (%): K – от 0.3 до 2.6, Ca – около 1.0, P – от 0.5 до 1 при переходе от ТПО к условно-фоновой почве соответственно. В работах [4, 14] также отмечено, что P в нефелиновых хвостах обогащения апатит-нефелиновых руд находится в составе остаточного апатита в формах, слабо доступных для растений.

Микробиологическая характеристика почв. Численность микроорганизмов. В исходном материале AI, отобранном в аккумулятивной части котловины хвостохранилища, численность трех изучаемых трофических групп бактерий не превышала 600 тыс. КОЕ/г при преобладании фосфатаккумулирующих бактерий (табл. 3). С появлением растительности на ТПО отмечен рост бактериальной численности. Количество сапротрофных бактерий оставалось на прежнем уровне, в то время как численность групп бактерий, использующих минеральные формы азота, и фосфатаккумулирующих бактерий увеличилась на порядок и в условно-фоновой почве достигала 4–7 млн КОЕ/г ($p < 0.05$). В то же время на численность бактерий в исходном материале влияние оказывало положение в ландшафте. На склоне численность увеличивалась на порядок ($p < 0.05$) по сравнению с дном котловины, что ранее отмечено другими исследователями для хвостохранилищ и может быть связано как с адаптационными свойствами бактериальных сообществ на склоне [85], так и с сезонными затоплениями дна котловины.

Высокая численность бактерий, использующих минеральные формы азота, в ТПО на начальной

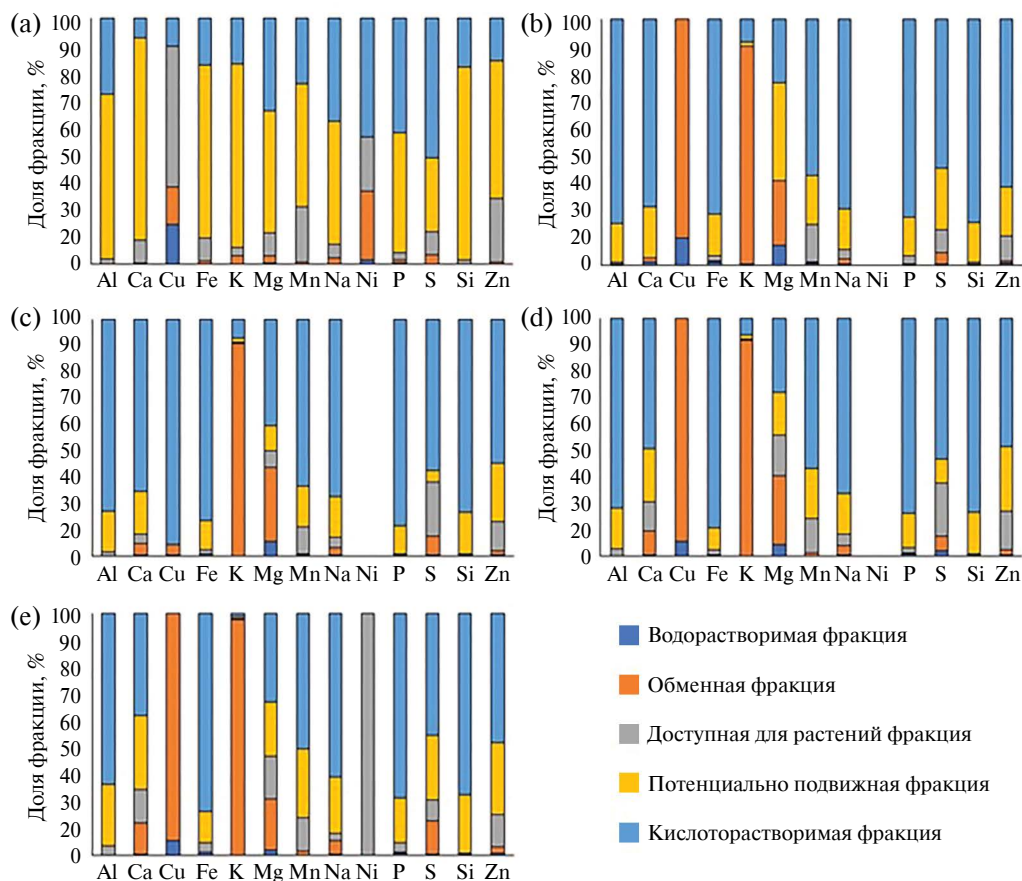


Рис. 3. Фракционный состав микро- и макрокомпонентов в образцах: (a) – AI, (b) – AV, (c) – АО (слой 5–10 см), (d) – АО (слой 0–5 см), (e) – AP.

стадии зарастания (AV) и почвах (АО и AP) свидетельствует об интенсивно протекающих процессах минерализации сложных органических соединений, в результате чего продукты минерализации в значительной степени становятся объектом питания растений и вновь включаются в биологический круговорот. Данный процесс играет важную роль в обеспечении возможности самозарастания хвостов и почвообразовании. В свою очередь, наличие бактерий, способных мобилизовать почвенный фосфор, позволяет улучшить режим фосфатного питания растений за счет мобилизации подвижных форм фосфора из его труднодоступных соединений и стимулирует прорастание семян [25, 26, 32].

Исследование материала редкометалльного хвостохранилища показало те же этапы формирования микробиоценоза, которые ранее были отмечены для других хвостохранилищ как в северных, так и в более южных регионах [14, 37]. В условиях недостатка питательных веществ существенную роль в процессах почвообразования играют олигонитрофилы и бактерии, использующие минеральные формы азота. Эти группы бактерий способны

переносить длительные периоды голодания и использовать труднодоступные для других микроорганизмов субстраты. Поэтому олиготрофность бактериального ценоза характерна и для почв, загрязненных тяжелыми металлами, в том числе урбаноземов [3].

Корреляционный анализ выявил положительное влияние Cu, Ni и S обменной фракции на численность бактерий ($r = 0.73, 0.42, 0.76$ при $p < 0.05$ соответственно) (рис. S2). Это может быть связано с низким питательным статусом ТПО по сравнению с условно-фоновой почвой, где численность бактерий значительно возросла. Известно, что микроэлементы участвуют в регуляции осмотического давления, pH среды, окислительно-восстановительного потенциала, активируют ферменты, входят в состав витаминов, ферментов и структурных компонентов бактерий [42, 76]. Не исключено, что такой высокий уровень корреляции в рамках нормального закона распределения выборок означает, что бактерии могли использовать эти элементы в качестве естественных катализаторов, заимствованных из среды обитания при синтезе белковых

Таблица 3. Численность бактерий и микроскопических грибов в образцах

Образец	Численность бактерий, тыс. КОЕ/г			Численность микроскопических грибов, тыс. КОЕ/г	
	сапротрофные	использующие минеральный азот	фосфат-аккумулирующие	сахаролитические	сапротрофные
AI (дно)	305±15 ^{ac}	210±140 ^a	600±70 ^a	0.03±0.01 ^a	0.07±0.02 ^a
AI (склон)	1045±65 ^{bc}	2910±470 ^{ab}	1605±105 ^b	0.06±0.03 ^a	0.04±0.02 ^a
AV	110±25 ^a	1031±377 ^{ab}	1785±295 ^b	0.07±0.04 ^a	0.22±0.05 ^a
AO	365±50 ^{ac}	1698±111 ^{ab}	4080±75 ^c	0.54±0.19 ^a	1.46±0.17 ^a
AP	294±42 ^{ac}	4377±1295 ^b	7605±195 ^d	14.32±3.95 ^b	22.13±8.89 ^b

Примечание. Надстрочные буквы означают наличие/отсутствие статистически значимых различий между образцами отдельно для каждой группы микроорганизмов при $p < 0.05$.

Таблица 4. Запасы биомассы микроорганизмов в образцах

Образец	Общая численность бактерий, 10 ⁹ кл./г	Биомасса бактерий, мг/г	Длина грибного мицелия, м/г	Биомасса микроскопических грибов, мг/г	Общая биомасса, мг/г
AI (дно)	1.6±0.18 ^a	0.07±0.008 ^a	114.23±7.017 ^a	0.13±0.008 ^a	0.20±0.016 ^a
AI (склон)	2.6±0.08 ^b	0.1±0.004 ^b	102.02±7.437 ^a	0.11±0.008 ^a	0.21±0.012 ^a
AV	13±0.6 ^c	0.5±0.04 ^c	1125.45±87.005 ^b	1.24±0.10 ^b	1.74±0.14 ^b
AO	17±0.3 ^d	0.68±0.04 ^d	1484.69±61.745 ^c	1.63±0.07 ^c	2.31±0.11 ^c
AP	20±4 ^d	0.80±0.03 ^d	1674.14±40.696 ^c	1.84±0.04 ^c	2.64±0.07 ^c

Примечание. Надстрочные буквы означают наличие/отсутствие статистически значимых различий между образцами отдельно для каждого показателя при $p < 0.05$.

структур [27]. Также другие авторы отмечали, что при добавлении минеральных удобрений численность и разнообразие бактерий возрастали, улучшая тем самым микробиологическую среду почв [77, 81].

Численность микроскопических грибов была на несколько порядков меньше, чем численность бактерий во всех образцах (табл. 3). Исходный материал (AI) как на дне котловины хвостохранилища, так и на склоне, характеризовался низкой численностью микромицетов — менее 100 КОЕ/г почвы, что, однако, было в 2–5 раз больше, чем в песках природного и антропогенного происхождения других объектов региона исследований [13, 38, 72]. Это свидетельствует о наличии микробного потенциала к деструкции органического вещества. С развитием растительности на ТПО численность микромицетов увеличилась в 2 и более раз и достигла максимальных значений в условно-фоновой почве — более 14 и 22 тыс. КОЕ/г почвы для сахаролитических и сапротрофных грибов соответственно ($p < 0.05$). Однако эта численность была более чем в 4 раза ниже по сравнению с фоновыми почвами

северо-таежной зоны Кольского полуострова, где она составила от 80 до 350 тыс. КОЕ/г почвы [19].

Биомасса микроорганизмов. В исходном техногенном материале (AI) наличие бактерий и грибов в общей микробной биомассе равноценно, однако при появлении растительности грибная биомасса превышала бактериальную на порядок (табл. 4). Подобные закономерности были отмечены для природных и техногенных песчаных материалов региона [13, 16, 72]. Если на биомассу бактерий влияло и наличие растительности, и положение в ландшафте, то на биомассу грибов — только наличие растительности. При этом для обеих групп микроорганизмов не выявлены статистически значимые различия между техногенной (АО) и условно-фоновой (AP) почвами. Метод люминесцентной микроскопии, в отличие от метода посева, учитывает как живые, так и мертвые клетки, в том числе и некультивируемые на питательных средах, за исключением ультрамелких форм бактерий. Вероятно, в образце АО большое количество микроорганизмов находилось в неактивном состоянии, тогда как в условно-фоновой почве — наоборот.

Необходимо отметить, что микробный потенциал материала хвостохранилища отходов добычи лопаритовых руд выше, чем на других объектах региона природного и техногенного генезиса. Так, биомасса бактерий и грибов была на один-два порядка выше по сравнению со свежесмытыми песками апатит-нефелинового хвостохранилища, а в вариантах с растительностью — на порядок [13, 72].

Таксономическое разнообразие микроскопических грибов. Всего из образцов ТПО и почв было выделено 19 видов, относящихся к 10 родам, 7 семействам (*Aspergillaceae*, *Chaetomiaceae*, *Cladosporiaceae*, *Cordycipitaceae*, *Hypocreaceae*, *Mucoraceae*, *Saccharotheciaceae*), 6 порядкам (*Capnodiales*, *Dothideales*, *Eurotiales*, *Hypocreales*, *Mucorales*, *Sordariales*), 4 классам (*Dothideomycetes*, *Eurotiomycetes*, *Mucoromycetes*, *Sordariomycetes*) и двум отделам (*Ascomycota*, *Mucoromycota*) (табл. 5). При появлении растительности видовое разнообразие микроскопических грибов увеличивалось, достигая максимума в техногенной почве (АО). Для условно-фоновой почвы (АР) при небольшом разнообразии видов микромицетов отмечено увеличение разнообразия на уровне вышестоящих таксонов.

В исходном материале (АІ) на дне котловины и на склоне хвостохранилища было выделено 5 и 4 вида микроскопических грибов соответственно, в ТПО с начальной стадией зарастания (АV) обнаружено 7 видов микроскопических грибов, в техногенной почве (АО) — 11 видов, в условно-фоновой почве (АР) — 4 вида. В целом грибные сообщества исследованных образцов почв характеризовались низким видовым разнообразием (индекс Шеннона 1.3–2.6). Подобные значения были обнаружены в сильно- и среднезагрязненных почвах импактной зоны алюминиевого предприятия на Кольском полуострове [12].

Дендрограмма сходства видового состава микрокомплексов подтверждает, что стадия сукцессии растительного сообщества являлась определяющим фактором, влияющим на формирование грибных сообществ (рис. S3). Образцы почв кластеризовались в зависимости от наличия растительности, при этом наибольшим сходством обладали грибные сообщества ТПО на начальной стадии зарастания (АV) с техногенной почвой (АО) (коэффициент Сёренсена 67%).

Отмечена смена доминирующих видов и структуры сообществ микроскопических грибов по мере развития растительных группировок. В техногенном материале без растительности (АІ) сформировалось специфическое сообщество микромицетов, не характерное для фоновых территорий района исследований, что также подтверждается дендрограммой сходства видового состава. Выделенные виды принадлежали к семействам отдела *Ascomycota*: *Aspergillaceae*, *Chaetomiaceae*, *Cordycipitaceae*,

Hypocreaceae. Наибольшим видовое разнообразие было отмечено для сем. *Aspergillaceae*. Ранее в работе других авторов для данного объекта получены подобные результаты [53]. В аккумулятивной части котловины хвостохранилища доминировал вид *Acremonium charticola*, который ранее был выделен с участков хвостохранилищ в Кыргызстане [80]. На склоне доминировал вид *Trichocladium griseum*, содержащий пигмент меланин. Известно, что пигментация представляет защиту от негативного воздействия факторов среды [68]. Также этот вид встречался в песчаных дюнах, солончаках, пустынях, в угольных отвалах и пустошах [43]. На обоих участках, вне зависимости от положения в ландшафте, преобладал вид *Talaromyces funiculosus*, обладающий мелким размером спор (2–3 мкм), что способствует его распространению в песках [43]. Эти виды также были обнаружены в разновозрастных песках апатит-нефелинового хвостохранилища в Мурманской области [71].

В ТПО на начальной стадии зарастания (АV) структура грибного сообщества смешалась в сторону таковой для северных почв с доминированием представителей рода *Penicillium* (57%), а именно — меланинсодержащего вида *Penicillium corylophilum*, что свидетельствует о негативном влиянии факторов среды на этом участке [68]. Преобладание грибов рода *Mucor* в техногенной почве (АО) также подтверждает приближение структуры грибного сообщества к фоновым почвам региона исследований [19]. Представители данного рода чувствительны к различного рода техногенным воздействиям, что было показано в предыдущих работах авторов, а также других исследователей [20, 79]. Грибы рода *Mucor* обычно развиваются в местах скопления легкодоступных органических соединений и способствуют их быстрой утилизации [34], что указывает на смену состава органического вещества. В условно-фоновой почве (АР) развивались грибы рода *Trichoderma*, которые являются колонизаторами растительных остатков и отличаются высокой ферментативной и антибактериальной активностью [43], из-за чего, возможно, они активно воздействовали на микробиоту местности.

Физиологическое разнообразие микробного сообщества. В микробном сообществе исследованных образцов доминировали микроорганизмы, потребляющие карбоновые кислоты (аскорбиновую, лимонную, щавелевую) и углеводы (глюкозу, фруктозу, галактозу) (рис. 4а). Эти группы микроорганизмов преобладают и в природных, и в антропогенно нарушенных экосистемах [35, 51, 52]. Известно, что карбоновые кислоты являются важным компонентом для обеспечения микробного метаболизма и могут выделяться корнями растений [63]. Они играют жизненно важную роль в мобилизации микроэлементов [40] и обладают потенциалом

Таблица 5. Таксономическое разнообразие и обилие микроскопических грибов в образцах, %

Вид	Образец				
	AI (дно)	AI (склон)	AV	АО	AP
Ascomycota Pezizomycotina Dothideomycetes Dothideomycetidae Capnodiales Cladosporiaceae					
<i>Cladosporium cladosporioides</i> (Fresen.) G.A. de Vries	—	—	2.4	—	—
Dothideales Saccotheciaceae					
<i>Aureobasidium pullulans</i> (de Bary & Löwenthal) G. Arnaud	—	—	—	0.8	—
Eurotiomycetes Eurotiomycetidae Eurotiales Aspergillaceae					
<i>Aspergillus fumigatus</i> Fresen.	—	—	11.9	5.7	—
<i>A. restrictus</i> G. Sm.	—	—	—	0.8	—
<i>A. unguis</i> (Émile-Weill & L. Gaudin) Thom & Raper	6.7	—	—	—	—
<i>A. versicolor</i> (Vuill.) Tirab.	13.3	—	9.5	13.8	33.1
<i>Penicillium corylophilum</i> Dierckx	—	—	50.0	22.0	—
<i>P. dierckxii</i> Biourge	—	—	—	0.8	—
<i>P. expansum</i> Link	—	—	—	4.9	5.9
<i>P. glabrum</i> (Wehmer) Westling	—	—	2.4	0.8	—
<i>P. spinulosum</i> Thom	—	—	2.4	0.8	—
<i>Talaromyces diversus</i> (Raper & Fennell) Samson, N. Yilmaz & Frisvad	20.0	—	—	—	—
<i>T. funiculosus</i> (Thom) Samson, N. Yilmaz, Frisvad & Seifert	26.7	33.3	21.4	19.5	—
Sordariomycetes Hypocreomycetidae Hypocreales Cordycipitaceae					
<i>Cordyceps farinosa</i> (Holmsk.) Kepler, B. Shrestha & Spatafora	—	16.7	—	—	—
Hypocreaceae					
<i>Trichoderma polysporum</i> (Link) Rifai	—	16.7	—	—	—
<i>Tr. viride</i> Pers.	—	—	—	—	59.6
Incertae sedis					
<i>Acremonium charticola</i> (Lindau) W. Gams	33.3	—	—	—	—
Sordariomycetidae Sordariales Chaetomiaceae					
<i>Trichocladium griseum</i> (Traaen) X. Wei Wang & Houbraken	—	33.3	—	—	—
Mucoromycota Mucoromycotina Mucoromycetes Incertae sedis Mucorales Mucoraceae					
<i>Mucor hiemalis</i> Wehmer	—	—	—	30.1	1.5
Индекс Шеннона (H)	2.1	1.9	2.0	2.6	1.3
ВСЕГО: Отделов/классов/порядков/семейств/родов/видов	1/2/2/2/3/5	1/2/3/4/4/4	1/2/2/2/4/7	2/3/3/3/5/11	2/3/3/3/4/4

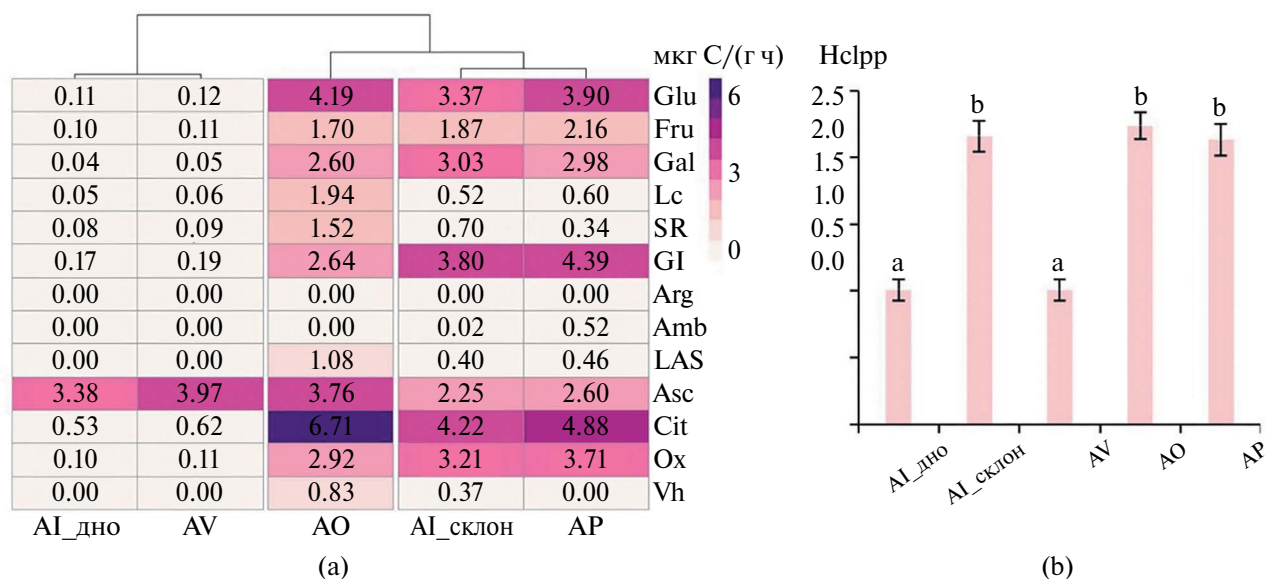


Рис. 4. Тепловая карта (а), отражающая величину дыхательного отклика (ДО) микробного сообщества на внесение различных органических субстратов и индекс функционального разнообразия Шеннона (б) в образцах почв: Glu, D – глюкоза; Fru, D – фруктоза; Gal, D – галактоза; Lc, L – лейцин; SR – сиреневая кислота; GI – глицин; Arg, L – аргинин; Amb, α – аминокислотная кислота; LAS, L – аспарагиновая кислота; Asc – аскорбиновая кислота; Cit – лимонная кислота; Ox – щавелевая кислота; Vh – ванилиновая кислота. Буквы над столбцами означают наличие/отсутствие статистически значимых различий между образцами при $p < 0.05$.

увеличения количества доступного растениям фосфора. [86].

На физиологическую структуру микробного сообщества влияло как положение в ландшафте, так и наличие растительности. По сходству физиологического профиля микробного сообщества образцы группируются в два основных кластера: 1) материал хвостохранилища (AI) на дне котловины и ТПО на начальной стадии зарастания (AV), для которых характерна наименьшая скорость минерализации органических субстратов и низкие значения индексов Шеннона ($H_{clpp} = 1.00$, рис. 4б); 2) материал хвостохранилища (AI) на склоне и почвы (AO и AP), для которых отмечена повышенная скорость минерализации органических субстратов (до 6 раз выше, чем в образцах первой группы) и более высокие значения индексов Шеннона ($H_{clpp} = 2.13–2.24$). В микробных сообществах первой группы присутствуют микроорганизмы, потребляющие 9 органических субстратов, при этом доля отклика на внесение аскорбиновой кислоты составляла 75% от общего ДО. Физиологический профиль микробных сообществ второй группы более выровненный: доля ДО на внесение карбоновых кислот не превышала 45%, углеводов – 35%, аминокислот – 20%, фенольных кислот – 8%. Микроорганизмы этой группы потребляли 11–12 органических субстратов. Притом максимальная доля отклика на внесение фенольных кислот отмечена для техногенной почвы (AO), где

в растительном покрове доминировал *Polytrichum commune*. По мере деструкции мхов возрастает выход фенолсодержащих соединений, которые представляют собой дубильные вещества и антиоксиданты [7] и могут являться питательными элементами для специфической микробиоты.

Факторы, влияющие на физико-химические и микробиологические параметры. Факторный анализ, проведенный по методу главных компонент (PCA), позволяет выявить основные тенденции совместного изменения физико-химических и микробиологических параметров и определить их взаимосвязи [41, 47, 88]. Анализ проводили по отдельности для химических элементов во фракциях с различной степенью геохимической подвижности (рис. 5, рис. S4). Первые две компоненты описывали 71–81% общей изменчивости параметров.

Первая компонента, описывающая 41–55% исходной изменчивости, объясняла различия, связанные с минеральной и органической составляющей исследованных образцов, т.е. характеризовала условия почвообразования. Для водорастворимой, обменной и доступной для растений фракций выявлены положительные корреляции первой компоненты с составляющими минеральной матрицы исходных хвостов (Al, Na, Si), микроэлементами (Cu, Fe, Ni, P, Zn, Mn) и pH, отрицательные корреляции – с содержанием макроэлементов (Ca, Mg, K), органического углерода и показателями численности и биомассы микроорганизмов.

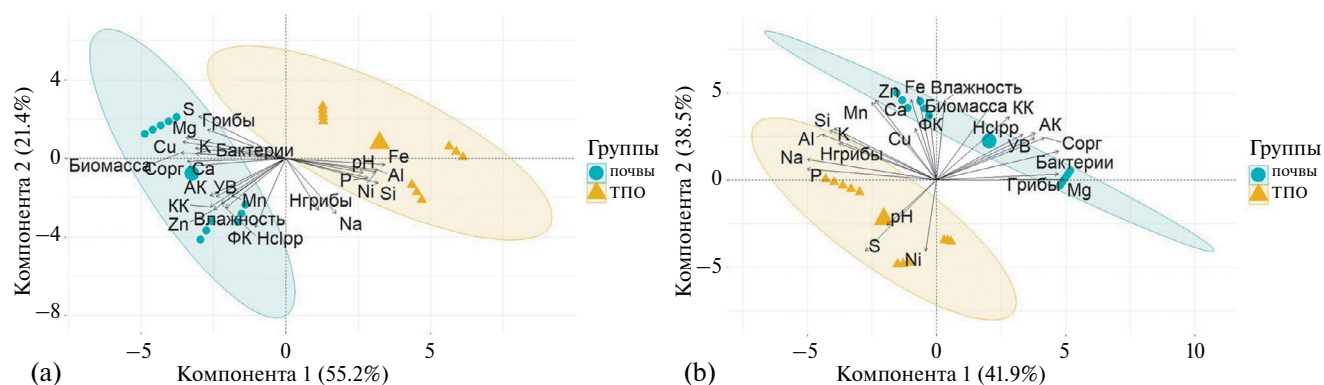


Рис. 5. Компонентный анализ, показывающий взаимосвязь физико-химических и микробиологических параметров для обменной (а) и кислоторастворимой (б) фракций. КК — дыхательный отклик (ДО) микробного сообщества на внесение карбоновых кислот, UV — ДО на внесение углеводов, АК — ДО на внесение аминокислот, FK — ДО на внесение фенольных кислот, $H_{\text{грибы}}$ — индекс разнообразия Шеннона для грибных сообществ, H_{clpp} — индекс функционального разнообразия Шеннона.

Известно, что органическое вещество является лимитирующим фактором для развития почвенной микробиоты [10]. Для потенциально-подвижной и кислоторастворимой фракций направление факторов противоположное. Наибольший вклад данной компоненты отмечен для обменной фракции, наименьший — для водорастворимой и кислоторастворимой.

Вторая компонента, общая дисперсия которой составляет 21–39%, связана с сукцессией растительных сообществ. Для доступных для растений потенциально-подвижной и кислоторастворимой фракций вторая компонента положительно коррелировала со влажностью, индексом разнообразия грибных сообществ, ДО на внесение органических субстратов и функциональным разнообразием микробного сообщества, отрицательные корреляции — с содержанием Mg, S, Mn, Zn. Данные параметры связаны с качественным составом органического материала и в основном относились к техногенной почве с гидроморфными условиями и доминированием мхов в растительном покрове. Многие мхи образуют фенолсодержащие соединения, обладающие антибактериальным эффектом [64, 89], что может способствовать увеличению разнообразия грибного сообщества и формированию микробиоты, способной усваивать фенольные кислоты — более трудно усваиваемые источники углерода вследствие наличия в составе фенольного кольца [62]. Проанализированные точки разделились на два непересекающихся кластера, которые соответствовали ТПО (AI и AV) и почвам (AO и AP), вне зависимости от фракции химических элементов, что свидетельствует о значительном изменении физико-химических и микробиологических параметров по мере сукцессии растительных сообществ и процессов почвообразования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены химические и микробиологические исследования образцов ТПО, сформировавшихся в течение последних 70 лет на отходах обогащения руд действующего редкометалльного предприятия в Кольской Субарктике. Выявлена постепенная трансформация щелочных минералов в процессе гипергенеза, сопровождающаяся увеличением содержания органического углерода в поверхностных горизонтах от 0% в хвостах обогащения (AI) до 0.27% на участке с начальной стадией восстановительной сукцессии (AV) и 4.5% — на участке с более сложным растительным сообществом (AO). Содержание органического углерода в условно-фоновой почве (AP) составляло 5.4%. Методом термического анализа показано, что органическое вещество грубогумусового горизонта условно-фоновой почвы имеет более сложный состав по сравнению с органическим веществом, образовавшимся на материале хвостохранилища редкометалльных руд. Химический анализ образцов выявил существенное обогащение ТПО и почв, находящихся в непосредственной близости от действующего хвостохранилища, элементами, входящими в состав хвостов обогащения лопаритовых руд. Установлено отсутствие значительных содержаний потенциально токсичных элементов (Cu, Ni, Al, Fe, Mn, Zn) в биодоступной форме, что, в частности для хвостов обогащения, может быть обусловлено слабощелочной средой поровых растворов. Повышенное содержание в хвостах натрия как в валовой, так и в подвижной формах, а также малое содержание биодоступных форм фосфора обусловлено минеральным составом.

Исходно низкая численность и биомасса разных групп микроорганизмов в материале дна котловины хвостохранилища постепенно возрастала по

мере развития и усложнения растительного сообщества. На количество бактерий влияние оказывало как положение в ландшафте, так и сукцессия растительных группировок, тогда как на грибные сообщества — только развитие растительности. Увеличение численности бактерий, способных мобилизовать почвенный фосфор, может иметь значительную роль в обеспечении возможности зарастания техногенного материала в процессе первичного почвообразования. Рост численности и разнообразия микроскопических грибов свидетельствует об увеличении потенциала микробного сообщества к разложению органических веществ, что особенно важно на ранних этапах почвообразования. В исходном материале хвостохранилища сформировались специфические микоконплексы, отличающиеся от ТПО на начальной стадии сукцессии, от почв, расположенных вблизи от редкометалльного хвостохранилища и от фоновых почв района исследования. В микробном сообществе почв доминировали микроорганизмы, потребляющие карбоновые кислоты и углеводы. На физиологический профиль микробных сообществ и их функциональное разнообразие влияло как положение в ландшафте, так и развитие растительных группировок. При усложнении растительных сообществ и увеличении содержания углерода физиологический профиль микробиоты становился более выровненным, увеличивалась доля ДО на добавление трудноусваиваемых фенольных кислот. Поступление растительных остатков разнотравья в почву с зарастающими хвостами расширяло спектр доступных органических соединений и тем самым способствовало увеличению количественных и изменению качественных параметров микробного сообщества. Результаты исследования могут лечь в основу разработки природно-ориентированной технологии инициализации почвообразовательного процесса с применением штаммов аборигенных микроорганизмов, устойчивых к неблагоприятным условиям редкометалльных хвостохранилищ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа частично выполнена в рамках государственного задания 122022400093-9, микробиологические исследования проведены при поддержке гранта РНФ № 19-77-30012, описание, диагностика и классификация почв выполнены за счет государственного задания FMWS-2024-0010.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Онлайн-версия содержит дополнительные материалы, доступные по адресу <https://doi.org/10.31857/S0032180X25020108>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абакумов Е.В.* Первичные почвы в природных и антропогенных экосистемах. Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Тольятти, 2012. 41 с.
2. *Андроханов В.А.* Почвенно-экологическое состояние техногенных ландшафтов: динамика и оценка. Автореф. дис. ... д-р. биол. наук. Новосибирск, 2005. 36 с.
3. *Артамонова В.С.* Микробиологические особенности антропогенно трансформированных почв Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. 225 с.
4. *Горбачева Т.Т., Лусис А.В., Иванова Л.А.* Химическая мелиорация нефелиновых песков с применением осадка сточных вод регионального предприятия водопроводно-канализационного хозяйства // Вестник МГТУ. 2021. № 24. С. 88–96. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-1-88-96>
5. *Горячев А.А., Красавцева Е.А., Лащук В.В., Иконен П.В., Смирнов А.А., Максимова В.В., Макаров Д.В.* Оценка экологической опасности и возможности переработки хвостов обогащения лопаритовых руд // Экология и промышленность России. 2020. № 24. С. 46–51. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-12-46-51>
6. *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. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19010040>
7. *Грум-Гржимайло О.А., Биланенко Е.Н.* Комплексы микромицетов верховых болот побережья Кандалакшского залива Белого моря // Микология и фитопатология. 2012. Т. 46. № 5. С. 297–305.
8. *Дабах Е.В.* Редкоземельные элементы в почвах и растениях луговых биоценозов // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 4. С. 104–111. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-4-104-111>
9. *Добровольская Т.Г., Бызов Б.А., Гузев В.С., Кожевин П.А., Лысак Л.В., Полянская Л.М., Зенова Г.М., Марфенина О.Е., Степанов А.Л., Умаров М.М., Кураков А.В.* Методы почвенной микробиологии и биохимии. М.: Изд-во МГУ, 1991. 304 с.
10. *Добровольская Т.Г., Звягинцев Д.Г., Чернов И.Ю., Головченко А.В., Зенова Г.М., Лысак Л.В., Мануча-*

- рова Н.А., Марфенина О.Е., Полянская Л.М., Степанов А.Л., Умаров М.М. Роль микроорганизмов в экологических функциях почв // Почвоведение. 2015. № 9. С. 1087–1087. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15090038>
11. Евдокимова Г.А., Мозгова Н.П. Сравнительная характеристика микробной биомассы AI-FE-гумусовых подзолов Кольского полуострова // Почвоведение. 2001. № 12. С. 1465–1472.
 12. Евдокимова Г.А., Корнейкова М.В., Лебедева Е.В. Сообщества микромицетов в почвах в зоне воздействия алюминиевого завода // Микология и фитопатология. 2007. Т. 41. № 1. С. 20–28.
 13. Евдокимова Г.А., Корнейкова М.В., Лебедева Е.В., Калмыкова В.В. Микромицеты в песках и песчаных почвах природного и техногенного генезиса // Микология и фитопатология. 2009. Т. 43. № 2. С. 84–92.
 14. Евдокимова Г.А., Переверзев В.Н., Зенкова И.В., Корнейкова М.В., Редькина В.В. Эволюция техногенных ландшафтов (на примере отходов апатитовой промышленности). Апатиты: Изд-во Кольского научного центра, 2010. 146 с.
 15. Звягинцев А.Г., Бабьева И.П., Зенова Г.М. Биология почвы. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 445 с.
 16. Калмыкова В.В. Биологическая активность кузовных песков Мурманской области // Глубокая переработка минеральных ресурсов. Апатиты: КНЦ РАН, 2008. С. 172–175.
 17. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. <http://infosoil.ru> (дата обращения 15.04.2024).
 18. Копчик Г.Н. Современные подходы к ремедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами (обзор литературы) // Почвоведение. 2014. № 7. С. 851. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14070077>
 19. Корнейкова М.В. Сравнительный анализ численности и структуры комплексов микроскопических грибов в почвах тундры и тайги Кольского Севера // Почвоведение. 2018. № 1. С. 86–92. <https://doi.org/10.7868/S0032180X18010094>
 20. Корнейкова М.В., Никитин Д.А. Качественные и количественные характеристики почвенного микробиома в зоне воздействия выбросов Кандалакшского алюминиевого завода // Почвоведение. 2021. № 6. С. 725–734. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21060083>
 21. Красавина Т.Н., Розинова Е.Л., Касатов Б.К., Иванова В.П. Термический анализ минералов и горных пород / Под ред. Ивановой В.П. Л.: Недра, 1974. 339 с.
 22. Ладонин Д.В. Формы соединений тяжелых металлов в техногенно загрязненных почвах. Автореф. дис. ... докт. биол. наук. М., 2016. 42 с.
 23. Лебедева М.П., Кутовая О.В., Сиземская М.Л., Хохлов С.Ф. Микроморфологическая и микробиологическая диагностика первичного почвообразования на днище искусственного понижения в условиях полупустыни Северного Прикаспия // Почвоведение. 2014. № 11. С. 1332. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14110069>
 24. Махонина Г.И. Состав гумуса почв, образующихся на буроугольных отвалах при естественном зарастании // Проблемы рекультивации земель в СССР. Новосибирск: Наука, 1974. С. 205–209.
 25. Павлова Л.М., Куимова Н.Г., Римкевич О.В. Биотехнологический потенциал фосфатмобилизирующих бактерий в процессах рекультивации посттехногенных ландшафтов // Вестник ДВО РАН. 2008. № 3. С. 44–50.
 26. Павлова Л.М., Шумилова Л.П. Микробно-растительные сообщества в техногенных грунтах россыпной золотодобычи // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2021. № 12. С. 7–13. <https://doi.org/10.24412/2500-1000-2021-12-3-7-13>
 27. Павлович Н.В., Кокин А.В., Силаев В.И., Аронова Н.В., Цимбалистова М.В., Киселева Д.В., Слюсарь А.В. Сравнительный анализ состава микроэлементов у бактерий различных видов // Актуальные вопросы изучения особо опасных и природно-очаговых болезней: Сб. ст. науч.-пр. конф. Ростов-на-Дону, 25–26 сентября 2019 года. Новосибирск, 2019. С. 309–313.
 28. Переверзев В.Н. Генетические особенности почв природных поясов хибинских гор (Кольский полуостров) // Почвоведение. 2010. № 5. С. 548–557.
 29. Переверзев В.Н., Ивлиев А.И., Горбунов А.В., Ляпунов С.М. Первичное почвообразование на отвалах обогащения апатито-нефелиновых руд Кольского полуострова // Почвоведение. 2007. № 8. С. 1006–1013.
 30. Переломов Л.В., Асаинова Ж.С., Йошида С., Иванов И.В. Содержание редкоземельных элементов в почвах Приокско-террасного биосферного заповедника // Почвоведение. 2012. № 10. С. 1115.
 31. Приймак Т.И., Зосин А.П., Федоренко Ю.В., Кошкина Л.Б., Калабин Г.В. Экологические аспекты процессов геохимической трансформации хвостов обогащения апатито-нефелиновых руд Хибинского месторождения. Апатиты: КНЦ РАН, 1998. 51 с.
 32. Рой А.А., Рева О.Н., Курдиш И.К., Смирнов В.В. Биологические свойства фосфатмобилизующего штамма *Bacillus subtilis* ИМВ В-7023 // Прикладная биохимия и микробиология. 2004. № 40. С. 551–557.
 33. Сиромля Т.И. К вопросу о подвижных формах соединений химических элементов в почвах // Сибирский экологический журнал. 2009. № 16. С. 307–318.
 34. Сумина О.И., Власов Д.Ю., Долгова Л.Л., Сафронова Е.В. Особенности формирования сообществ микромицетов в зарастающих песчаных карьерах

- севера Западной Сибири // Вестник СПб. ун-та. Сер. 3. Биология. 2010. № 2. С. 84–90.
35. Allingham S.M., Nwaishi F.C., Andersen R., Lamit L.J., Elliott D.R. Microbial communities and biogeochemical functioning across peatlands in the Athabasca Oil Sands region of Canada: Implications for reclamation and management // *Land Degradation Development*. 2023. V. 34. P. 1504–1521. <https://doi.org/10.1002/ldr.4549>
 36. Baffi C., Dell'Abate M. T., Nassisi A., Silva S., Benedetti A., Genevini P. L., Adani F. Determination of biological stability in compost: A comparison of methodologies // *Soil Biol. Biochem.* 2007. V. 39. P. 1284–1293. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.12.004>
 37. Bogorodskaya A.V., Krasnoshchekova E.N., Trefilova O.V., Shishikin A.S. Seasonal dynamics of the development of microbiocenoses and invertebrate complexes on overburden dumps of the Borodino brown coal mine (KATEK) // *Geography and Natural Resources*. 2010. V. 4. P. 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.gnr.2010.11.005>
 38. Bubnova E.N. Diversity of the microscopic fungi in the littoral sands of the White Sea // *Moscow University Biological Sciences Bulletin*. 2017. V. 72. P. 121–127.
 39. Campbell C.D., Chapman S.J., Cameron C.M., Davidson M.S., Potts J.M. 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. V. 69. P. 3593–3599. <https://doi.org/10.1128/AEM.69.6.3593>
 40. Clarholm M., Skjellberg U., Rosling A. Organic acid induced release of nutrients from metal-stabilized soil organic matter—the unbutton model // *Soil Biol. Biochem.* 2015. V. 84. P. 168–176. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.02.019>
 41. Cong Y., Yu R.L., Yan Y., Weng B.S., Hu G.R., Sun J.W., Cui J.-Y., Yan Yan, Huang Y.Y. Source analysis of metals in the tea plant using linear correlation analysis combined with a lead-strontium isotope tracer // *Catena*. 2023. V. 229. P. 107194. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107194>
 42. Costa O.Y., Oguejiofor C., Zühlke D., Barreto C.C., Wünsche C., Riedel K., Kuramae E.E. Impact of different trace elements on the growth and proteome of two strains of *Granulicella*, class “Acidobacteriia” // *Front. Microbiol.* 2020. V. 11. P. 1227. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01227>
 43. Domsch K.H., Gams W., Anderson T.H. Compendium of soil fungi. Heidelberg: IHW–Verlag, 2007. 672 p.
 44. Fedotov P.S., Rogova O.B., Dzhendloda R.Kh., Karandashv V.K. Metal-organic complexes as a major sink for rare earth elements in soils // *Environ. Chem.* 2019. V. 16. № 5. P. 323–332. <https://doi.org/10.1071/EN18275>
 45. Forghani G., Mokhtari A.R., Kazemi G.A., Fard M.D. Total concentration, speciation and mobility of potentially toxic elements in soils around a mining area in central Iran // *Geochemistry*. 2015. V. 75. P. 323–334. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2015.05.001>
 46. Glotov V.E., Chlachula J., Glotova L.P., Little E. Causes and environmental impact of the gold-tailings dam failure at Karamken, the Russian Far East // *Engineering Geology*. 2018. V. 245. P. 236–247. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.08.012>
 47. Gómez-Brandón M., Herbón C., Probst M., Fornasier F., Barral M.T., Paradelo R. Influence of land use on the microbiological properties of urban soils // *Appl. Soil Ecology*. 2022. V. 175. P. 104452. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104452>
 48. Huang X., Deng H., Zheng C., Cao G. Hydrogeochemical signatures and evolution of groundwater impacted by the Bayan Obo tailing pond in northwest China // *Sci. Total Environ.* 2016. V. 543. P. 357–372. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.150>
 49. *Index Fungorum*. <http://www.indexfungorum.org> (дата обращения 15.04.2024)
 50. *IUSS Working Group WRB*. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Vienna: International Union of Soil Sciences (IUSS), 2022.
 51. Ivashchenko K., Lepore E., Vasenev V., Ananyeva N., Demina S., Khabibullina F., Vaseneva I., Selezneva A., Dolgikh A., Sushko S., Marinari S., Dovletyarova E. Assessing soil-like materials for ecosystem services provided by constructed Technosols // *Land*. 2021. V. 10. P. 1185. <https://doi.org/10.3390/land10111185>
 52. Ivashchenko K., Sushko S., Selezneva A., Ananyeva N., Zhuravleva A., Kudryarov V., Makarov M., Blagodatky S. Soil microbial activity along an altitudinal gradient: vegetation as a main driver beyond topographic and edaphic factors // *Appl. Soil Ecol.* 2021. V. 1685. P. 104197. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104197>
 53. Kasatkina E.A., Shumilov O.I., Kirtsideli I.Yu., Makarov D.V. Bioleaching potential of microfungi isolated from Arctic loparite ore tailings (Kola Peninsula, Northwestern Russia) // *Geomicrobiol. J.* 2023. V. 40. P. 285–294. <https://doi.org/10.1080/01490451.2022.2162166>
 54. Kavamura V.N., Esposito E. Biotechnological strategies applied to the decontamination of soils polluted with heavy metals // *Biotechnol. Adv.* 2010. V. 28. P. 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2009.09.002>
 55. Klich M.A. Identification of Common *Aspergillus* Species. Utrecht, The Netherlands: CBS Fungal Biodiversity Centre, 2002.
 56. Kooistra M.J., Pulleman M.M. Features Related to Faunal Activity // Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths. Elsevier, 2018. P. 447–469. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63522-8.00016-4>

57. Kossoff D., Dubbin W.E., Alfredsson M., Edwards S.J., Macklin M.G., Hudson-Edwards K.A. Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation // *Appl. Geochem.* 2014. V. 51. P. 229–245. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.09.010>
58. Krasavtseva E.A., Ivanova T.K., Maksimova V.V., Mosendz I.A., Kanareykina I.P., Panikorovskii T.L., Shirokaya A.A., Slukovskaya M.V. Improvement of the hydrophysical properties of substrates of technogenic landscapes using expanded vermiculite // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2021. V. 848. P. 12144. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/848/1/012144>
59. Krasavtseva E.A., Maksimova V.V., Elizarova E.I., Malysheva M.B. Assessment of Soil Pollution by Rare Earth Elements in the Area Affected by the Rare Metal Plant in Russia // *Euras. Soil Sci.* 2023. V. 56. № S2. P. S194–S201. <https://doi.org/10.1134/s1064229323601403>
60. Krasavtseva E., Maksimova V., Makarov D., Potorochin E. Modelling of the chemical halo of dust pollution migration in loparite ore tailings storage facilities // *Minerals.* 2021. V. 11. P. 10. <https://doi.org/10.3390/min11101077>
61. Krasavtseva E.A., Maksimova V.V., Makarov D.V., Selivanova E.A., Ikkonen P.V. Studies of Properties and Composition of Loparite Ore Mill Tailings // *J. Mining Sci.* 2021. V. 57. P. 531–538. <https://doi.org/10.1134/S1062739121030182>
62. Kumar S., Abedin M.M., Singh A.K., Das S. Role of Phenolic Compounds in Plant-Defensive Mechanisms. // *Plant Phenolics in Sustainable Agriculture.* Springer, 2020. https://doi.org/10.1007/978-981-15-4890-1_22
63. Lagomarsino A., Knapp B.A., Moscatelli M.C., de Angelis P., Grego S., Insam H. Structural and functional diversity of soil microbes is affected by elevated [CO₂] and N addition in a poplar plantation // *J. Soils Sediments.* 2007. V. 7 P. 399–405. <https://doi.org/10.1065/jss2007.04.223>
64. Liu J., Du C., Beaman H.T., Monroe M.B.B. Characterization of phenolic acid antimicrobial and antioxidant structure–property relationships // *Pharmaceutics.* 2020. V. 12. P. 419. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics12050419>
65. Marinari S., Bonifacio E., Moscatelli M. C., Falsone G., Antisari L. V., Vianello G. Soil development and microbial functional diversity: Proposal for a methodological approach // *Geoderma.* 2013. V. 192. P. 437–445. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.08.023>
66. Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Burachevskaya M.V., Bauer T. V. Sushkova S. N. Method of determining loosely bound compounds of heavy metals in the soil // *Methods X.* 2018. V. 5. P. 217–226. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2018.02.007>
67. Moscatelli M.C., Secondi L., Marabottini R., Papp R., Stazi S.R., Mania E., Marinari S. Assessment of soil microbial functional diversity: land use and soil properties affect CLPP-MicroResp and enzymes responses // *Pedobiologia.* 2018. V. 66. P. 36–42. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2018.01.001>
68. Nosanchuk J.D., Stark R.E., Casadevall A. Fungal melanin: what do we know about structure? // *Front. Microbiol.* 2015. V. 6. P. 1463. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01463>
69. Panikorovskii T.L., Mikhailova J.A., Pakhomovsky Y.A., Bazai A.V., Aksenov S.M., Kalashnikov A.O., Krivovichev S.V. Zr-Rich Eudialyte from the Lovozero peralkaline massif, Kola Peninsula, Russia // *Minerals.* 2021. V. 11. P. 982. <https://doi.org/10.3390/min11090982>
70. Plante A.F., Fernández J.M., Leifeld J. Application of thermal analysis techniques in soil science // *Geoderma.* 2009. V. 153. P. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.08.016>
71. R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. <https://www.R-project.org/> (дата обращения 15.04.2024)
72. Redkina V.V., Korneykova M.V., Shalygina R.R. Microorganisms of the technogenic landscapes: The Case of nepheline-containing sands, the Murmansk Region // *Processes and phenomena on the boundary between biogenic and abiogenic nature.* Springer, 2020. P. 561–579.
73. Rokade K., Mali G. Biodegradation of chlorpyrifos by *Pseudomonas desmolyticum* NCIM 2112 // *Int. J. Pharma Bio Sci.* 2013. V. 4. P. B609–B616.
74. Salminen R. et al. Geochemical Atlas of Europe. Part 1. Background Information, Methodology and Maps. Espoo: Geological Survey of Finland, 2005. 526 p.
75. Seifert K., Morgan-Jones G., Gams W., Kendrick B. The Genera of Hyphomycetes; Biodiversity Series. CBS, Reus: Utrecht, The Netherlands, 2011. № 9. P. 1–997.
76. Sessitsch A., Kuffner M., Kidd P., Vangronsveld J., Wenzel W. W., Fallmann K., Puschenreiter M. The role of plant-associated bacteria in the mobilization and phytoextraction of trace elements in contaminated soils // *Soil Biol. Biochem.* 2013. V. 60. P. 182–194. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.01.012>
77. Shamshiripour M., Motesharezadeh B., Rahmani H. A., Alikhani H. A., Etesami H. Optimal concentrations of silicon enhance the growth of soybean (*Glycine Max* L.) cultivars by improving nodulation, root system architecture, and soil biological properties // *Silicon.* 2022. V. 14(10). P. 5333–5345. <https://doi.org/10.1007/s12633-021-01273-3>
78. Shannon C., Weaver W. The mathematical theory of communication. Champaign-Urbana. US: The University of Illinois Press, 1964. 131 p.
79. Šimonovičová A., Kraková L., Pauditšová E., Pangallo D. Occurrence and diversity of cultivable autochthonous

- microscopic fungi in substrates of old environmental loads from mining activities in Slovakia // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2019. V. 172. P. 194–202.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.01.064>
80. Terekhova V.A., Ivanova A.E., Shitikov V.K., Kydraliev K.A. Assessment of the ecological risk of technogenic soil pollution on the basis of the statistical distribution of the occurrence of micromycete species // *Russ. J. Ecology.* 2017. V. 48. № 5. P. 417–424.
<https://doi.org/10.1134/S1067413617050125>
 81. Wang B., Chu C., Wei H., Zhang L., Ahmad Z., Wu S., Xie B. Ameliorative effects of silicon fertilizer on soil bacterial community and pakchoi (*Brassica chinensis* L.) grown on soil contaminated with multiple heavy metals // *Environ. Pollut.* 2020. V. 267. P. 115411.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115411>
 82. Wang L., Ji B., Hu Y., Liu R., Sun W. A review on in situ phytoremediation of mine tailings // *Chemosphere.* 2017. V. 184. P. 594–600.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.06.025>
 83. Wang P., Sun Z., Hu Y., Cheng H. Leaching of heavy metals from abandoned mine tailings brought by precipitation and the associated environmental impact // *Sci. Total Environ.* 2019. V. 695. P. 133893.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133893>
 84. Ward J.H. Hierarchical grouping to optimize an objective function // *J. Am. Stat. Assoc.* 1963. V. 58. P. 236–244.
<https://doi.org/10.1080/01621459.1963.10500845>
 85. Wolfaardt G.M., Hendry M.J., Korber D.R. Microbial distribution and diversity in saturated, high pH, uranium mine tailings, Saskatchewan, Canada // *Can. J. Microbiol.* 2008. V. 54. № 11. P. 932–940.
<https://doi.org/10.1139/w08-084>
 86. Wu Y.F., Wang Y.Z., Zhang X.Y. Mobilization of P by low molecular weight organic acids in a calcareous, neutral and acid soil with low available P status // *Energy, Environmental & Sustainable Ecosystem Development. International Conference on Energy, Environmental & Sustainable Ecosystem Development (EESD 2015).* Yunnan, 21–23 August 2015. P. 1–12.
https://doi.org/10.1142/9789814723008_0118
 87. Xu L., Lofts S., Lu Y. Terrestrial ecosystem health under long-term metal inputs: modeling and risk assessment // *Ecosystem Health and Sustainability.* 2016. V. 2. P. 11879026.
<https://doi.org/10.1002/ehs2.1214>
 88. Zhang J., Li S., Sun X., Tong J., Fu Z., Li J. Sustainability of urban soil management: analysis of soil physicochemical properties and bacterial community structure under different green space types // *Sustainability.* 2019. V. 11. P. 1395.
<https://doi.org/10.3390/su11051395>
 89. Zhu R.L., Wang D., Xu L., Shi R.-P., Wang J., Zheng M. Antibacterial activity in extracts of some bryophytes from China and Mongolia // *J. Hattori Botanical Laboratory.* 2006. V. 100. P. 603–615.

Chemical and Microbiological Characteristics of Soils Formed During Self-Growing of Waste from the Enrichment of Rare Metal Ores in the Subarctic

E. A. Krasavtseva^{a, b, *}, A. S. Soshina^{b, d}, T. K. Ivanova^{a, c},
I. A. Mosendz^{a, c}, V. V. Maksimova^{a, b}, M. V. Korneykova^{b, d},
N. V. Fokina^b, A. A. Chaporgina^b, E. S. Latyuk^b, I. R. Elizarova^b,
A. A. Shirokaya^c, A. V. Dolgikh^e, and M. V. Slukovskaya^{a, c, d}

^aCentre of Nanomaterials Science, Federal Research Centre “Kola Science Centre” of the Russian Academy of Sciences, Apatity, 184209 Russia

^bInstitute of North Industrial Ecology Problems of Federal Research Centre “Kola Science Centre” of the Russian Academy of Sciences, Apatity, 184209 Russia

^cTananaev Institute of Chemistry and Technology of Rare Elements and Mineral Raw Materials of Federal Research Centre “Kola Science Centre” of the Russian Academy of Sciences, Apatity, 184209 Russia

^dPeoples Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, 117198 Russia

^eInstitute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia

*e-mail: e.krasavtseva@ksc.ru

The development of rare metal ore deposits in the Murmansk region over the past 70 years has been accompanied by the storage of fine-grained enrichment waste, which led to the formation of two tailings fields. The field, which was decommissioned 35 years ago, is undergoing natural overgrowth processes.

Studies of the mineral and chemical composition, quantitative and qualitative characteristics of the microbiota of technogenic surface formations (TSF) and soils, formed on waste from the enrichment of loparite ores, have been carried out. With increasing age of TSF, the destruction of weakly stable alkaline minerals was observed simultaneously with an increase in carbon content from 0 to 4.5% in the upper soil horizon. Differential thermal analysis has shown that organic matter of the coarse humus horizon of the conditionally background soil had a more complex composition in comparison with the organic matter formed on the material of the tailings of rare metal ores. An increase in the number and biomass of bacteria and microscopic fungi, the species diversity of micromycetes, and a leveling of the functional profile of microorganisms during the transition from the initial tailings material to areas with vegetation were noted. The results obtained can form the basis for the development of a nature-based technology for initializing the soil-forming process using indigenous strains of microorganisms that are resistant to the unfavorable conditions of rare metal tailings.

Keywords: Protic Arenosol (Tecnic), Gleyic Arenosol (Folic, Technic), Albic Podzol (Arenic, Folic), tailings, heavy metals, rare earth elements, soil bacteria, microscopic fungi, physiological profile of the microbial community