

ЧИСЛЕННОСТЬ И ТАКСОНОМИЧЕСКОЕ РАЗНООБРАЗИЕ МИКРООРГАНИЗМОВ В ПРОФИЛЕ ПОЧВ Г. МУРМАНСКА

© 2024 г. М. В. Корнейкова^{a, b, *} (<http://orcid.org/0000-0002-6167-1567>),
А. С. Сошина^{a, b}, Н. В. Фокина^b, В. А. Мязин^{a, b}, Е. В. Козлова^a, В. И. Васенев^c

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

^bИнститут проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН,
Академгородок, 14а, Анадырь, 184209 Россия

^cУниверситет Вагенингена, Вагенинген, 6707 Нидерланды

*e-mail: korneykova.maria@mail.ru

Поступила в редакцию 01.04.2024 г.

После доработки 27.06.2024 г.

Принята к публикации 12.07.2024 г

Проведен сравнительный анализ химических и микробиологических свойств по профилю в почвах (Urbic Technosol) г. Мурманска по сравнению с подзолом (Albic Podzol) на фоновой территории. В городских почвах выявлено увеличение значений pH и содержания основных биогенных элементов С, N, P, K, особенно заметное для глубинных горизонтов. В верхних горизонтах городских почв отмечено увеличение численности культивируемых бактерий: сапротрофных до 3–6 млн КОЕ/г, олиготрофных до 4.5–8 млн КОЕ/г – и уменьшение количества культивируемых микроскопических грибов на два порядка (до 10^3 КОЕ) по сравнению с природными подзолами. При этом в нижних горизонтах городских почв выявлено увеличение численности всех групп микроорганизмов по сравнению с фоном. Такая закономерность характерна и для разнообразия комплексов микромицетов в городе. В верхних горизонтах городских почв отмечена пространственная неоднородность видового состава и структуры комплексов микроскопических грибов, тогда как в более глубоких горизонтах наблюдается относительная однородность состава доминирующих видов: *Trichocladium griseum*, относительное обилие 41–77%. Отмечено увеличение доли и обилия условно патогенных микромицетов групп BSL-1 и BSL-2 50–60% в верхних горизонтах почв в городе по сравнению с природными подзолами, где эта доля составляет 30%. Степень микологической опасности городских почв варьировала от опасной до безопасной, значения индекса микологической опасности (Im) изменились от 7–20 в центре города до 1.5–3.6 на окраине. Результаты показали, что урбанизация в Арктике не только приводит к изменениям химических свойств почв, но и создает новую нишу для развития микроорганизмов в глубинных почвенных горизонтах.

Ключевые слова: урбанизация, микробное сообщество, обилие видов грибов, условно патогенные микромицеты, индекс микологической опасности, арктическая зона Российской Федерации, Urbic Technosol, Albic Podzol

DOI: 10.31857/S0032180X24120109, **EDN:** JCRTGS

ВВЕДЕНИЕ

Почвы арктических городов привлекают интерес исследователей уникальным сочетанием экстремальных климатических условий и высокой антропогенной нагрузки. Микробиом арктических почв своеобразен и существенно отличается от других регионов [71]. Происходящая в городах трансформация растительного покрова, создание почвенных конструкций, загрязнение и связанные

с ними изменения физико-химических параметров почв формируют отличные от природных аналогов микробные сообщества [6, 22]. В частности, эффект городского “острова тепла” приводит к повышению температуры почвы, стимулирует микробиологическую активность [74] и обеспечивает благоприятные условия для развития микробного сообщества, создавая специфические ниши, которые могут превратиться в своеобразные очаги биоразнообразия микроорганизмов [33, 44]. В то же

время повышение температуры и загрязнение среды создают условия для роста сообществ стресс-толерантных условно патогенных видов микроорганизмов, сопряженное с рисками для здоровья человека [18, 65].

Изучение состава, структуры и состояния почвенного микробного сообщества необходимо для оценки функционирования экосистемы арктического города, особенно в условиях потепления Арктики [48]. Так, многие исследования анализируют роль почвенных микроорганизмов в секвстрации и стабилизации органического вещества [14, 50, 57]. Микроорганизмы также играют ключевую роль в процессах поддержания круговорота питательных веществ и биоразнообразия [1, 67, 68], детоксикации почв, производстве биологически активных веществ и прочих процессах [7, 58]. На данный момент изучение комплексов почвенных культивируемых бактерий и микроскопических грибов в основном проводилось для городов умеренного и теплого климата России, например, Благовещенск, Владивосток, Воронеж, Киров, Курск, Москва, Нальчик, Пущино, Ростов-на-Дону, Сочи, Ярославль и др. [5, 18, 19, 23, 27, 32, 51]. Для арктических городов исследования единичны: была изучена структура микробного сообщества городов Апатиты, Кандалакша, Лабытнанги и Надым [23, 32, 60]. При этом большинство из них направлены на анализ санитарно-эпидемиологических рисков городских почв, в основном сосредоточены на выявлении опасных групп бактерий – возбудителей соответствующих заболеваний (роды *Escherichia*, *Enterobacter*, *Klebsiella*, *Salmonella* и др.) [20, 41, 42, 51], тогда как сообществам потенциально опасных микроскопических грибов не уделялось достаточно внимания.

Как правило, микробиологические исследования почв в Арктике сосредоточены на верхних почвенных горизонтах [50]. Результаты, полученные в таких исследованиях, могут быть представительны для природных почв [16, 29]. Однако в городских почвах, где более глубокие слои, как правило, искусственно созданы или сильно трансформированы, изучение профильного распределения микробиологических параметров очень актуально [53, 64]. Для почв крупнейшего в мире арктического г. Мурманска последствия урбанизации были ранее продемонстрированы в отношении химического загрязнения, физических свойств почвы, биомассы и численности копий генов разных групп микроорганизмов [61], а также содержания санитарно-показательных групп бактерий [34].

Цель работы – анализ численности разных групп микроорганизмов и таксономического разнообразия культивируемого сообщества микроскопических грибов, в том числе долевое участие условно патогенных микромицетов, в почвах г. Мурманска.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Характеристика района исследований. Мурманск (68°58' N; 33°05' E) – крупнейший город мира за Полярным кругом, расположенный на севере Кольского полуострова, на восточном побережье Кольского залива. Район относится к Атлантико-Арктической зоне умеренного климата из-за влияния теплого течения Гольфстрим. Средняя температура самых холодных месяцев около –11°C, что значительно теплее, чем в целом по Кольскому полуострову, а средняя температура летних месяцев +13°C. Большая часть годовой суммы осадков (500 мм) выпадает в виде снега в зимний период [26]. Район относится к зоне лесотундры, протянувшейся узкой полосой шириной около 50 км параллельно побережью Баренцева моря. Подзолы являются доминирующим зональным типом почв [29].

Отбор образцов. Почвенные образцы отбирали на территории г. Мурманска (в центральной части и на окраине) в июле 2021 г. В качестве фонового использовали ненарушенный участок (MUR-NR), расположенный в лесотундровой зоне, в районе п. Абрам-мыс (рис. 1). На каждом участке заложили по одному полнопрофильному почвенному разрезу и по две точки, где выполняли бурение с использованием почвенного бура Eijkelkamp (Нидерланды) с насадками для супесчаных и суглинистых грунтов. В каждой точке образцы отбирали в трехкратной повторности. Описание участков приведено в табл. 1. Результаты морфологического описания почвенных разрезов и физико-химических свойств почв подробно описаны в ранее [61]. Согласно Мировой реферативной базе почвенных ресурсов [55] почва фонового участка (MUR-NR) классифицирована как Leptic Albic Podzol (Arenic, Folic), городские почвы – как Urbic Technosols (Arenic).

Для микробиологического анализа образцы отбирали по горизонтам стерильно по стандартной методике отбора проб [56], транспортировали в лабораторию и до начала анализа хранили в холодильнике при температуре +4°C. Анализы проводили в свежих образцах на следующий день после отбора.

Численность и разнообразие культивируемых микроорганизмов. Численность колониообразующих единиц (КОЕ) и разнообразие культивируемых микроскопических грибов определяли методом посева на среду Чапека с добавлением молочной кислоты (4 мл/л) для ингибирования роста бактерий [10]. Повторность каждого варианта пятикратная. Инкубацию проводили в термостатах при температуре 27°C в течение 7–10 сут, при 5°C в течение 5–6 недель, чтобы дополнительно выделить психротолерантные штаммы и 37°C – для выявления условно патогенных (оппортунистических) видов, которые могут представлять опасность для здоровья

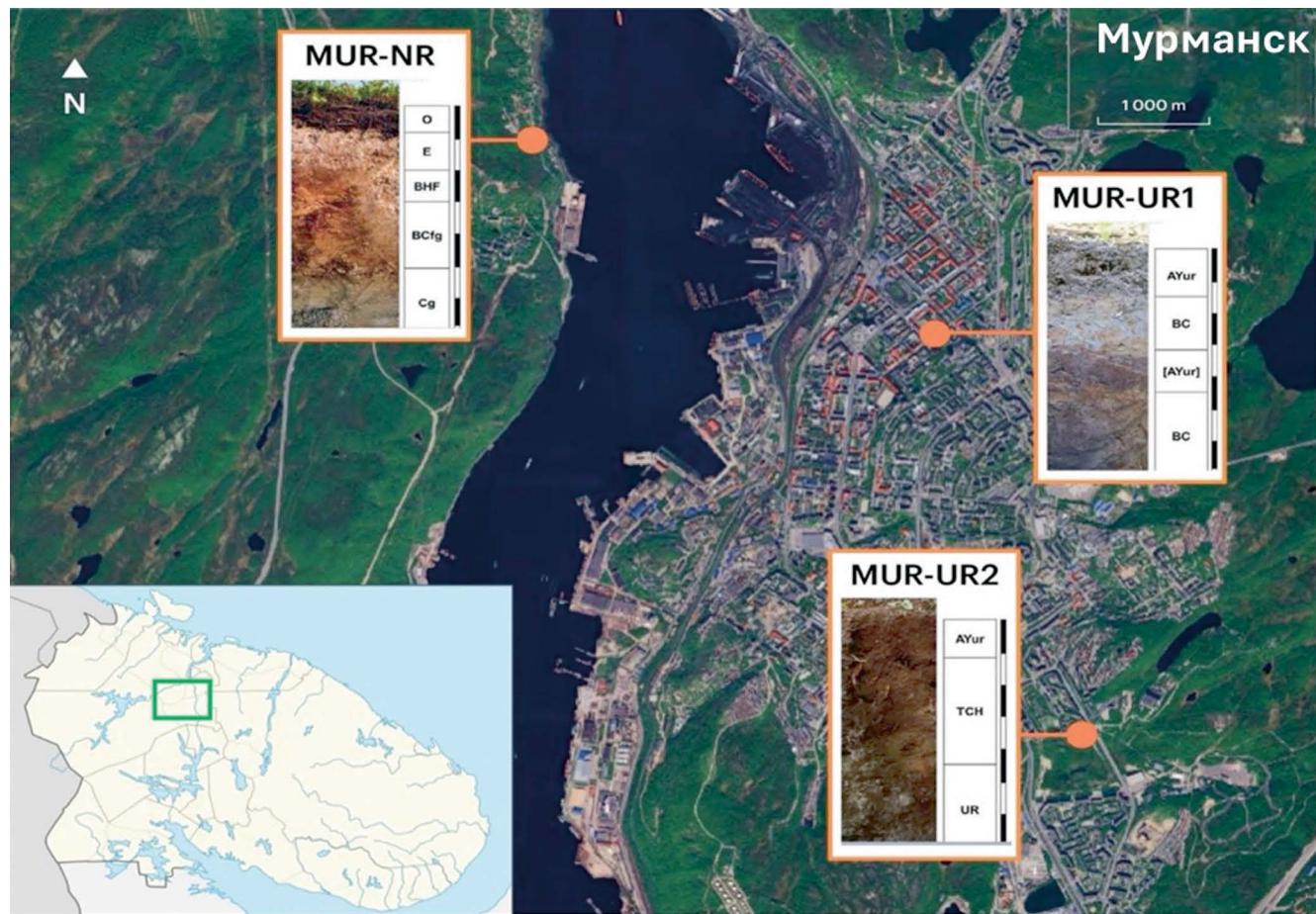


Рис. 1. Расположение участков отбора проб.

Таблица 1. Характеристика участков

Участок	Координаты	Характеристика	Почва	Растительность
MUR-NR	68.98394 N 33.01746 E	Фоновый участок, характеризуется пологим рельефом, материнские породы – моренные валунные пески и супеси	Leptic Albic Podzol (Arenic, Folic)	Древесный ярус с преобладанием <i>Pinus friesiana</i> и <i>Picea obovata</i> и присутствием <i>Betula pubescens</i> . Кустарниковый ярус представлен <i>Juniperus communis</i> . Травяно-кустарничковый ярус представлен <i>Empetrum nigrum</i> , <i>Vaccinium vitis-idaea</i> , <i>V. myrtillus</i> , <i>Ledum palustre</i>
MUR-U1	68.97267 N 33.08597 E	Участок расположен в центральной части города	Urbic Technosols (Arenic)	Древесный ярус представлен <i>Sorbus Gorodkovii</i> . Травянисто-кустарничковый ярус – злаково-разнотравное сообщество с доминированием <i>Festuca rubra</i> и присутствием <i>Taraxacum officinale</i> и <i>Ranunculus acris</i>
MUR-U2	68.94488 N 33.11141 E	Участок расположен на окраине города	Urbic Technosols (Arenic)	Древесно-кустарниковый ярус представлен <i>Betula pubescens</i> и <i>Syringa josikaea</i> , в травянистом ярусе доминировали виды сем. <i>Poaceae</i> , <i>Festuca rubra</i> , а также <i>Taraxacum officinale</i>

человека. Анализ биологического разнообразия микроскопических грибов выполняли на основе культурально-морфологических признаков (микроскоп Olympus CX41) с использованием современных определителей [47, 59, 70]. Наименование видов и систематическое положение корректировали по базе данных CABI Bioscience Databases [54]. Для ряда видов, выделенных в форме стерильного мицелия, идентификацию осуществляли на основании анализа участка ITS1–5.8S–ITS2 рДНК. Выделение ДНК осуществляли по методике, описанной Глушаковой с соавт. [4], но культуры подвергали трем циклам обработки, поскольку мицелиальные грибы более устойчивы к внешним воздействиям.

Представленность видов оценивали по показателю относительного обилия видов. Дополнительно для характеристики сообщества микроскопических грибов использовали индекс разнообразия Шеннона, индекс доминирования Симпсона и индекс выровненности Пиелу.

Численность культивируемых сапротрофных бактерий определяли на мясо-пептонном агаре, численность олиготрофных бактерий – на слабо-минерализованной среде Аристовской [2]. Расчеты численности культивируемых бактерий и грибов проводили на абсолютно сухую почву, высушеннюю при 105°C до постоянного веса.

Анализ условно патогенных микромицетов. Выделенные виды микромицетов относили к группе условно патогенных (УПГ) по классификации [46], согласно которой их разделили на три группы, в соответствии с их потенциальной опасностью для здоровья человека: BSL-1, BSL-2, BSL-3 (по мере увеличения степени опасности), что соответствует группам патогенности IV, III, II, согласно СанПиН 3.3686-21 [30].

Для оценки неблагоприятного для человека изменения среды в результате изменения комплексов микроскопических грибов рассчитывали индекс комплексной оценки микологической опасности по формуле [21]:

$$Im = D C,$$

где Im – индекс микологической опасности, D – изменение разнообразия (количество видов) УПГ по сравнению с контролем, C – изменение содержания (обилия) УПГ по сравнению с контролем.

Увеличение разнообразия и обилия УПГ в 2 раза, т.е. $Im > 4$, позволяет оценить ситуацию как микологически опасную.

Статистическую обработку экспериментальных данных и их визуализацию выполняли в программах R 4.3.3 и MS Excel. Оценку значимости различий численности микроорганизмов в разных участках проводили с помощью однофакторного

дисперсионного анализа (ANOVA, критерий Краскела–Уоллиса) с последующей процедурой по-парных множественных сравнений. Выбор метода был обусловлен результатами предварительных анализов: проверка гипотезы нормальности распределения экспериментальных данных (критерий Шапиро–Уилка) и однородности дисперсий выборок (критерий Левена). Кластерный анализ обилия микроскопических грибов выполняли по методу Варда, дистанции были рассчитаны по евклидовому расстоянию. Его результаты были визуализированы тепловой картой с помощью пакетов “pheatmap” и “RColorBrewer”. Анализ сходства видового состава микромицетов, основанного на признаке присутствие–отсутствие вида в почвенном горизонте, проводили с помощью кластерного анализа по методу Варда, реализованного в пакете “vegan”, дистанции были рассчитаны по критерию сходства Серенсена. Связь между химическими и микробиологическими свойствами анализировали с помощью корреляционного анализа (коэффициент корреляции Пирсона). Факторный анализ данных проводили по методу главных компонент с помощью пакета “FactoMineR”.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Физико-химические свойства почв. Результаты морфологического описания почвенных разрезов и физико-химических свойств почв подробно описаны в работе [61]. Отдельные данные использовали для выявления взаимосвязи между химическими и микробиологическими параметрами почв. В табл. 2 приведены основные физико-химические параметры изучаемых почв.

Для верхнего торфо-подстилочного горизонта фоновой почвы (MUR-NR) показана сильнокислая реакция среды, для нижележащих минеральных горизонтов pH_{H_2O} смешался в слабокислую область и достигал максимального значения 5.5 в горизонте BCs. В профиле MUR-U1 pH был в среднем на единицу больше, чем в естественной почве, при этом наибольшие значения наблюдались в средней части профиля, а наименьшие – в верхнем слое почвы. В отличие от первых двух профилей pH_{H_2O} в MUR-U2 варьировал от нейтрального до слабощелочного, при этом средние значения были на три единицы выше, чем в природных условиях.

Содержание общего углерода (TC) в верхнем 5–10 см слое городских почв было значительно ниже, чем в торфо-подстилочном горизонте подзола фонового участка, а для минеральных горизонтов показана обратная закономерность. Профильное распределение углерода в фоновой почве имело два максимума – в горизонтах O и Bhs, что характерно для подзолов [29]. В профиях городских почв распределение углерода также имело два максимума; однако в данном случае они

Таблица 2. Физико-химические свойства почв

Горизонт (глубина, см)	Плотность	pH	TC, %	TN, %	TC/TN	P, мг/кг	K, мг/кг
MUR-U1							
Au (0–10)	0.9	5.18	3.71	0.19	19	1054	84
BC (10–35)	1.38	5.93	0.39	0.03	13	1002	64
Aub (35–45)	1.35	5.69	2.42	0.1	24	401	55
BC (45–55)	1.34	5.82	0.77	0.04	17	428	105
C (55–90)	1.6	5.5	0.59	0.03	20	550	50
MUR-U2							
Au (0–10)	0.85	7.03	4.20	0.14	30	669	121
BCu (10–55)	1.41	8.23	0.99	0.04	26	340	102
ABub (55–90)	1.5	7.5	1.31	0.08	16	610	110
MUR-NR							
O (0–7)	0.16	3.66	46.47	1.13	41	348	75
E (7–20)	1.45	5.4	0.45	0.02	29	64	64
Bhs (20–30)	1.2	5.12	3.77	0.09	40	554	65
BCs (30–55)	1.22	5.5	1.19	0.05	25	260	57
Cg (55–90)	1.62	5.49	0.8	0.04	21	675	44

соответствовали поверхностному и погребенному горизонтам. Соотношение общего углерода к общему азоту (TC/TN) в городских почвах было ниже, чем в подзолах, по всему профилю, что, вероятно, является результатом дополнительного поступления азота, как это часто отмечается для городских почв по сравнению с природными эталонами [64, 73].

Содержание фосфора в городских почвах было в 2–3 раза выше, чем в природных почвах, что особенно заметно для профиля MUR-U1 в центральной части города. Вероятно, деятельность человека способствовала дополнительному поступлению фосфора, что также часто отмечается для городских почв и иногда характеризуется как фосфорное загрязнение городских почв [75]. Содержание калия в городских почвах также было на 10–20% выше, чем в фоновом подзоле. Плотность сложения верхнего слоя городской почвы была выше, чем естественной, а для нижележащих минеральных горизонтов разница между объектами была незначимой.

Численность микроорганизмов по почвенному профилю. Микроскопические грибы. Численность культивируемых микромицетов в верхних горизонтах городских почв изменялась от 4×10^3 до 9×10^3 КОЕ/г почвы (рис. 2а), тогда как в фоновой почве она была на несколько порядков выше и составила 2×10^5 КОЕ/г почвы ($p < 0.05$). Подобная

закономерность отмечалась в работах [24, 28]. В минеральных горизонтах выявлена иная закономерность: уже на глубине 10 см численность культивируемых микромицетов в городских почвах была выше, чем в фоновой почве, что ранее отмечалось в других работах [11]. Максимальная разница в численности микромицетов городских и фоновых почв выявлена в более глубоких погребенных слоях (35–45 см), далее вниз по профилю разница уменьшается, и на глубине 70–80 см различий практически не обнаружено.

В фоновой почве отмечено постепенное уменьшение численности культивируемых грибов от поверхностного к минеральным горизонтам, что ранее выявлено в работах других авторов [1, 3, 13]. Подобное распределение численности микроскопических грибов характерно для почв разных климатических зон и связано с уменьшением вниз по профилю доступного органического вещества [7]. Лесные почвы, как правило, имеют на поверхности разнообразный по составу опад, формирующий богатую органическим веществом подстилку. В более глубоких слоях численность грибов меньше из-за недостатка органического вещества, избыточного увлажнения и слабой аэрации минеральной толщи лесотундровых почв [62, 69].

В городских почвах распределение численности во многом зависит от истории землепользования.

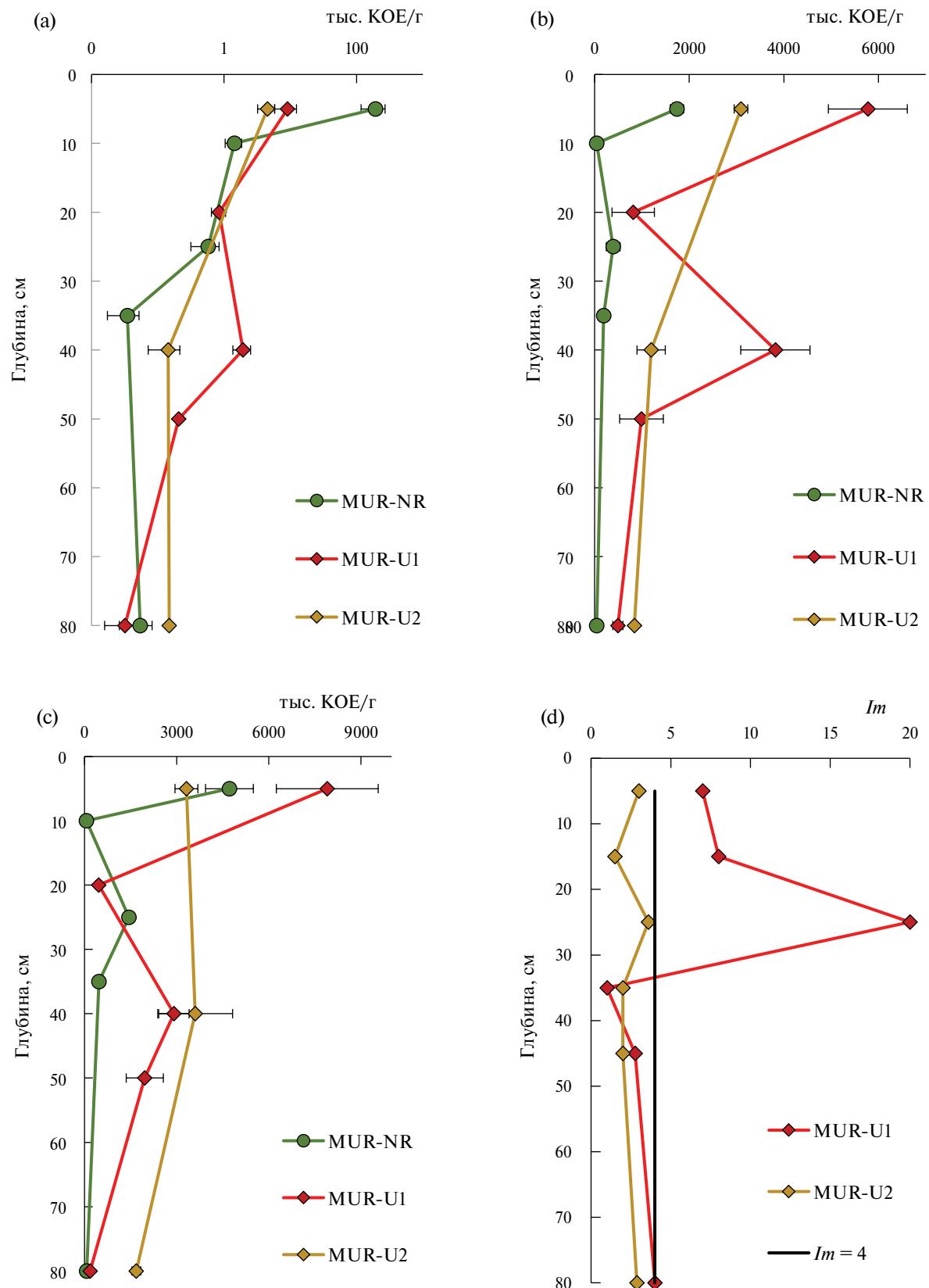


Рис. 2. Численность микроскопических грибов (а), сапротрофных (б) и олиготрофных (с) бактерий и индекс микологической опасности (д) почв: центр города – MUR-U1, окраина города – MUR-U2, фоновый участок – MUR-NR.

Накопление грибов в нижележащих горизонтах связано с наличием погребенных горизонтов, артефактов и иных субстратов [73], которые могут быть нишой для развития микроорганизмов [35, 61]. Также микромицеты могут долгое время сохраняться в погребенных горизонтах в неактивном состоянии в виде спор, катализатором развития которых является поступление дополнительного органического вещества — лимитирующего фактора для почвенных микроорганизмов [11]. Численность грибов положительно коррелировала с содержанием углерода и азота ($r = 0.65-1.00$), что хорошо согласуется с предыдущими исследованиями [9, 38, 40] и отрицательно с плотностью почвы и актуальной кислотностью ($r = -0.60-0.85$). Известно, что в результате уплотнения почвы при вытаптывании уменьшается микробная активность и функциональное разнообразие [43, 63], что связано с недостаточным количеством кислорода — лимитирующим фактором для многих микроскопических грибов. В то же время установлено, что в городских условиях на снижение численности грибов оказывает влияние характерное подщелачивание верхних горизонтов почв [37].

Бактерии. Для сапротрофных и олиготрофных бактерий выявлена иная закономерность. Уже в верхнем горизонте в городских почвах численность обеих групп была выше, чем в фоновой почве в 2–3 раза и изменялась от 3 до 6 млн КОЕ/г почвы — для сапротрофных бактерий ($p < 0.05$) и от 4.5–8 млн КОЕ/г почвы — для олиготрофных (рис. 2b, 2c). В целом численность олиготрофных бактерий была выше, чем сапротрофных в городских и фоновых почвах ($p < 0.05$). Ранее выполненные исследования в г. Апатиты показали сходную закономерность. Численность бактерий в верхних горизонтах селитебной и общественно-рекреационной почв превышала бактериальную численность в относительно чистых участках лесных почв окрестностей в 2 раза [60]. Аналогичные тенденции выявлены для сапротрофного бактериального комплекса почв Сыктывкара, где в урбанизме численность была выше, чем в верхнем горизонте контрольных почв [5]. Для верхних горизонтов урбанизмов Москвы выявлены более высокие значения численности сапротрофного бактериального комплекса — от 1.2 до 3.15×10^7 КОЕ/г почвы [19].

Это может быть связано как с тем, что микробиота городской среды более молодая по сравнению со зрелыми биоценозами, сформированными в лесной подстилке, и для нее характерны высокие скорости роста и быстрый захват трофических ресурсов, так и с тем, что городские почвы имеют нейтральную или слабощелочную реакцию, что более предпочтительно для развития почвенных бактерий [32].

Накопление бактерий в городских почвах в минеральных горизонтах также отмечено и другими

авторами для урбанизмов средней полосы [18]. В профиле MUR-U1 на глубине 20 см численность обоих групп бактерий снижается почти на порядок, в то время как в погребенном горизонте (примерно на глубине 40 см) происходит рост численности бактерий до 4 млн КОЕ/г, а затем снова снижение. В профиле MUR-U2 погребенный горизонт отсутствует и уменьшение численности бактерий по почвенному профилю происходит более плавно.

Таксономическое разнообразие культивируемых микроскопических грибов. Всего из почв г. Мурманска и фоновой лесотундровой зоны выделено 28 видов микроскопических грибов, относящихся к 14 родам, 9 семействам (Aspergillaceae, Chaetomiaceae, Hypocreaceae, Mucoraceae, Ophiostomataceae, Saccotheciaceae, Tilachlidiaeae, Torulaceae, Umbelopsidaceae), 8 порядкам (Dothideales, Eurotiales, Hypocreales, Mucorales, Ophiostomatales, Pleosporales, Sordariales, Umbelopsidales), 5 классам (Dothideomycetes, Eurotiomycetes, Mucoromycetes, Sordariomycetes, Umbelopsidomycetes) и 2 отделам (Ascomycota, Mucoromycota). Отдел Mucoromycota представлен родами *Mucor* и *Umbelopsis*. Отдел Ascomycota представлен 12 аноморфными родами (*Acremonium*, *Aspergillus*, *Aureobasidium*, *Humicola*, *Paecilomyces*, *Penicillium*, *Sporothrix*, *Talaromyces*, *Tilachlidium*, *Torula*, *Trichocladium*, *Trichoderma*). Также выделен один штамм стерильного мицелия неопределенного систематического положения ввиду сложного культивирования.

Отмечено сокращение видового разнообразия микроскопических грибов в верхних горизонтах городских почв по сравнению с фоновыми и увеличение в более глубоких почвенных горизонтах (рис. 3). Так, в фоновой почве в верхнем горизонте выделено 10 видов, в почве городских участков 4–5 видов; в минеральных горизонтах количество выделенных видов в почве лесотундры варьировало от 2 до 4, тогда как в городских от 2 до 7. Сокращение разнообразия культивируемых микроскопических грибов в верхних горизонтах городских почв по сравнению с фоновыми территориями отмечено и в работах других авторов [22, 24]. Тогда как в более глубоких горизонтах городских участков возможно накопление разнообразных видов грибов, находящихся в форме спор. Установлено, что в городских почвах увеличивается доля спор в биомассе грибов по сравнению с фоновыми минеральными горизонтами аналогичной глубины [15, 61, 66]. Известно, что погребенные горизонты почв являются природными резервуарами сохранения видового разнообразия микроскопических грибов [35]. В проведенном ранее исследовании для г. Апатиты, также расположенного на Кольском полуострове, не обнаружено подобной закономерности, максимальная видовая насыщенность отмечалась для верхних горизонтов как городских, так и фоновых почв [60]. Возможно, это связано с более

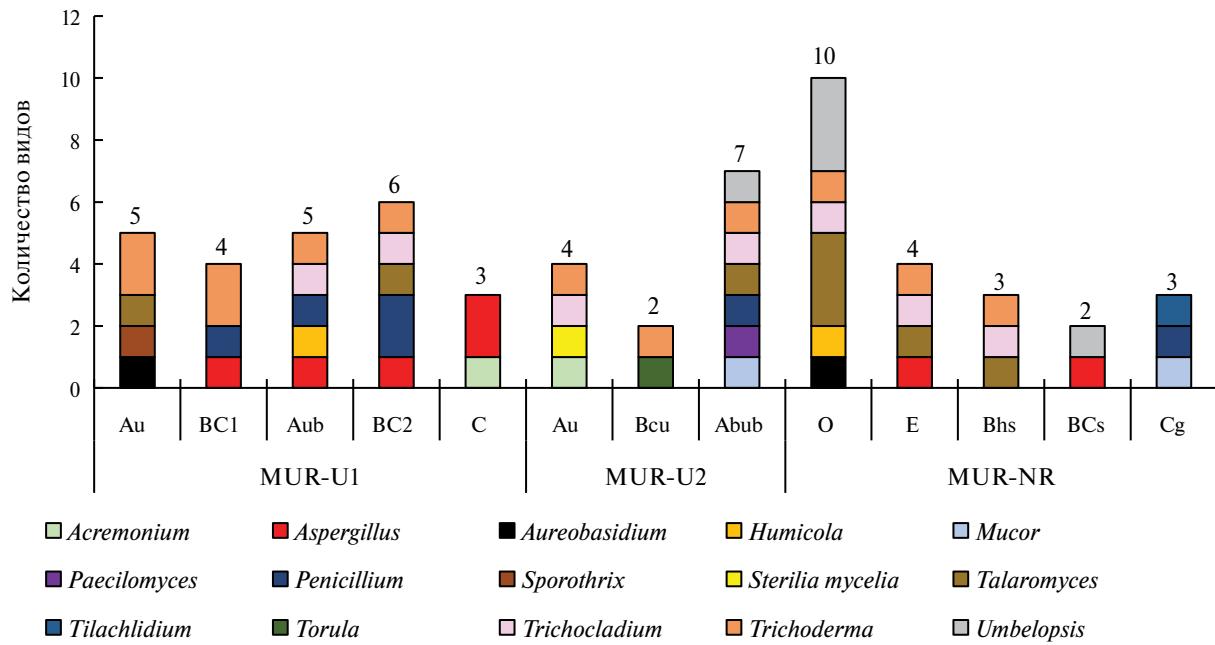


Рис. 3. Представленность микроскопических грибов на уровне родов: центр города – MUR-U1, окраина города – MUR-U2, фоновый участок – MUR-NR.

молодым возрастом Апатитов по сравнению с областным центром г. Мурманска, где имеет место явление микологической памяти в погребенных горизонтах, отражающих долгую историю землепользования [66].

Наибольшим видовым разнообразием характеризовались роды *Aspergillus*, *Trichoderma* и *Umbelopsis* (по 4 вида) (рис. 4). Представители рода *Aspergillus* в основном встречались в разных почвенных горизонтах участка MUR-U1, где составляли 17–67% от общего количества выделенных видов. Это можно объяснить присутствием более южных видов в урбанизированных северных территориях [22]. Представители рода *Trichoderma* встречались во всех изученных почвах на разных глубинах, где составляли 10–50% от общего количества выделенных видов. Грибы рода *Trichoderma*, являются колонизаторами растительных остатков, отличаются высокой ферментативной и антибактериальной активностью, а также отвечают за плодородие и супрессивные свойства почвы [47]. Грибы рода *Umbelopsis* в основном были приурочены к фоновой лесотундре, где достигали 30–50% от общего количества видов. Грибы рода *Umbelopsis* широко распространены в почвах холодных и умеренно холодных регионов, в том числе и на территории Кольского полуострова, являются психрофилами и олиготрофами, чувствительными к антропогенной нагрузке [16, 45]. Урбанизированные почвы отличались специфическим видовым составом микрокомплексов из-за низкой частоты встречаемости видов рода

Penicillium – широко распространенных в почвах Кольского полуострова [13, 16].

В верхних горизонтах городских почв доминировали виды *Sporothrix pallida* (MUR-U1), *Acremonium turorum* и *Trichoderma viride* (MUR-U2), тогда как в фоновой почве был наиболее распространен *Umbelopsis isabellina* (MUR-NR). В целом по почвенному профилю как в городских, так и фоновых почвах отмечена смена доминантных видов. Однако вид *Trichocladium griseum* является доминирующим с высоким относительным обилием (41–77%) в более глубоких почвенных горизонтах как городских (на глубине 35–90 см), так и фоновых почв (на глубине 10–30 см). Ранее выполненные исследования в г. Апатиты показали сходную закономерность: в городских и фоновых почвах на аналогичной глубине доминировал *Trichocladium griseum* с высокими индексами обилия (33–100%). Этот вид является факультативным анаэробом, радиальная скорость которого в опытах со сменой атмосферы воздуха на азот не отличалась от скорости при обычной атмосфере [17], что позволяет ему находиться в глубоких почвенных горизонтах. Также этот вид широко распространен в мерзлотных почвах, обладает высокой целлюлозолитической активностью [47] и ранее был выделен из городских почв Москвы с высокой временной и пространственной встречаемостью [27] и в урбанизированных Воронежа как индикаторный вид для урбозоисистем [31]. Таким образом, пространственная неоднородность состава и структуры комплексов микроскопических грибов наблюдается только

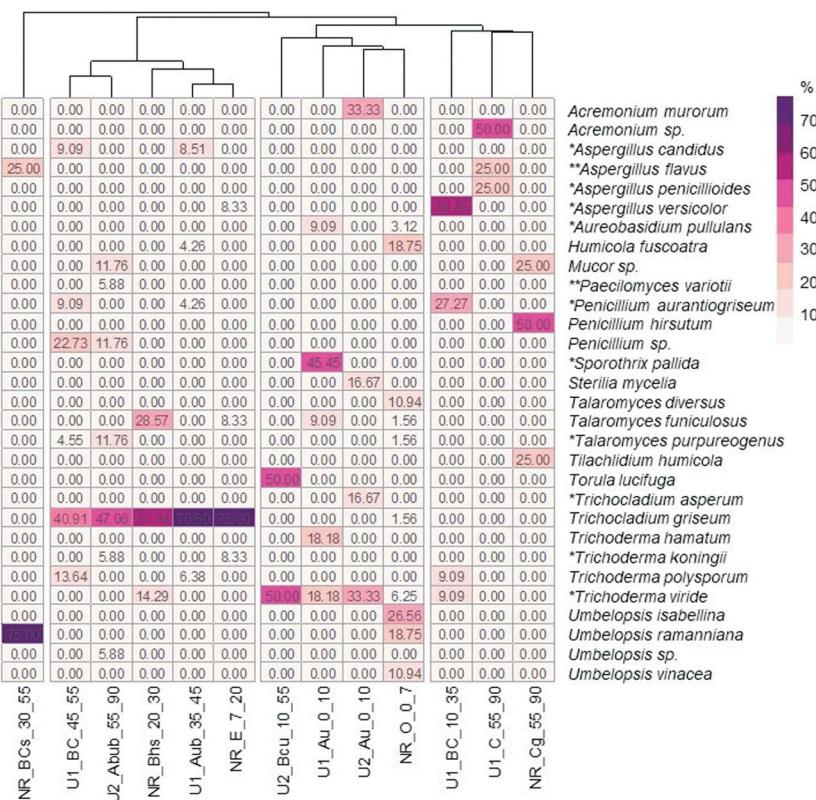


Рис. 4. Тепловая карта обилия почвенных микроскопических грибов: центр города – U1, окраина города – U2, фоновый участок – NR. ** условно патогенные грибы группы BSIL-2, * условно патогенные грибы группы BSIL-1.

для верхних горизонтов, тогда как в более глубоких слоях отмечается относительная однородность состава доминирующих микроскопических грибов для всех изученных почв, что подтверждается кластеризацией, основанной на обилии видов.

В целом, и городские, и фоновые изученные почвы характеризовались низким видовым разнообразием. Индексы разнообразия Шеннона колебались в разных горизонтах городских почв от 1.00 до 2.32, в фоновой почве составляли 0.81–2.80 (табл. 3). Значения индекса Шеннона для верхнего горизонта фоновой лесотундры соответствуют данным по фоновым районам Кольского полуострова [8]. Для городских почв сопоставимые значения индексов были получены в селитебных зонах Апатитов ($H' = 0.7–1.9$) и Воронежа ($H' = 1.8–2.2$) [15, 25]. Однако в урбанизмах Москвы и Серпухова индексы разнообразия были выше ($H' = 2.7–4.0$) [22].

Видовой состав комплексов микромицетов почв Мурманска специфичен для каждого горизонта, о чем свидетельствуют низкие значения коэффициента Сёренсена (рис. S1). Для микромицетов горизонтов участка MUR-U1 индекс сходства составлял 0.18 ± 0.08 , для горизонтов MUR-U2 – 0.11 ± 0.01 ,

Таблица 3. Значение индексов Шеннона (H'), Симпсона (C) и Пиелу (e) для сообществ микроскопических грибов в почвах Мурманска

Разрез	Горизонт (глубина, см)	H'	C	e
MUR-U1	Au (0–10)	2.04	0.29	0.88
	BC (10–35)	1.62	0.39	0.81
	Aub (35–45)	1.24	0.60	0.53
	BC (45–55)	2.24	0.26	0.87
	C (55–90)	1.50	0.38	0.95
MUR-U2	Au (0–10)	1.92	0.28	0.96
	Bcu (10–55)	1.00	0.50	1.00
	Abub (55–90)	2.32	0.27	0.83
MUR-NR	O (0–7)	2.80	0.17	0.84
	E (7–20)	1.21	0.58	0.60
	Bhs (20–30)	1.38	0.43	0.87
	BCs (30–55)	0.81	0.63	0.81
	Cg (55–90)	1.50	0.38	0.95

для фоновой лесотунды – 0.15 ± 0.07 . Коэффициент сходства между сообществами грибов разных урбанизированных участков составил 0.16 ± 0.07 так же, как сходство городских участков в целом с фоновой лесотундой – 0.16 ± 0.05 . Коэффициенты соответствуют значениям, полученным ранее для г. Кандалакши [22]. Причиной высокой видоспецифичности почвенных местообитаний может быть неоднородность городских почв и наличие специфических субстратов для развития микромицетов [65].

Комплексы почвенных микроскопических грибов урбозоисистем отличались друг от друга не только видовым составом, но и структурой сообщества. Для верхнего горизонта фоновой лесотунды характерна полидоминантная структура сообщества грибов, при которой доминируют несколько видов и присутствуют много редко встречающихся, индекс доминирования Симпсона в этом горизонте минимальный – 0.17. Такая структура свойственна фоновым почвам северных регионов [8]. В верхних горизонтах городских почв структура сообщества меняется, увеличивается индекс обилия доминирующих видов с 25 до 35–45%, и сокращается число редких видов с пяти в лесотундре до 2–4 в городских условиях, значения индекса доминирования возрастают до 0.28–0.29. В более глубоких горизонтах как городских, так и фоновых почв структура сообществ в большинстве горизонтов становится монодоминантной, при которой индекс обилия доминирующего вида составляет 50–77%, а индексы доминирования увеличиваются до 0.38–0.63. При этом число редких видов в городских почвах варьирует от 0 до 6 (0–86% от общего выделенного видового богатства), в фоновой лесотундре – от 0 до 3 (0–75%). В то же время индексы выровненности Пиелу значительно не изменились и по горизонтам, и по участкам и варьировали от 0.53 до 1.00 (0.84 ± 0.04). Это свидетельствует о сбалансированном сообществе микроскопических грибов, где несмотря на доминирование одного вида, сохраняются и редкие виды, доля которых значительна от общего количества выделенных видов. Такой тип видовой структуры, вероятно, определяется большим разнообразием субстратов в городских почвах, является следствием заноса и внедрения видов, нетипичных для данной зоны и объясняется возможностью развития минорных видов в значительно измененных условиях среды в городе по сравнению с зональными условиями [22]. Таким образом, структура грибного сообщества имеет больше общего на аналогичных глубинах как в городских, так и фоновых почвах, чем с таковой почвенным профилю.

Условно патогенные микроскопические грибы. Для оценки степени микологической загрязненности участков исследований использовали индекс микологической опасности. Он характеризует возможность присутствия (в течение длительного промежутка време-

ни) опасных (потенциально патогенных, микотоксичных, аллергенных) видов микроскопических грибов в количествах, превышающих естественный флюктуационный уровень в данных местообитаниях. Значения индексов часто невелики на территориях с каким-либо одним типом воздействия, а в наибольшей степени увеличение выражено на урбанизированных территориях [21].

В центральной части города (MUR-U1) верхние почвенные горизонты (0–30 см) относились к микологически опасным ($Im = 7–20$) (рис. 2д). Значения индексов были сопоставимы со значениями, выявленными для урбанизированных г. Лабытнанги и г. Москвы ($Im = 8–18$) [21]. В погребенных почвенных горизонтах (30–80 см) центра города значения индексов не превышали порогового значения ($Im = 1.0–3.9$) и относились к условно микологически чистым. На участке, расположенном на окраине города (MUR-U2), все почвенные горизонты отнесены к микологически безопасным ($Im = 1.5–3.6$), значения индексов сопоставимы с таковыми для почв Кандалакши и Казани ($Im = 2.7–3.7$) [21, 36].

В верхних горизонтах городских почв происходит увеличение доли УПГ (до 50–60% от общего количества видов), по сравнению с фоновыми (30%) (рис. S2). Известно, что в антропогенно-преобразованных почвах, в том числе в результате урбанизации, происходит накопление опасных видов микроскопических грибов [12, 22, 31, 36]. Отмечено увеличение доли видов УПГ в некоторых нижележащих горизонтах как городских (MUR-U1, С) так и фоновых почв (MUR-NR, BCs). Однако это существенно не влияло на распределение их содержания (обилия) по глубине профиля. Содержание опасных видов в фоновой почве распределено относительно равномерно по всему профилю, в каждом горизонте обилие УПГ составляет 11–25%. Для городских почв отмечено концентрирование содержания УПГ в верхних горизонтах глубиной 0–30 см, особенно для участка в центре города (MUR-U1), где обилие этой группы достигает 73–91%.

В основном виды УПГ представлены группой BSL-1, и только в нижележащих горизонтах встречаются представители BSL-2 – потенциальные возбудители глубоких оппортунистических микозов [46]. К грибам этой группы относились два вида: *Aspergillus flavus* (MUR-U1 и MUR-NR) и *Paecilomyces variotii* (MUR-U2). Оба вида являются космополитными почвенными сапротрофами с широкой экологической амплитудой [47], были отмечены в оппортунистической микробиоте других городов [21] и ранее были выделены из почв Кольского полуострова [13].

Факторы, влияющие на микробное сообщество городских почв. Факторный анализ позволяет определить уровень антропогенной нагрузки на химические и микробиологические компоненты почв

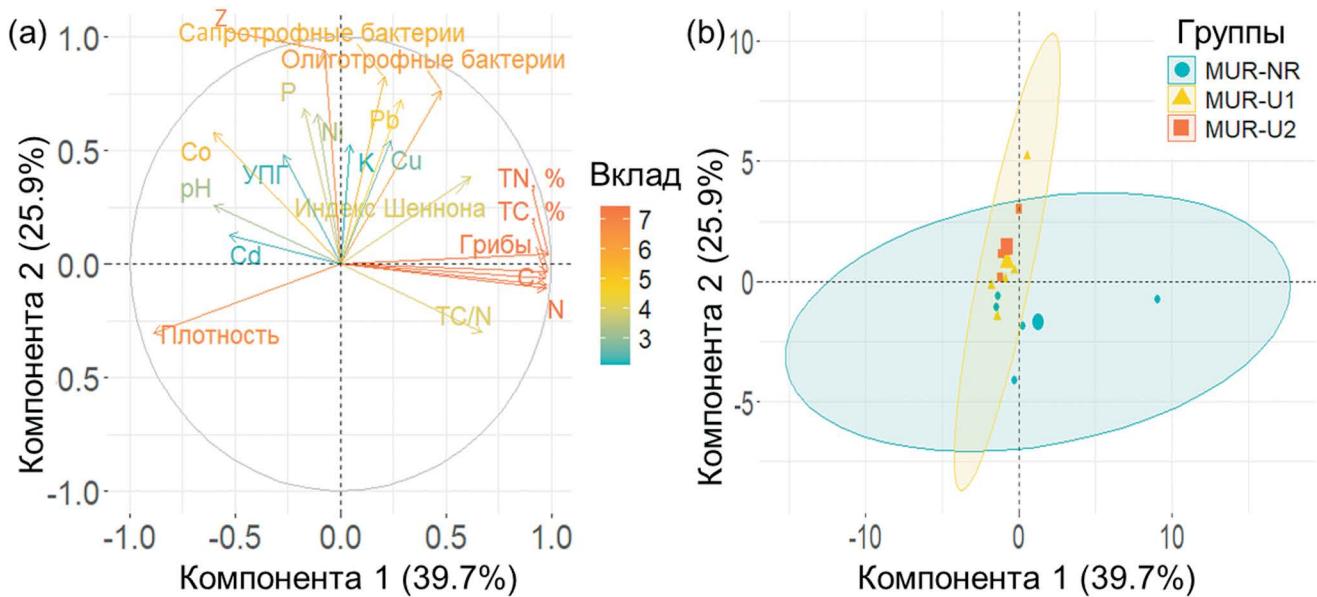


Рис. 5. Компонентный анализ (а) и шкалирование точек (б) по физико-химическим и микробиологическим свойствам почв.

и выделить основные факторы, влияющие на микробные сообщества [52]. По результатам компонентного анализа, 66% общей вариабельности физико-химических и микробиологических параметров объясняются двумя компонентами (рис. 5а).

Первая компонента – эдафический фактор – отрицательно коррелировала с уплотненностью и актуальной кислотностью. Положительные корреляции выявлены с содержанием углерода и азота, численностью и разнообразием культивируемых микроскопических грибов. Данная компонента вобрала в себя основную изменчивость микробных характеристик и химических элементов, напрямую стимулирующих развитие микробиоты. Первая компонента определяется содержанием доступного углерода и азота для грибов, как основных деструкторов органического вещества в северных экосистемах [58], и уплотненностью почвы, угнетающей развитие мицелиальных эукариотов [43, 63].

Вторая компонента – загрязнение, связанное с урбанизацией – положительно коррелировала с численностью прокариотических микроорганизмов, обилием оппортунистических микромицетов и содержанием некоторых потенциально токсичных элементов (Zn, Pb, Ni, Co) и элементов – индикаторов урбанизации (K и P). Вторая компонента в основном определяет стимулирующие параметры для микробного сообщества и, в первую очередь, влияет на прокариотический комплекс, как наиболее чувствительный компонент микробиоты [49]. Известно, что низкие концентрации потенциально токсичных веществ могут оказывать стимулирующее действие на почвенные

микроорганизмы (феномен гормезиса) [39], также микроорганизмы обладают адаптационной способностью к загрязнениям [72].

Проанализированные точки были разделены на три кластера (рис. 5б). Урбанизированные почвы образовали два перекрывающих друг друга кластера, что свидетельствует о низкой дисперсии физико-химических и микробиологических свойств в городских почвах с разной историей освоения. Фоновые почвы отличались по своим характеристикам от урбанизированных, хотя и образовали пересекающийся кластер. Таким образом, оба городских участка испытывают антропогенное воздействие в результате урбанизации, выражющееся в уменьшении органического углерода, увеличении pH и уровня загрязнения. При этом происходит угнетение сообщества микроскопических грибов, стимулирование прокариотического комплекса и оппортунистической микробиоты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты настоящего исследования дополняют ранее полученные данные о влиянии урбанизации на свойства почв и микробных сообществ в г. Мурманске и в определенной степени подтверждают гипотезу, что городские почвы могут быть нишней для развития микроорганизмов. В верхних горизонтах городских почв отмечено увеличение численности сапротрофных и олиготрофных бактерий и уменьшение численности и разнообразия микроскопических грибов по сравнению с природными подзолами. В городских почвах складываются наиболее благоприятные условия для развития

бактерий изучаемых групп за счет изменения рН почвы и появления дополнительных субстратов и артефактов. Для микромицетов, по-видимому, состав подстилки, содержание органического вещества и низкая уплотненность играют определяющую роль, потому в верхних горизонтах городских почв их численность ниже, чем в природных почвах. Глубинные горизонты городских почв являются резервуаром сохранения разнообразия микроскопических грибов в виде спор, отражая изменение микологического состава почв в истории землепользования. Это проявляется в увеличении численности и разнообразия микромицетов по почвенному профилю. В верхних горизонтах изученных почв наблюдается пространственная неоднородность комплексов микромицетов, отражающаяся в смене доминирующих видов и структуры сообщества в сторону концентрации доминирования для городских участков. Более глубокие горизонты как городских, так и фоновых почв сохраняют относительную пространственную однородность, выраженную в монодомировании вида – факультативного анаэроба целлюлозолитика *Trichocladium griseum*. Горизонты изученных почв сохраняют высокую видоспецифичность, проявляющуюся в большом количестве случайных видов, имеющих невысокие индексы обилия, но составляющие до 86% от общего видового богатства горизонта. Критические значения индекса микологической опасности, увеличение доли и обилия условно патогенных микромицетов в верхних почвенных горизонтах центра города по сравнению с зональными подчеркивают важность и необходимость проведения мониторинга условно патогенных видов микроскопических грибов для оценки степени микологической опасности городских почв. Антропогенный фактор в городе являлся ключевым, оказывающим влияние на химические и микробиологические свойства почв. В результате его воздействия городские почвы по изучаемым параметрам более схожи друг с другом, чем с фоновыми почвами.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность коллегам, участвующим в экспедиционных работах, за помощь в подготовке почвенных разрезов и их полевом описании (А.В. Долгих, Институт географии РАН; Д.А. Саржанов, РУДН; Ю.А. Дворников, РУДН) и аккредитованной почвенно-экологической лаборатории РУДН в лице заведующего Ю.Л. Сотниковой за проведение химических анализов почвенных образцов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Полевые работы и отбор почвенных образцов выполнены в рамках темы НИР по госзаданию 122022400109-7. Микробиологические исследования городских почв проведены при поддержке гранта РНФ № 23-17-00118, анализ оппортунистической микробиоты в рамках темы FSSF-2024-0023. Анализ данных и подготовка публикации выполнены в рамках проекта системы грантовой поддержки научных проектов РУДН.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Онлайн-версия содержит дополнительные материалы, доступные по адресу <https://doi.org/10.31857/S0032180X24120109>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ананьева Н.Д., Иващенко К.В., Сушко С.В. Микробные показатели городских почв и их роль в оценке экосистемных сервисов (обзор) // Почвоведение. 2021. № 10. С. 1231–1246. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21100038>
2. Аристовская В.В., Владимирская М.Е., Голлербах М.М. Большой практикум по микробиологии. М.: Высшая школа, 1962. 491 с.
3. Богословская А.В., Пономарева Т.В., Шапченко О.А., Шишикин А.С. Оценка состояния микробных комплексов почв лесотундровой зоны в условиях аэробиотехногенного загрязнения // Почвоведение. 2012. № 5. С. 582–593.
4. Глушакова А.М., Качалкин А.В., Чернов И.Ю. Особенности динамики эпифитных и почвенных дрожжевых сообществ в зарослях недотроги железконосной на перегнойно-глеевой почве // Почвоведение. 2011. № 8. С. 966–972.
5. Глушакова А.М., Лысак Л.В., Белов А.А., Иванова А.Е., Лапыгина Е.В., Прокофьева Т.В., Умарова А.Б. Локальный мониторинг бактериального комплекса городских почв Сыктывкара в 2019 и 2020 гг. // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 2021. № 2. С. 45–50.
6. Гончарова О.Ю., Семенюк О.В., Матышак Г.В., Богатырев Л.Г. Биологическая активность городских почв: пространственная вариабельность и определяющие факторы // Почвоведение. 2022. № 8. С. 1009–1022. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22080032>

7. Добровольская Т.Г., Звягинцев Д.Г., Чернов И.Ю., Головченко А.В., Зенова Г.М., Лысак Л.В., Манучарова 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>
8. 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.
9. Заварзина А.Г., Семенова Т.А., Белова О.В., Лисов А.В., Леонтьевский А.А., Иванова А.Е. Продукция лактазы и деструкция гуминовых кислот почвенными микроскопическими грибами // Микробиология. 2018. Т. 87. № 3. С. 233–241.
<https://doi.org/10.7868/S00265618030023>
10. Звягинцев Д.Г. Методы почвенной микробиологии и биохимии. М.: Изд-во МГУ, 1991. 304 с.
11. Кириенко О.А., Иманова Е.Л. Микробиологическая оценка экологического состояния урбанизированных почв // Экология урбанизированных территорий. 2008. № 4. С. 57–61.
12. Кирцидели И.Ю., Власов Д.Ю., Зеленская М.С., Ильюшин В.А., Новожилов Ю.К., Чуркина И.В., & Баранцевич Е.П. Оценка антропогенной инвазии микроскопических грибов в арктические экосистемы (архипелаг Шпицберген) // Гигиена и санитария. 2020. № 99. С. 145–151.
<https://doi.org/10.33029/0016-9900-2020-99-2-145-151>
13. 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>
14. Корнейкова М.В., Васенев В.И., Салтан Н.В., Слуковская М.В., Сошина А.С., Заводских М.С., Сотникова Ю.Л., Долгих А.В. Анализ эмиссии CO₂ городскими почвами в условиях Крайнего Севера // Почвоведение. 2023. № 11. С. 1385–1399.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X23600373>
15. Корнейкова М.В., Никитин Д.А., Долгих А.В., Сошина А.С. Микробиота почв города Апатиты (Мурманская область) // Микология и фитопатология. 2020. Т. 54. № 4. С. 264–277.
<https://doi.org/10.31857/S0026364820040078>
16. Корнейкова М.В., Редькина В.В., Шалыгина Р.Р. Альго-микологическая характеристика почв в сосновом и березовом лесах на территории заповедника “Пасвик” // Почвоведение. 2018. № 2. С. 211–220.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X18020090>
17. Кураков А.В., Лаврентьев Р.Б., Нечитайло Т.Ю., Голышин П.Н., Звягинцев Д.Г. Разнообразие факультативно анаэробных мицелиальных микроскопических грибов в почвах // Микробиология. 2008. Т. 77. № 1. С. 103–112.
18. Лысак Л.В. Бактериальные сообщества городских почв. Автореф. дис. ... докт. биол. наук. М., 2010.
19. Лысак Л.В., Шоба С.А., Прокофьева Т.В., Глушакова А.М., Гончаров Н.В., Белов А.А. Обилие и разнообразие прокариотных сообществ пылеэрозоля и городских почв на территории Москвы // Почвоведение. 2023. № 5. С. 654–664.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X22601359>
20. Макарова А.П., Напрасникова Е.В., Буковская Н.Е. Экологическая и санитарно-бактериологическая характеристика почвенного покрова города Братска // Известия Иркутского гос. ун-та. Сер. Биология. Экология. 2018. № 26. С. 18–27.
<https://doi.org/10.26516/2073-3372.2018.26.18>
21. Марфенина О.Е. Антропогенные изменения комплексов микроскопических грибов в почвах. Автореф. дис. ... докт. биол. наук. М, 1999. 49 с.
22. Марфенина О.Е. Антропогенная экология почвенных грибов. М.: Медицина для всех, 2005. 196 с.
23. Марфенина О.Е., Кулько А.Б., Иванова А.Е., Согонов М.В. Микроскопические грибы во внешней среде города // Микология и фитопатология. 2002. № 36. С. 22–32.
24. Марьина-Чермных О.Г., Марьин Г.С., Анаева Н.Н. Влияние интенсивного антропогенного воздействия на формирование микромицетных сообществ и фитотоксичность почвы // Вестник Алтайского гос. аграрного ун-та. 2012. № 10. С. 72–77.
25. Молодых Т.А., Свистова И.Д. Видовое разнообразие почвенных микромицетов рекреационных зон города Воронежа. Материалы международной молодежной научной школы-конференции “Воспроизводство, мониторинг и охрана природных, природно-антропогенных и антропогенных ландшафтов”. 2021. С. 76–80.
26. Нестеркин М.Г., Хлуднева Н.Н. Состояние плодородия почв Мурманской области // Достижения науки и техники АПК. 2018. Т. 32. № 6. С. 10–14.
<https://doi.org/10.24411/0235-2451-2018-10602>
27. Николаева В.В., Иванова А.Е. Почвенные целлюлозолитические грибные сообщества при точечной застройке городских территорий (на примере Москвы) // Проблемы агрохимии и экологии. 2015. № 2. С. 45–0.
28. Овчинникова Т.А., Панкратов Т.А. Некоторые микробиологические особенности почвенного покрова города Новокуйбышевска в осенний период // Самарская Лука. 2008. Т. 17. № 2. С. 373–383.
29. Перееверзев В.Н. Лесные почвы Кольского полуострова. М.: Наука, 2004. 232 с.
30. СанПиН 3.3686-21. Санитарно-эпидемиологические требования по профилактике инфекционных болезней. М., 2021. 708 с.
31. Свистова И.Д., Назаренко Н.Н., Потапова О.П. Влияние городской нагрузки на комплекс почвен-

- ных микромицетов (на примере левобережной части г. Воронежа) // Экология и промышленность России. 2016. № 20. С. 46–50.
32. Стома Г.В., Манучарова Н.А., Белокопытова Н.А. Биологическая активность микробных сообществ в почвах некоторых городов России // Почвоведение. 2020 № 6. С. 703–715. <https://doi.org/10.31857/S0032180X2006012X>
33. Тенеева А.Н., Глушакова А.М., Качалкин А.В. Влияние городских теплотрасс на дрожжевые сообщества почв // Почвоведение. 2018. № 4. С. 486–492. <https://doi.org/10.7868/S0032180X18040093>
34. Турчановская Н.С., Богданова О.Ю. Микробиологическое исследование почвы города Мурманска // Успехи современного естествознания. 2011. № 8. С. 72.
35. Тухбатова Р.И. Микробиологическая характеристика археологических памятников на территории Республики Татарстан. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Казань, 2008. 23 с.
36. Халдеева Е.В., Баязитова А.А., Лисовская С.А., Глушко Н.И., Паршаков В.Р. Микробиота почв городских территорий с различным уровнем антропогенной нагрузки // Гигиена и санитария. 2017. № 96. С. 505–508. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-6-505-508>
37. Широких И.Г., Ашихмина Т.Я., Соловьева Е.С. Сравнительный анализ биоиндикационного значения различных параметров микробной системы в урбанизмах города Киров // Вестник Ин-та биологии Коми НЦ УрО РАН. 2012. № 3. С. 41–43.
38. Широких И.Г., Косолапова А.И., Широких А.А., Завьялова Н.Е. Микробная трансформация органического вещества дерновоподзолистой почвы Предуралья при различном использовании и внесении минеральных удобрений // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 1. С. 102–110. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2019-1-102-110>
39. Agathokleous E., Wang Q., Iavicoli I., Calabrese E.J. The relevance of hormesis at higher levels of biological organization: hormesis in microorganisms // Current Opinion in Toxicology. 2022. V. 29. P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.cotox.2021.11.001>
40. Bastida F., Eldridge D.J., Garcia C., Kenny Png G., Bardgett R.D., Delgado-Baquerizo M. Soil microbial diversity–biomass relationships are driven by soil carbon content across global biomes // The ISME J. 2021. V. 15. P. 2081–2091. <https://doi.org/10.1038/s41396-021-00906-0>
41. Benami M., Gross A., Herzberg M., Orlofsky E., Vonshak A., Gillor O. Assessment of pathogenic bacteria in treated graywater and irrigated soils // Sci. Total Environ. 2013. V. 458. P. 298–302. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.04.023>
42. Beroigui M., Naylo A., Walczak M., Hafidi M., Charzynski P., Switonik M., Rozanski S., Boularbah A. Physico-chemical and microbial properties of urban park soils of the cities of Marrakech, Morocco and Torun, Poland: Human health risk assessment of fecal coliforms and trace elements // Catena. 2020. V. 194. P. 104673. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104673>
43. Beylich A., Oberholzer H.R., Schrader S., Höper H., Wilke B.M. Evaluation of soil compaction effects on soil biota and soil biological processes in soils // Soil Till. Res. 2010. V. 109. P. 133–143. <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.05.010>
44. Blume-Werry G., Klaminder J., Krab E.J., Monteux S. Ideas and perspectives: Alleviation of functional limitation by soil organisms is key to climate feedbacks from northern soils // Biogeosciences Discussions. 2022. P. 1–18. <https://doi.org/10.5194/bg-2022-215>
45. Brunner I., Plotze M., Rieder S., Zumsteg A., Furrer G., Frey B. Pioneering fungi from the damma glacier fore-field in the Swiss Alps can promote granite weathering // Geobiology. 2011. V. 9. P. 266–279. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4669.2011.00274.x>
46. de Hoog G.S., Guarro J., Gene J., Ahmed S., Al-Hatmi A.M.S., Figueras M.J., Vitale R.G. Atlas of Clinical Fungi, 4th edition. Hilversum. 2020.
47. Domsch K.H., Gams W., Anderson T.H. Compendium of Soil Fungi. Verlag, Eching, 2007. 672 p.
48. Ernakovich J.G., Barbato R.A., Rich V.I., Schädel C., Hewitt R.E., Doherty S.J., Whalen E.D., Abbott B.W., et al. Microbiome assembly in thawing permafrost and its feedbacks to climate // Global Change Biol. 2022. V. 28. P. 5007–5026. <https://doi.org/10.1111/gcb.16231>
49. Fei Y., Huang S., Zhang H., Tong Y., Wen D., Xia X., Wang H., Luo Y., Barcelo D. Response of soil enzyme activities and bacterial communities to the accumulation of microplastics in an acid cropped soil // Sci. Total Environ. 2020. V. 707. P. 135634. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135634>
50. Frossard A., De Maeyer L., Adamczyk M., Svenning M., Verleyen E., Frey B. Microbial carbon use and associated changes in microbial community structure in high-Arctic tundra soils under elevated temperature // Soil Biol. Biochem. 2021. V. 162. P. 108419. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108419>
51. Glushakova A.M., Kachalkin A.V., Prokofieva T.V., Lysak L.V. Enterobacteriaceae in soils and atmospheric dust aerosol accumulations of Moscow city // Current Res. Microbial Sci. 2022. V. 3. P. 100124. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2022.100124>
52. Gomez-Brandon M., Herbon C., Probst M., Fornasier F., Barral M.T., Paradelo R. Influence of land use on the microbiological properties of urban soils // Appl. Soil Ecol. 2022. V. 175. P. 104452. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104452>
53. Howard J.L. Urban anthropogenic soils – A review // Adv. Agronomy. 2021. V. 165. P. 1–57. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.08.001>

54. <http://www.indexfungorum.org/> Accessed 15.02.2024.
55. [https://www.isric.org/sites/default/files/WRB_fourth_edition_2022-12-18.pdf/](https://www.isric.org/sites/default/files/WRB_fourth_edition_2022-12-18.pdf) Accessed 10.02.2024
56. ISO 18400-206:2018. In Soil Quality-Sampling- Part. 206: Collection, Handling and Storage of Soil under Aerobic Conditions for the Assessment of Microbiological Processes, Biomass and Diversity in the Laboratory. ISO: Geneva, Switzerland, 2018. 10 p.
57. Ivashchenko K., Ananyeva N., Vasenev V., Sushko S., Seleznyova A., Kudeyarov, V. Microbial C-availability and organic matter decomposition in urban soils of megapolis depend on functional zoning // Soil Environ. 2019. V. 38. P. 31–41.
<https://doi.org/10.25252/SE/19/61524>
58. Kaviya N., Upadhyay V.K., Singh J., Khan A., Panwar M., Singh A.V. Role of Microorganisms in Soil Genesis and Functions // Mycorrhizosphere and Pedogenesis. 2019. P. 25–52.
https://doi.org/10.1007/978-981-13-6480-8_2
59. Klich M.A. Identification of common Aspergillus species. Utrecht: CBS Fungal Biodiversity Centre, 2002.
60. Korneykova M.V., Redkina V.V., Fokina N.V., Myazin V.A., Soshina A.S. Soil microorganisms in the urban ecosystems of the Russian ubarctic (Murmansk region, Apacity) // Czech Polar Reports. 2021. V. 11. P. 333–351.
<https://doi.org/10.5817/CPR2021-2-23>
61. Korneykova M.V., Vasenev V.I., Nikitin D.A., Soshina A.S., Dolgikh A.V., Sotnikova Y.L. Urbanization affects soil microbiome profile distribution in the Russian Arctic region // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2021. V. 18. P. 11665.
<https://doi.org/10.3390/ijerph182111665>
62. Li X., Qu Z., Zhang Y., Ge Y., Sun H. Soil fungal community and potential function in different forest ecosystems // Diversity. 2022. V. 14. P. 520.
<https://doi.org/10.3390/d14070520>
63. Liu Q., Li W., Nie H., Sun X., Dong L., Xiang L., Zhang J., Liu X. The Effect of Human Trampling Activity on a Soil Microbial Community at the Urban Forest Park // Forests. 2023. V. 14(4). P. 692.
<https://doi.org/10.3390/f14040692>
64. Lorenz K., Kandeler E. Biochemical characterization of urban soil profiles from Stuttgart, Germany // Soil Biol. Biochem. 2005. V. 37. P. 1373–1385.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.12.009>
65. Marfenina O.E., Danilogorskaya A.A. Effect of elevated temperatures on composition and diversity of micro-fungal communities in natural and urban boreal soils, with emphasis on potentially pathogenic species // Pedobiologia. 2017. V. 60. P. 11–19.
<https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2016.11.002>
66. Marfenina O.E., Ivanova A.E., Kislova E.E., Sacharov D.S. The mycological properties of medieval culture layers as a form of soil ‘biological memory’ about urbanization // J. Soils Sediments. 2008. V. 8. P. 340–348.
<https://doi.org/10.1007/s11368-008-0032-2>
67. Nugent A., Allison S.D. A framework for soil microbial ecology in urban ecosystems // Ecosphere. 2022. V. 13. P. e3968.
<https://doi.org/10.1002/ecs2.3968>
68. O’Riordan R., Davies J., Stevens C., Quinton J.N., Boyko C. The ecosystem services of urban soils: A review // Geoderma. 2021. V. 395. P. 115076.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115076>
69. Pastukhov A., Kovaleva V., Kaverin D. Microbial community structure in ancient European Arctic Peatlands // Plants. 2022. V. 11. P. 2704.
<https://doi.org/10.3390/plants11202704>
70. Seifert K., Morgan-Jones G., Gams W., Kendrick B. The genera of Hyphomycetes. Utrecht: CBS Reus, 2011.
71. Son D., Lee E.J. Soil Microbial Communities Associated with Three Arctic Plants in Different Local Environments in Ny-Ålesund, Svalbard // J. Microbiol Biotechnol. 2022. V. 32. P. 1275–1283.
<https://doi.org/10.4014/jmb.2208.08009>
72. Tang J., Zhang J., Ren L., Zhou Y., Gao J., Luo L., Yang Y., Huang H., Chen A. Diagnosis of soil contamination using microbiological indices: A review on heavy metal pollution // J. Environ. Management. 2019. V. 242. P. 121–130.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.061>
73. Vasenev V., Kuzyakov Y. Urban soils as hot spots of anthropogenic carbon accumulation: Review of stocks, mechanisms and driving factors // Land Degradation Development. 2018. V. 29. P. 1607–1622.
<https://doi.org/10.1002/lde.2944>
74. Vasenev V., Varentsov M., Konstantinov P., Romzaykina O., Kanareykina I., Dvornikov Y., Manukyan V. Projecting urban heat island effect on the spatial-temporal variation of microbial respiration in urban soils of Moscow megalopolis // Sci. Total Environ. 2021. V. 786. P. 147457.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147457>
75. Zhang M.K., Ke Z.X. Heavy metals, phosphorus and some other elements in urban soils of Hangzhou City, China // Pedosphere. 2004. V. 14. P. 177–185.

Number and Taxonomic Diversity of Microorganisms in the Profile of Urban Soils in the Arctic Zone of the Murmansk City

**M. V. Korneykova^{1, 2, *}, A. S. Soshina², N. V. Fokina²,
V. A. Myazin^{1, 2}, E. V. Kozlova¹, and V. I. Vasenev³**

¹Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, 117198 Russia

²Institute of North Industrial Ecology Problems Subdivision of the Federal Research Center "Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences", Apatity, 184209 Russia

³Wageningen University, Wageningen, 6707 Netherlands

**e-mail: korneykova.maria@mail.ru*

In this work, a comparative analysis of the chemical and microbiological properties of soils profile (Urbic Technosol) in Murmansk was carried out in comparison with podzol (Albic Podzol) in the background area. In urban soils, an increase in pH values and the content of main nutrients (C, N, P, K), especially noticeable for subsoil horizons, was revealed. In the topsoil horizons, an increase in the number of bacteria was noted (saprotrophs – up to 3–6 mln CFU/g, oligotrophs up to 4.5–8 mln CFU/g) and a decrease in the number of culturable microscopic fungi by 2 orders of magnitude (up to 10^3 CFU) compared to natural podzols, while in the urban subsoil horizons an increase in the number of all groups of microorganisms was revealed compared to the background. The same pattern is characteristic of the microfungi diversity in the urban area. In the urban topsoil horizons, spatial heterogeneity of the species composition and structure of microfungal complexes was noted, while in subsoil horizons there was a relative homogeneity of the dominant species composition: *Trichocladium griseum*, relative abundance 41–77%. There was an increase in the proportion and abundance of opportunistic fungi of BSL-1 and BSL-2 groups 50–60% in the urban topsoil horizons compared to natural podzols 30%. The degree of mycological danger of urban soils varied from dangerous to safe (index mycological Im values varied from 7–20 in the city center to 1.5–3.6 on the outskirts). The results showed that urbanization in the Arctic not only leads to changes in the chemical properties of soils, but also creates a new niche for microorganisms in subsoil horizons.

Keywords: urbanization, microbial community, abundance of fungal species, opportunistic fungi, mycological hazard index, Urbic Technosol, Albic Podzol