

УДК 631.427

## МИКРОБНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ГОРОДСКИХ ПОЧВ И ИХ РОЛЬ В ОЦЕНКЕ ЭКОСИСТЕМНЫХ СЕРВИСОВ (ОБЗОР)

© 2021 г. Н. Д. Ананьева<sup>a, \*</sup>, К. В. Иващенко<sup>a, b</sup>, С. В. Сушко<sup>a, b, c</sup>

<sup>a</sup>Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,  
Пушино, Московской обл., ул. Институтская, 2, 142290 Россия

<sup>b</sup>Российский университет дружбы народов, Аграрно-технологический институт,  
Москва, ул. Миклухо-Маклая, 8/2, 117198 Россия

<sup>c</sup>Агрофизический научно-исследовательский институт, Гражданский пр-т, 14, Санкт-Петербург, 195220 Россия

\*e-mail: ananyeva@rambler.ru

Поступила в редакцию 19.01.2021 г.

После доработки 24.02.2021 г.

Принята к публикации 03.03.2021 г.

Важным элементом городской среды является почва, сбалансированное функционирование которой во многом зависит от почвенного микробиома. Состояние микробиома можно индцировать разными микробными показателями. Однако нет ответа на вопрос, какие микробные показатели могут наиболее информативно отражать функционирование городских почв и быть полезными при планировании и благоустройстве городских территорий. С помощью информационных баз данных (eLIBRARY.RU, Web of Science, Scopus) найдены опубликованные за последние 25 лет отечественные и зарубежные статьи об изучении микробного состояния почв разных городов мира. Выявлено, что основное внимание при изучении городских почв направлено на оценку таксономической структуры почвенного микробиома, его газообразующей и ферментативной активности, содержания микробной биомассы, ее экофизиологического статуса, микробного функционального разнообразия, морфологии клеток, наличия патогенных и условно-патогенных микроорганизмов. Предложены критерии разных микробных показателей (воспроизводимость, селективность, затраты, стандартизация, интерпретация и понимание, признание научным сообществом), позволяющие иллюстрировать их приемлемость и информативность для оценки функций городских почв и экосистемных сервисов. Наибольшее соответствие таким критериям выявлено для микробной активности почвы и показателя экофизиологического статуса, наименьшее – обилия функциональных генов и “ключевых групп” микроорганизмов. Обоснована необходимость изучения взаимосвязи таксономического разнообразия микробиома городских почв с их основными функциями и интерпретации экспериментальных результатов в терминах экосистемных сервисов.

*Ключевые слова:* почвенный микробиом, экологическая функция, урбоэкосистема, экосистемные услуги

**DOI:** 10.31857/S0032180X21100038

### ВВЕДЕНИЕ

Урбанизация является современной тенденцией изменения землепользования и преобразования наземных экосистем [107, 114]. Площадь городов занимает 2.5% поверхности суши [109, 113], в некоторых регионах она может достигать 10% [44]. В настоящее время в городах проживает около 55% населения планеты, а к 2030 г., согласно расчетам Департамента по экономическим и социальным вопросам ООН, достигнет 60%, 2050 г. – почти 70% [120].

Городская среда представляет собой социально-экологическую систему, состоящую из множества функциональных зон (жилых, промышленных, рекреационных и др.) [65]. В городах происходит

формирование специфических городских почв [46, 56, 127]. Их классифицируют как природные и антропогенно-преобразованные (урбаноземы и их варианты), развивающиеся и функционирующие при сочетании физических, химических, биологических процессов и сильном влиянии антропогенных факторов [46, 121]. Важность изучения почв в городах отмечали еще более двух веков назад. В 1890 г. В.В. Докучаев представил программу “Детальное естественно-историческое, физико-географическое и сельскохозяйственное исследование Санкт-Петербурга и его окрестностей” [15]. Исследование городских почв активно развивается с середины 70-х годов прошлого века в США, Германии и России [101]. Отмечают, что наука о

городских почвах — молодое направление в почвоведении, а их свойства в отличие от естественных во многом остаются неизученными [76, 92].

Почвы городов часто рассматривают как сток неорганических (тяжелые металлы) и органических (нефтепродукты, полициклические ароматические углеводороды, пестициды, фенолы) поллютантов [26, 69, 94, 124, 127]. Поступление в городскую почву пыли от разных отходов и строительных материалов (избыток кальция и магния) приводит к увеличению ее рН [56, 86], а органических и минеральных удобрений — обогащению фосфором [73]. Почва в городах часто уплотнена и “запечатана” асфальтом, зданиями и сооружениями. Например, в Москве и Санкт-Петербурге такие почвы составляют 70–90% их общей площади [3, 56, 122].

Состояние микробиома городских почв давно привлекало внимание ученых. В отечественной научной литературе первые исследования оценивали санитарно-гигиеническое состояние почв, связанное с выявлением патогенных и условно-патогенных микроорганизмов для человека и растений [37]. В настоящее время изучение таких почвенных микроорганизмов продолжается [68, 81, 82, 95], однако состояние городских почв активно оценивают и другими микробными показателями. Этому во многом способствует усовершенствование микробиологических методов изучения почв и стремительное развитие концепций, связанных с ее экологическими функциями и экосистемными сервисами [8]. Показано, что именно микроорганизмы почвы ответственны за многие функции в биосфере [14, 18], которые обеспечивают широкий спектр продовольственных, регулирующих и поддерживающих экосистемных сервисов<sup>1</sup> [62, 63, 106]. Поэтому применение микробных показателей для мониторинга состояния городских почв — одно из основных условий развития умных и устойчивых городов (“smart and sustainable cities”). Изучение способности почвы сбалансированно функционировать в условиях урбанизации приобретает в настоящее время особую значимость. Многогранность информации, связанной с оценкой разных почвенных микробных показателей, привела к познанию их распределения во многих городах мира [86, 93, 129]. Вместе с тем сведения о микробных показателях городских почв и особенно их связи с экосистемными сервисами ограничены. Цели работы: 1) сравнительная характеристика отечественного и зарубежного опыта в исследовании микробных показателей городских почв; 2) анализ критериев и подходов для выбора наиболее чувствительных, селективных и информативных

почвенных микробных показателей для оценки экосистемных сервисов в условиях города.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Первый этап исследования был связан с поиском информации об оценке микробных показателей почв в различных городах мира. Для этой цели собрали публикации отечественной и зарубежной научной литературы за последние 25 лет. Основным источником отечественных статей была информационная база данных eLIBRARY.RU, зарубежных — Web of Science и Scopus. Поиск запросы выполняли по следующим ключевым словам: “почвенные микроорганизмы города”, “патогенные и условно-патогенные микроорганизмы почвы города”, “оценка почвы города”, “микробиом городских почв”, “микробное сообщество городских почв”, “экологическое состояние почвы города”, “микробные показатели городских почв”, “биологическая активность городских почв” (для базы eLIBRARY.RU); “urban soil microorganisms”, “pathogenic microorganisms in urban soil”, “assessment of urban soil”, “urban soil microbiome”, “soil microbial community in urban ecosystems”, “ecological assessment of urban soil”, “microbial properties of urban soils”, “biological activity of urban soils”, “microbial activity of urban soils” (для баз Web of Science и Scopus). Найдено 114 публикаций, однако почти 28% из них исключили из дальнейшего рассмотрения, поскольку они оценивали в городских почвах только содержание тяжелых металлов, простейших и других паразитарных форм; запасы органического углерода; применение биотестов (растения, животные), биопрепаратов, в том числе и микробных; а также научные обзоры. В итоге 47 и 35 публикаций (всего 82) были посвящены изучению почвенных микробных свойств в городах России и за рубежом соответственно. Результаты отечественных исследований опубликованы преимущественно в журналах: “Почвоведение”, “Микробиология”, “Гигиена и санитария”, “Микология и фитопатология” и других, в том числе региональных изданиях; зарубежных — в высокорейтинговых журналах “Frontiers in Microbiology”, “Global Change Biology”, “Catena”, “Applied Soil Ecology”, “Journal Soil and Sediments” и др. Составлен перечень микробных показателей, применяемых для оценки городских почв, указаны методы их определения, а также география (страны, города) исследований. Микробные показатели объединили в 7 групп, отражающих разные характеристики почвенного микробного сообщества: 1) активность (дыхание, ферменты, метаногенез, азотфиксация); 2) биомассу; 3) экофизиологические индексы (например, отношение микробного дыхания к микробной биомассе); 4) таксономическую структуру (эколого-трофические группы, домены, филумы, виды); 5) функциональную

<sup>1</sup> В статье используется термин “экосистемные сервисы” как оригинальный в переводе с англ. “ecosystem services”, который является синонимом “экосистемные услуги” и употребляется в отечественной научной литературе.

**Таблица 1.** Микробиологические показатели почвы разных городов РФ

Показатель	Метод*	Город/область (число городов)	Ссылки
Патогены и условные патогены (мезофильные аэробные и факультативные анаэробные микроорганизмы; р. <i>Escherichia</i> , <i>Shigella</i> , <i>Salmonella</i> ; микромицеты, их фитотоксичность)	КОЕ (СанПиН 2.1.7.1287-03; МУ 2.1.7.730–99 “Гигиенические требования к качеству почвы населенных мест”); окрашенность мицелия, патогенные виды микромицетов	Астрахань, Благовещенск, Братск, Владивосток, Вологодская, Воронеж, Иркутская (8), Москва, Оренбург, Самара, Самарская (5)	[9, 10, 13, 16, 20, 22, 24, 25, 31, 32, 34–36, 39, 42, 43, 47–50, 57, 58]
Таксономическое разнообразие и структура (бактерии, грибы, актиномицеты; морфология клеток, окрашенность мицелия)	КОЕ, предельное разведение, микроскопия (ЭМ, СМ), ГХ-МС, каскадная фильтрация	Астрахань, Благовещенск, Братск, Владимир, Владивосток, Вологда, Вологодская, Воронеж, Иркутская (9), Надым, Новосибирск, Саратов, Самара, Москва, Пермь, Ростов-на-Дону, Ростовская (6), Орловская (1), Киров, Челябинск, Курск, Сочи, Ярославль	[1, 2, 4–7, 11, 16, 17, 20–25, 27–32, 34–36, 39, 40, 42, 45, 47–49, 52–55, 57–61]
Микробная биомасса, физиологические индексы (углерод микробной биомассы ( $C_{\text{мик}}$ ), микробное дыхание (МД), $\text{МД}/C_{\text{мик}}$ , $C_{\text{мик}}/C_{\text{орг}}$ )	ГХ, СИД, СИ	Благовещенск, Новосибирск, Петрозаводск, Москва, Московская (4)	[7, 19, 33, 38, 51, 86, 87]
Образование парниковых газов ( $\text{CO}_2$ , $\text{CH}_4$ ); азотфиксация	ГХ	Надым, Ярославль, Москва, Челябинск, Курск, Новосибирск, Сочи	[7, 19, 53, 55, 86, 87]
Функциональное разнообразие (отклик на органические субстраты)	МСТ	Москва	[57]
Ферменты (уреаза, каталаза, дегидрогеназа, инвертаза, полифенолоксидаза и др.)	Газометрия, колориметрия	Владимир, Ростов-на-Дону, Ростовская (8)	[12, 17, 21, 40]

\* КОЕ – колониеобразующие единицы; МУ – методические указания; ЭМ – электронная микроскопия; СМ – световая микроскопия; ГХ-МС – газовая хроматография-масс-спектрометрия; ГХ – газовая хроматография; СИД – субстрат-индуцированное дыхание; СИ – селективное ингибирование СИД; МСТ – мультисубстратное тестирование.

структуру (группы микроорганизмов, потребляющих различные субстраты, функциональные гены); 6) обилие патогенов и условных патогенов; 7) размеры и морфологию клеток, спор грибов. Далее оценили частоту применения каждой группы показателей в отечественных и зарубежных публикациях.

На втором этапе исследования выбрали критерии, обосновывающие применение почвенных микробных показателей для оценки экосистемных сервисов в условиях города. Такие критерии, как воспроизводимость, селективность, затраты на анализ, стандартизация и интерпретация по-

казателя иллюстрируют, на наш взгляд, его приемлемость и информативность для оценки функционирования почв и обеспечения экосистемных сервисов в городской среде.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

**Микробные показатели городских почв: отечественный и зарубежный опыт.** Для оценки состояния городских почв в России и за рубежом применяют широкий спектр микробиологических показателей: патогены и условные патогены; таксономическое разнообразие и структура; микробная биомасса и экофизиологические индексы; образование парни-

**Таблица 2.** Показатели микробиологической оценки почв разных городов мира

Показатель	Метод*	Страна (город)	Ссылки
Патогены (род <i>Salmonella</i> )	МПР	Марокко (Marackesh), Польша (Toruń)	[68, 69, 82]
Микробная биомасса, дыхание, физиологические индексы (углерод, $C_{\text{мик}}$ , азот, $N_{\text{мик}}$ , микробной биомассы; микробное дыхание (МД); $\text{МД}/C_{\text{мик}}$ , $C_{\text{мик}}/C_{\text{орг}}$ )	ФЭ, СИД, ГХ	США (Al Baha, Moscow, Pullman, New-York, Fort Collins), Бразилия (Bahia), Китай (Beijing, Nanchang, Fuzhou, Hefei), Германия (Kiel, Stuttgart); Чехия (Kokořínko), Польша (Toruń), Пуэрто-Рико (San Juan), Румыния (Iassy), Италия (Naples, Caserta), Швейцария (Zurich), Шотландия (Aberdeen)	[64, 70, 71, 73, 75, 84, 88, 89, 93, 96, 98, 102–104, 111, 116, 118, 119, 123, 128, 130, 131]
Таксономическое разнообразие и структура (эколого-трофические группы, структура микробного сообщества)	КОЕ, МПР	США (Al Baha), Китай (Jinan, Nanchang), Румыния (Iassy), Марокко (Marackesh), Польша (Toruń)	[64, 69, 73, 83, 96, 100]
	PLFA	Китай (Jinan), США (Fort Collins, New-York)	[83, 89, 91]
	ДНК (бактериальные/грибные ОТЕ)	США (New-York), Китай (Beijing)	[72, 91]
	ДНК экстракция: 16S rRNA (бактерии), 18S rRNA (грибы)	США (New-York), Китай (Shaoguan, Beijing, +16 городов), Швейцария (Zurich)	[85, 88, 91, 119, 125, 126, 130]
Функциональное разнообразие	DGGE	Марокко (Marackesh)	[100]
	CLPP (Biolog, MicroResp); ДНК (ПЦР, ОТЕ)	Китай (Jinan, Beijing), Шотландия (Aberdeen), США (New-York), Пуэрто-Рико (San Juan), Швейцария (Zurich)	[72, 75, 83, 88, 119, 128, 131]
Ферменты (каталаза, инвертаза, фосфатаза, дегидрогеназа, ксиланаза, протеаза, уреазы, арилсульфатаза, $\beta$ -глюкозидаза)	Спектрофотометрия, колориметрия, флуориметрия (разные субстраты)	Китай (Shaoguan, Beijing, Nanchang), Польша (Toruń), Пуэрто-Рико (San Juan), Италия (Caserta), Германия (Stuttgart), Марокко (Marackesh), Польша (Toruń)	[69, 73, 75, 93, 100, 103, 104, 123, 130]

\* МПР – метод предельных разведений; КОЕ – колониеобразующие единицы; ФЭ – фумигация–экстракция; СИД – субстрат-индуцированное дыхание; ГХ – газовая хроматография; PLFA (phospholipid fatty acids) – фосфолипиды жирных кислот; ДНК – дезоксирибонуклеиновая кислота; ПЦР – полимеразная цепная реакция; ОТЕ – оперативная таксономическая единица; DGGE (denaturing gradient gel electrophoresis) – электрофорез в денатурирующем геле; CLPP – community level physiological profile (Biolog, MicroResp).

ковых газов; функциональное разнообразие; ферменты (табл. 1, 2). В нашей стране такие исследования выполнены более чем в 30-ти городах, самый северный из которых Надым, южный – Сочи. Значительное количество работ по данной тематике отмечено для Москвы, Воронежа, Ростова-на-Дону, Благовещенска и Астрахани. Исследование микробиома городских почв в России исторически связано с оценкой их санитарно-гигиенических показателей [37], отражающих в основном наличие бактерий группы кишечной палочки [10,

20, 32], патогенных и условно-патогенных микроскопических грибов [16, 36]. В значительном количестве работ оценивали таксономическую структуру микробного сообщества городских почв. Такие исследования направлены на определение числа колоний почвенных микроорганизмов на разных питательных средах и их дальнейшую идентификацию. Оценку численности и биомассы микроорганизмов, в том числе их разных групп, в городских почвах часто определяют с помощью световой и электронной микроскопии. Такие подходы

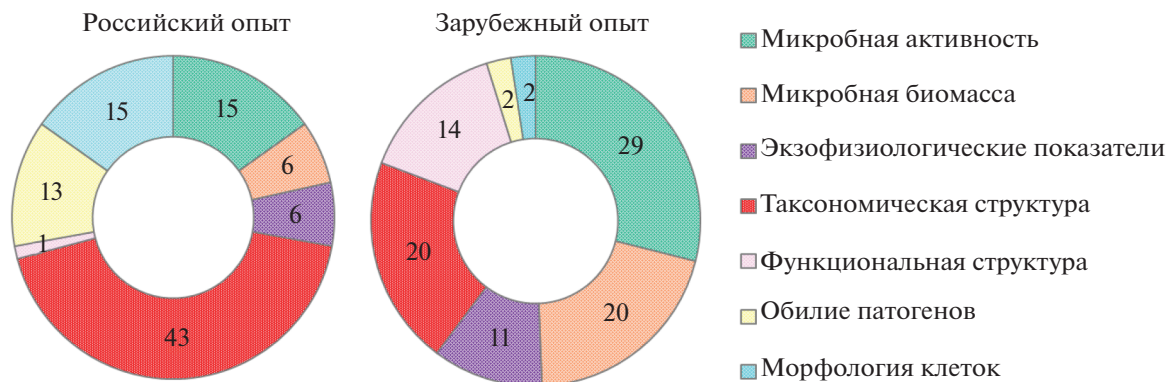


Рис. 1. Микробные показатели (%) для оценки городских почв в России и за рубежом (всего 82 научные статьи) за 1995–2020 гг.

способствуют накоплению сведений о морфологических особенностях почвенных микроорганизмов при разном антропогенном влиянии [12, 30]. Кроме того, оценивают содержание основных элементов (С, N, P) в почвенной микробной биомассе с помощью методов субстрат-индуцированного дыхания и фумигации–экстракции [19, 93]. В нашей стране выполняют исследования, связанные с определением дыхательной и ферментативной активности почвенного микробиома, которые характеризуют его функциональные свойства. Следует отметить недостаточную изученность функциональных свойств микробиома городских почв, которые могут быть сопряжены с выполнением экосистемных сервисов.

За рубежом микробные показатели почв изучены для 39 городов, значительная часть которых расположена в США, странах Европы (Германия, Италия, Румыния, Швейцарии, Польша, Чехия) и Восточной Азии (Китай). В основном эти исследования посвящены оценке таксономического и функционального разнообразия почвенного микробиома. Для диагностики таксономической структуры почвенных микроорганизмов активно применяют методы молекулярной биологии и жирно-кислотного анализа. Физиологический профиль микробного сообщества (community level physiological profile, CLPP) городских почв и его функциональное разнообразие часто оценивают методами Biolog и MicroResp™. Вместе с тем отмечают, что таксономическое разнообразие микробиома почв, в том числе городских, не всегда отражает особенности его функционирования, а наличие функциональных генов — напрямую не связано с почвенными процессами [99].

Анализ выбранных публикаций по изученным группам микробных показателей выявил, что основная их доля связана с оценкой таксономической структуры микробного сообщества почв разных городов: 43 и 20% российского и зарубежного опыта (рис. 1). Микробная активность городских

почв осыящена в 15 и 29% отечественных и зарубежных исследованиях соответственно. Публикации, связанные с изучением функционального разнообразия микробиома городских почв, в нашей стране малочисленны (1%), за рубежом — их больше (14%). Кроме того, в отечественных работах по сравнению с зарубежными, значительное внимание уделяется оценке размеров и морфологии клеток почвенных микроорганизмов (15 против 2%), а также наличию патогенных и условно-патогенных микроорганизмов (13 против 2% соответственно).

Микробиологические показатели городских почв часто сравнивают с таковыми естественных аналогов [70, 93]. Так, содержание микробной биомассы в городских почвах Пекина [131], Килля и Штутгарта [70, 93] существенно меньше такового естественных аналогов. Кроме того, наиболее распространенный дизайн исследования почв разных городов связан с дифференциацией их территорий по антропогенной нагрузке: парковые, селитебные, селитебно-транспортные и промышленные (авторазвязки, АЗС и др.) функциональные зоны. Почвы городских промышленных территорий, в том числе загрязненных тяжелыми металлами, характеризовались меньшей численностью и диаметром колоний культивируемых микроорганизмов [4, 29, 30]. Отмечено, что в городских почвах с увеличением антропогенной нагрузки (от рекреационных к промышленным функциональным зонам) возрастает численность устойчивых к неблагоприятным факторам групп бактерий (спорообразующих, пигментированных родококков, нанобактерий, энтеробактерий) и микромицетов (условно патогенных видов и с темноокрашенным мицелием) [16, 24, 25, 29, 30, 34–36, 41, 50]. Однако, например, микробное функциональное разнообразие городских почв (Пекина), напротив, увеличивалось по сравнению с естественными аналогами [131].

Таким образом, для оценки состояния городских почв исследователи применяют широкий

**Таблица 3.** Экосистемные сервисы, согласно [62, 97]

Группа сервисов	Экосистемный сервис
Обеспечивающие	Продукты питания; материалы, волокно, топливо; вода; пул генов; фармацевтические препараты
Поддерживающие	Педогенез, круговорот элементов, водный цикл, рост растений, биоразнообразие
Регулирующие	Газовый состав атмосферы и климат, качество воды, повышение устойчивости растений к болезням, детоксикация почв
Культурные	Эстетика, рекреация

спектр микробных показателей, среди которых превалирует активность микроорганизмов, их обилие, разнообразие и морфология клеток. Эталонном “оптимального экологического состояния” почвы и ее устойчивости к неблагоприятным воздействиям служат микробные показатели соответствующих естественных аналогов или ненарушенных (мало нарушенных) городских территорий. Вместе с тем взаимосвязь микробных показателей городских почв с их экологическими функциями и, как следствие экосистемными сервисами, при интерпретации экспериментальных результатов практически не рассматривается.

**Микробные показатели почв для оценки экосистемных сервисов в городе.** Экосистемные сервисы рассматривают как своеобразные блага или выгоды для человека, предоставляемые компонентами экосистемы посредством их функционирования [74]. Их выражают, как правило, в виде экономических предпочтений, что понятно для широкого круга специалистов (инженеров-экологов, землеустроителей, ландшафтных архитекторов, политиков) [8, 66]. Выделяют четыре группы основных экосистемных сервисов: обеспечивающие, поддерживающие, регулирующие и культурные (табл. 3).

Почва является ключевым компонентом наземной экосистемы и выполняет основную роль в ее функционировании. При этом именно микробное сообщество почвы или ее “живая часть” обеспечивает большинство почвенных функций. Следует отметить, что в научной литературе имеются концепции “экологических функций” и “экосистемных сервисов”, которые длительное время развивались независимо друг от друга [8]. Однако в последнее время их начинают рассматривать совместно как своеобразный переход от теории к практике принятия решений [62, 78]. В связи с этим, нами предложена схема связи функций микробиома почвы и экосистемных сервисов в городе (рис. 2). Есть основание считать, что происходящие процессы в почве можно рассматривать как функции почвенных микроорганизмов. Например, процессы трансформации органического вещества, азотфиксации, нитрификации и денитрификации обеспечивают круговорот биофильных элементов в экосистеме и влияют на

состояние зеленой инфраструктуры города посредством регуляции доступности этих элементов растениям. В свою очередь, состояние зеленой инфраструктуры связано с эстетическим восприятием. Следовательно, микробиом почвы во многом обеспечивает поддерживающие, производственные и даже культурные экосистемные сервисы. Регулирующие экосистемные сервисы (газовый состав атмосферы, повышение устойчивости растений к болезням, очищение и детоксикация почв) обеспечиваются за счет активности гетеротрофных и других (метаногены, метанотрофы, денитрификаторы) микроорганизмов, в том числе выделяющих специфические соединения для агрегации почв, ингибирования патогенов и вредителей растений.

Считают, что ненарушенное (оптимальное) функционирование микробиома почвы во многом определяет объем экосистемных сервисов [62, 106]. Однако в настоящее время отсутствует четкое понимание того, какие микробные показатели могут быть надежными и информативными для их оценки. Этот аспект актуален для городских почв, функционирующих в условиях разнообразного антропогенного воздействия. Например, микробные показатели городских почв должны быть не только чувствительными к внешним воздействиям (загрязнению, уплотнению почвы, изменению землепользования и др.), но и характеризоваться определенной селективностью к ним. К тому же оценка состояния городских почв из-за их высокой гетерогенности предполагает анализ большого количества образцов. Поэтому методы такой оценки должны быть экспрессными и экономически оправданными.

В табл. 4 представлен перечень критериев и условия их реализуемости для оценки микробного состояния городских почв, который адаптировали с учетом литературных сведений [80, 105, 112] и авторского опыта. На основе описанных критериев проведена оценка микробных показателей, связанных с определенными функциями почвы и экосистемными сервисами (табл. 5). В этой таблице полное соответствие микробных показателей выбранным критериям отмечали зеленым цветом, частичное – желтым, отсутствие соответствия – красным. Чем больше отметок зеленого



**Рис. 2.** Схема связи функций микробиома почвы и экосистемных сервисов (выделено цветом: поддерживающие – голубой, обеспечивающие – зеленый, регулирующие – оранжевый, культурные – бледно-фиолетовый (согласно [97])). ОВ – органическое вещество почвы.

цвета имеет микробный показатель, тем большему количеству критериев он соответствует и лучше подходит для оценки городских почв.

Оказалось, что наиболее информативными, экспрессными и понятными показателями для практической оценки экосистемных сервисов в городе является активность различных функциональных групп микроорганизмов, продуцирующих парниковые газы (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>) или их секвестрирующих (соответствие критериям на 70–80%). Несомненным преимуществом этих показателей является стандартизированные и легко реализуемые методы анализа. Например, для определения активности микроорганизмов

почвы интересен простой и недорогой метод “чайных пакетиков” [90]. Он основан на оценке потери веса внесенных в почву (глубина 8 см, 90 сут) пакетиков чая (зеленый и ройбуш, фирма Lipton), сорта которого различаются отношением C/N (12.2 и 42.9 соответственно). Вместе с тем скорость минерализации органического вещества почвы, определяемая методами, например, “чайных пакетиков” совместно с газовой хроматографией, позволяет интерпретировать продукцию CO<sub>2</sub> как экосистемный сервис. Следует отметить, что, хотя метод “чайных пакетиков” не включен в список международной организации по стандартизации, но он широко используется для оценки биологической активности почв и формирования

**Таблица 4.** Критерии и условия их соответствия для оценки микробного состояния городских почв (адаптировано на основе [80, 105, 112])

Критерий	Условия соответствия критерию	Индекс
Реализуемость	Недорогостоящее оборудование (≤500 €) и обучение персонала	a
Затраты	Анализ образца (≤3 €, ≥100 образцов в неделю)	b
Чувствительность	Реагирует на загрязнение почвы и изменение землепользования	c
Селективность	Отклик на малое число факторов	d
Воспроизводимость	Различие аналитических повторностей ≤10%	e
Применение	Часто	f
Стандартизация (международная)	Существует	g
Интерпретация, понимание	Понятно для широкой аудитории	h
Признание научным сообществом	Публикации (≥100)	i
Оценка и сравнение	Наличие баз данных или публикации о городских почвах (≥10)	j

**Таблица 5.** Микробиологические показатели (изменено по [117]), соответствующие функции почвы и экосистемные сервисы [97]. Показатели оценены критериями с соответствующими индексами (a–j, табл. 4). Зеленая отметка – микробный показатель соответствует критериям, желтая – частично соответствует, красный – не соответствует

Показатель	Функция почвы	Экосистемный сервис	Практическая оценка (количество/г почвы)	Метод исследования*	Индекс (см. табл. 4)																
					a	b	c	d	e	f	g	h	i	j							
Микробное дыхание	Деструкция ОВ	Круговорот элементов; регуляция газового состава атмосферы и климата; рост растений; эстетика, рекреация	Выделившийся CO <sub>2</sub> (парниковый газ)	Газовая хромография	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
				Окситоп (Oxitop)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Активность ферментов (например, β-глюкозида, арилсульфатаза, хитиназа, фосфатаза, лейцинаминопептидаза)	Эффективность деструкции ОВ			“Индекс чайных пакетиков” (tea bags index)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
				Флюорогенно-меченые субстраты (флюоресценция)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Экофизиологические индексы (например, дыхательная или ферментативная активность на единицу микробной биомассы)				СИД, содержание микробной биомассы	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
				ФЭ, содержание микробной биомассы	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Гены аммониймонооксигеназы (amoA)	Нитрификация		Доступные формы азота для растений (город)	Молекулярная биология	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
				Молекулярная биология	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Активность метаногенов и метанотрофов	Метаногенез; продукция и секвестрация CH <sub>4</sub>	Круговорот C; регуляция газового состава атмосферы и климата	Выделение или секвестрирование CH <sub>4</sub> (парниковый газ)	Газовая хромография	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
				Молекулярная биология	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Метил-кофермент					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
М-редуктазы (mcrA)					■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■



Таблица 5. Окончание

Показатель	Функция почвы	Экосистемный сервис	Практическая оценка (количество/г почвы)	Метод исследования*	Индекс (см. табл. 4)											
					a	b	c	d	e	f	g	h	i	j		
Активность денитрификаторов	Денитрификация; продукция N <sub>2</sub> O		Выделение N <sub>2</sub> O (парниковый газ)	Газовая хроматография	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Редуктаза закиси азота (nosZ)				Молекулярная биология	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Обилие “ключевых групп” микроорганизмов (например, р. <i>Trichoderma</i> , <i>Aspilotus</i> )	Ингибирование патогенных организмов	Устойчивость растений к болезням и вредителям; производство фармацевтических препаратов; эстетика, рекреация	Фармацевтический препарат	Молекулярная биология	Red	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Активность лакказы	Деструкция поллютантов	Очищение и детоксикация почв; чистая вода	Снижение содержания загрязнителя	Спектрофотометрия	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Отношение обилия таксономических групп (грибы/бактерии)	Агрегация	Педогенез; рост растений; эстетика, рекреация	Прирост биомассы растений	Анализ жирных кислот (PLFA)	Yellow	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Гликопротеин гломалин (наличие арбускулярной микоризы)				БИК-спектроскопия, спектроскометрия	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green

\* СИД – субстрат-индуцированное дыхание (регистрация начального максимального отклика микробиома на внесение глюкозы, который прямо пропорционален микробной биомассе, ISO 14240-1:1997); ФЭ – фумигация–экстракция (внесение в почву раствора экстрагента и эмульсии хлороформа, приводящие к лизису микробных клеток и высвобождению их элементов – оценивает разность фумигированного и контрольного образцов, ISO 14240-2:1997); минерализация органического вещества: 1) выделение CO<sub>2</sub> (газовая хроматография) или 2) потребление кислорода (Oxitor – манометрическое измерение газовой фазы почвы в закрытом сосуде, в котором одновременно протекает потребление кислорода и поглощение CO<sub>2</sub> раствором щелочи), 1 и 2 стандартизированы ISO 16072:2002, 3) изменение массы чайного пакетика в почве [90]. Молекулярная биология – молекулярно-биологические методы – основаны на анализе ДНК или РНК, экстракция ДНК из почвы стандартизирована (ISO 11063:2012) – высокопроизводительное секвенирование амплификаций на основе бактериального гена 16S рРНК и внутреннего транскрибируемого слейсера (ITS) трибной рРНК или 18S рРНК позволяют идентифицировать определенные таксономические группы микроорганизмов; диагностирование специфичных функциональных генов (например, *nosZ*, *merA*, *nifH* и др.). Флюорогенно-меченые субстраты (ферментативная активность), PLFA – специфичные фосфолипиды жирных кислот образуются флюоресцирующее соединение (метилумбеллиферон), содержание которого измеряют флуорометрически (ISO/TS 22939:2019), PLFA – специфичные фосфолипиды жирных кислот диагностируют определенные таксономические группы микроорганизмов (ISO/TS 29843-1/2:2010/2011). БИК-спектроскопия – спектроскопия в ближней инфракрасной области.

глобальной базы таких данных (<http://www.tea-time4science.org/data/map/>). Для оценки биологической активности горных почв, прибрежных лесных и арктических экосистем указанный метод уже применен [67, 108, 110], а городских – практически нет [79].

Экофизиологические индексы, характеризующие удельную активность микробиома (дыхательную и ферментативную активность на единицу биомассы), являются информативными показателями для оценки эффективности деструкции органического вещества почвы (соответствие критериям на 60–80%). Причем отношение микробной дыхательной активности к содержанию углерода, азота и фосфора в микробной биомассе позволяет характеризовать цикл этих биофильных элементов в почве. Следует отметить, что микробные показатели, основанные на определении функциональных генов и обилии “ключевых групп” микроорганизмов методами молекулярной биологии, оказались менее подходящими для оценки экосистемных сервисов (соответствие критериям на 30–60%). Хотя обилие функциональных генов является селективным показателем, его определение считается дорогостоящим и трудозатратным, что во многом ограничивает мониторинг состояния городских почв (большое количество образцов). Возможно, что усовершенствование технологий (например, применение GeoChip – гибридизации с различными ДНК зондами) позволит в будущем избежать этих ограничений [115].

Важно отметить, что информации о распределении разных микробных показателей в почве города, а также факторов (драйверов) их определяющих, для оценки экосистемных сервисов еще во многом недостаточно. Например, таксономическое разнообразие микробиома почвы рассматривают в качестве интегральной меры устойчивости экосистемы, которая выражается количеством осуществляемых ею функций [77]. Упомянутыми авторами показано, что разнообразие почвенных бактерий тесно связано с содержанием в почве фосфора, нитратов, скоростью аммонификации и первичной продуктивностью болот, лесов, лугов и пашен. Однако данных о связи разнообразия почвенного микробиома с функциями городских почв пока недостаточно для практической оценки экосистемных сервисов. Кроме того, сведения об экспериментальной связи санитарно-микробиологических показателей городских почв и выполнением ими определенных функций (азотфиксации, детоксикации, минерализации органического вещества и др.) практически отсутствует в современной литературе.

Итак, в настоящее время наиболее надежными, чувствительными и информативными показателями для оценки экосистемных сервисов в городе являются микробная активность почвы и

микробные экофизиологические индексы. Эти показатели отражают широкий спектр экосистемных сервисов, характеризуются определенной надежностью (признание научным сообществом), методы их определения стандартизованы и не требуют существенных экономических затрат для реализации. Таксономическое разнообразие микробиома городских почв важно для познания их функционирования, однако его интерпретация в терминах экосистемных сервисов пока затруднительна. Определение специфических соединений в почве (например, гликопротеина гломалина, продуцируемой грибами арбускулярной микоризы; антибиотиков и др.) является, по нашему мнению, перспективным для оценки экосистемных сервисов, хотя и диктует необходимость разработки надежных и экспрессных методов их определения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Почва является основным компонентом наземной экосистемы, функционирование которой во многом обеспечивается почвенным микробиомом. В условиях города отмечено беспрецедентное антропогенное воздействие на почву, ее микробиом и экосистему в целом, что может приводить к нарушению их функционирования. Исследователи всех стран направлены на получение обширной информации об особенностях функционирования почвенного микробиома в городских условиях, что, в свою очередь, связано с применением разнообразных показателей его состояния (биомассой, таксономическим и функциональным разнообразием, активностью, наличием патогенов). Мы попытались рассмотреть взаимосвязь микробных показателей городских почв с выполнением ими экологических функций и их участием в обеспечении экосистемных сервисов. Иными словами, предложен подход для интерпретации экспериментальных результатов (показателей) микробиома городской почвы в терминах экосистемных сервисов. Показано, что такие микробные показатели, как активность микроорганизмов и микробные экофизиологические индексы, способны в наибольшей степени характеризовать обеспечивающие, поддерживающие, регулирующие и культурные экосистемные сервисы в городах. Следует подчеркнуть, что упомянутые микробные показатели характеризуются определенной надежностью (признание научным сообществом), методы их определения стандартизованы и не требуют существенных экономических затрат для их реализации. Наряду с обязательной оценкой биобезопасности городских почв с помощью контроля санитарно-микробиологических показателей, важно изучать функционирование почвенного микробиома, сопряженного с обеспечением экосистем-

ных сервисов для создания, планирования и благоустройства умных и устойчивых городов.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-04-00148а. Обработка экспериментальных данных осуществлена при частичной финансовой поддержке проекта РНФ № 19-77-30012. Подготовка статьи выполнена в рамках тем Государственного задания РФ №№ 121040800126-5 и 0667-2019-0009 и темы ЕГИСУ НИОКР № 121040800126-5 “Исследование почвенных предшественников, источников и стоков парниковых газов в связи с климатическими изменениями”.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абросимова О.В., Быкова М.А., Меркулова М.Ю., Тихомирова Е.И.* Оценка экологического неблагополучия урбоэкосистем на основе данных мониторинга снежного и почвенного покровов (на примере г. Саратова) // Вестник Саратовского гос. техн. ун-та. 2013. № 4(73). С. 240–243.
2. *Ажогина Т.Н., Долженко М.В., Илюшкина Л.Н.* Численность основных физиологических групп микроорганизмов в почвах рекреационных зон // Междунар. журн. прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 6. С. 253–256.
3. *Апарин Б.Ф., Сухачева Е.Ю.* Принципы создания почвенной карты мегаполиса (на примере Санкт-Петербурга) // Почвоведение. 2014. № 7. С. 790–802.  
<https://doi.org/10.7868/S0032180X1407003X>
4. *Артамонова В.С., Бортникова С.Б.* О состоянии почвенных азотфиксирующих бактерий на территории городского леса // Вестник Пермского ун-та. 2016. Вып. 2. С. 150–159.
5. *Артамонова В.С., Еремченко О.З.* Адаптивные признаки *Azotobacter chlorococum* Weigick и *Vacillus mycoides* Flugge в городских почвах // Вестник Пермского ун-та. 2015. Вып. 2. С. 158–165.
6. *Артамонова В.С., Лютых И.В., Смирнова Н.В.* Биогенные экотоксиканты городских почв // Сибирский экологический журн. 2009. № 2. С. 269–277.
7. *Артамонова В.С., Танасиенко А.А., Бортникова С.Б.* Современные аспекты ремедиации биологических свойств городских почв // Сибирский экологический журнал. 2005. № 5. С. 855–864.
8. *Васнев В.И., Ван Ауденховен А.П., Ромзайкина О.Н., Гаджагаева Р.А.* Экологические функции и экосистемные сервисы городских и техногенных почв: от теории к практическому применению (обзор) // Почвоведение. 2018. № 10. С. 1177–1191.  
<https://doi.org/10.1134/S0032180X18100131>
9. *Воробьева К.Ю., Прохорова Н.В.* Лактозоположительные кишечные простейшие в почвенном покрове объектов строительства в Самарской области // Самарский научный вестник. 2017. Т. 6. № 2(19). С. 27–31.
10. *Гарицкая М.Ю., Шайхутдинова А.А., Студеникина Д.К.* Оценка степени биологического загрязнения почв внутридворовых территорий города Оренбурга, относящихся к зонам повышенного риска воздействия на здоровье населения // Известия Оренбургского гос. аграрного ун-та. 2016. № 6(62). С. 196–198.
11. *Горбов С.Н., Безуглова О.С.* Биологическая активность почв городских территорий (на примере г. Ростов-на-Дону) // Научный журн. КубГАУ. 2013. № 85. С. 1–15.
12. *Горбов С.Н., Горовцов А.В., Безуглова О.С., Вардуни Т.В., Тагивердиев С.С.* Биологическая активность запечатанных почв Ростова-на-Дону // Известия Самарского НЦ РАН. 2016. Т. 18. № 2(2). С. 331–336.
13. *Горлова А.П., Волкова И.В.* Комплексный мониторинг почвы несанкционированных славок города Астрахани // Экология и рациональное природопользование. 2013. № 4. С. 100–103.
14. *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. 1087–1096.  
<https://doi.org/10.7868/S0032180X15090038>
15. *Докучаев В.В.* Детальное естественно-историческое, физико-географическое и сельскохозяйственное исследование Санкт-Петербурга и его окрестностей. (1890) Цит. по: Сочинения. Т. VII. М.: Изд-во АН СССР, 1953. 447 с.
16. *Егорова Л.Н., Шихова Н.С., Ковалева Г.В.* Структура сообществ микромицетов в почвах городских зеленых насаждений Владивостока // Вестник ДВО РАН. 2015. № 1. С. 58–62.
17. *Забелина О.Н., Злышко А.С.* Биологическая активность запечатанной почвы урбанизированных территорий // Успехи современного естествознания. 2015. № 5. С. 167–170.
18. *Звягинцев Д.Г., Добровольская Т.Г., Бабьева И.П., Зенова Г.М., Лысак Л.В., Марфенина О.Е.* Роль микроорганизмов в биогеоценотических функциях почв // Почвоведение. 1992. № 6. С. 63–77.
19. *Ивашенко К.В., Ананьева Н.Д., Васнев В.И., Кудеяров В.Н., Валентини Р.* Биомасса и дыхательная активность почвенных микроорганизмов в антропогенно-измененных экосистемах (Московская область) // Почвоведение. 2014. № 9. С. 1077–1088.  
<https://doi.org/10.7868/S0032180X14090056>
20. *Калинкина В.Е., Сальникова Н.А., Сальников А.Л.* К вопросу о биоремедиации урбанизированных почв аридной зоны России: микробиологические показатели и индикаторные биообъекты // Науч. журн. Российского НИИ проблем мелиорации. 2015. № 1(17). С. 26–40.

21. Капралова О.А., Колесников С.И., Денисова Т.В., Казеев К.Ш., Налета Е.В. Влияние загрязнения тяжелыми металлами на биологические свойства почв г. Ростова-на-Дону. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального ун-та, 2014. 148 с.
22. Катола В.М. Формы бактериального “покоя” в различных биотопах // Дальневосточный журн. инфекционной патологии. 2015. № 26. С. 47–51.
23. Куимова Н.Г., Шумилова Л.П. Условно-патогенные грибы как показатель санитарного состояния городской среды // Известия Самарского НЦ РАН. 2009. Т. 11. № 1–6. С. 1160–1163.
24. Куимова Н.Г., Шумилова Л.П., Павлова Л.М. Оценка экологического состояния почв г. Благовещенска // Вестник РУДН. Сер. Экология и безопасность жизнедеятельности. 2008. № 3. С. 38–48.
25. Кулько А.Б. Комплексы микроскопических грибов городских почв. Дис. ... к. б. н. М., 2000. 141 с.
26. Ладонин Д.В., Михайлова А.П. Тяжелые металлы и мышьяк в почвах и уличной пыли юго-восточного округа г. Москвы: результаты многолетних исследований // Почвоведение. 2020. № 11. С. 1401–1411.  
<https://doi.org/10.31857/S0032180X2011009X>
27. Лошаков А.И. Особенности состава и структуры почвенного микробного сообщества на примере рекреационной зоны мегаполиса // Актуальные научные исследования в современном мире. 2017. № 4 (24). С. 63–67.
28. Лысак Л.В., Лапыгина Е.В. Разнообразие бактериальных сообществ городских почв // Почвоведение. 2018. № 9. С. 1108–1114.  
<https://doi.org/10.1134/S0032180X18090071>
29. Лысак Л.В., Сидоренко Н.Н., Марфенина О.Е., Звягинцев Д.Г. Микробные комплексы городских почв // Почвоведение. 2000. № 1. С. 80–85.
30. Лысак Л.В., Соина В.С. Анализ наночастиц бактерий в почвах природных и антропогенных ландшафтов // Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, центральной Азии и Сибири. М.: ВНИИ Агрохимии им. Д.Н. Прянишникова, 2018. С. 357–361.
31. Макарова А.П., Напрасникова Е.В. Санитарно-экологические свойства почвенного покрова урбанизированной территории в условиях Сибири // Известия Иркутского гос. ун-та. Серия “Биология. Экология”. 2013. Т. 6. № 2. С. 61–66.
32. 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. Т. 26. С. 18–27.
33. Мамай А.В., Мошкина Е.В. Влияние урбанизации на показатели биологической активности микробного сообщества автоморфных лесных почв Карелии // Международный журн. прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 11. С. 1094–1099.
34. Марфенина О.Е., Каравайко Н.М., Иванова А.Е. Особенности комплексов микроскопических грибов урбанизированных территорий // Микробиология. 1996. Т. 65. № 1. С. 119–124.
35. Марфенина О.Е., Макарова Н.В., Иванова А.Е. Оппортунистические грибы в почвах и приземных слоях воздуха мегаполиса (на примере района Тушино г. Москвы) // Микология и фитопатология. 2011. Т. 45. Вып. 5. С. 397–407.
36. Марфенина О.Е., Фомичева Г.М., Василенко О.В., Наумова Е.М., Кулько А.Б. Особенности спорообразования у сапротрофных и клинических штаммов *Aspergillus sydowii* (Bain. & Sart.) Thom & Church в разных экологических условиях // Микробиология. 2010. Т. 79. № 6. С. 767–773.
37. Мишустин Е.Н., Перцовская М.И., Горбов В.А. Санитарная микробиология почвы. М.: Наука, 1979. 304 с.
38. Мошкина Е.В., Мамай А.В. Оценка плодородия и экологического состояния автоморфных почв городских и пригородных лесов по показателям их биологической активности (на примере г. Петрозаводска) // Вестник современной науки. 2016. № 10. С. 31–37.
39. Назаренко Н.Н., Корецкая И.И., Свистова И.Д. Биоиндикация почвы транспортных зон г. Воронежа // Вестник ВГУ. Сер. География. Геоэкология. 2015. № 1. С. 46–50.
40. Налета Е.В., Капралова О.А., Казеев К.Ш., Колесников С.И. Изменение биологических свойств почв крупных городов Ростовской области под влиянием загрязнения тяжелыми металлами // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. С. 716–724.
41. Напрасникова Е.В. Экологические особенности городских почв Приангарья // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2(2).  
<http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=22817>
42. Напрасникова Е.В., Макарова А.П. Санитарно-микробиологическая и биохимическая характеристика почв в условиях урбанизации // Гигиена и санитария. 1999. № 3. С. 15–17.
43. Николенко М.В., Пастухов М.В. Современные методы микробиологических исследований объектов окружающей среды // Университетская медицина Урала. 2017. № 4. С. 30–32.
44. О состоянии природных ресурсов и окружающей среды Московской области в 2006 году. Информац. вып. / Под ред. А.С. Качан и др. М.: НИА Природа, 2007. 314 с.
45. Пищухина Е.Ю., Сопрунова О.Б., Сальникова Н.А. Физико-химические свойства и особенности микрофлоры почв Бэровских бугров урбанизированных территорий // Известия Уфимского НЦ РАН. 2015. № 4(1). С. 114–116.
46. Прокофьева Т.В., Герасимова М.И., Безуглова О.С., Бахматова К.А., Гольева А.А., Горбов С.Н., Жарикова Е.А., Матинян Н.Н., Наквасина Е.Н., Сивцева Н.Е. Введение почв и почвоподобных образований городских территорий в классификацию почв России // Почвоведение. 2014. № 10. С. 1155–1164.  
<https://doi.org/10.7868/S0032180X14100104>
47. Сазонова О.В., Трухина Г.М., Сухачева И.Ф., Исакова О.Н., Сухачев П.А., Вистяк Л.Н., Торопова Н.М. Эколого-гигиенические особенности антропогенного загрязнения почвы территории промышленного

- города // Междунар. журн. прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 7. С. 150–156.
48. *Свистова И.Д.* Методические подходы к определению фитотоксической активности почвы и почвенных микроорганизмов // Лесотехнический журн. 2019. № 2. С. 40–46.  
<https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.2/5>
  49. *Свистова И.Д., Талалайко Н.Н., Щербаков А.П.* Микробиологическая индикация урбаноземов г. Воронежа // Вестник Воронежского гос. ун-та. Сер. Химия. Биология. Фармация. 2003. № 2. С. 175–180.
  50. *Свистова И.Д., Щербаков А.П., Корецкая И.И., Талалайко Н.Н.* Накопление токсичных видов микроскопических грибов в городских почвах // Гигиена и санитария. 2003. № 5. С. 22–24.
  51. *Сергеева А.Г., Котельникова И.М., Радомская В.И.* Дыхательная активность микрофлоры урбанизированных почв г. Благовещенска // Региональная экология. 2018. № 4(54). С. 5–15.  
<https://doi.org/10.30694/1026-5600-2018-4-71-78>
  52. *Соина В.С., Лысак Л.В., Конова И.А., Лапыгина Е.В., Звягинцев Д.Г.* Электронно-микроскопическое изучение ультрамикробактерий (наноформ) в почвах и подпочвенных отложениях // Почвоведение. 2012. № 11. С. 1188–1198.
  53. *Степанов А.Л., Манучарова Н.А., Смагин А.В., Курбатова А.С., Мяжкова А.Д., Башкин В.Н.* Характеристика биологической активности микробного комплекса городских почв // Почвоведение. 2005. № 8. С. 978–983.
  54. *Степанова Л.П., Яковлева Е.В., Писарева А.В., Раскатов В.А.* Экологическая оценка структуры микробиологического комплекса техногенно-трансформированных земель // Агрехимический вестник. 2016. № 3. С. 20–25.
  55. *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>
  56. *Строганова М.Н., Мяжкова А.Д., Прокофьева Т.В.* Роль почв в городских экосистемах // Почвоведение. 1997. № 1. С. 96–101.
  57. *Тепеева А.Н., Марфенина О.Е.* Структурное и функциональное разнообразие микобиоты городских почв в условиях пониженных температур // Современные проблемы науки и образования. 2017. № 5. С. 342–350.
  58. *Хамитова С.М., Авдеев Ю.М.* Микробиологические исследования почв в зеленых городских насаждениях Вологодской области // Вестник КрасГАУ. 2016. № 10. С. 29–35.
  59. *Шабманова Т.Х., Чуйков Ю.С., Егоров М.А., Батаева Ю.В.* Микробиологические показатели почв территорий г. Астрахань // Естественные науки. 2014. № 1(46). С. 33–40.
  60. *Широких И.Г., Ашихмина Т.Я., Широких А.А.* Особенности актиномицетных комплексов в урбано-земах г. Киров // Почвоведение. 2011. № 2. С. 199–205.
  61. *Шумилова Л.П., Куимова Н.Г.* Изучение микробного сообщества городских почв методом газовой хроматографии-масс-спектрометрии // Бюл. физиологии и патологии дыхания. 2013. № 50. С. 121–125.
  62. *Adhikari K., Hartemink A.E.* Linking soils to ecosystem services – A global review // *Geoderma*. 2016. V. 262. P. 101–111.  
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009>
  63. *Aislabie J., Deslippe J.R.* Soil microbes and their contribution to soil services // *Ecosystem services in New Zealand – conditions and trends*. New Zealand: Manaaki Whenua Press, 2013. P. 112–161.
  64. *Al-Ghamdi A.Y.* Soil microbial biomass of pea (*Pisium sativum* cv. Little Marvel) in response to three atmospheric air regimes at Al Baha Region, KSA // *American J. Climate Change*. 2017. V. 6. P. 607–621.  
<https://doi.org/10.4236/ajcc.2017.64031>
  65. *Andersson E.* Urban landscapes and sustainable cities // *Ecology and Society*. 2006. V. 11(1). P. 34.  
<https://doi.org/10.5751/ES-01639-110134>
  66. *Annea B., Geoffroya S., Cherelc J., Warot G., Mariea S., Jean Noëld C., Jean Louis M., Christophe S.* Towards an operational methodology to optimize ecosystem services provided by urban soils // *Landscape and Urban Planning*. 2018. V. 176. P. 1–9.  
<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.03.019>
  67. *Becker J.N., Kuzyakov Y.* Teatime on Mount Kilimanjaro: Assessing climate and land-use effects on litter decomposition and stabilization using the Tea Bag Index // *Land Degradation and Development*. 2018. V. 29. P. 2321–2329.  
<https://doi.org/10.1002/ldr.2982>
  68. *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>
  69. *Beroigui M., Naylo A., Walczak M., Hafidi M., Charzyński P., Świtoniak M., Różański S., Boularbah A.* Physicochemical and microbial properties of urban park soils of the cities of Marrakech, Morocco and Toruń, 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>
  70. *Beyer L., Blum H.-P., Elsner D.-Ch., Willnow A.* Soil organic matter composition and microbial activity in urban soils // *Sci. Total Environ*. 1995. V. 168. P. 267–278.  
[https://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)04704-5](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04704-5)
  71. *Boechat C.L., Santos J.A.G., de Aguiar Accioly A.M., Bomfim M.R., Santos A.C.* Industrial and urban organic wastes increase soil microbial activity and biomass // *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2012. V. 36. P. 1629–1636.  
<https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000500027>
  72. *Brodsky O.L., Shek K.L., Dinwiddie D., Bruner S.G., Gill A.S., Palmer M.I., McGuire K.L.* Microbial communities in bioswale soils and their relationships to soil properties, plant species, and plant physiology // *Frontiers in Microbiology*. 2019. V. 10. P. 2368.  
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02368>

73. *Chen F.-S., Yavitt J., Hu X.-F.* Phosphorus enrichment helps increase soil carbon mineralization in vegetation along an urban-to-rural gradient, Nanchang, China // *Appl. Soil Ecol.* 2014. V. 75. P. 181–188. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2013.11.011>
74. *Costanza R., d'Are R., de Groot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R.V., Paruelo J., Raskin R.S., Sutton P., van den Belt M.* The value of the world's ecosystem services and natural capital // *Nature.* 1997. V. 387. P. 253–260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
75. *Cusak D.F., Lee J.K., Mcclery T.L., Lecroy C.S.* Exotic grasses and nitrate enrichment alter soil carbon cycling along an urban–rural tropical forest gradient // *Global Change Biol.* 2015. V. 21. P. 4481–4496. <https://doi.org/10.1111/gcb.13066>
76. *De Kimpe C.R., Morel J.L.* Urban soil management: a growing concern // *Soil Sci.* 2000. V. 165. P. 31–40. <https://doi.org/10.1097/00010694-200001000-00005>
77. *Delgado-Baquerizo M., Maestre F., Reich P., Jeffries T.C., Gaitan J.J., Encinar D., Berdugo M., Campbell C.D., Singh B.K.* Microbial diversity drives multifunctionality in terrestrial ecosystems // *Nature Com.* 2016. V. 7. P. 10541. <https://doi.org/10.1038/ncomms10541>
78. *Dominati E., Patterson M., Mackay A.* A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils // *Ecological Economics.* 2010. V. 69. P. 1858–1868. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.05.002>
79. *Duddigan S., Alexander P.D., Shaw L.J., Sandén T., Collins C.D.* The Tea Bag Index – UK: using citizen/community science to investigate organic matter decomposition rates in domestic gardens // *Sustainability.* 2020. V. 12. P. 6895. <https://doi.org/10.3390/su12176895>
80. *Faber J.H., Creamer R.E., Mulder C., Römbke J., Rutgers M., Sousa J.P., Stone D., Griffiths B.S.* The practicalities and pitfalls of establishing a policy-relevant and cost-effective soil biological monitoring scheme // *Int. Environ. Assess. Manag.* 2013. V. 9. P. 276–284. <https://doi.org/10.1002/ieam.1398>
81. *Garcia M.M., McKay K.A.* Pathogenic microorganisms in soil: an old problem in a new perspective // *Can. J. Comparative Medicine.* 1970. V. 34. P. 105–110.
82. *Gondim-Porto C., Platero L., Nadal I., Navarro-Garcia F.* Fate of classical faecal bacteria markers and ampicillin-resistant bacteria in agricultural soils under Mediterranean climate after urban sludge amendment // *Sci. Total Environ.* 2016. V. 565. P. 200–210. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.160>
83. *Han X., Wang R., Guo W., Pang X., Zhou J., Wang Q., Zhan J., Dai J.* Soil microbial community response to land use and various soil elements in a city landscape of north China // *Afr. J. Biotechnol.* 2011. V. 10(73). P. 16554–16565. <https://doi.org/10.5897/AJB10.1682>
84. *Hofman J., Trávníčková E., Anděl P.* Road salts effects on soil chemical and microbial properties at grassland and forest site in protected natural areas // *Plant, Soil Environ.* 2012. V. 58(6). P. 282–288. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113976>
85. *Hu Y., Dou X., Li J., Li F.* Impervious surfaces alter soil bacterial communities in urban areas: a case study in Beijing, China // *Frontiers in Microbiology.* 2018. V. 9. P. 226. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00226>
86. *Ivashchenko K., Ananyeva N., Sushko S., Paltseva A., Seleznyova A., Plushchikov V., Kudayarov V.* Fungal and bacterial respiration in Urban Technosols vs. Natural Soils // *Green Technologies and Infrastructure to Enhance Urban Ecosystem Services.* Springer Geography, 2019. P. 88–99. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-16091-3\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-16091-3_12)
87. *Ivashchenko K., Ananyeva N., Vasenev V., Sushko S., Seleznyova A., Kudayarov V.* Microbial C-availability and organic matter decomposition in urban soils of megapolis depend on functional zoning // *Soil Environ.* 2019. V. 38(1). P. 31–41. <https://doi.org/10.25252/SE/19/61524>
88. *Joyner J.L., Kerwin J., Deeb M., Lozefski G., Prithviraj B., Paltseva A., McLaughlin J., Groffman P., Cheng Z., Muth T.R.* Green infrastructure design influences communities of urban soil bacteria // *Frontiers in Microbiology.* 2019. V. 10. P. 982. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00982>
89. *Kaye J.P., Mcculley R.L., Burke I.C.* Carbon fluxes, nitrogen cycling, and soil microbial communities in adjacent urban, native and agricultural ecosystems // *Global Change Biol.* 2005. V. 11. P. 575–587. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.00921.x>
90. *Keuskamp J.A., Dingemans B.J.J., Lehtinen T., Sarneel J.M., Hefting M.M.* Tea Bag Index: a novel approach to collect uniform decomposition data across ecosystems // *Methods Ecol. Evolution.* 2013. V. 4. P. 1070–1075. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12097>
91. *Lee J.M., Tan J., Gill A.S., McGuire K.L.* Evaluating the effects of canine urine on urban soil microbial communities // *Urban Ecosystems.* 2019. V. 22. P. 721–732. <https://doi.org/10.1007/s11252-019-00842-0>
92. *Li G., Sun G.-X., Ren Y., Luo X.-S., Zhu Y.-G.* Urban soil and human health: a review // *Eur. J. Soil Sci.* 2018. V. 69. P. 196–215. <https://doi.org/10.1111/ejss.12518>
93. *Lorenz K., Kandeler E.* Microbial biomass and activities in urban soils in two consecutive years // *J. Plant Nutrition Soil Sci.* 2006. V. 169. P. 799–808. <https://doi.org/10.1002/jpln.200622001>
94. *Luo X.S., Ding J., Xu B., Wang Y.J., Li H.B., Yu S.* Incorporating bioaccessibility into human health risk assessments of heavy metals in urban park soils // *Sci. Total Environ.* 2012. V. 424. P. 88–96. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.02.053>
95. *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>
96. *Matei G.-M., Matei S., Breabăn I.G., Lăcătușu R.* Microbial characteristics of urban soils from Iassy municipality // *Factori și Procese Pedogenetice din Zona Temperată 5.* 2006. P. 63–71.

97. Millennium Ecosystem Assessment: Ecosystems and human well-being: a framework for assessment. Washington: Island Press, 2003. 155 p.
98. Mgelwa A.S., Hu Y.-L., Xu W.-B., Ge Z.-Q., Yu T.-W. Soil carbon and nitrogen availability are key determinants of soil microbial biomass and respiration in forests along urbanized rivers of southern China // *Urban Forestry and Urban Greening*. 2019. V. 43. P. 126351. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.05.013>
99. Nannipieri P., Ascher-Jenull J., Ceccerini M.T., Pietramellara G., Renella G., Schloter M. Beyond microbial diversity for predicting soil functions: A mini review // *Pedosphere*. 2020. V. 30(1). P. 5–17. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(19\)60824-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(19)60824-6)
100. Naylo A., Almeida Pereira S.I., Benidire L., El Khalil H., Castro P.M.L., Ouvrard S., Schwartz C., Boularbah A. Trace and major element contents, microbial communities, and enzymatic activities of urban soils of Marrakech city along an anthropization gradient // *J. Soils Sediments*. 2019. V. 19. P. 2153–2165. <https://doi.org/10.1007/s11368-018-2221-y>
101. Norra S., Stüben D. Urban soils // *J. Soils Sediments*. 2003. V. 3. P. 230–233. <https://doi.org/10.1007/BF02988664>
102. Panico S.C., Memoli V., Esposito F., Maisto G., De Marc A. Plant cover and management practices as drivers of soil quality // *Appl. Soil Ecol.* 2018. V. 129. P. 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.05.001>
103. Papa S., Bartoli G., Pellegrino A., Fioretto A. Microbial activities and trace element contents in an urban soil // *Environ. Monitor. Assess.* 2010. V. 165. P. 193–203. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-0938-1>
104. Piotrowska-Długosz A., Charzyński P. The impact of the soil sealing degree on microbial biomass, enzymatic activity, and physicochemical properties in the Ekranic Technosols of Toruń (Poland) // *J. Soils Sediments*. 2015. V. 15. P. 47–59. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0963-8>
105. Pulleman M., Creamer R., Hamer U., Helder J., Pelose C., Peres G., Rutgers M. Soil biodiversity, biological indicators and soil ecosystem services – an overview of European approaches // *Current Opinion in Environmental Sustainability*. 2012. V. 4. P. 529–538. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.10.009>
106. Saccá A., Caracciolo A.B., Di Lenola M., Grenni P. Ecosystem services provided by soil microorganisms // *Soil Biological Communities and Ecosystem Resilience, Sustainability in Plant and Crop Protection*. Springer Int. Publi., 2017. P. 9–24. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-63336-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-63336-7_2)
107. Saier M.H. Are megacities sustainable? // *Water, Air, Soil Poll.* 2008. V. 191. P. 1–3. <https://doi.org/10.1007/s11270-006-9211-1>
108. Saint-Laurent D., Arsenault-Boucher L. Soil properties and rate of organic matter decomposition in riparian woodlands using the TBI protocol // *Geoderma*. 2020. V. 358. P. 113976. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113976>
109. Sharma R.C., Tateishi R., Hara K., Gharechelou S., Lizuka K. Global mapping of urban built-up areas of year 2014 by combining MODIS multispectral data with VIIRS nighttime light data // *Int. J. Digital Earth*. 2016. V. 9. P. 1–17. <https://doi.org/10.1080/17538947.2016.1168879>
110. Sarneel J.M., Sundqvist M.K., Molau U., Björkman M.P., Alatalo J.M. Decomposition rate and stabilization across six tundra vegetation types exposed to >20 years of warming // *Sci. Total Environ.* 2020. V. 72. P. 138304. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138304>
111. Scharenbroch B.C., Lloyd J.E., Johnson-Maynard J.L. Distinguishing urban soil with physical, chemical and biological properties // *Pedobiology*. 2005. V. 49. P. 283–296. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2004.12.002>
112. Schloter M., Nannipieri P., Sørensen S.J., van Elsas J.D. Microbial indicators for soil quality // *Biol. Fertil. Soils*. 2018. V. 54. P. 1–10. <https://doi.org/10.1007/s00374-017-1248-3>
113. Schneider A., Friedl M.A., Potere D. A new map of global urban extent from MODIS satellite data // *Environ. Res. Lett.* 2009. V. 4. P. 44003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/4/044003>
114. Seto K.C., Fragkias M., Güneralp B., Reilly M.K. A Meta-analysis of global urban land expansion // *PLoS ONE*. 2011. V. 6. P. 1–8. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0023777>
115. Shi Z., Yin H.D., Van Nostrand J., Voordeckers J.W., Tu Q., Deng Y., Yuan M., Zhou A., Zhang P., Xiao N., Ning D., He Z., Wu L., Zhou J. Functional gene array-based ultrasensitive and quantitative detection of microbial populations in complex communities // *mSystems*. 2019. V. 4. P. e00296–19. <https://doi.org/10.1128/mSystems.00296-19>
116. Tao X., Cui J., Dai Y., Wang Z., Xu X. Soil respiration responses to soil physiochemical properties in urban different green-lands: A case study in Hefei, China // *Int. Soil Water Conserv. Res.* 2016. V. 4. P. 224–229. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.08.001>
117. Thiele-Bruhn S., Schloter M., Wilke B.-M., Beaudette L.A., Martin-Laurent F., Cheviron N., Mougín C., Römbke J. Identification of new microbial functional standards for soil quality assessment // *Soil*. 2020. V. 6. P. 17–34. <https://doi.org/10.5194/soil-6-17-2020>
118. Tresh S., Moretti M., Le Bayon R.-C., Mader P., Zanetta A., Frey D., Fliessbach A. A gardener's influence on urban soil quality // *Frontiers Environ. Sci.* 2018. V. 6(25). P. 1–17. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00025>
119. Tresh S., Moretti M., Le Bayon R.-C., Mader P., Zanetta A., Frey D., Stehle B., Kuhn A., Munyangabe A., Fliessbach A. Urban soil quality assessment – A comprehensive case study dataset of urban garden soils // *Frontiers Environ. Sci.* 2018. V. 6(136). P. 1–5. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00136>
120. UN Department of Economic and Social Affairs. Revision of World Urbanization Prospects: New York: United Nations, 2018.
121. Vasenev V., Kuzyakov Y. Urban soils as hot spots of anthropogenic carbon accumulation: Review of stocks, mechanisms and driving factors // *Land Degradation and Development*. 2018. V. 29. P. 1607–1622. <https://doi.org/10.1002/ldr.2944>

122. *Vasenev V.I., Stoorvogel J.J., Vasenev I.I.* Urban soil organic carbon and its spatial heterogeneity in comparison with natural and agricultural areas in the Moscow region // *Catena*. 2013. V. 107. P. 96–102. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.02.009>
123. *Wang M., Markert B., Shen W., Chen W., Peng C., Ouyang Z.* Microbial biomass carbon and enzyme activities of urban soils in Beijing // *Environ. Sci. Poll. Res.* 2011. V. 18. P. 958–967. <https://doi.org/10.1007/s11356-011-0445-0>
124. *Wang X.T., Miao Y., Zhang Y., Li Y.C., Wu M.H., Yu G.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban soils of the megacity Shanghai: occurrence, source apportionment and potential human health risk // *Sci. Total Environ.* 2013. V. 447. P. 80–89. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.12.086>
125. *Xu H.-J., Li S., Su J.-Q., Nie S., Gibson V., Li Y., Zhu Y.-G.* Does urbanization shape bacterial community composition in urban park soils? A case study in 16 representative Chinese cities based on the pyrosequencing method // *FEMS Microbiol. Ecol.* 2013. V. 87. P. 182–192. <https://doi.org/10.1111/1574-6941.12215>
126. *Yan B., Li J., Xiao N., Qi Y., Fu G., Liu G., Qiao M.* Urban-development-induced Changes in the Diversity and Composition of the Soil Bacterial Community in Beijing // *Scientific Reports*. 2016. V. 6. P. 38811. <https://doi.org/10.1038/srep38811>
127. *Yang J.L., Zhang G.L.* Formation, characteristics and eco-environmental implications of urban soils – A review // *Soil Sci. Plant Nutrition*. 2015. V. 61. P. 30–46. <https://doi.org/10.1080/00380768.2015.1035622>
128. *Yang Y., Paterson E., Campbell C.D.* Urban soil microbial features and their environmental significance as exemplified by Aberdeen City, UK // *Chin. J. Geochem.* 2001. V. 20(1). P. 34–44. <https://doi.org/10.1007/BF03166847>
129. *Yuangen Y., Campbell C.D., Clark L., Cameron C.M., Paterson E.* Microbial indicators of heavy metal contamination in urban and rural soils // *Chemosphere*. 2006. V. 63. P. 1942–1952. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.10.009>
130. *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>
131. *Zhao D., Li F., Yang Q., Wang R., Song Y., Tao Y.* The influence of different types of urban land use on soil microbial biomass and functional diversity in Beijing, China // *Soil Use and Management*. 2013. V. 29. P. 230–239. <https://doi.org/10.1111/sum.12034>
132. *Zhen Z., Wang S., Luo S., Ren L., Liang Y., Yang R., Li Y., Zhang Y., Deng S., Zou L., Lin Z., Zhang D.* Significant impacts of both total amount and availability of heavy metals on the functions and assembly of soil microbial communities in different land use patterns // *Frontiers in Microbiology*. 2019. V. 10. P. 2293. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02293>

## Microbial Indicators of Urban Soils and Their Role in Assessment of Ecosystem Services (Review)

N. D. Ananyeva<sup>1,\*</sup>, K. V. Ivashchenko<sup>1,2</sup>, and S. V. Suchko<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences, Pushchino, 142290 Russia*

<sup>2</sup> *Agrarian-Technological Institute, Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, 117198 Russia*

<sup>3</sup> *Agrophysical Research Institute, Saint Petersburg, 195220 Russia*

\*e-mail: [ananyeva@rambler.ru](mailto:ananyeva@rambler.ru)

Soil is an important component of the urban ecosystems, the balanced functioning of which is largely dependent on the soil microbiome. The state of the microbiome can be indicated by various properties, but which of them is the most suitable to indicate the urban soil functioning and, thereby, be useful in planning and management of urban areas is still unclear. Using information databases (eLIBRARY.RU, Web of Science, Scopus), domestic and foreign papers (47 and 35, respectively) published over the past 25 years and focused on the study of soil microbial properties in different cities of the world were found. It was revealed that the main attention in the investigations is contributed to assessing the taxonomic structure of soil microbiome, its green gases production and enzymatic activity, biomass content, ecophysiological status, functional diversity, cell morphology, pathogenic and opportunistic microorganism abundance. Criteria of various microbial indicators (reproducibility, selectivity, expenses, standardization, interpretation and understanding, scientific approval) illustrating the usefulness for assessing the urban soil functions and, thereby, ecosystem services are proposed. The more suitable indicators were the activity and ecophysiological status of soil microbiome, and less – functional genes and “key groups” of microorganism abundances. Highlighted the importance of study the relationship between the microbial taxonomic diversity of urban soils and their main functions and, thereby, ecosystem services. Other promising microbial indicators for assessing the urban soils functioning are discussed.

**Keywords:** soil microbiome, ecological function, urban ecosystem, functioning, indicator criterion, ecosystem services