

УДК 574.4:631.46

МИКРОАРТРОПОДЫ КАК ИНДИКАТОРЫ СОСТОЯНИЯ ПОЧВ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ: ОБЗОР ПОДХОДОВ И АНАЛИЗ ДОСТУПНЫХ ДАННЫХ

Самсонов И.В.

аспирант научной специальности 1.5.15. «Экология» СамГТУ

e-mail: i.samsonov15@mail.ru

Аннотация

Рассматриваются возможности использования почвенных микроартропод, прежде всего коллембол и клещей, для оценки экологического состояния городских почв. Сопоставлены таксономический, функциональный и эколого-морфологический подходы, а также индекс биологического качества QBS-ar. На основе проверяемых публикаций о парках Бухареста и Неаполя показано, что связь разнообразия микроартропод с загрязнением неоднозначна и зависит от растительного покрова, подстилки, управления зелеными насаждениями и пространственной неоднородности. Предлагается воспроизводимая схема отбора опубликованных данных и комплексной интерпретации биоиндикационных показателей. Работа носит обзорно-аналитический характер; новый массив полевых проб не собирался.

Ключевые слова: городские почвы, микроартроподы, *Collembola*, *Acari*, биоиндикация, *QBS-ar*, тяжелые металлы, зеленые территории.

SOIL MICROARTHROPODS AS INDICATORS OF URBAN SOIL CONDITION: A REVIEW OF APPROACHES AND ANALYSIS OF AVAILABLE DATA

Samsonov I.V.

Postgraduate student in the scientific specialty 1.5.15 «Ecology» at Samara State Technical University

e-mail: i.samsonov15@mail.ru

Abstract

This paper examines soil microarthropods, especially springtails and mites, as indicators of urban soil condition. Taxonomic, functional and ecomorphological approaches, including the QBS-ar index, are compared. Verified studies from Bucharest and Naples illustrate why the relationship between soil contamination and microarthropod diversity is context-dependent: vegetation cover, litter, management, and spatial heterogeneity can modify the observed response. A reproducible framework for extracting published evidence and interpreting multiple ecological indices is proposed. The study is a critical literature analysis and does not claim new field measurements or a pooled meta-analytic effect.

Keywords: urban soils, microarthropods, *Collembola*, *Acari*, soil bioindication, *QBS-ar*, heavy metals, urban green space.

Введение

Урбанизация трансформирует почвенный покров не только через химическое загрязнение. Существенны и иные сдвиги: уплотнение, нарушение водного режима, изменение растительного опада и фрагментация местообитаний, причем их совместное и одновременное действие – особенно в городе – меняет свойства среды по нескольким каналам. По этой причине состояние городской почвы нельзя надежно описать лишь концентрацией тяжелого металла или значением pH. Живые организмы интегрируют влияние нескольких факторов во времени и тем самым дополняют физико-химическую диагностику.

К наиболее доступным группам почвенной мезофауны относятся коллемболы (*Collembola*) и клещи (*Acari*). Их жизненные циклы, требования к влажности, способ питания и степень специализации неодинаковы; поэтому сдвиги численности не во всех случаях

совпадают с изменениями видового богатства. Такое расхождение – самостоятельный диагностический сигнал, позволяющий судить о неоднородной реакции микроартропод на городские воздействия, но оно же, как представляется, заметно затрудняет интерпретацию простых индексов.

Цель статьи – сопоставить применяемые способы биоиндикации с использованием микроартропод и определить условия, при которых опубликованные данные о городских почвах пригодны для сравнительного анализа. В число задач входят оценка индикаторных признаков, разработка схемы стандартизованного обследования, критический разбор нескольких исследований и описание статистических ограничений. Это обобщение не следует считать ни новым полевым исследованием, ни количественным метаанализом.

Методы и методики

Коллемболы участвуют в трансформации органических остатков и грибной биомассы. Они связаны с пищевыми сетями ризосферы и, реагируя на условия поверхностных горизонтов, отражают изменения той части почвенной среды, где особенно заметны колебания влажности и поступление свежего опада – именно здесь проявляется их диагностическая значимость. Среди клещей выделяют панцирных (Oribatida), гамазовых и другие группы с различными трофическими функциями; в стабильных подстилочных местообитаниях, как представляется, способны формироваться сообщества с более сложной структурой, но их состав – даже при сходных условиях – всегда зависит от климата и истории конкретного участка.

При загрязнении металлами наиболее чувствительные таксоны могут исчезать, а толерантные – увеличивать относительную долю. Следовательно, высокая суммарная плотность не равнозначна экологическому благополучию. В исследовании парков Бухареста именно сочетание низкого видового богатства с повышенной численностью части коллембол оказалось показательным для участка с высокими уровнями загрязнения [1].

Городская среда создает трудноразделимые градиенты. Дорожная пыль и противогололедные реагенты действуют одновременно с иссушением, рекреационной нагрузкой и изменением подстилки. Даже внутри одного парка затененные и открытые участки формируют разные микроклиматические условия. По этой причине сравнение «парк – придорожная полоса» без характеристик влажности, растительности и почвенной текстуры может дать ошибочную причинную интерпретацию.

Результаты

Базовым нормативным ориентиром служит ISO 23611-2:2024, посвященный отбору, извлечению и сохранению почвенных микроартропод, включая коллембол и клещей [2]. Для получения сопоставимых наблюдений фиксируют координаты, время года, глубину отбора, площадь или объем пробы, наличие подстилки, влажность и продолжительность экстракции; без такого набора параметров сравнение серий теряет строгость. В городских условиях полезен отдельный анализ подстилки и минерального горизонта – уборка листьев способна изменить первую составляющую без немедленного изменения второй.

Обычно применяют экстракцию, основанную на реакции животных на градиенты тепла и влажности, например, в воронках Берлеза-Тульгрена. Такой способ не обеспечивает одинаковую эффективность извлечения всех особей: подвижность организмов и их физиологическое состояние различаются, а потому итоговая выборка в определенной мере зависит не только от среды, но и от свойств самих микроартропод. По этой причине постоянство методики – важнее кажущейся максимальной полноты сбора. Для повторных сезонов рекомендуется сохранять одинаковую продолжительность обработки и условия пробоподготовки.

План обследования должен включать независимые участки, а внутри них – повторные пробы. Последние нельзя рассматривать как независимые участки при оценке влияния городской среды, поскольку они отражают внутриплощадочную вариацию, а не самостоятельные пространственные единицы наблюдения. Особое значение имеют контрольные территории: они должны быть сопоставимы по типу растительности и текстуре

почвы, иначе выявленные различия будут отражать не только нагрузку, но и естественную неоднородность экосистем.

Самый простой показатель – плотность особей на единицу площади почвы. Он удобен для полевых сравнений, но чувствителен к сезонности и редким массовым видам; видовое богатство и индекс Шеннона, в свою очередь, дополнительно учитывают разнообразие таксонов, однако требуют надежной идентификации и достаточно полной выборки. Рекомендуется совместно отображать плотность, число таксонов и распределение их долей – а не сводить диагностику к одному итоговому числу.

Индекс QBS-ar, предложенный Parisi и соавторами [3], основан на эколого-морфологической приспособленности найденных групп к жизни в почве. Каждой группе соответствует балл ЕМІ, а суммарная оценка представляет собой сумму выбранных баллов присутствующих групп. Преимущество – сравнительно невысокие требования к видовому определению. Ограничение состоит в потере информации о численности и внутригрупповой таксономической вариации.

Функциональный анализ может включать жизненную форму, размер тела, пигментацию, наличие глаз, трофическую специализацию и глубину обитания. Признаки важны для объяснения механизмов реакции на нарушение среды, однако единой универсальной шкалы устойчивости для всех географических зон не существует. Набор признаков необходимо обосновывать применительно к конкретной группе и экосистеме.

Для расчета разнообразия применяют выражение:

$$H = -\sum(p_i \ln p_i), \quad p_i = \frac{n_i}{N}, \quad (1)$$

где p_i – число особей i -го таксона;

N – суммарное число учтенных особей.

При сравнении участков следует контролировать полноту выборки и чувствительность индекса к редким видам. Табл. 1 подчеркивает необходимость сочетания показателей: ни один из них в отдельности не служит достаточным критерием загрязнения.

Таблица 1 – Основные показатели для исследования

Показатель	Преимущество	Основное ограничение
Плотность	Простота подсчета	Сезонность, доминирование
Богатство видов	Чувствительность к потере таксонов	Зависимость от усилия отбора
Индекс Шеннона	Учитывает соотношение численностей	Требуется точного определения
QBS-ar	Возможность морфогруппового учета	Не отражает обилие внутри групп

Для предметного обзора отобраны публикации, в которых представлены:

- городские площадки и явно определенные группы микроартропод;
- описание экологического градиента или характеристик землепользования;
- интерпретируемые сведения о составе сообществ.

Методологические работы и стандарт ISO рассмотрены отдельно как источники процедуры, а не как эмпирические наблюдения. Отбор носит целевой, а не исчерпывающий характер: систематический поиск по всем базам с регистрацией PRISMA здесь не проводился.

Исследование С. Fiera в трех парках Бухареста включает 210 проб почвы и подстилки, 2475 особей и 34 вида коллембол [1]. На наиболее загрязненной площадке выявлено 11 видов, хотя суммарная численность могла возрасти благодаря устойчивым видам. Эти числа относятся именно к указанной публикации; их нельзя напрямую переносить на иные города или сравнивать с другими исследованиями без унификации объема пробы.

В восьми парках Неаполя исследователи изучали влияние истории озеленения, состояния подстилки, древесного полога, городской застройки и свойств почвы на сообщества коллембол [4]. Авторы особо подчеркивают значение наличия подстилки и полога; при этом содержание металлов в диапазоне исследованных условий не обнаружило ожидаемой

определяющей связи с разнообразием, хотя именно такой эффект нередко предполагается в упрощенных интерпретациях городских градиентов. Сопоставление с бухарестским исследованием показывает контекстную зависимость, и, по нашему мнению, исключает возможность обобщать тезис «металлы снижают разнообразие» без уточнения уровня воздействия.

Другие исследования городской структуры парков показывают связь наблюдаемых различий с размером пятен местообитаний, расположением зеленых территорий и функциональными характеристиками сообщества [5, 6]. Эти работы задают важные ориентиры для дизайна мониторинга; однако неоднородность способов подсчета и описания участков, примечательно, затрудняет простое объединение результатов, поскольку сопоставление наборов данных требует совпадения не только показателей, но и процедур их получения (табл. 2).

Таблица 2 – Анализ исследований

Источник и регион	Предмет сравнения	Подтвержденный вывод
Fiera, Бухарест [1]	Коллемболы в трех парках	2475 особей, 34 вида; 11 видов на наиболее загрязненном участке
Парки Неаполя [4]	Полог, подстилка, металлы	Влияние покрова и подстилки, отсутствие выраженного влияния невысоких уровней металлов
Городские парки [5, 6]	Мозаика местообитаний	Важность пространственной структуры и неоднородности

Сводка выявляет различия экологической постановки, а не объединенную оценку величины эффекта. По этим строкам нельзя рассчитывать единую корреляцию или обобщенный коэффициент, поскольку сопоставляемые исследования различаются по структуре наблюдений, набору переменных и логике отбора материала; следовательно, таблица служит средством сравнительного описания, а не основой для прямого статистического синтеза. Иными словами, ее функция – аналитическая, а не метааналитическая.

При наличии исходных подсчетов для каждого участка вычисляют плотность, видовое богатство и индекс Шеннона. Для сравнений между участками необходимы доверительные интервалы, а в моделях требуется учитывать иерархию «парк – пробная площадка – проба», поскольку вложенность наблюдений влияет на корректность выводов и на оценку межуровневой вариации. Многочисленные пробы в одном парке повышают точность оценки его среднего, но не заменяют независимые парки.

При моделировании счетных данных предпочтительны обобщенные линейные модели с отрицательно-биномиальным распределением при сверхдисперсии. В число объясняющих переменных включают загрязнение, влажность, pH, текстуру почвы, мощность подстилки, долю древесного полога и сезон; при повторных измерениях вводят случайный эффект площадки либо корреляционную структуру, чтобы отделить временную зависимость от влияния самих экологических факторов. Прежде чем интерпретировать коэффициент металла, необходимо оценить мультиколлинеарность и точность химических измерений.

Для анализа состава сообщества пригодны ординация, пермутационный многомерный дисперсионный анализ и сопоставление функциональных профилей. Однако значимость различий может определяться не только сдвигом центров групп, но и неодинаковой дисперсией внутри них, поэтому статистическую процедуру – во избежание ошибочной интерпретации – дополняют проверкой гомогенности многомерного рассеяния и графическим представлением наблюдений.

Разнородные публикации нельзя объединять по средним значениям. Формальный метаанализ потребовал бы сопоставимой меры эффекта, размера выборки, вариации показателя и сведений о пространственной зависимости. Для работ с неполными данными

предпочтительнее табличный синтез с указанием направления эффекта и факторов смещения, чем расчет искусственно точной общей оценки:

$$\ln(E[N_{ij}]) = \beta_0 + \beta_1 C_{ij} + \beta_2 M_{ij} + u_j, \quad (2)$$

В модельном выражении C обозначает концентрацию выбранного загрязнителя, M – показатель микросреды, u – случайный эффект участка. Это проект статистической обработки, а не результат подгонки модели к исходным данным. Даже при статистически значимых ассоциациях требуется проверка их экологического смысла и устойчивости к исключению отдельных площадок.

Обсуждение

Ключевое ограничение связано с многофакторностью городских почв. Изменение структуры сообщества является сигналом экологического воздействия, но само по себе не определяет вид загрязнителя. Индекс QBS-ar может отражать адаптацию группы к почвенной среде, не указывая на причину нарушений; высокая плотность толерантных организмов способна скрывать потерю редких видов.

Вторая проблема - непостоянство наблюдаемости. Количественные результаты могут изменяться из-за высушивания проб, различий в экспозиции экстрактора и квалификации определителя, поскольку каждая из этих процедурных деталей влияет на полноту извлечения и точность таксономического учета. Третья проблема связана с масштабом: даже качественно отобранные пробы характеризуют локальные микроместообитания, тогда как управленческое решение принимается на уровне парка или города. По этой причине требуются пространственная репликация и описание ландшафтной конфигурации.

Практически целесообразно использовать ступенчатую оценку: сначала проводят физико-химическую характеристику почвы и описание участка, затем рассчитывают количественные показатели микроартропод и QBS-ar, после чего проверяют согласованность сигналов. При противоречии индикаторов следует анализировать доминирующие группы и состояние подстилки, а не выбирать только тот показатель, который подтверждает исходную гипотезу. Такой порядок особенно важен в неоднородной городской среде, где разные компоненты биоты и почвенных свойств нередко реагируют на нагрузку с различной скоростью.

Для городского экологического мониторинга особенно полезны повторные исследования одних и тех же участков в одинаковые сезоны. Эта схема позволяет отделить устойчивые межучастковые различия от кратковременных колебаний погодных условий; кроме того, она повышает сопоставимость серий наблюдений при последующем статистическом анализе. Публикация обезличенных таблиц подсчета по пробам, метаданных и протокола идентификации, как представляется, повысит пригодность результатов для последующего количественного синтеза.

Заключение

Микроартроподы выступают содержательным, но не универсальным индикатором состояния почв урбанизированных территорий. Важнейшую роль играет сочетание признаков: плотности, таксономического богатства, структуры доминирования, эколого-морфологической адаптации и функционального состава, поскольку именно такая комбинация позволяет охватить несколько уровней организации сообщества и уменьшить зависимость вывода от одного показателя. Использование только одного индекса – повышает риск неоднозначных выводов.

Опубликованные исследования Бухареста и Неаполя демонстрируют принципиально важную особенность: характер реакции коллембол меняется в зависимости от уровня загрязнения и устройства городского местообитания. По этой причине результаты биоиндикации следует рассматривать вместе с химическими измерениями, наличием подстилки, растительным пологом и историей управления территорией; только при таком сопоставлении можно отделить отклик на загрязнение от влияния структуры местообитания и особенностей его поддержания. Показательно, что здесь контекст – определяющее условие интерпретации.

Методически наиболее убедительным представляется дизайн с независимыми парками, пространственной репликацией внутри них, стандартизированной экстракцией по ISO 23611-2 и статистическими моделями, учитывающими вложенность проб. Представленный обзор формирует основу для будущей сравнительной работы; однако для количественного метаанализа необходимы открытые первичные данные и согласованные меры эффекта, без которых сопоставление результатов останется качественным, а не строгим расчетом суммарной зависимости. Отсюда следует практический вывод – приоритет следует отдавать прозрачности данных и единообразию процедур.

Литература

1. Fiera C. Biodiversity of Collembola in urban soils and their use as bioindicators for pollution // *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 2009. Vol. 44, № 8. PP. 868-873.
2. ISO 23611-2:2024. Soil quality – Sampling of soil invertebrates – Part 2: Sampling and extraction of micro-arthropods (Collembola and Acarina). Geneva: ISO, 2024. URL: <https://www.iso.org/standard/85217.html> (дата обращения: 21.10.2026).
3. Parisi V., Menta C., Gardi C., Jacomini C., Mozzanica E. Microarthropod communities as a tool to assess soil quality and biodiversity: a new approach in Italy // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2005. Vol. 105, № 1-2. PP. 323-333.
4. Collembolan biodiversity in Mediterranean urban parks: impact of history, urbanization, management and soil characteristics // *Applied Soil Ecology*. 2017. Vol. 119. PP. 428-437.
5. The effect of urban park landscapes on soil Collembola diversity: A Mediterranean case study // *Landscape and Urban Planning*. 2018. Vol. 180. PP. 135-147.
6. Inter- and intra-site variation of microarthropod communities in urban parks // *Pedobiologia*. 2025. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031405625000423> (дата обращения: 21.10.2026).
7. Kayiranga A., Li Z., Isabwe A. et al. The Effects of Heavy Metal Pollution on Collembola in Urban Soils and Associated Recovery Using Biochar Remediation: A Review // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2023. Vol. 20, № 4. Art. 3077.
8. Soil Biological Quality index (QBS-ar): 15 years of application at global scale // *Ecological Indicators*. 2018. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X17307422> (дата обращения: 21.10.2026).