Трансформация экосистем
Ecosystem Transformation

ISSN 2619-0931 Online
www.ecosysttrans.com

DOI: https://doi.org/10.23859/estr-250325
EDN: https://elibrary.ru/nzveeq
УДК 57.04

Научная статья

Металлы Zn, Cu, Pb, Cd в системе «почва-растение» зеленых зон города

О.Е. Кононова[1, 2], А.С. Олькова[2*]

[1] *Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого, 610007, Россия, г. Киров, ул. Ленина, д. 166а*

[2] *Вятский государственный университет, 610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36*

**morgan-abend@mail.ru*

Аннотация. Многие тяжелые металлы (ТМ) могут иметь как эссенциальное значение, так и оказывать токсическое действие. Целью работы была оценка показателей, отражающих накопление и поведение Zn, Cu, Pb, Cd в системе «почва-растение» урбоэкосистемы. Пробы почвы (0–10 см) и листьев березы повислой *Betula pendula* были отобраны в г. Кирове (Россия), в зоне тайги с умеренно континентальным климатом. Накопление Zn в почве большинства участков было выше регионального фона (58 мг/кг), кроме отдаленных от центра жилых зон. Содержание Cu в почве было выше норматива (20 мг/кг), но в пределах регионального фона (28 мг/кг), кроме участка с высокой транспортной нагрузкой, где превышение фона составило 1.7 раза. Доля подвижных форм Zn была больше, чем у других ТМ, с максимальной лабильностью на участке с высокой транспортной нагрузкой (58%). Это привело к тому, что на 4 из 9 участков коэффициент биологического накопления Zn листьями *B. pendula* превышал 1. Асимметрия листьев *B. pendula* в большей степени коррелировала с валовым содержанием Zn в почве (r по Пирсону равен 0.67), концентрацией его подвижных форм (r = 0.36), и подвижными формами Cu (r =−0.38). Взаимосвязь флуктуирующей асимметрии (ФА) с содержанием ТМ в листьях оказалась слабой (r < 0.30). Таким образом, увеличение ФА листьев *B. pendula* – это в большей степени реакция на содержание металлов в почве, чем на их накопление в листьях.

Ключевые слова: кадмий, свинец, медь, цинк, аккумуляция, береза, *Betula pendula*, флуктуирующая асимметрия листьев, коэффициент биологического накопления

ORCID:
О.Е. Кононова, https://orcid.org/0000-0001-9066-0536
А.С. Олькова, https://orcid.org/0000-0002-5798-8211

Для цитирования: Кононова, О.Е., Олькова, А.С., 2026. Металлы Zn, Cu, Pb, Cd в системе «почва-растение» зеленых зон города. *Трансформация экосистем* **9** (4), 209–224. https://doi.org/10.23859/estr-250325

Поступила в редакцию: 25.03.2025
Принята к печати: 28.06.2025
Опубликована онлайн: 04.12.2026

DOI: https://doi.org/10.23859/estr-250325
EDN: https://elibrary.ru/nzveeq
UDC 57.04

Article

Metals Zn, Cu, Pb, and Cd in the "soil-plant" system of urban green zones

O.E. Kononova[1, 2], A.S. Olkova[2]*

[1] *Federal Agrarian Scientific Center of the Northeast named after N.V. Rudnitsky, Lenin St. 166a, Kirov, 610007 Russia*
[2] *Vyatka State University, Moskovskaya St. 36, Kirov, 610000, Russia*

**morgan-abend@mail.ru*

Abstract. Many heavy metals (HMs) can be either essential or toxic. The aim of this study was to assess indicators reflecting the accumulation and behavior of Zn, Cu, Pb, and Cd in the soil-plant system of an urban ecosystem. Soil samples (0–10 cm) and leaves of silver birch *Betula pendula* were collected in Kirov (Russia), in the taiga zone with a temperate continental climate. Soil Zn exceeded the regional background (58 mg/kg) at most sites. The exceptions were residential areas remote from the city center. Copper content in the soil was above the standard (20 mg/kg) but within the regional background (28 mg/kg), except at a site with high traffic load (a 1.7-fold background exceedance). Zn had a higher proportion of mobile forms than the other HMs, peaking at the high-traffic site (58%). As a result, Zn's biological accumulation coefficient in *B. pendula* leaves exceeded 1 at 4 of 9 sites. Leaf asymmetry of *B. pendula* correlated most strongly with total soil Zn ($r = 0.67$), then mobile Zn ($r = 0.36$) and mobile Cu ($r = -0.38$). The relationship between fluctuating asymmetry (FA) and HMs content in leaves was weak ($r < 0.30$). Thus, increased FA in *B. pendula* leaves reflects soil metal content rather than metal accumulation in leaves.

Keywords: cadmium, lead, copper, zinc, accumulation, birch tree, *Betula pendula*, fluctuating leaf asymmetry, biological accumulation coefficient

ORCID:
O.E. Kononova, https://orcid.org/0000-0001-9066-0536
A.S. Olkova, https://orcid.org/0000-0002-5798-8211

To cite this article: Kononova, O.E., Olkova, A.S., 2026. Metals Zn, Cu, Pb, and Cd in the "soil-plant" system of urban green zones. *Ecosystem Transformation* **9** (4), 209–224. https://doi.org/10.23859/estr-250325

Received: 25.03.2025
Accepted: 28.06.2025
Published online: 04.12.2026

Введение

Благополучие городских экосистем во многом обеспечивается наличием в них развитой сети зеленых зон. Согласно Лесному кодексу РФ[1], зеленые зоны – это не только леса, но и земли иных категорий, выделяемые в целях обеспечения защиты населения от воздействия неблагоприятных явлений природного и техногенного происхождения, а также для сохранения и восстановления окружающей среды. Зеленые зоны города формируют его экологический каркас, выполняющий множественные экологические, социальные и эстетические функции.

Традиционно к экологическому каркасу города относят парковые, лесопарковые, водоохранные зоны, зоны ООПТ, кольцо лесных экосистем естественного и искусственного происхождения (Мирзеханова, 2000). Важная часть городского озеленения – посадки вдоль автотранспортных дорог. Они выполняют барьерную функцию, защищая селитебные районы от пыли, насыщенной потенциально опасными веществами.

В перечисленных составляющих зеленых зон городов центральное место занимает система «почва-растение». Известно, что почвы городов по всему миру отличаются повышенным содержанием тяжелых металлов (Водяницкий, 2008; Крутских и др., 2016; Hao et al., 2024), нефтепродуктов (Лысак и Лапыгина, 2018; Jing et al., 2024), бензпирена (Макаева и Корчин, 2017, Saltiene et al., 2002), редкоземельных элементов (Жорняк и Язиков, 2008; Maurizio et al., 2025). В ответ на загрязнение изменяются эколого-биологические свойства почвы. Например, в г. Оренбурге уровень фитотоксичности почв в парковых зонах подавлял рост тест-культур. Было показано наличие достоверной корреляционной зависимости показателя фитотоксичности почв (для тест-объекта *Avena sativa* L.) и суммарного содержания в них подвижных форм тяжелых металлов ($r = 0.95$), главным образом цинка ($r = 0.87$) и свинца ($r = 0.75$), а также суммарного содержания их валовых форм ($r = 0.74$) (Верхошенцева и Галактионова, 2014). Поллютанты поглощаются растениями, накапливаясь в их структурных частях. Так, в г. Соликамске в листьях липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.*)* было обнаружено повышенное содержание валовых форм Zn (127 мг/кг), Cu (9.85 мг/кг) и Pb (5.68 мг/кг) (Кайгородов и др., 2009).

Приведенные примеры показывают, что состояние как городских почв, так и растений в урбоэкосистемах часто является объектом изучения в силу их экологической и социальной важности. Целью данной работы стало установление связей между загрязнением почвы в зеленых зонах города и индикаторными характеристиками почвы и растений, произрастающих на ней.

Материалы и методы

Территория и участки исследования

Участки исследования располагались в городской агломерации г. Кирова (Россия). Киров относится к крупным городам, является областным центром Кировской области, входит в территориальную группу регионов Приволжья – Приволжский федеральный округ. Город расположен в подзоне южной тайги. Отметим, что зона тайги занимает около 60% Российской Федерации.

Участки исследования (Рис. 1) относились к зеленым зонам города, расположенным на следующих участках:

1) территории рекреационного назначения:

– в центре города: парк им. Кирова и Александровский сад;

– на периферии города: сквер в пос. Садаковский и лесопарк Порошино;

2) жилые районы с низкой транспортной нагрузкой: р-н Коминтерн, р-н «Солнечный берег», р-н Малая Субботиха, ул. Искры;

3) транспортно нагруженная часть города – сквер на ул. Лепсе.

Исследование почвы

Определение типа почв проводили «мокрым» полевым методом. На всех исследованных участках урбопочвы по генезису и сохранившейся структуре были близки к дерново-подзолистым с песчаным и супесчаным гранулометрическим составом.

Почву на участках отбирали из верхнего корнеобитаемого слоя глубиной 0–10 см методом конверта, располагая прикопки по сторонам квадрата 10×10 м. Сухие образцы гомогенизировали, усредненную пробу направляли на анализ.

[1] Лесной кодекс РФ, 2007. Юридическая литература, Москва, Россия, 56 с.

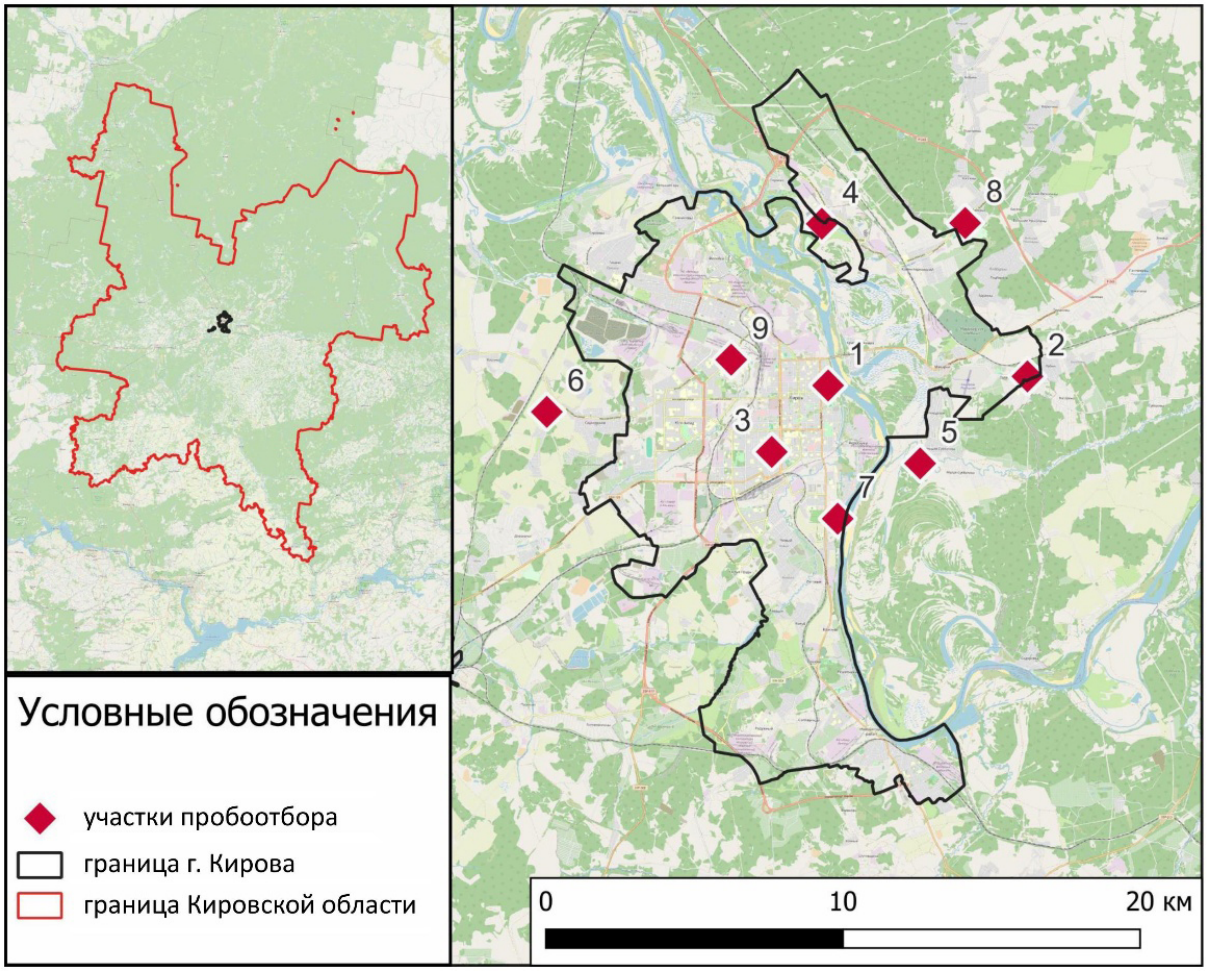


Рис. 1. Карта-схема расположения участков отбора проб. 1 – Александровский парк, 2 – Лесопарк Порошино, 3 – Парк им. Кирова, 4 – Район «Коминтерн», 5 – Район «Малая Субботиха», 6 – Район «Садаковский», 7 – Район Солнечный берег, 8 – ул. Искры, 9 – ул. Лепсе.

В почве были определены следующие показатели: концентрации валовых и подвижных форм тяжелых металлов атомно-абсорбционным методом[2]; уровень pH в водной и солевой вытяжках (Кидин, 2008); содержание органического вещества (ГОСТ 26213-91[3]). По данным, установленным экспериментально, вычисляли степень подвижности металлов как долю подвижных форм металла от его валового содержания в почве.

Для оценки уровня загрязнения почвы вначале рассчитывали коэффициенты концентрации элементов:

$$\mathrm{K}_k = \frac{C_i}{C_\Phi},$$

где C_i – содержание элемента в почве исследуемого участка, C_Φ – среднее содержание элемента на участке фоновой территории. В нашем случае концентрации элементов в почве сравнивали с региональным фоном (Эколого-геохимическая карта..., 1996) и с установленными нормативами[4].

[2] Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства, 1992. ЦИНАО, Москва, Россия, 61 с.

[3] ГОСТ 26213-91, 1991. Почвы. Методы определения органического вещества.

[4] СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.

После определения коэффициентов концентрации рассчитывали суммарный показатель загрязнения (СПЗ) по следующей формуле:

, $$Z_c = \sum_{i=1}^{n} К_{ci} - (n-1)$$

где $К_{ci}$ – коэффициент концентрации *i*-ого элемента в пробе; *n* – число учитываемых элементов.

Полученные СПЗ характеризовали степень загрязнения почв: более 128 – чрезвычайное загрязнение, 32–128 – опасное, 16–32 – умеренно опасное, менее 16 – допустимое загрязнение (Методические указания, 1987[5]; Сает и др., 1990).

Исследование растений

На выбранных участках зеленых зон г. Кирова древесная растительность представлена в основном *Betula pendula* Roth, *Populus tremula* L., *Tilia cordata* Mill., *Acer negundo* L. в различных сочетаниях. Для исследования была выбрана береза повислая *B. pendula*, поскольку она произрастала на всех участках. Для исследования было использовано 10 средневозрастных деревьев без признаков поражения фитофагами. В конце вегетационного сезона (август) 2023 г. с каждого дерева было отобрано по 10 листьев; отбор проводился с нижних веток на высоте 1.5–5 м равномерно со всех сторон света. Впоследствии для листьев выполнялось определение коэффициента флуктуирующей асимметрии[6] и накопления металлов в биомассе за вегетационный сезон атомно-абсорбционной спектрометрией[7]. Перед ААС свежие биопробы промывали дистиллированной водой для удаления аэрогенного загрязнения, сушили до воздушно-сухого состояния, гомогенизировали, подвергали кислотному разложению[7]. Для уточнения данных отбор проб с одного из участков повторили в августе 2024 г.

Биоаккумуляцию ТМ в листьях березы оценивают по коэффициенту биологического накопления (КБН) (Eid et al., 2021; Guo-hang et al., 2018). Он определяется как отношение содержания элемента в растении (его части) к содержанию этого же элемента в почве (субстрате произрастания). При значениях коэффициента биологического накопления меньше 1 считается, что растение избегает накопления элемента, выше 1 – растение относится к аккумуляторам (Baker, 1981).

Математическая обработка результатов

Полученные данные проверяли на нормальность по критерию Шапиро-Уилка в программе R со свободным доступом. Далее результаты представляли в виде среднего значения и их стандартного отклонения. Достоверность различий между показателями на разных участках определяли однофакторным дисперсионным анализом ($p = 0.05$). Связь между различными показателями определяли по коэффициенту корреляции Пирсона (r).

Результаты

Характеристика почвы в зеленых зонах г. Кирова

Большинство исследуемых участков характеризовались слабокислой и кислой реакцией почвы, а по степени накопления органического веществ относились в основном к среднегумусным (Почвоведение, 1988) (Рис. 2).

Для большинства зеленых зон г. Кирова ситуацию накопления металлов в почве можно назвать благополучной. Кадмий (I класс опасности) обнаруживается в почве в минимальных количествах, составляющих менее 8% от установленного норматива[8].

---

[5] Методические указания по оценке степени опасности загрязнения почвы химическими веществами № 4266-87, 1987. Министерство здравоохранения СССР, Москва, СССР, 23 с.

[6] Методические рекомендации по выполнению оценки качества среды по состоянию живых существ (оценка стабильности развития живых организмов по уровню асимметрии морфологических структур), 2003. Распоряжение МПР № 460-р от 16.10.2003. МПР, Москва, Россия, 24 с.

[7] Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства, 1992. ЦИНАО, Москва, Россия, 61 с.

[8] СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.

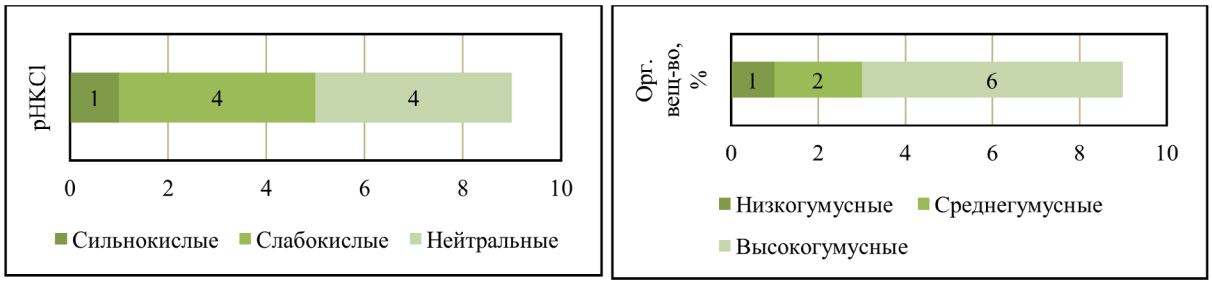


Рис. 2. Распределение количества образцов почв по уровню pH и содержанию органического вещества. Отклонения от среднего при измерении pH составляли не более 5% (n = 3), при определении концентрации органического вещества составляли не более 2% (n = 2).

Концентрация свинца (I класс опасности) в почве выше норматива только на одном участке (Порошино, в 2.7 раза). Его накопление в транспортной зоне и одном из участков рекреационной зоны (район «Коминтерн») превышает 0.5 ПДК (Рис. 3**А**). Уровни регионального фона для Pb строже федеральных нормативов, поэтому на указанных участках видно превышение критической линии (Рис. 3**В**).

Концентрация цинка (II класс опасности) на всех участках была ≥0.5 ПДК, превышение норматива установлено только для транспортной зоны и одного рекреационного участка (Александровский парк, в 3.9 раза). Сравнение данных со средним региональным уровнем указывает на процесс накопления Zn в городских почвах: на большинстве участков показатель выше 1, кроме отдаленных от центра жилых зон (ул. Искры и Малая Субботиха).

Для меди (III класс опасности) ситуация отличается тем, что средний региональный уровень ее содержания в почве превышает федеральный норматив в 1.4 раза. Концентрации валовых форм Cu в почве г. Кирова достаточно высокие. В транспортной зоне, на всех рекреационных участках и двух из четырех участков жилой зоны (районы «Коминтерн» и «Солнечный берег») показатель достиг или превысил ПДК (от 1.2 до 2.3 раза). В то же время из-за высокого регионального фонового уровня загрязнение медью зафиксировано только на двух участках (Александровский парк и ул. Лепсе). Максимальное превышение фонового уровня наблюдается в транспортной зоне (в 1.7 раза).

Известно, что механизмы действия многих тяжелых металлов схожи: дезактивация белков-ферментов, в частности, за счет блокирования сульфгидрильных групп (SH), замещение макроэлементов в структурах клеток (Caito et al., 2014). С этих позиций вполне обоснована оценка токсической нагрузки на почву по индексу СПЗ, известному также как Z_c (Рис. 4).

Согласно Методическим указаниям (1987)[9], все участки характеризуются допустимым загрязнением, так как СПЗ оказался менее 16. Интересно, что максимальные индексы суммарного загрязнения выявлены для двух участков с рекреационными функциями. Значительный вклад в высокие СПЗ внесли Pb и Cu (Порошино), Cu и Zn (Александровский парк).

Важной характеристикой любых почв является степень подвижности металлов. На Рис. 5 отражены эти показатели для Cd, Pb, Cu, Zn. Медь, отличающаяся высоким фоновым содержанием в почве региона, характеризуется минимальной долей подвижных форм (от 0.04 до 1.1). Для основной части проб фиксировалась подвижность металла не более 20%. Только для Zn в Александровском парке, зеленых зонах Малой Субботихи и ул. Лепсе показатель был 28, 27 и 58% соответственно.

Аккумуляция металлов листьями березы

Биоаккумуляция элементов отражает интенсивность процессов их миграции из субстрата в ткани растений (Pachura et al., 2015). Обычно, чем выше содержание металла в почве, тем более высокая концентрация элемента наблюдается в тканях растений. Однако имеются и видовые особенности растений как в накоплении элементов, так и в избегании некоторых из них (Березин и Олькова, 2024).

[9] Методические указания по оценке степени опасности загрязнения почвы химическими веществами № 4266-87, 1987. Министерство здравоохранения СССР, Москва, 23 с.

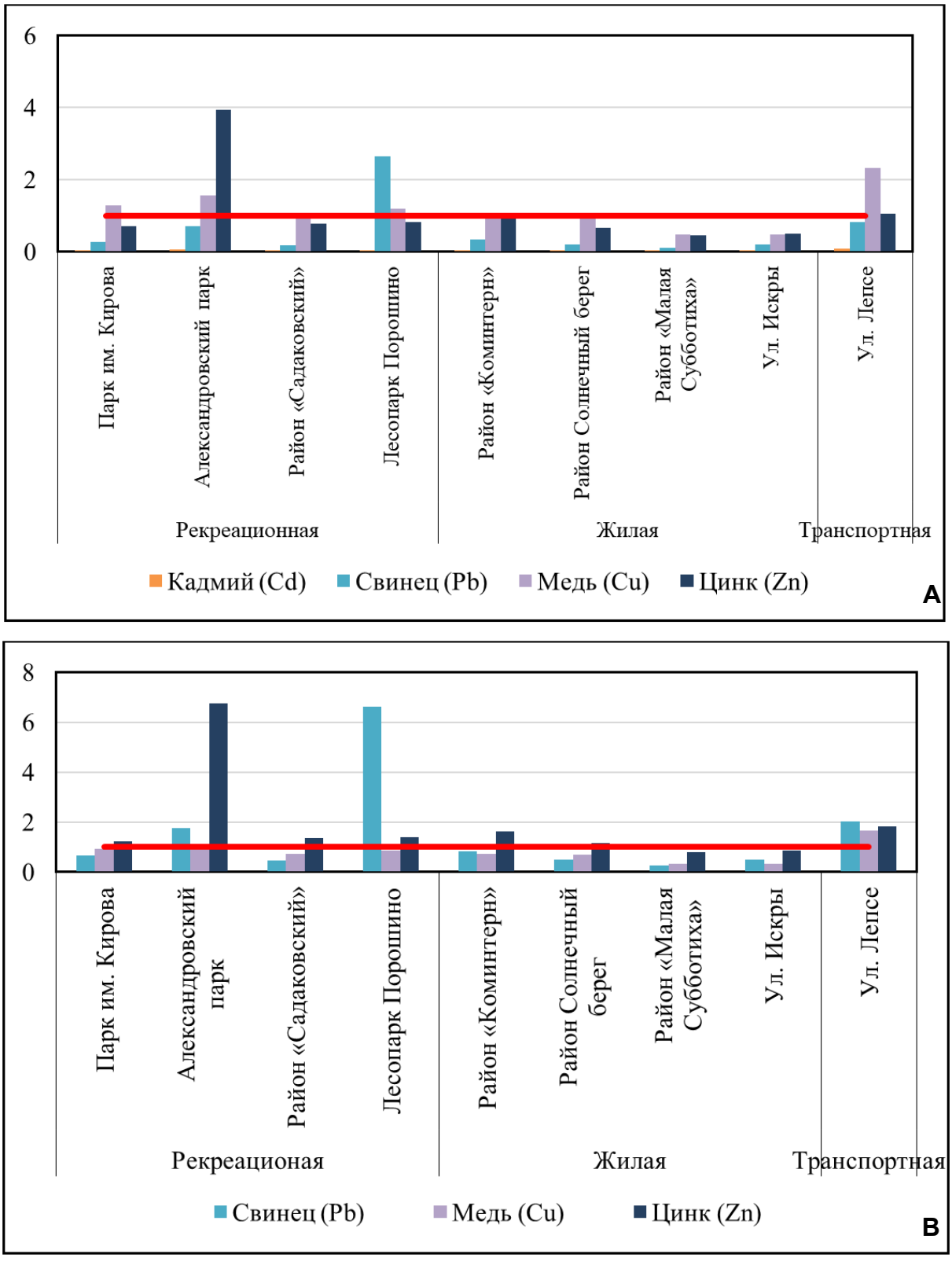


Рис. 3. Кратность содержания валовых форм ТМ к уровню ПДК (**A**) и региональному фону (**B**). Красной линией обозначены уровни превышения ПДК. Согласно СанПин1.2.3685-21, ПДК для металлов: Cd – 5 мг/кг, Pb – 30 мг/кг, Cu – 20 мг/кг, Zn – 100 мг/кг; региональный фон для Pb – 12 мг/кг, Cu – 28 мг/кг, Zn – 58 мг/кг, для Cd региональный фон не установлен.

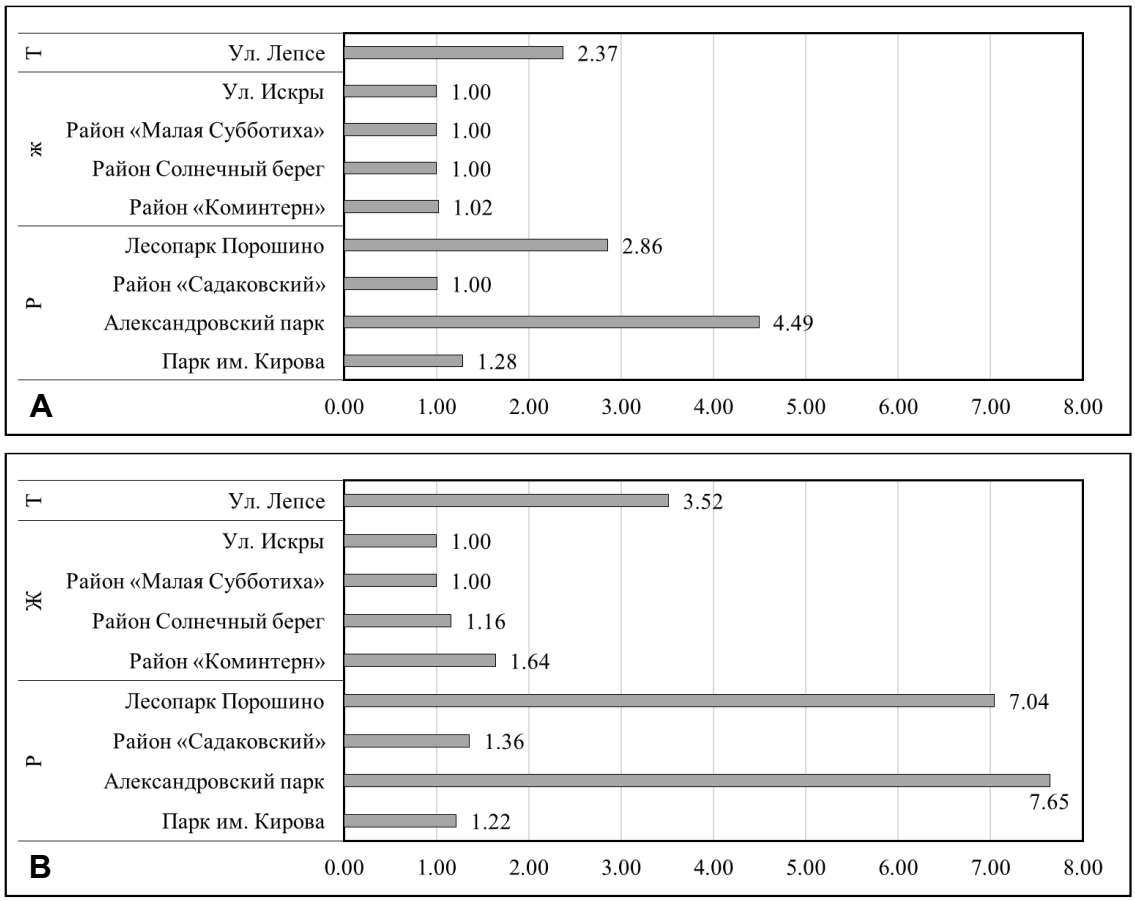


Рис. 4. Суммарный показатель загрязнения почвы ТМ по сравнению с ПДК (**A**) и региональным фоновым уровнем (**B**). Р – рекреационная зона, Ж – жилая зона, Т – транспортная зона.

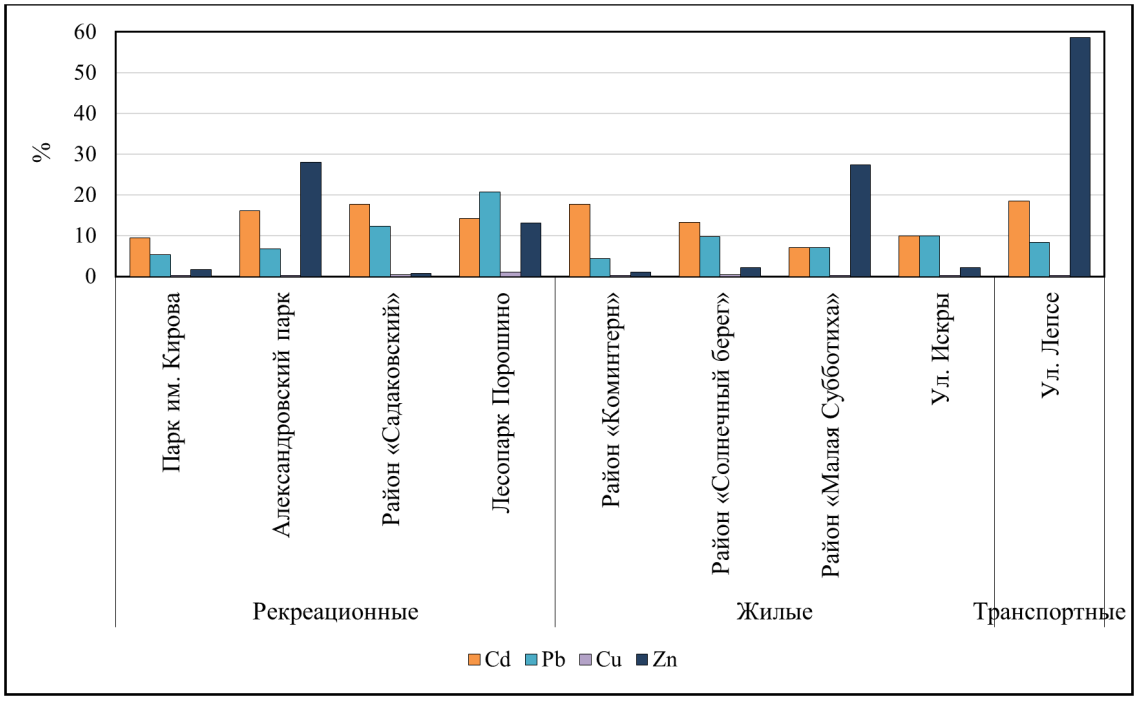


Рис. 5. Подвижность ТМ в почве исследуемых участков.

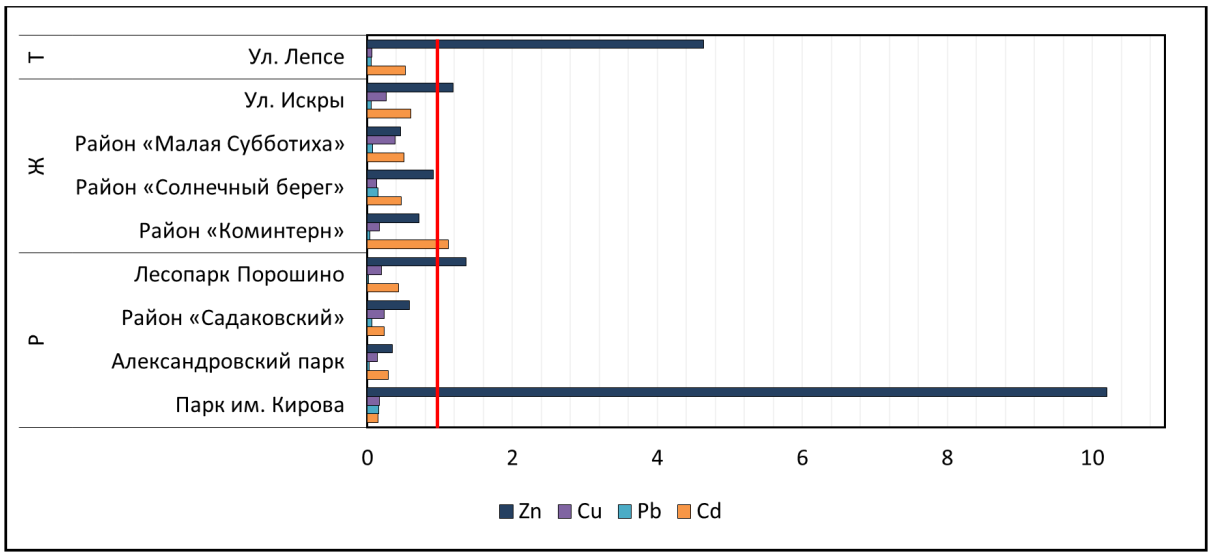


Рис. 6. Коэффициенты биологического накопления ТМ в листьях *B. pendula* на участках исследования. Красной линией показан уровень, равный 1.

КБН для пяти металлов территории исследования показаны на Рис. 6. Наиболее значительным было накопление цинка: максимальные КБН достигли 4.63 (транспортная зона, ул. Лепсе) и 10.21 (рекреационная зона, парк им. Кирова). Обнаруженные концентрации Zn заставили нас усомниться в результатах анализа. Поэтому в сквере на ул. Лепсе в следующий полевой сезон (2024 г.) был проведен повторный отбор проб листьев. Их отправили в Аналитический сертификационный испытательный центр ФГБУН Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук (Россия, г. Черноголовка), где был проведен анализ атомно-эмиссионным методом. Установлено содержание Zn в листьях березы 220 мг/кг (в 2023 г. было обнаружено 489 мг/кг). Следовательно, порядок концентраций Zn, установленный атомно-абсорбционным и атомно-эмиссионным методами, совпал.

Явление такого чрезмерного накопления Zn не носило массовый характер. На других участках встречались значения выше критического уровня, равного единице, но они не превышали 1.4 (лесопарк Порошино).

Другие металлы листья березы аккумулировали слабо, опять же за некоторым исключением, связанным не с металлом, а с конкретным участком. Так, на участке района «Коминтерн» КБН кадмия достиг 1.1.

Флуктуирующая асимметрия листьев березы повислой

Асимметрия листьев *B. pendula*, произрастающей в городской черте, варьировала на разных участках от 0.040 до 0.060, что соответствовало практически всем группам нарушения стабильности развития растения (Рис. 7).

Два участка рекреационной зоны города (Порошино и парк им. Кирова) характеризовались существенным отклонением от нормы, еще один из них (Александровский парк) имел критическое состояние по биоиндикационному показателю. Среди участков жилой зоны асимметрии листьев выше критического уровня (0.054) не выявлено, однако два участка из четырех (район «Коминтерн» и ул. Искры) также имели существенные отклонения от нормы.

Корреляционные связи характеристик почвы и содержания металлов в листьях с асимметрией листьев

Результаты определения зависимости флуктуирующей асимметрии (ФА) березы от различных показателей почвы и накопления металлов в листьях отражены на Рис. 8. Прямую корреляционную связь с ФА листьев березы имеют содержание форм Zn, Pb, уровень pH солевой вытяжки, обратную – формы Cu, pH водной вытяжки, содержание органического вещества Валовая и подвижная формы Cd не имели значительной корреляционной связи с ФА листьев березы. Наиболее сильно

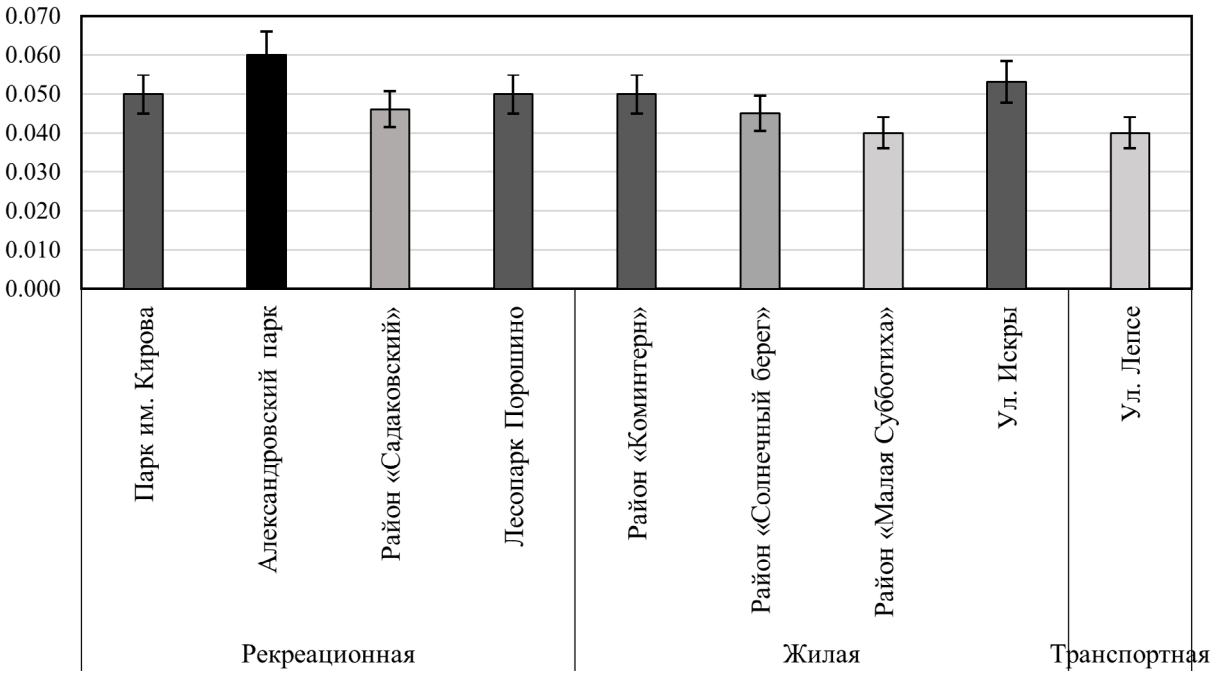


Рис. 7. Коэффициенты флуктуирующей асимметрии *B. pendula*. Оттенками серого обозначены отклонения от нормы развития по В.М. Захарову (2000): светло-серый – начальные отклонения от нормы (0.040–0.044), серый – средний уровень отклонений от нормы (0.045–0.049), темно-серый – существенные отклонения от нормы (0.050–0.054), черный – критическое состояние (ФА > 0.054).

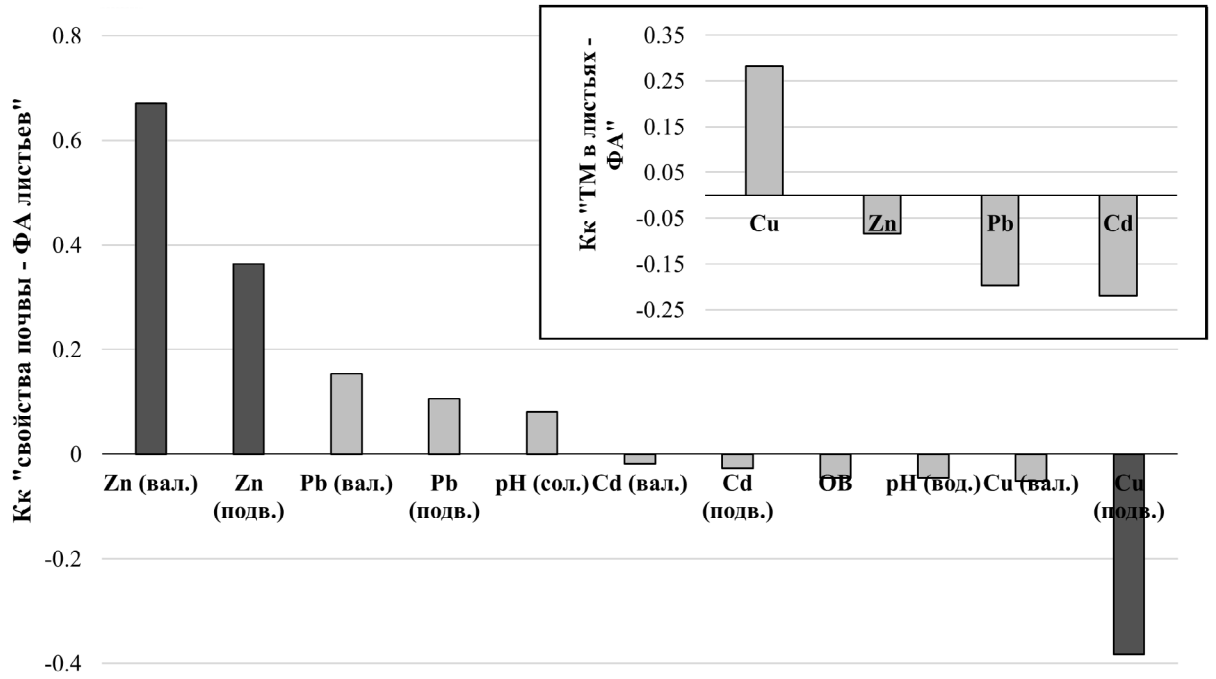


Рис. 8. Взаимосвязь характеристик почвы с биоиндикационным ответом *B. pendula*. Оттенками серого обозначены уровни взаимосвязи: темно-серый – средний уровень взаимосвязи (0.3 <r <0.7), светло-серый – слабый уровень связи (< 0.3). Кк – коэффициент корреляции.

биоиндикационный показатель был связан с содержанием Zn в почве, при этом уровень связи с концентрацией валовых форм цинка был выше, чем с подвижной формой. Вероятно, это объясняется тем, что в ризосфере доля биодоступных форм элементов может увеличиваться за счет корневых выделений и деятельности особых сообществ микроорганизмов (Legrand et al., 2005).

Согласно полученным данным, снижение ФА (то есть стабилизация развития листьев) наблюдалось в ответ на увеличение содержания подвижной Cu. Вероятно, это связано с эссенциальными эффектами этого металла, поскольку, в отличие от цинка, содержание меди на большинстве участков не превышало регионального фонового уровня.

Накопление металлов в листьях слабо влияло на формирование их асимметрии. Для меди показана слабая положительная связь. Вероятно, это связано с тем, что медь – эссенциальный элемент, для которого у растения есть механизмы ее активного накопления. Однако при повышенном поступлении элемента начинают проявляться токсичные свойства. Для свинца, кадмия и цинка показана слабая отрицательная связь; мы связываем это с тем, что для данного биоиндикационного показателя не достигнут критический уровень их накопления в листьях.

Следовательно, содержание металлов Cd, Pb, Cu, Zn в почве даже в пределах нормативов влияет на развитие листьев в большей степени, чем их аккумуляция в биомассе листьев за вегетационный сезон.

Обсуждение результатов

При оценке концентраций кадмия, свинца, меди и цинка в почвах зеленых зон г. Кирова показано, что максимальное накопление металлов свойственно скверу, расположенному в транспортной зоне. На этом участке концентрации валовых форм Pb, Cu, Zn превысили федеральные нормативы, Pb и Zn – региональный фоновый уровень. Рекреационные зоны города характеризовались точечным превышением нормативов по одному или двум металлам, что, вероятно, связано, с расположением части участков в центре города. Так, одна из старейших зеленых зон города – Александровский сад – имеет высокий суммарный показатель загрязнения при сравнении как с федеральными нормативами (4.5), так и с региональным фоном (7.7). Однако эти значения не критические и относятся к допустимому уровню загрязнения[10]; кроме того, по сравнению с исследованием 2016 г. (Олькова и др., 2016) СПЗ снизился почти в два раза. Зеленые зоны жилых территорий и периферийных рекреационных зон не загрязнены тяжелыми металлами.

Описанные закономерности свойственны пространственному распределению металлов в городах. В Китае массовое накопление в почве восьми микроэлементов (Cu, Ni, Zn, As, Cd, Cr, Hg и Pb) значительно увеличивалось с приближением к крупным городам (Guo et al., 2023). В европейских городах превышение национальных пороговых значений безопасности чаще всего отмечается для таких металлов, как Pb, Zn, Cu, Cr и Ni (Binner et al., 2023).

По степени подвижности металлы расположились в ряд Cu < Pb < Cd < Zn. Известно, что повышенная степень подвижности металла может свидетельствовать о его антропогенном происхождении (Даукаев и др., 2018). Действительно, меди свойствен повышенный региональный фоновый уровень (Эколого-геохимическая карта..., 1996); в то же время превышение нормативов для цинка и его повышенная лабильность относительно трех других элементов связаны с антропогенными источниками. Анализируемые металлы часто являются лидерами неорганического загрязнения почв в городах. В Чили на примере четырех городов показано, что содержание Cu чаще всего превышало принятые нормы, далее следовали Pb и Zn (Vega et al., 2022).

Цинк, оказавшийся наиболее подвижным на части участков, накапливался в листьях больше, чем другие металлы. Для Zn показаны КБН в диапазоне от 0.45 (на периферии города) до 10.2 (в центре). Такой значительный разброс говорит о локальных источниках загрязнения. Действительно, в городе функционируют завод по переработке цветных металлов и машиностроительный завод. Концентрации Zn в почве превышали региональный фоновый уровень на большинстве участков. Это говорит об атмосферном переносе загрязнения. Поглощение Zn листьями, особенно вблизи промышленных предприятий, может превышать поступление в растение из почвы (Плеханова и Обухов, 1992). Ионы металлов проникают в лист в основном через устьица или кутикулу (Cakmak et al., 2000; Harris and Taylor, 2001). Однако корреляционный анализ не выявил связи между цинком и флуктуирующей асимметрией листьев.

[10] Методические указания по оценке степени опасности загрязнения почвы химическими веществами № 4266-87, 1987. Министерство здравоохранения СССР, Москва, 23 с.

Судя по полученным величинам КБН, береза повислая избегала накопления Cu, Pb и Cd; влияние содержания этих элементов в листьях на их развитие также не обнаружено. Возможно, это связано с достаточно благополучной экологической ситуацией в г. Кирове.

Заключение

Исследовано накопление и поведение Zn, Cu, Pb, Cd в системе «почва-растение» урбоэкосистемы, расположенной в таежной природной зоне: Были проанализированы следующие показатели: отношение содержания валовых форм ТМ к уровню ПДК и региональному фону, суммарный показатель загрязнения почвы, подвижность элементов, аккумуляция Zn, Cu, Pb, Cd листьями березы *B. pendula* в сравнении с фитотоксическими уровнями, сформированный ответ растения на данные показатели – флуктуирующая асимметрия. Методом корреляционного анализа выявляли связи между уровнем асимметрии листьев и содержанием в почве валовых, подвижных форм ТМ, концентрацией органического вещества, pH почвы, а также между асимметрией листьев и содержанием в их биомассе Zn, Cu, Pb и Cd.

Металлы Zn и Pb вносили наибольший вклад в загрязнение почвы по сравнению с Cu и Cd. Подвижность Zn также была выше, чем у Cd, Pb и Cu, что закономерно отразилось в максимальной положительной корреляции с асимметрией листьев *B. pendula*. При этом степень связи ФА с концентрацией металлов в почве была средней (с Zn) и слабой (с Pb), что объяснимо содержанием этих металлов в пределах нормативов на большинстве участков. Тем не менее, были показаны новые закономерности в системе «почва-растение» на примере *B. pendula* в зеленых зонах города.

Взаимосвязь ФА с валовым содержанием металлов, доминирующих по степени накопления, оказалась значительнее, чем с содержанием их подвижных форм, что на примере г. Кирова соблюдалось для Zn и Pb. Объяснением может быть, во-первых, отбор проб почвы из верхнего генетического горизонта, тогда как в нижележащих горизонтах доля подвижных форм металлов может быть иной. Во-вторых, продукты жизнедеятельности ризосферных микроорганизмов увеличивают биодоступность многих микроэлементов.

Взаимосвязь ФА листьев с металлами, содержащимися в пределах нормативов, может быть обратной, что показано для г. Кирова на примере подвижных форм Cu. Стабилизация развития листьев в ответ на повышение содержания металлов, вероятно, происходит в силу эссенциальных свойств последних в качестве необходимых микроэлементов.

Влияние Zn, Cu, Pb, Cd, содержащихся в почве, на ФА листьев было более выраженным, чем их содержание в самих листьях, что говорит о большем значении эдафического пути поступления металлов в растение, чем комбинированного воздействия из воздуха и почвы.

Таким образом, асимметрия листьев *B. pendula* является биоиндикаторным признаком, закономерно отвечающим на содержание металлов Zn, Cu, Pb, Cd в почве.

Список литературы

Березин, Г.И., Олькова, А.С., 2024. Видовые особенности биоаккумуляции тяжелых металлов листвой тополя *Populus canadensis* Moench и ясеня *Fraxinus americana* L. в условиях урбоэкосистемы. *Трансформация экосистем* **7** (2), 12–18.

Верхошенцева, Ю.П., Галактионова, Л.В., 2014. Фитотоксичность почв парков города Оренбурга. *Вестник ОГУ* **6** (167), 195–198.

Водяницкий, Ю.Н., 2008. Тяжелые металлы и металлоиды в почвах. Российская академия сельскохозяйственных наук, Почвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва, Россия, 164 с.

Даукаев, Р.А., Ларионова, Т.К., Афонькина, С.Р., Аллаярова, Г.Р., Адиева, Г.Ф. и др., 2018. Изучение загрязнения тяжелыми металлами растительной продукции, выращенной на территории промышленного региона. *Медицина труда и экология человека* **3** (15), 22–27.

Жорняк, Л.В., Язиков, Е.Г., 2008. Редкие, редкоземельные и радиоактивные элементы в почвенном покрове урбанизированных территорий (на примере г. Томска). *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка* **4**, 82–83.

Кайгородов, Р.В., Тиунова, М.И., Дружинина, А.В., 2009. Загрязняющие вещества в пыли проезжих частей дорог и в древесной растительности придорожных полос городской зоны. *Вестник ПГУ. Биология* **10**, 141–146.

Кидин, В.В., Слипчик, А.Ф., Дерюгин, И.П., 2008. Практикум по агрохимии: учебник для вузов. КолосС, Москва, Россия, 598 с.

Крутских, Н.В., Бородулина, Г.С., Казнина, Н.М., Батова, Ю.В., Рязанцев, П.А. и др., 2016. Геоэкологические основы организации мониторинга северных урбанизированных территорий (на примере г. Петрозаводска*). Труды КарНЦ РАН* **12**, 52–67.

Лысак, Л.В., Лапыгина, Е.В., 2018. Разнообразие бактериальных сообществ городских почв. *Почвоведение* **9**, 1108–1114.

Макаева, Ю.С., Корчин, В.И., 2017. Основные загрязнители выхлопных газов автомобилей и их влияние на здоровье населения. *Научный медицинский вестник Югры* **67**, 67–71.

Мирзеханова, З.Г., 2000. Экологический каркас территории: назначение, содержание, пути реализации. *Проблемы региональной экологии* **4**, 42–55.

Олькова, А.С., Березин, Г.И., Ашихмина, Т.Я., 2016. Оценка состояния почв городских территорий химическими и эколого-токсикологическими методами. *Поволжский экологический журнал* **4**, 411–423.

Плеханова, И.О., Обухов, А.И., 1992. Цинк и кадмий в почвах и растениях городской среды. В: Добровольский, В.В. (ред.), *Цинк и кадмий в окружающей среде*. Наука, Москва, Россия, 144–159.

Почвоведение, 1988. Ч. 2. Ковда, В.А., Розанов, Б..(ред.). Высшая школа, Москва, Россия, 124 с.

Сает, Ю.Е., Ревич, Б.А., Янин, Е.П., 1990. Геохимия окружающей среды. Недра, Москва, СССР, 335 с.

Эколого-геохимическая карта почв Кировской области, 1996. ВСЕГЕИ, Санкт-Петербург, Россия.

Baker, A.J.M., 1981. Accumulators and excluders strategies in the response to plants of heavy metals. *Journal of Plant Nutrition* **3**, 643–646.

Binner, H., Sullivan, T., Jansen, M.A.K., McNamara, M.E., 2023. Metals in urban soils of Europe: A systematic review. *Science of the Total Environment* **854**, 158734.

Caito, S., Costa, L.G., Aschner, M., 2014. Toxicology of Metals. *Reference Module in Biomedical Sciences*. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801238-3.00209-9

Cakmak, I., Welch, R.M., Hart, J., Norvell, W.A., Oztürk, L., Kochian, L.V., 2000. Uptake and retranslocation of leaf-applied cadmium (109Cd) in diploid, tetraploid and hexaploid wheats. *Journal of Experimental Botany* **51** (343), 221–226.

Eid, E.M., Shaltout, K.H., Alamri, S.A.M., Alrumman, S.A., Hussain, A.A., Sewelam, N., 2021. Prediction models based on soil properties for evaluating the uptake of eight heavy metals by tomato plant (Lycopersicon esculentum Mill.) grown in agricultural soils amended with sewage sludge. *Journal of Environmental Chemical Engineering* **9**, 105977.

Guo, Y., Du, E., Li, B., Xia, N., Wu, X., de Vries, W., 2023. Significant urban hotspots of atmospheric trace element deposition and potential effects on urban soil pollution in China. *Journal of Cleaner Production* 415, 137872.

Guo-hang, Y., Guang-yun, Z.H.U., He-lian, L.I., Xue-mei, H.A.N., Ju-mei, L.I., Yi-bing, M.A., 2018. Accumulation and bioavailability of heavy metals in a soil-wheat/maize system with long-term sewage sludge amendments. *Journal of Integrative Agriculture* **17**, 1861–1870.

Hao, H., Laiye, Q., Siqi, T., Naili, Z., 2024. Differential effects of urbanization-induced heavy metal pollution on soil microbial communities under evergreen and deciduous trees. *Pedobiologia* **107**, 150999. https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2024.150999

Harris, N.S., Taylor, G.J., 2001. Remobilization of cadmium in maturing shoots of near isogenic lines of durum wheat that differ in grains cadmium accumulation. *Journal of Experimental Botany* **52** (360), 1473–1481.

Jing, W., Jinfeng, J., Changlin, X., Yue, C., Min, L. et al., 2024. A comprehensive assessment of heavy metals, VOCs and petroleum hydrocarbon in different soil layers and groundwater at an abandoned Al/Cu industrial site. *Ecotoxicology and Environmental Safety* **284**, 116927. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116927

Legrand, P., Turmel, M.-C., Sauvé, S., Courchesne, F., 2005. Chapter 8 – Speciation and bioavailability of trace metals (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn) in the rhizosphere of contaminated soils. *Biogeochemistry of Trace Elements in the Rhizosphere*, 261–299.

Maurizio, A., Javier, P., Stefano, A., Xin, L., Sabatino, C., Domenico, C., 2025. Assessing natural background concentrations of chemical elements in urban soils: A case study in Benevento (Italy). *Science of The Total Environment* **975**, 179298. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179298

Pachura, P., Ociepa-Kubicka, A., Skowron-Grabowska, B., 2015. Assessment of the availability of heavy metals to plants based on the translocation index and the bioaccumulation factor. *Desalination and Water Treatment* **57**, 1469–1477.

Saltiene, Z., Brukstiene, D., Ruzgyte, A., 2002. Contamination of soil by polycyclic aromatic hydrocarbons in some urban areas. *Polycyclic Aromatic Compounds* **22** (1), 23–35.

Vega, A.S., Arce, G., Rivera, J.I., Acevedo, S.E., Reyes-Paecke, S., Bonilla, C.A., Pastén, P., 2022. A comparative study of soil metal concentrations in Chilean urban parks using four pollution indexes. *Applied Geochemistry* **141**, 105230.

References

Baker, A.J.M., 1981. Accumulators and excluders strategies in the response to plants of heavy metals. *Journal of Plant Nutrition* **3**, 643–646.

Berezin, G.I., Olkova, A.S., 2024. Species-specific features of heavy metal bioaccumulation by leaves of *Populus canadensis* Moench and *Fraxinus americana* L. under urban ecosystem conditions. *Ecosystem Transformation* **7** (2), 12–18.

Binner, H., Sullivan, T., Jansen, M.A.K., McNamara, M.E., 2023. Metals in urban soils of Europe: A systematic review. *Science of the Total Environment* **854**, 158734.

Caito, S., Costa, L.G., Aschner, M., 2014. Toxicology of Metals. *Reference Module in Biomedical Sciences*. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801238-3.00209-9

Cakmak, I., Welch, R.M., Hart, J., Norvell, W.A., Oztürk, L., Kochian, L.V., 2000. Uptake and retranslocation of leaf-applied cadmium (109Cd) in diploid, tetraploid and hexaploid wheats. *Journal of Experimental Botany* **51** (343), 221–226.

Daukayev, R.A., Larionova, T.K., Afonkina, S.R., Allayarova, G.R., Adieva, G.F. et al., 2018. Izuchenie zagryazneniya tyazhelymi metallami rastitel'noy produktsii, vyrashchennoy na territorii promyshlennogo regiona [Study of heavy metal contamination of plant products grown in an industrial region]. *Meditsina truda i ekologiya cheloveka [Occupational Medicine and Human Ecology]* **3** (15), 22–27. (In Russian).

Eid, E.M., Shaltout, K.H., Alamri, S.A.M., Alrumman, S.A., Hussain, A.A., Sewelam, N., 2021. Prediction models based on soil properties for evaluating the uptake of eight heavy metals by tomato plant (Lycopersicon esculentum Mill.) grown in agricultural soils amended with sewage sludge. *Journal of Environmental Chemical Engineering* **9**, 105977.

Ekologo-geokhimicheskaya karta pochv Kirovskoy oblasti [Ecological-geochemical map of soils of the Kirov region], 1996. All-Russian Geological Research Institute, Saint Petersburg, Russia. (In Russian).

Guo, Y., Du, E., Li, B., Xia, N., Wu, X., de Vries, W., 2023. Significant urban hotspots of atmospheric trace element deposition and potential effects on urban soil pollution in China. *Journal of Cleaner Production* 415, 137872.

Guo-hang, Y., Guang-yun, Z.H.U., He-lian, L.I., Xue-mei, H.A.N., Ju-mei, L.I., Yi-bing, M.A., 2018. Accumulation and bioavailability of heavy metals in a soil-wheat/maize system with long-term sewage sludge amendments. *Journal of Integrative Agriculture* **17**, 1861–1870.

Hao, H., Laiye, Q., Siqi, T., Naili, Z., 2024. Differential effects of urbanization-induced heavy metal pollution on soil microbial communities under evergreen and deciduous trees. *Pedobiologia* **107**, 150999. https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2024.150999

Harris, N.S., Taylor, G.J., 2001. Remobilization of cadmium in maturing shoots of near isogenic lines of durum wheat that differ in grains cadmium accumulation. *Journal of Experimental Botany* **52** (360), 1473–1481.

Jing, W., Jinfeng, J., Changlin, X., Yue, C., Min, L. et al., 2024. A comprehensive assessment of heavy metals, VOCs and petroleum hydrocarbon in different soil layers and groundwater at an abandoned Al/Cu industrial site. *Ecotoxicology and Environmental Safety* **284**, 116927. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116927

Kaygorodov, R.V., Tiunova, M.I., Druzhinina, A.V., 2009. Zagryaznyayushchie veshchestva v pyli proezzhikh chastey dorog i v drevesnoy rastitel'nosti pridorozhnykh polos gorodskoy zony [Pollutants in road dust and woody vegetation of roadside strips in the urban zone]. *Vestnik PGU. Biologiya [Bulletin of Perm State University. Biology]* **10**, 141–146. (In Russian).

Kidin, V.V., Slipchik, A.F., Deryugin, I.P., 2008. Praktikum po agrokhimii: uchebnik dlya vuzov [Practicum on Agrochemistry: textbook for universities]. KolosS, Moscow, Russia, 598 p. (In Russian).

Krutskikh, N.V., Borodulina, G.S., Kaznina, N.M., Batova, Yu.V., Ryazantsev, P.A. et al., 2016. Geoekologicheskie osnovy organizatsii monitoringa severnykh urbanizirovannykh territoriy (na primere g. Petrozavodska) [Geoecological foundations for organizing monitoring of northern urbanized territories (on the example of Petrozavodsk)]. *Trudy KarNTs RAN [Proceedings of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences]* **12**, 52–67. (In Russian).

Legrand, P., Turmel, M.-C., Sauvé, S., Courchesne, F., 2005. Chapter 8 – Speciation and bioavailability of trace metals (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn) in the rhizosphere of contaminated soils. *Biogeochemistry of Trace Elements in the Rhizosphere*, 261–299.

Lysak, L.V., Lapygina, E.V., 2018. Raznoobrazie bakterial'nykh soobshchestv gorodskikh pochv [Diversity of bacterial communities in urban soils]. *Pochvovedenie [Eurasian Soil Science]* **9**, 1108–1114. (In Russian).

Makaeva, Yu.S., Korchin, V.I., 2017. Osnovnye zagryazniteli vykhlopnykh gazov avtomobiley i ikh vliyanie na zdorov'e naseleniya [Major pollutants of vehicle exhaust gases and their impact on public health]. *Nauchnyy meditsinskiy vestnik Yugry [Scientific Medical Bulletin of Yugra]* **67**, 67–71. (In Russian).

Maurizio, A., Javier, P., Stefano, A., Xin, L., Sabatino, C., Domenico, C., 2025. Assessing natural background concentrations of chemical elements in urban soils: A case study in Benevento (Italy). *Science of The Total Environment* **975**, 179298. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179298

Mirzekhanova, Z.G., 2000. Ekologicheskiy karkas territorii: naznachenie, soderzhanie, puti realizatsii [Ecological framework of a territory: purpose, content, ways of implementation]. *Problemy regional'noy ekologii [Problems of Regional Ecology]* **4**, 42–55. (In Russian).

Olkova, A.S., Berezin, G.I., Ashikhmina, T.Ya., 2016. Otsenka sostoyaniya pochv gorodskikh territoriy khimicheskimi i ekologo-toksikologicheskimi metodami [Assessment of the state of urban soils by chemical and ecotoxicological methods]. *Povolzhskiy ekologicheskiy zhurnal [Volga Region Ecological Journal]* **4**, 411–423. (In Russian).

Pachura, P., Ociepa-Kubicka, A., Skowron-Grabowska, B., 2015. Assessment of the availability of heavy metals to plants based on the translocation index and the bioaccumulation factor. *Desalination and Water Treatment* **57**, 1469–1477.

Plekhanova, I.O., Obukhov, A.I., 1992. Tsink i kadmiy v pochvakh i rasteniyakh gorodskoy sredy [Zinc and cadmium in soils and plants of the urban environment]. In: Dobrovoslkyi, V.V. (ed.), *Tsink i kadmiy v okruzhayushchey srede [Zinc and Cadmium in the Environment]*. Nauka, Moscowm Russia, 144–159. (In Russian).

Pochvovedenie [Soil Science], 1988. Part 2. Kovda, V.A., Rozanov, B.G. (eds.). Vysshaya Shkola, Moscow, USSR, 124 p. (In Russian).

Saet, Yu.E., Revich, B.A., Yanin, E.P., 1990. Geokhimiya okruzhayushchey sredy [Environmental Geochemistry]. Nedra, Moscow, USSR, 335 p. (In Russian).

Saltiene, Z., Brukstiene, D., Ruzgyte, A., 2002. Contamination of soil by polycyclic aromatic hydrocarbons in some urban areas. *Polycyclic Aromatic Compounds* **22** (1), 23–35.

Vega, A.S., Arce, G., Rivera, J.I., Acevedo, S.E., Reyes-Paecke, S., Bonilla, C.A., Pastén, P., 2022. A comparative study of soil metal concentrations in Chilean urban parks using four pollution indexes. *Applied Geochemistry* **141**, 105230.

Verkhoshentseva, Yu.P., Galaktionova, L.V., 2014. Fitotoksichnost' pochv parkov goroda Orenburga [Phytotoxicity of soils in parks of the city of Orenburg]. *Vestnik OGU [Bulletin of Orenburg State University]* **6** (167), 195–198. (In Russian).

Vodyanitskiy, Yu.N., 2008. Tyazhelye metally i metalloidy v pochvakh [Heavy metals and metalloids in soils]. Russian Academy of Agricultural Sciences, V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, Russia, 164 p. (In Russian).

Zhornyak, L.V., Yazikov, E.G., 2008. Redkie, redkozemel'nye i radioaktivnye elementy v pochvennom pokrove urbanizirovannykh territoriy (na primere g. Tomska) [Rare, rare-earth and radioactive elements in the soil cover of urbanized territories (on the example of Tomsk)]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka [Proceedings of Higher Educational Institutions. Geology and Exploration]* **4**, 82–83. (In Russian).