



Мониторинг состояния почвы, воздуха, воды

УДК 57.044

DOI: 10.25514/CHS.2026.1.26103

Влияние накопления Cd, Zn, Cu, Pb, Fe в почве и листьях березы *Betula pendula* Roth на их флуктуирующую асимметрию**А. С. Олькова¹✉, Т. А. Адамович¹, Т. А. Гуляева¹**¹Вятский государственный университет, Киров, Кировская область, Россия,
e-mail: usr08617@vyatsu.ru

Поступила в редакцию: 02.03.2026 г.; после доработки: 26.03.2026 г.; принята в печать: 31.03.2026 г.

Аннотация – Вопрос выбора удобных и информативных индикаторов качества окружающей среды особенно остро стоит для городских экосистем. Цель данной работы – сравнение влияния содержания металлов в почве и их накопления в листьях на флуктуирующую асимметрию (ФА) листьев березы *Betula pendula* Roth. Исследование проводилось в городе Кирово-Чепецке, расположенном в средней полосе России. Город среднего масштаба и находится в подзоне южной тайги, где климат умеренно-континентальный. На разных функциональных участках отбирали пробы почвы (0–15 см) и листья березы *B. pendula* (n = 100). Содержание металлов Cd, Zn, Cu, Pb, Fe в почве соответствовало нормативам, кроме Zn в транспортной зоне (превышение в 2,29 раз). Накопление Cd и Pb в листьях было меньше половины условного норматива, равного для них 10 мг/кг (по А. Кабата-Пендиас). Cu и Zn аккумулировались в листьях березы выше фитотоксических уровней (2 и 33 мг/кг соответственно). Показана прямая зависимость (по Пирсону) ФА листьев *B. pendula* от их содержания в почве: Zn ($r = 0,76$) > Fe (0,66) > Cu (0,46) > Cd (0,43) > Pb (0,36). Зависимость ФА от накопления металлов в почве оказалась выше: Pb ($r = 0,85$) > Fe (0,80) > Cu (0,76) Zn (0,53) > Cd (0,46). Из результатов следует, что (1) накопление металлов в почве даже в пределах нормативов имеет связь с биоиндикационным показателем ФА листьев *B. pendula*, вероятно, за счет промывного режима; (2) влияние содержания металлов в листьях на их ФА более значительно в связи с возможностью поступления металлов как из почвы, так и из воздуха.

Ключевые слова: урбоэкосистема, промышленная зона, транспортная зона, жилая зона, рекреационная зона, тяжелые металлы, фитотоксический уровень, флуктуирующая асимметрия, *Betula pendula*

Monitoring soil, air, water status

UDC 57.044

DOI: 10.25514/CHS.2026.1.26103

The effect of accumulation of Cd, Zn, Cu, Pb, Fe in the soil and leaves of birch *Betula pendula* Roth on their fluctuating asymmetry**Anna S. Olkova¹✉, Tatiana A. Adamovich¹, and Tatiana A. Gulyaeva¹**¹Vyatka State University, Kirov, Russia, e-mail: usr08617@vyatsu.ru

Abstract – The issue of choosing convenient and informative environmental quality indicators is particularly acute for urban urban ecosystems. The purpose of this work is to compare the effect of the metal content in the soil and their accumulation in the leaves on the fluctuating asymmetry of birch leaves *Betula pendula* Roth. The study was conducted in a medium-sized city (Kirovo-Chepetsk, Russia, a subzone of the southern taiga, the climate is temperate continental). Soil samples (0–15 cm) and birch leaves of *B. pendula* (n = 100) were taken at different functional sites. The content of metals Cd, Zn, Cu, Pb, Fe in the soil corresponded to the standards, except for Zn in the transport zone (exceeding 2.29 times). The accumulation of Cd and Pb in the leaves was less than half of the conditional norm of 10 mg/kg (according to A. Kabata-Pendias). Cu and Zn accumulated in birch leaves above phytotoxic levels (2 and 33 mg/kg, respectively). The direct dependence (correlation to Pearson) of the FA of *B. pendula* leaves on their content in the soil is shown: Zn ($r = 0.76$) > Fe (0.66) > Cu (0.46) > Cd (0.43) > Pb (0.36). The dependence of FA on the accumulation of metals in the soil was higher: Pb ($r=0.85$) > Fe (0.80) > Cu (0.76) Zn (0.53) > Cd (0.46). It follows from the results that (1) the accumulation of metals in the soil, even within the limits of standards, is associated with the bioindication index of the FA of *B. pendula* leaves, probably due to the washing regime; (2) the influence of the metal content in the leaves on their FA is more significant due to the possibility of metals entering both from the soil and from the air.

Keywords: Bioassay, industrial area, transport area, housing area, recreational area, heavy metals, phytotoxic level, fluctuating asymmetry, *Betula pendula*

ВВЕДЕНИЕ

Биодиагностика качества окружающей среды выполняет не только научно-исследовательскую функцию, но и социальную, способствуя информированию общественности о текущей экологической ситуации на определенной территории. Особенно важно организовывать научно-исследовательские и регулярные мониторинговые работы в городах, имеющих крупные промышленные объекты.

База научно-исследовательских методик в отличие от документов, допущенных для целей государственного экологического контроля и мониторинга, безусловно, шире. Результаты биоиндикации не могут быть сопоставлены с нормативами как данные химических и физико-химических анализов, однако обладают другими преимуществами. Главное из них – возможность наблюдения за параметрами живых организмов, находящихся в интересующей окружающей среде. При этом живые организмы становятся датчиками текущих изменений в воздухе, воде, почве.

Проблеме выбора индикаторных организмов посвящено множество научных работ [1–3]. Критериям оседлости и длительного жизненного цикла соответствуют древесные растения [4]. Из них береза повислая *Betula pendula* Roth отличается широким распространением, например, в России она произрастает от тундры до степей. Береза является культурой, часто используемой в городском озеленении. Как в российской, так и зарубежной практике имеются апробированные методики биоиндикации среды по флуктуирующей асимметрии (ФА) листьев березы [5, 6]. Обычно эти методики ассоциируются с оценкой загрязнения воздуха. Так, в работе [7] отмечена

статистически значимая зависимость ФА древесных растений от транспортной нагрузки в городах. В то же время, показано, что содержание Pb, Mn, Cu в почве также влияет на ФА листьев березы (r Пирсона равен 0,60, 0,36, 0,35 соответственно) [8].

Цель данной работы – сравнение влияния содержания тяжелых металлов (ТМ) в почве и их накопления в листьях на флуктуирующую асимметрию листьев березы *Betula pendula* Roth.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Участки исследования располагались в городе Кирово-Чепецк (Кировская область, Россия). Город относится к средним по численности населения (около 65 тыс. чел) и интересен тем, что имеет в черте агломерации крупный комплекс предприятий химической отрасли, производящих минеральные удобрения, полимеры, в том числе фторполимеры. Городу свойственна транспортная нагрузка, работают котельные и ТЭЦ, использующая газ, торф, уголь и мазут (резервно).

Город расположен в подзоне южной тайги, климат умеренно-континентальный, рельеф ровный (высокий левый берег р. Вятка), почвы в пределах города можно отнести к урбаноземам.

Участки представляли разные функциональные части города, их количество было пропорционально площадям, занимаемым этими зонами: 4 участка в жилой зоне и по 2 участка в рекреационной зоне и зоне с повышенной производственной и транспортной нагрузкой (рис. 1).

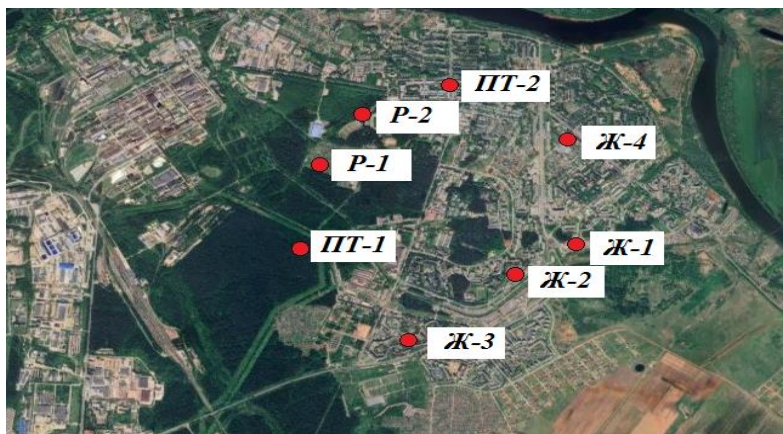


Рис. 1. Карта-схема участков отбора проб почвы и листьев березы. P-1 – Парковая зона, P-2 – Парковая зона, Ж-1 – Жилая застройка, Ж-2 – Жилая застройка, Ж-3 – Жилая застройка (район школы), Ж-4 – Жилая застройка (район детского сада), ПТ-1 – Заводская зона, ПТ-2 – территория с высокой транспортной нагрузкой.

Fig. 1. Schematic map of the sampling sites for birch soil and leaves. P-1 is a park area, P-2 is a park area, Ж-1 is a residential area, Ж-2 is a residential area, Ж-3 is a residential area (school district), Ж-4 is a residential area (kindergarten district), ПТ-1 is a factory area, ПТ-2 is an area with a high traffic load.

На участках исследования была отобрана почва методом конверта (0–15 см) и листья березы повислой. В воздушно-сухой почве определяли уровень pH водной и солевой вытяжек потенциометрическим методом [9] на pH-метре pH-150МИ (Россия), содержание органического вещества спектрофотометрически

по методике [10], используя Спектрофотометр ПЭ-5400ВИ (Россия), концентрации подвижных и валовых форм металлов (Cd, Zn, Cu, Pb, Fe,) – методом атомно-абсорбционной спектроскопии согласно [11] на атомно-абсорбционном спектрометре «СПЕКТР-5-4 (Россия). Работы проведены на базе научно-исследовательской лаборатории ВятГУ, аккредитованной Росаккредитацией.

У листьев березы ($n=100$) была определена флуктуирующая асимметрия (ФА) по 5 параметрам правой и левой половины листа согласно [6] и содержание перечисленных выше металлов также атомно-абсорбционной методом в биомассе после сухого озоления при 500°C в муфельной печи LOIP LF 7/11-G1 (электронный) (Россия). Измерения биоиндикационных параметров листьев проводились группой студентов, не заинтересованных в результатах оценки, для исключения «эффекта наблюдателя» согласно рекомендациям, указанным в работе [12]. Для исключения обработки некачественных измерений, они проводились дважды с последующим сравнением массивов данных.

Обработку физико-химических и химических результатов анализов проводили в соответствии с используемыми аттестованными методиками, погрешность измерений не превышала допустимых пределов. Достоверность оценки ФА листьев обеспечивалась выборкой биоматериала ($n=100$) и дальнейшей обработкой всего массива данных с вычислением среднего значения и стандартного отклонения. Сравнение одинаковых показателей на разных участках проводили методом дисперсионного анализа с предварительной проверкой нормальности распределения данных. Зависимость между различными показателями определяли по Пирсону.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристика почв

В таблице 1 обобщены физико-химические и химические показатели почвы на участках исследования. Для отражения потенциальной степени загрязнения почвы накопление металлов представили в виде кратности к действующим нормативам [13].

Почва исследуемых участков имела нейтральный уровень рН с незначительным смещением в кислую сторону в вариантах с солевой вытяжкой, хотя известно, что почва естественных экосистем таёжной зоны имеет кислую и сильно кислую реакцию рН. В исследовании [14] уровень рН почвы ближайшего крупного города (г. Киров, Россия) варьировал от 5,5 до 7,1 единиц рН. При исследовании почв города, расположенного севернее (г. Ухта, Россия) разброс данных был в пределах 5,1 до 6,3 единиц рН [8]. Причинами повышения уровня рН могут быть привнесенные грунты, используемые для благоустройства городов, а также щелочные выбросы предприятий. Для городских почв смещение рН почвенной вытяжки в щелочную сторону может быть связано с поступлением пыли, содержащей взвешенные вещества, карбонаты кальция и магния, а также с применением антигололедных реагентов и т. п. [14].

Таблица 1. Комплексная характеристика участков исследования
Table 1. Comprehensive characterization of study sites

Функциональные зоны	Обозначение участков	рН вытяжки водной/солевой, ед. рН	Органическое вещество, мг/кг	Кратность валового содержания ТМ к нормативу, раз	Кратность подвижного содержания ТМ к нормативу, раз
Рекреационные зоны	Р-1	$\frac{7,2 \pm 0,02}{6,8 \pm 0,02}$	3,77±0,05	Pb 0.21 Cu 0.06 Zn 0.20 Cd 0.15 Fe 0.32	Pb 0.10 Cu 0.06 Zn 0.21 Cd 0.09 Fe 0.35
	Р-2	$\frac{7,1 \pm 0,02}{6,7 \pm 0,02}$	3,09±0,04	Pb 0.22 Cu 0.18 Zn 0.80 Cd 0.16 Fe 0.31	Pb 0.19 Cu 0.08 Zn 0.63 Cd 0.08 Fe 0.28
Жилые зоны	Ж-1	$\frac{7,2 \pm 0,02}{6,8 \pm 0,02}$	4,71±0,05	Pb 0.23 Cu 0.19 Zn 0.76 Cd 0.13 Fe 0.28	Pb 0.09 Cu 0.06 Zn 0.67 Cd 0.08 Fe 0.30
	Ж-2	$\frac{7,1 \pm 0,02}{6,9 \pm 0,02}$	4,88±0,05	Pb 0.17 Cu 0.17 Zn 0.64 Cd 0.13 Fe 0.27	Pb 0.09 Cu 0.05 Zn 0.21 Cd 0.06 Fe 0.33
	Ж-3	$\frac{7,0 \pm 0,02}{6,8 \pm 0,02}$	3,69±0,04	Pb 0.21 Cu 0.20 Zn 0.74 Cd 0.16 Fe 0.31	Pb 0.14 Cu 0.06 Zn 0.68 Cd 0.08 Fe 0.33
	Ж-4	$\frac{7,1 \pm 0,02}{6,9 \pm 0,02}$	3,99±0,05	Pb 0.16 Cu 0.18 Zn 0.70 Cd 0.19 Fe 0.31	Pb 0.12 Cu 0.05 Zn 0.63 Cd 0.03 Fe 0.30
Зоны с повышенной производственной и транспортной нагрузкой	ПТ-1	$\frac{6,9 \pm 0,02}{6,6 \pm 0,02}$	2,79±0,03	Pb 0.21 Cu 0.21 Zn 0.83 Cd 0.15 Fe 0.36	Pb 0.97 Cu 0.12 Zn 0.64 Cd 0.07 Fe 0.32
	ПТ-2	$\frac{7,0 \pm 0,02}{6,6 \pm 0,02}$	1,85±0,03	Pb 0.21 Cu 0.21 Zn 2.29 Cd 0.25 Fe 0.37	Pb 0.69 Cu 0.14 Zn 0.68 Cd 0.11 Fe 0.63

Примечание: Р-1 – Парковая зона, Р-2 – Парковая зона, Ж-1 – Жилая застройка, Ж-2 – Жилая застройка, Ж-3 – Жилая застройка (район школы), Ж-4 – Жилая застройка (район детского сада), ПТ-1 – Заводская зона, ПТ-2 – территория с высокой транспортной нагрузкой. Жирным шрифтом выделены значения, превышающие 0,5 российского норматива.

Содержание органического вещества в почве типично для дерново-подзолистых и подзолистых почв региона [15]. При этом минимальное содержание органических веществ по сравнению с другими участками отмечено в почвах на участках с повышенной промышленной и транспортной нагрузкой ($p < 0,05$). Это может быть связано с низким уровнем проективного покрытия почвы растительностью на данных участках.

Анализ кратности содержания подвижных форм и валового содержания металлов в почве к действующим нормативам показал, что концентрации всех определяемых металлов не превышали ПДК, кроме концентрации цинка на участке ПТ-2 зоны с повышенной производственной и транспортной нагрузкой (превышение ПДК в 2,29 раз). Источником загрязнения цинком городских почв могут быть выбросы автотранспорта, использующего цинксодержащие присадки, цинксодержащие краски, используемые в строительстве, гальванические производства, предприятия металлургической и топливной промышленности [14].

Накопление ТМ в листьях березы

Нормативов содержания металлов в дикорастущих растениях не разработано. Оценка степени накопления металлов в листьях березы проведена по уровням, указанным в работе А. Кабата-Пендиас (2010) [16], где предложены минимальные значения токсического уровня биоаккумуляции: Cd, Pb по 10 мг/кг, Cu – 2 мг/кг, Zn – 33 мг/кг.

Металлы разделились на 2 группы. Первая группа включала Cd и Pb их накопление в листьях было меньше половины условного норматива (рис. 2А). Вторая группа металлов – Cu и Zn – аккумуляровалась в листьях березы выше уровня, превышение которого приводит к фитотоксическим эффектам (рис. 2Б). На большинстве участков кратность концентрации Cu к условному нормативу была меньше, чем аналогичный показатель для Zn, кроме участка ПТ-2.

В пространственном отношении накопление металлов обеих групп достаточно однородное, то есть концентрации металлов в листьях на разных участках были близкими ($p > 0,05$). Только в пробах почвы с транспортно-промышленной зоны концентрации Cu, Zn, Pb были значимо выше, чем на других участках. Это дало основания усреднить данные для схожих групп участков. В итоге кратность накопления металлов в биомассе листьев к условному нормативу распределилась следующим образом: Cd ($0,039 \pm 0,008$) < Pb рекреационных и жилых зон ($0,25 \pm 0,03$) < Pb промышленных и транспортных зон ($0,38 \pm 0,05$) < Cu рекреационных и жилых зон ($2,29 \pm 0,36$) < Zn рекреационных и жилых зон ($3,35 \pm 0,56$) < Zn промышленных и транспортных зон ($4,15 \pm 0,05$) < Cu промышленных и транспортных зон ($4,92 \pm 2,44$).

В ближайшем крупном городе (Киров, Россия) также были показаны подобные накопления металлов, особенно Cu, Zn и Pb и в листьях древесных растений (*Populus canadensis* L. и ясеня *Fraxinus americana* L.), однако экологически значимое накопление было отмечено не на всех участках, в большей степени – в промышленных и транспортных зонах [17].

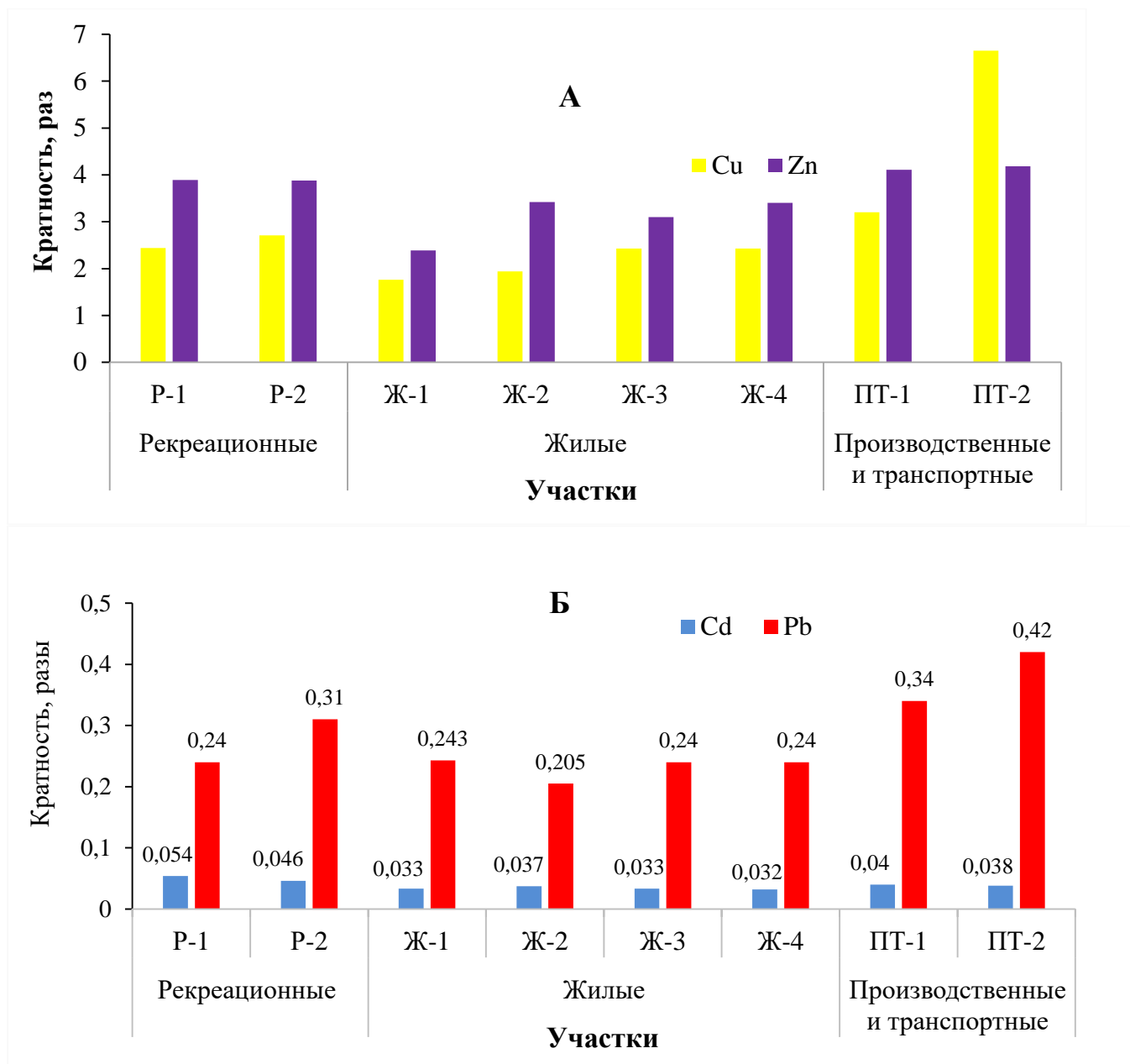


Рис. 2. Кратность содержания меди и цинка (А), а также свинца и кадмия (Б) в листьях *B. pendula* к минимальным значениям токсического уровня их биоаккумуляции по А. Кабата-Пендиас (2010).

Fig. 2. The multiplicity of copper and zinc (А), as well as lead and cadmium (Б) in *B. pendula* leaves to the minimum values of the toxic level of their bioaccumulation according to A. Kabata-Pendias (2010).

Асимметрия листьев березы.

Древесные растения – биоиндикаторы качества окружающей среды, подходящие для данных целей по многим параметрам, основные из них – оседлость и длительный цикл жизни. *B. pendula* распространена по всему северному полушарию, вводится в городское озеленение и в южном полушарии. На рисунке 3 показаны коэффициенты ФА листьев *B. pendula* на разных участках территории исследования.

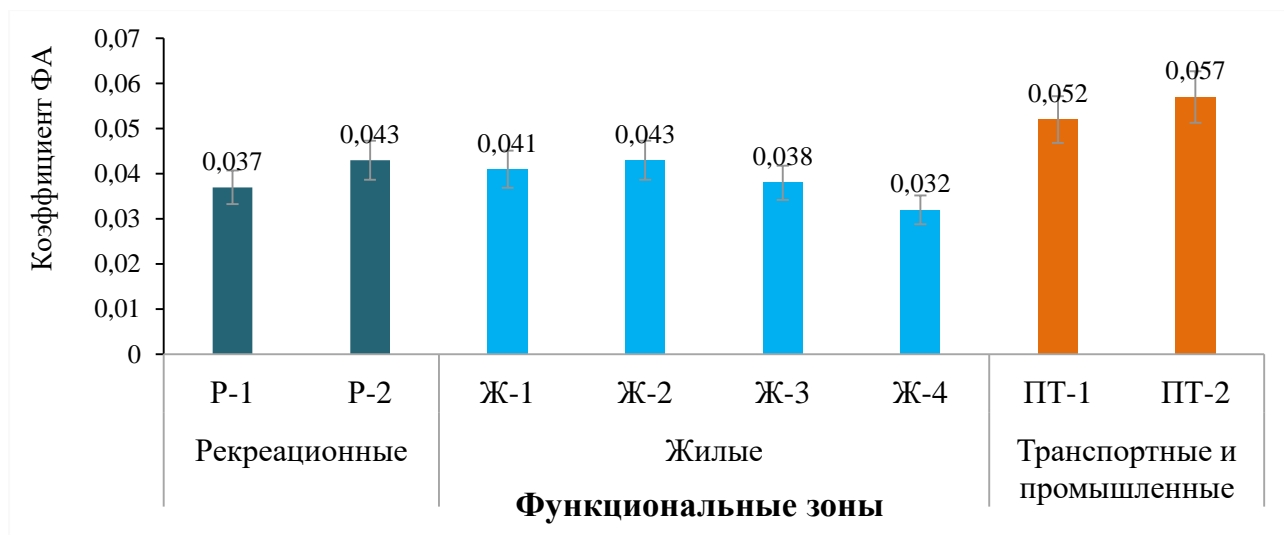


Рис. 3. Флуктуирующая асимметрия листьев березы *B. pendula*. Оттенками серого обозначены отклонения от нормы развития по В.М. Захарову (2000): светло-серый – условно нормальное состояние (менее 0,40), темно-серым - начальные отклонения от нормы (0,040–0,044), черным – существенные отклонения от нормы (более 0,50).

Fig. 3. Fluctuating asymmetry of birch leaves of *B. pendula*. Shades of gray indicate deviations from the norm of development according to V.M. Zakharov (2000): light gray - a conditionally normal condition (less than 0.40), dark gray - initial deviations from the norm (0.040–0.044), black - significant deviations from the norm (more than 0.50).

Участки в рекреационных и жилых зонах отличались низкими значениями ФА листьев березы, то есть их развитие практически не было нарушено. Выявленные начальные отклонения от нормы [18] на участках Р-2, Ж-1, Ж-2 были не значимы ($p > 0,05$ по сравнению с показателями для Р-1 и Ж-3). Максимальные индексы ФА показаны для промышленно-транспортных зон. Здесь индексы превысили критический уровень 0,05, что указывает на значительную асимметрию листьев.

В целом г. Кирово-Чепецк по данным биоиндикации можно назвать благополучным. Известно о более значительных проявлениях асимметрии листьев у *B. pendula* вблизи промышленных предприятий – больше 0,06 [19]. В г. Ухта (Россия) ФА листьев березы варьировал от 0,064 до 0,076 в разных функциональных зонах города, включая жилую.

Взаимосвязь биоиндикации и эколого-химических показателей

В масштабном обзоре [20] береза повислая *B. pendula* отнесена к древесным растениям, рекомендованным в качестве биоиндикатора окружающей среды, реагирующего на содержание потенциально токсичных элементов в среде обитания. Данные корреляционного анализа это подтверждают (рис. 4).

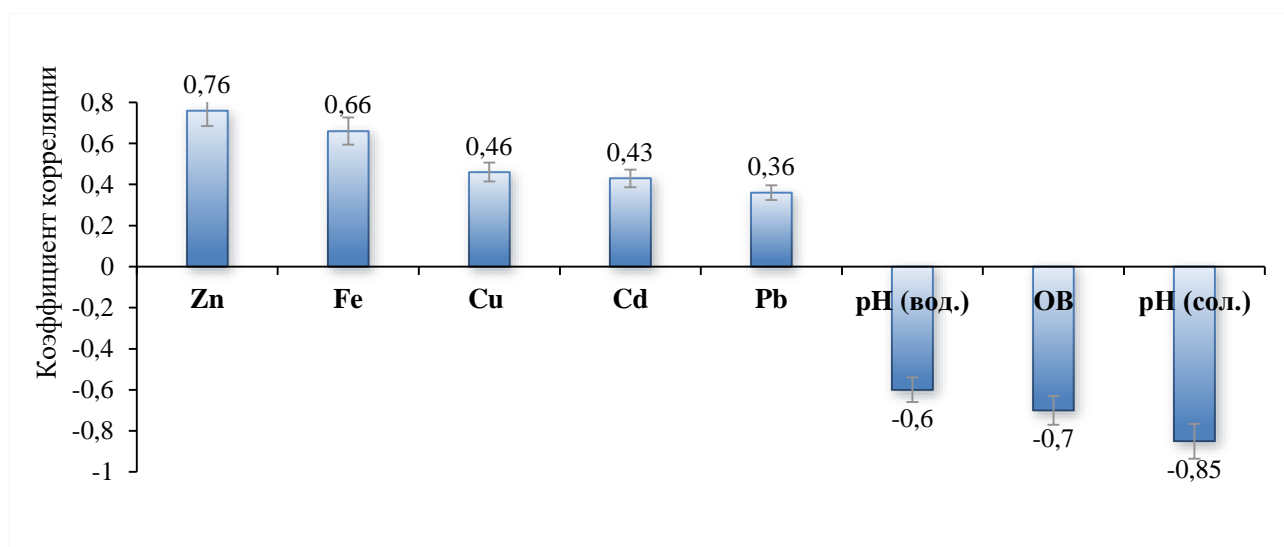


Рис. 4. Зависимость ФА листьев *B. pendula* от характеристик почвы на участках произрастания (для анализа использовали валовое содержание ТМ). Оттенками серого обозначены уровни взаимосвязи: штриховкой – высокий уровень связи ($r > 0,7$), темно-серым – средний уровень связи ($0,3 < r < 0,7$), светло-серым – слабый уровень связи ($r < 0,3$).

Fig. 4. The dependence of the FA of *B. pendula* leaves on the soil characteristics in the growing areas (the gross content of TM was used for analysis). Shades of gray indicate the levels of interconnection: hatching indicates a high level of connectivity ($r > 0.7$), dark gray indicates an average level of connectivity ($0.3 < r < 0.7$), light gray indicates a weak level of connectivity ($r < 0.3$).

Согласно полученным данным, асимметрия листьев березы значительно возрастала в ответ на увеличение содержания цинка в почве ($r = 0,76$) и снижение рН почвы (по методу солевой вытяжки, $r = -0,85$). Тяжелые металлы, в частности цинк, обладают не только прямой, но и косвенной токсичностью, нарушая доступность и усвоение макроэлементов растениями [21].

Второй значимой группой факторов можно назвать содержание железа и органического вещества в почве. Железо, хоть и не является металлом с высокой токсичностью, но вызывает негативные изменения при контакте с корнями растений, в частности, отток калия из корней и накопление активных форм кислорода и азота в корнях, что приводит к физиологическому стрессу [22]. Низкое содержание органического вещества повышает биодоступность потенциально токсичных веществ, поэтому обратная корреляционная связь этого показателя и ФА листьев вполне логична. Это подтверждается экспериментально для органических и минеральных токсикантов [23, 24].

Корни *B. pendula* проникают в почву и ниже лежащие грунты на глубину 2–3 м. Вероятно, показанные корреляционные зависимости связаны с промывным почвенным режимом, характерным для подзоны южной тайги [15].

Другие факторы (содержание меди, кадмия, свинца в почве и рН по методике с водной вытяжкой) оказывали среднее и слабое влияние на ФА листьев ($r < 0,6$). Это вполне закономерно, поскольку накопление этих металлов редко превышало 20% от установленной нормы.

На рисунке 5 показаны уровни связи между ФА листьев *B. pendula* и накоплением в них металлов.

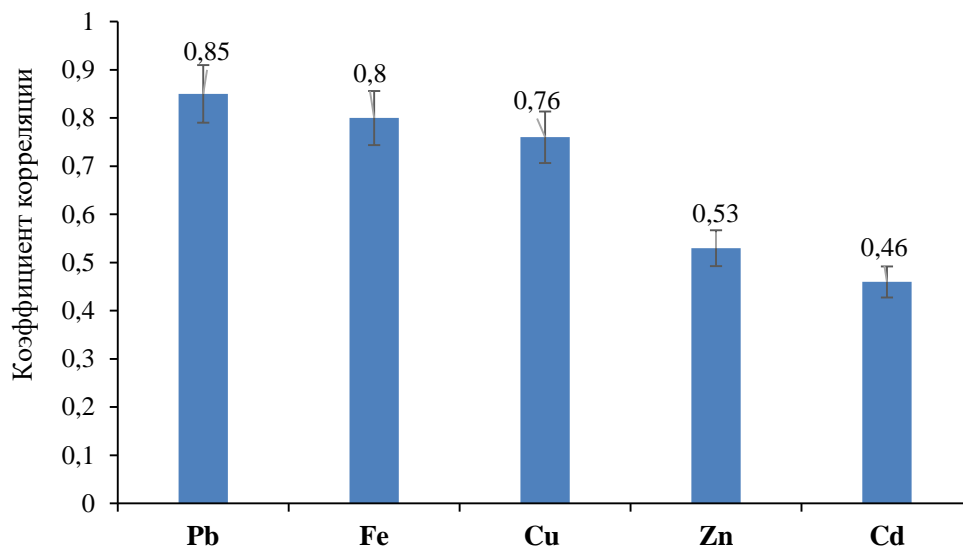


Рис. 5. Зависимость ФА листьев *B. pendula* от накопления в них металлов. Оттенками серого обозначены уровни взаимосвязи: черным – высокий уровень связи ($r > 0,7$), темно-серым средний уровень связи ($0,3 < r < 0,7$).

Fig. 5. The dependence of the FA of *B. pendula* leaves on the accumulation of metals in them. Shades of gray indicate the levels of interconnection: black – high level of connectivity ($r > 0.7$), dark gray – medium level of connectivity ($0.3 < r < 0.7$).

Корреляционный анализ показал, что асимметрия листьев значительно зависела от накопления в них Pb, Fe, Cu. Металлы Zn и Cd влияли на ФА в средней степени. Поступление металлов в листья происходит как из почвы, так и из воздуха [16]. Этим объясняется более высокий уровень связи «ФА – металлы в листья» по сравнению с «ФА – металлы в почве».

Отметим, что формирование почек и дальнейшее развитие листьев может зависеть и от других показателей: множества веществ присутствующих в воздухе города и тех веществ, которые не учитывались при анализе почв.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Организмы-биоиндикаторы воспринимают все факторы окружающей среды и реагируют на них своим морфофизиологическим состоянием. В данном исследовании рассматривались причины флуктуирующей асимметрии листьев березы *B. pendula* – древесного биоиндикатора, распространенного по всему миру. Оценивалось влияние на ФА металлов, содержащихся в почве и металлов, накопившихся за вегетационный сезон в биомассе листьев. Моделью был город Кирово-Чепецк (Россия), расположенный в зоне тайги, имеющий на своей территории, как и другие города среднего размера, жилые, рекреационные и транспортно-промышленные функциональные зоны.

Почва одного из исследуемых участков с промышленной и транспортной нагрузкой, содержала повышенную концентрацию цинка. Кратность к нормативу для валовой формы составило 2,29 раз. При этом в почвах жилых и рекреационных зон содержание всех металлов соответствовало нормативам (ПДК). Тенденция накопления цинка была видна только по превышению уровня, равного 0,5 ПДК, что было характерно для почв всего города.

Содержание ТМ в листьях древесных растений не нормируется. В сравнении с условными нормами, предложенными А. Кабата-Пендиас, показано, что листья *V. pendula* аккумулировали медь и цинк (более 2 и 33 мкг/кг соответственно). Свинец и кадмий накапливался в листьях в малых количествах (менее 10 мг/кг). Биомасса листьев из жилых и рекреационных зон накапливала металлы в меньшей степени, чем на промышленных и транспортных участках, что указывает на экологическое благополучие социально значимых районов.

Результаты биоиндикации по асимметрии листьев *V. pendula* подтвердили закономерности, выявленные химическими методами. Корреляция по Пирсону ослабевала в ряду «ФА-валовая форма ТМ»: Zn ($r=0,76$) > Fe (0,66) > Cu (0,46) > Cd (0,43) > Pb (0,36). Максимальная асимметрия листьев выявлена на участках с повышенной транспортной и промышленной нагрузкой (0,052–0,057).

Накопление металлов в листьях коррелировало с их асимметрией в еще большей степени. Связь «ФА – содержание ТМ в листьях» такова: Pb ($r=0,85$) > Fe (0,80) > Cu (0,76) Zn (0,53) > Cd (0,46).

Таким образом, накопление металлов в почве даже в пределах нормативов влияет на биоиндикационный показатель ФА листьев *V. pendula*. Cu и Zn накапливаются в листьях *V. pendula* больше, чем Cd и Pb, при этом на ФА листьев в большей степени влияет аккумуляция в них Pb, Fe и Cu. Связь ФА с накоплением в листьях Zn и Cd также наблюдалась, она характеризуется средним уровнем корреляции.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS:

The authors declare no conflict of interests.

Список литературы:

1. Петухов А. С., Кремлева Т. А., Хритохин Н. А., Петухова Г. А. (2024). Сравнение способности древесных растений различных видов к аккумуляции тяжелых металлов в городской среде. *Экология и промышленность России*, 28(11), 66–71. <http://doi.org/10.18412/1816-0395-2024-11-66-7>.
2. Гусакова М. А., Бровко О. С., Москалюк Е. А., Самсонова Н. А., Слобода А. А., Красикова А. А., Селиванова Н. В., Ивахнов А. Д., Боголицын К. Г. (2024). Оценка аэротехногенного воздействия промышленных эмиссий АО Архангельский ЦБК" на окружающую среду методом биоиндикации. *Экология и промышленность России*, 28(10), 15–21. <http://dx.doi.org/10.18412/1816-0395-2024-10-15-21>.
3. Schloter M., Nannipieri P., Sørensen S. J., van Elsas J. D. (2018). Microbial indicators for soil quality. *Biology and Fertility of Soils*, 54,(1-10). <http://dx.doi.org/10.1007/s00374-017-1248-3>.
4. Авдеева Е.В., Надемьянов В.Ф., Черникова К.В. (2014). Дендроиндикация экологической комфортности городских территорий. *Хвойные бореальной зоны, XXXII*, (5-6), 7–12.
5. Palmer A. R. Fluctuating asymmetry analyses: A primer. (1994). In: Markow, T.A. Ed., *Developmental Instability: Its Origins and Evolutionary Implications*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 335–364. http://dx.doi.org/10.1007/978-94-011-0830-0_26.

6. Методические рекомендации по оценке качества среды обитания по состоянию живых существ (оценка устойчивости развития живых организмов по уровню асимметрии морфологических структур). (2003). Распоряжение Минприроды России от 16.10.2003 г. № 460-р. М.: МПР. 24.
7. Nadgórska-Socha A., Kandziora-Ciupa M., Trzęsicki M., Barczyk G. (2017). Air pollution tolerance index and heavy metal bioaccumulation in selected plant species from urban biotopes. *Chemosphere*, 183, 471–482. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.05.128>.
8. Olkova A. S., Adamovich T. A. (2024). Dependence of Asymmetry of *Betula pendula* Roth Leaves on Soil Indicators *Annals of Biology*, 40(1), 131–134.
9. ГОСТ 26423-85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки», (1985).
10. ГОСТ 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества, (1991).
11. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. Подгот. А. В. Кузнецов и др. М.: ЦИНАО, 2-е изд., перераб. и доп. (1992).
12. Kozlov M. V, Zvereva E. L. (2015). Confirmation bias in studies of fluctuating asymmetry. *Ecol. Indicators*, 57, 293–297. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.05.014>.
13. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. (2021). Утверждены Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 №2.
14. Скугорева С. Г., Домрачева Л. И., Фокина А. И., Кутявина Т. И., Абдухалилов О. М., Кулаков В. Н., Ашихмина Т. Я. (2023). Комплексный подход в оценке экологического состояния городских парковых почв. *Юг России: экология, развитие*, 2(67), 102–111. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2023-2-102-112>.
15. Тюлин В. В. (1976). Почвы Кировской области. *Волго-Вятское издательство, Киров*.
16. Кабата-Пендиас А. (2010). Микроэлементы в почвах и растениях: Четвертое издание. <https://doi.org/10.1201/b10158>.
17. Березин Г. И., Олькова А. С. (2024). Видовые особенности биоаккумуляции тяжелых металлов листвой тополя *Populus canadensis* Moench и ясеня *Fraxinus americana* L. в условиях урбозооэкосистемы, *Трансформация экосистем*, 7(25). 12–18.
18. Захаров В. М., Баранов А. С., Борисов В. И., Валецкий А.В., Кряжева Н. Г., Чистякова Е. К., Чубинишвили А. Т. (2000). Гигиена окружающей среды: методология оценки. *ЦЭПР Москва*.
19. Губашева Б. Е., Идрисова Г. З., Туменов А.Н., Мифтахов Р. Р. (2022). Оценка степени загрязнения воздушной среды по флуктуирующей асимметрии листьев различных древесных пород. *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности*, 30(3). 417–427. <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2022-30-3-417-427>.
20. Patel, A., Tiwari, S., Khandelwal, A., Singh, C., Pandey, N., Tiwari, A., ... & Prasad, S. M. (2024). Plants as biomarkers for monitoring environmental pollution. In *Biomarkers in Environmental and Human Health Biomonitoring* (pp. 169–184). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13860-7.00019-7>.
21. Umar A. W., Naeem M., Hussain H., Ahmad N., Xu M. (2025). Starvation from within: How heavy metals compete with essential nutrients, disrupt metabolism, and impair plant growth. *Plant Science*, 353, 112412. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2025.112412>.
22. Li G., Wu J., Kronzucker H. J., Li B., Shi W. (2024). Physiological and molecular mechanisms of plant-root responses to iron toxicity. *Journal of Plant Physiology*, 297, 154257. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2024.154257>.
23. Van Hall B. G., Sweeney Ch. J., Bottoms M., van Gestel C. A. M. (2024). The influence of soil organic matter content and substance lipophilicity on the toxicity of pesticides to the earthworm

Eisenia Andrei. *Science of The Total Environment*, 917, 170206.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170206>.

24. Liu J., Yang W., Zhou H., Zia-ur-Rehman M., Salam M., Ouyang L., Chen Y., Yang L., Wu P. (2024). Exploring the mechanisms of organic fertilizers on Cd bioavailability in rice fields: Environmental behavior and effect factors. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 285, 117094. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.117094>.

References:

1. Petukhov A. S., Kremleva T. A., Hritokhin N. A., & Petukhova G.A. (2024). Comparison of the ability of woody plants of various species to accumulate heavy metals in an urban environment. *Ecology and industry of Russia*. 28(11), 66–71. <http://dx.doi.org/10.18412/1816-0395-2024-11-66-7>.
2. Gusakova M. A., Brovko O. S., Moskalyuk E. A., Samsonova N. A., Sloboda A. A., Krasikova A. A., Selivanova N. V., Ivakhnov A. D., & Bogolitsyn K. G. (2024). Assessment of aerotechnogenic impact of industrial emissions of Arkhangelsk Pulp and Paper Mill JSC on the environment by bioindication method. *Ecology and industry of Russia*. 28(10), 15–21. <http://dx.doi.org/10.18412/1816-0395-2024-10-15-21>.
3. Schloter M., Nannipieri P., Sørensen S. J., & van Elsas J. D. (2018). Microbial indicators for soil quality. *Biology and Fertility of Soils*. 54, 1-10. <http://dx.doi.org/10.1007/s00374-017-1248-3>.
4. Avdeeva E. V., Nademyanov V. F., & Chernikova K. V. (2014). Dendroindication of ecological comfort of urban areas. *Conifers of the boreal zone*. XXXII(5-6), 7–12.
5. Palmer A. R. (1994). Fluctuating asymmetry analyses: A primer. In: Markow, T. A. Ed., *Developmental Instability: Its Origins and Evolutionary Implications*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 335–364. http://dx.doi.org/10.1007/978-94-011-0830-0_26.
6. Methodological recommendations for assessing the quality of the environment according to the state of living beings (assessment of the stability of the development of living organisms by the level of asymmetry of morphological structures) (2003). *Decree of the Ministry of Natural Resources* No. 460-r dated 16.10.2003. Moscow: MPR, 24 p.
7. Nadgórska-Socha A., Kandziora-Ciupa M., Trzęsicki M., & Barczyk G. (2017). Air pollution tolerance index and heavy metal bioaccumulation in selected plant species from urban biotopes. *Chemosphere*. 183, 471–482. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.05.128>.
8. Olkova A. S., & Adamovich T. A. (2024). Dependence of Asymmetry of *Betula pendula* Roth Leaves on Soil Indicators. *Annals of Biology*. 40(1), 131–134.
9. GOST 26423-85. Soils. Methods for determining specific electrical conductivity, pH and solid residue of aqueous extract. (1985).
10. GOST 26213-91 “Soils. Methods for determination of organic matter”. (1991).
11. Methodological guidelines for the determination of heavy metals in agricultural soils and plant products. Prepared by A. V. Kuznetsov et al. 2nd ed., revised and enlarged. Moscow: TsINAO, 61 p. (1992).
12. Kozlov M. V., & Zvereva E. L. (2015). Confirmation bias in studies of fluctuating asymmetry. *Ecol. Indicators*, 57, 293–297. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.05.014>.
13. Sanitary rules and regulations SanPiN 1.2.3685-21 "Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans". (2021). *Resolution No. 2 of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated January 28*
14. Skugoreva S. G., Domracheva L. I., Fokina A. I., Kutyavina T. I., Abdukhalilov O. M., Kulakov V. N., & Ashikhmina T. Ya. (2023). An integrated approach to assessing the ecological status of urban park soils. *South of Russia: ecology, development*. 2(67), 102–111. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2023-2-102-112>.
15. Tyulin V. V. (1976) Soils of the Kirov region. Kirov: Volga-Vyatka Publishing House. 288 p. (in Russia).

16. Kabata-Pendias A. (2010). Trace elements in soils and plants: Fourth edition. <https://doi.org/10.1201/b10158>.
17. Berezin G. I., & Olkova A. S. (2024). Specific features of bioaccumulation of heavy metals by foliage of poplar *Populus canadensis* Moench and ash *Fraxinus americana* L. in the conditions of urban ecosystem. *Ecosystem transformation*. 7(2), 12–18. <https://doi.org/10.23859/estr-230227>.
18. Zakharov V. M., Baranov A. S., Borisov V. I., Valetsky A. V., Kryazheva N. G., Chistyakova, E. K., & Chubinishvili, A. T. Environmental health: assessment methodology. Moscow: CEPR, 2000. 65 p.
19. Gubasheva B. E., Idrisova G. Z., Tumenov A. N., & Miftakhov R. R. (2022). Assessment of the degree of air pollution by the fluctuating asymmetry of leaves of various tree species. *Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Ecology and life safety*. 30(3), 417–427. <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2022-30-3-417-427>.
20. Patel, A., Tiwari, S., Khandelwal, A., Singh, C., Pandey, N., Tiwari, A., ... & Prasad, S. M. (2024). Plants as biomarkers for monitoring environmental pollution. In *Biomarkers in Environmental and Human Health Biomonitoring* (pp. 169–184). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13860-7.00019-7>.
21. Umar A. W., Naeem M., Hussain H., Ahmad N., & Xu M. (2025). Starvation from within: How heavy metals compete with essential nutrients, disrupt metabolism, and impair plant growth. *Plant Science*. 353, 112412. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2025.112412>.
22. Li G., Wu J., Kronzucker H. J., Li B., & Shi W. (2024). Physiological and molecular mechanisms of plant-root responses to iron toxicity. *Journal of Plant Physiology*. 297, 154257. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2024.154257>.
23. Van Hall B.G., Sweeney Ch.J., Bottoms M., & van Gestel C.A.M. (2024). The influence of soil organic matter content and substance lipophilicity on the toxicity of pesticides to the earthworm *Eisenia Andrei*. *Science of The Total Environment*. 917, 170206. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170206>.
24. Liu J., Yang W., Zhou H., Zia-ur-Rehman M., Salam M., Ouyang L., Chen Y., Yang L., & Wu P. (2024). Exploring the mechanisms of organic fertilizers on Cd bioavailability in rice fields: Environmental behavior and effect factors. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 285, 117094. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.117094>.