



Мониторинг состояния почвы, воздуха, воды

УДК 57.042

DOI: 10.25514/CHS.2024.1.26009

Влияние физико-химических и химических характеристик почвы на асимметрию листьев *Betula pendula* Roth**А. С. Олькова¹✉, А. М. Шеромов¹**¹Вятский государственный университет, г. Киров, Россия, e-mail: usr08617@vyatsu.ru

Поступила в редакцию: 22.02.2024 г.; после доработки: 18.03.2024 г.; принята в печать: 25.03.2024 г.

Аннотация – Асимметрию морфологических частей растений обычно связывают с загрязнением воздуха, однако, очевидно, что вносить вклад в результаты биоиндикации могут различные характеристики почвы. Участки исследования располагались в северо-таёжной природной зоне (г. Ухта, Россия) в разных направлениях света от условного центра. На каждом участке были проведены биоиндикация по флуктуирующей асимметрии (ФА) листьев *B. pendula* (10 деревьев, по 10 листьев с каждого), а также химические и физико-химические анализы почвы. Коэффициенты ФА изменялись от 0,064 до 0,076 при показателе для незагрязненных территорий менее 0,04. Корреляционный анализ Пирсона показал, что снижение содержания органического вещества в почве и уменьшение уровня pH (солевая вытяжка) увеличивает ФА у березы: $r = -0,49$ и $r = -0,42$ соответственно. Нормативы содержания металлов в почве не были превышены, однако связь ФА с содержанием их подвижных форм наблюдалась для Pb, Mn, Cu: r равны 0,6, 0,36, 0,35 соответственно. Комплексный анализ результатов показывает, что результаты биоиндикации по ФА листьев *B. pendula* необходимо объяснять не только состоянием воздушной среды, но и почвенной.

Ключевые слова: Биоиндикация, *Betula pendula*, флуктуирующая асимметрия, почва, металлы в почве, органическое вещество почвы

Monitoring soil, air, water status

UDC 57.042

DOI: 10.25514/CHS.2024.1.26009

The influence of physico-chemical and chemical characteristics of the soil on the asymmetry of *betula pendula* roth leaves**Anna S. Olkova¹✉, and Anton M. Sheromov**Vyatka State University, Kirov, Russia, e-mail: usr08617@vyatsu.ru

Received: February 22, 2024; Revised: March 18, 2024; Accepted: March 25, 2024

Abstract – The asymmetry of the morphological parts of plants is usually associated with air pollution. Obviously, different soil characteristics can influence the results of bioindication. The study sites were located in the north taiga natural zone (Ukhta, Russia) in different directions of the

world from the conditional center. Bioindication of the fluctuating asymmetry (FA) of *B. pendula* leaves (10 trees, 10 leaves each), as well as chemical and physico-chemical analyses of the soil were carried out at each site. FA coefficients ranged from 0.064 to 0.076 with an indicator for uncontaminated areas of less than 0.04. Pearson's correlation analysis showed that a decrease in the content of organic matter in the soil and a decrease in the pH level (salt extract) increases FA in birch: $r = -0.49$ and $r = -0.42$, respectively. The standards for the content of metals in the soil were not exceeded, however, the relationship of FA with the content of their mobile forms was observed for Pb, Mn, Cu: r equal to 0.6, 0.36, 0.35, respectively. A comprehensive analysis of the results shows that the results of bioindication by FA of *B. pendula* leaves must be explained not only by the state of the air environment, but also by soil indicators.

Keywords: Bioindication, *Betula pendula*, fluctuating asymmetry, soil, metals in soil, soil organic matter.

ВВЕДЕНИЕ

Неблагоприятные факторы окружающей среды влияют на показатели жизнедеятельности и морфологические характеристики живых организмов. На этом основаны многочисленные методы биоиндикации загрязнения окружающей среды. Флуктуирующая асимметрия (ФА) органов растений, реже животных, эффективно используется для оценки экологической ситуации и уровня антропогенного воздействия [1, 2].

Этика экологических исследований ограничивает использование животных для обнаружения их морфологической асимметрии. Для этого подходят только массовые виды. Например, в работе [3] показано, что 10 морфологических признаков лягушек *Pelophylax ridibundus* становятся асимметричными в ответ на антропогенное загрязнение и могут быть использованы в качестве надежных биомаркеров.

Растения предпочтительнее для подобной биоиндикации, чем животные, не только с этической точки зрения. В многолетнем режиме они воспринимают антропогенное воздействие на строго определённой территории. Для оценки показателей ФА достаточно части растения, которое остается жизнеспособным после отбора биопроб. На следующий год можно наблюдать эти же растения, что повышает достоверность получаемых научных данных.

Чаще всего увеличение ФА ученые связывают с загрязнением воздушной среды. Например, наиболее высокие значения ФА при сильном пылевом загрязнении воздуха были у растений *Cecropia pachystachya* Trécul, а наименьшие – у растений контрольного участка [4]. В работах [5, 6] отмечается статистически значимая зависимость ФА *Betula pendula* Roth и *Aser pseudoplatanus* L. от транспортной нагрузки в городах.

Однако, зависимость ФА растений от характеристик почвы, в том числе уровня её загрязнения, в научных работах не раскрыта. Поэтому целью нашего исследования стало определение взаимосвязи асимметрии листьев березы *B. pendula* от таких показателей почвы как уровень pH, содержание органического вещества, концентрация подвижных форм тяжелых металлов (ТМ).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исследование проводилось в городской агломерации г. Ухта (Россия), широта 63°34'01" с.ш., долгота 53°41'00" в.д. Климат территории исследования умеренно континентальный. Зима продолжительная, холодная: средняя температура января -18°C . Лето короткое, прохладное: средняя температура июля $+14,6^{\circ}\text{C}$.

Были заложены 10 участков, на которых произрастала береза *Betula pendula* Roth. Участки располагались по разным направлениям света от условного центра района исследования.

На каждом участке исследования были выбраны 10 деревьев *B. pendula*. С каждого дерева мы собирали по 10 листьев, у которых определяли коэффициент ФА по 5 параметрам [7, 8]. Далее экологическое состояние на участках ранжировали согласно шкале А.Б. Стрельцова [9]: ФА $< 0,055$ – среда чистая; ФА $0,056-0,6$ – среда относительно чистая; ФА $0,06-0,065$ – среда загрязненная; ФА $0,065-0,07$ – среда грязная; ФА $> 0,070$ – среда очень грязная.

На каждом участке исследования были отобраны пробы почвы с глубины 0–20 см и проанализированы. Определение рН водной и солевой вытяжек из почвы проводили потенциометрическим методом [10], содержание органического вещества анализировали спектрофотометрическим методом по Тюрину [11]. Определение содержания подвижной формы тяжелых металлов в пробах почвы проводили методом атомно-абсорбционной спектроскопии [12].

Определение всех химических и физико-химических показателей почвы проводилось в трех повторностях. Значения биоиндикационных, химических и физико-химических показателей представляли в виде средних значений (M) и их стандартных отклонений (δ). Влияние химических и физико-химических характеристик почвы на ФА листьев *B. pendula* оценивали корреляционным анализом по Пирсону [13].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Биоиндикация

Коэффициенты ФА на исследуемых участках изменялись в пределах от 0,064 до 0,076. Согласно шкале Стрельцова [9] большинство участков характеризуются загрязненной окружающей средой (желтые столбцы), 30% участков относятся к очень грязным (оранжевые столбцы) (Рис. 1).

Природно-климатические условия г. Ухта не являются оптимальными для произрастания *B. pendula*, однако она успешно произрастает вплоть до зоны тундры. Мы не установили влияния стороны света на ФА березы. На рисунке 1 видно, что максимальные коэффициенты асимметрии установлены как для северного, так и для южного участка. Литературные данные подтверждают, что климатические факторы не оказывают существенного влияния на устойчивость развития *B. pendula* в городских условиях [6].

Антропогенная нагрузка на исследованные территории обусловлена транспортной сетью, а также действующими шахтами по добыче угля и нефти. Известно, что ФА листьев березы растет в зависимости от уровня антропогенной нагрузки. Так, вблизи фармацевтического предприятия ФА

березы достигал 0,053 [14]. В промышленных зонах городов ФА березы может достигать 0,061 – 0,667 [15]. Напротив, в относительно чистых районах ФА листьев березы невелика. Например, в Западной Якутии, близкой по природно-климатическим условиям к территории исследования, на фоновых территориях ранее ученые определяли ФА березы на уровне 0,04 [16].

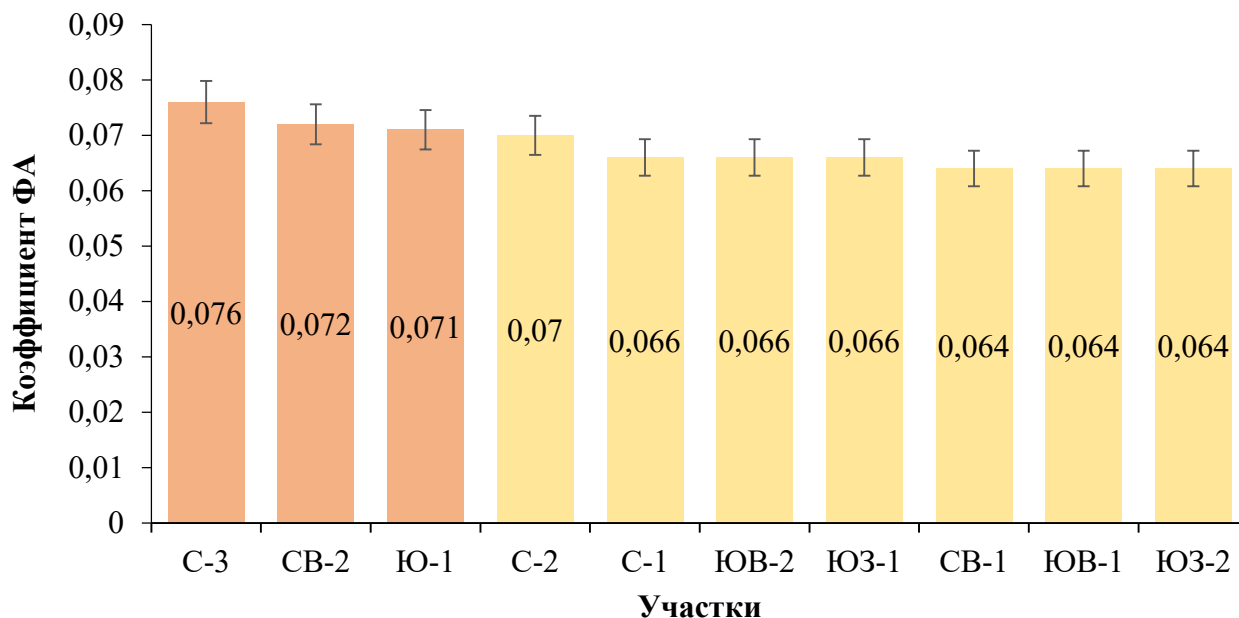


Рис. 1. Флуктуирующая асимметрия листьев березы на участках вблизи г. Ухта. Обозначения участков соответствуют сторонам света относительно условного центра района исследований.

Fig. 1. Fluctuating asymmetry of birch leaves in areas near Ukhta. The site designations correspond to the cardinal directions relative to the conditional center of the research area.

Уровень загрязнения атмосферы в г. Ухта в 2022 г. был низкий. Средние за год концентрации всех загрязняющих веществ в атмосферном воздухе города были ниже санитарных норм. Случаев высокого и экстремально высокого уровня загрязнения атмосферного воздуха не отмечалось [17]. Следовательно, необходимо вести поиск других антропогенных факторов, вызвавших значительную асимметрию листьев березы в окрестностях г. Ухта.

Физико-химические и химические характеристики почвы

Рост и развитие деревьев сильно зависят от состава почвы, в том числе и от степени её загрязнения. В таблице представлены некоторые характеристики почвы, которые могли потенциально повлиять на результаты биоиндикации по ФА листьев березы.

Реакция почвенной среды на большинстве участков является слабокислой: 60% проб по анализу водной вытяжки и 80% проб по анализу солевой вытяжки. Почвы не богаты органическим веществом: 70% исследованных участков относятся к бедным органическим веществам по шкале, приведенной в работе [18]. Анализ содержания подвижных форм ТМ в почвах показал, что на всех участках исследования их концентрация значительно ниже установленных нормативов [19]. Максимальные

концентрации отмечены для железа, марганца и цинка, что типично для северных почв [20].

Таблица. Физико-химические и химические характеристики почвы

Table. Physico-chemical and chemical characteristics of the soil

Участок отбора проб	pH _{H2O}	pH _{KCl}	Содержание в почве						
			Органическое вещество, %	ТМ, мг/кг					
				Cd	Pb	Fe	Zn	Cu	Mn
С-1	6,8	6,3	0,26	0,001	0,55	0,72	0,59	0,28	1,63
С-2	6,7	5,0	0,26	0,007	0,74	3,0	0,22	0,01	0,87
С-3	6,8	6,0	0,22	0,009	0,27	1,56	0,24	0,17	1,25
СВ-1	6,9	5,8	0,27	0,53	0,05	0,59	0,32	0,16	1,46
СВ-2	6,8	6,0	0,22	нпо	0,22	0,98	0,35	0,18	1,52
ЮВ-1	5,5	5,5	0,37	0,022	0,52	0,81	0,43	0,30	1,57
ЮВ-2	5,1	5,1	0,34	0,007	2,68	0,73	0,34	0,27	1,73
Ю-1	6,0	6,0	0,38	0,062	0,55	0,68	0,61	0,25	1,66
ЮЗ-1	5,7	5,7	0,50	0,067	0,22	1,10	0,37	0,21	1,64
ЮЗ-2	5,6	5,6	0,45	0,005	0,27	1,23	0,29	0,14	1,32

Примечание: отклонения от среднего при измерении pH составляли не более 5%, при определении концентрации органического вещества не более 2%, при определении ТМ не более 20%; нпо – ниже предела обнаружения.

B. pendula относится к неприхотливым древесным культурам, однако сочетание кислой почвы и низкого содержания органического вещества в ней приводят к повышению биодоступности ТМ [21]. Также известно негативное действие ТМ в низких концентрациях при их сочетании [22].

Взаимосвязь результатов биоиндикации и характеристик почвы

Результаты определения зависимости ФА березы от различных показателей почвы показаны на рисунке 2.

Максимальная положительная связь асимметрии листьев березы установлена с содержанием подвижной формы свинца в почве ($r = 0,6$). Наличие этого металла в почве обусловлено в большей степени антропогенной деятельностью [23], в нашем случае, вероятно, добычей угля и нефти, а также транспортной нагрузкой.

Также положительные связи умеренной степени наблюдались между ФА и содержанием подвижного марганца ($r = 0,36$), ФА и содержанием подвижной меди ($r = 0,35$). Медь, марганец и цинк могут усиливать действие друг друга [24], поэтому относительно низкое содержание этих металлов в почве влияет на состояние *B. pendula*.

Умеренная отрицательная связь наблюдалась между ФА и pH почвы по солевой вытяжке ($r = -0,52$), а также ФА и содержанием органического вещества в почве ($r = -0,49$). Это вполне закономерно. Чем ниже уровень pH почвы и меньше органического вещества, тем экстремальнее почвенные условия для растения. Другие показатели почвы (pH водной почвенной вытяжки, содержание подвижных форм меди, цинка и железа) имели слабую

корреляционную связь с ФА листьев березы. Вероятно, это связано с более объективным отражением уровня рН в почве при использовании солевой вытяжки, поскольку в естественной почве в раствор переходят природные соли. Отсутствие значимой связи ФА с содержанием Cu, Zn, Fe в почве объясняется толерантностью *B. pendula* к этим металлам в обнаруженных концентрациях.

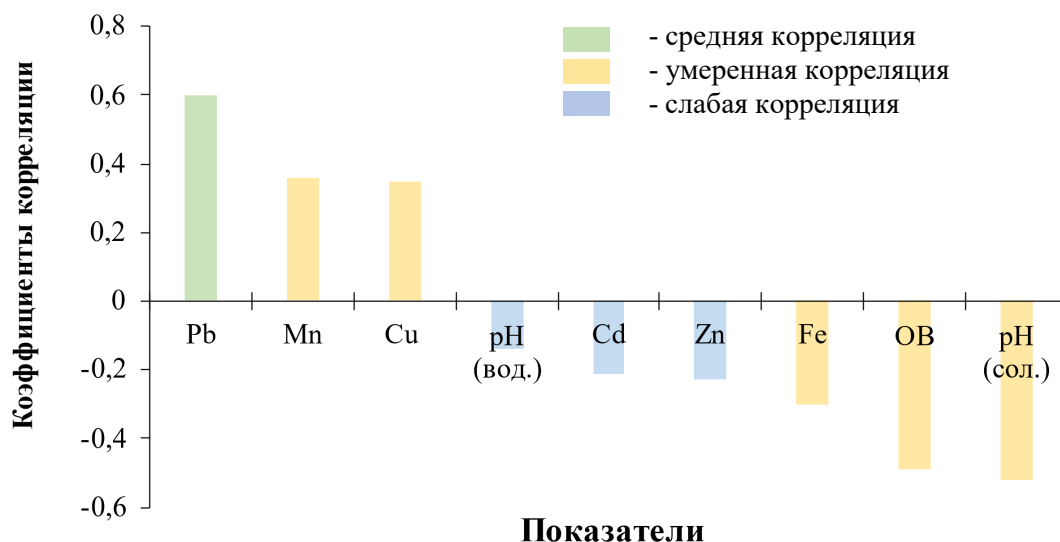


Рис. 2. Коэффициенты корреляции Пирсона (r) между ФА листьев березы и характеристиками почвы на соответствующих участках.

Fig. 2. Pearson correlation coefficients (r) between the FA of birch leaves and soil characteristics at the respective sites

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Береза *B. pendula*, безусловно, является ценным биоиндикатором, поскольку она часто используется для городского озеленения Европы, Азии, Северной и Южной Америки, в северных частях Африки. На примере северо-таежной зоны показано, что асимметрия листьев *B. pendula* зависит не только от качества воздушной среды, но и от характеристик почвы. С понижением содержания органического вещества в почве и снижением уровня рН асимметрия листьев увеличивается. При этом климатические условия в пределах северо-таежной зоны не влияли на асимметрию листьев *B. pendula*.

Загрязнения почвы тяжелыми металлами на участках исследования выявлено не было. Однако степень влияния подвижных форм обнаруженных ТМ на ФА можно разделить на две группы:

1. Увеличение содержания трех металлов приводило к повышению уровня ФА листьев: $Pb > Mn = Cu$.
2. Металлы Cd, Zn, Fe не влияли на показатель ФА листьев ($r < 0,35$).

Высокие показатели ФА в окрестностях г. Ухта (0,064 – 0,076) могут свидетельствовать как о совместном действии ТМ, так и о влиянии тех загрязняющих веществ, которые не были определены в ходе проведенных работ. Расширение базы данных о взаимосвязи асимметрии листьев *B. pendula* с характеристиками почвы и её загрязнением составит основу наших дальнейших исследований.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS:

The authors declare no conflict of interests.

Список литературы:

1. Barišić Klisarić, N., & Miljković, D., Avramov, S., Živković, U., Tarasjev, A. (2019). Radial and bilateral fluctuating asymmetry of *Iris pumila* flowers as indicators of environmental stress. *Symmetry*, 11(6), 818. <https://doi.org/10.3390/sym11060818>.
2. Kozlov, G., & Pushkarev, M. (2020). Sample size for bioindication of pollution level by the method of fluctuating asymmetry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 1001 (1), 012104. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1001/1/012104>.
3. Zhelev, Z. M., Tsonev, S.V., & Angelov, M.V. (2019). Fluctuating asymmetry in *Pelophylax ridibundus* meristic morphological traits and their importance in assessing environmental health. *Ecological Indicators*, 107, 105589. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105589>.
4. Mendes, G., Boaventura, M.G., Cornelissen, T. (2018). Fluctuating asymmetry as a bioindicator of environmental stress caused by pollution in a pioneer plant species. *Environmental entomology*, 47(6), 1479–1484. <https://doi.org/10.1093/ee/nvy147>.
5. Prihod'ko, S.A., & Shtirc, Y.A. (2018). Application of the morphometric method for determining the indicators of fluctuating asymmetry leaf plate *Acer pseudoplatanus* L. *Ukrainian Journal of Ecology*, 8(1), 194–210. https://doi.org/10.15421/2018_204.
6. Shadrina, E., Turmukhametova, N., Soldatova, V., Vol'pert, Y., Korotchenko, I., & Pervyshina, G. (2020). Fluctuating asymmetry in morphological characteristics of *Betula pendula* Roth leaf under conditions of urban ecosystems: evaluation of the multi-factor negative impact. *Symmetry*, 12(8), <https://doi.org/10.3390/sym12081317>.
7. 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. https://doi.org/10.1007/978-94-011-0830-0_26.
8. 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. М.: МПР, 24 с.
9. Стрельцов А.Б. *Региональная система биологического мониторинга*. (2003). Калуга: Изд-во Калуж. ЦНТИ, 150 с.
10. ГОСТ 26423-85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки (2011). М.: Издательство стандартов, 8 с.
11. ГОСТ 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества. (2011). М.: Издательство стандартов, 6 с.
12. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства (1992). Подготовлено Кузнецов А.В. и др. 2-е изд., перераб. и доп. М.: ЦИНАО, 61 с.
13. Чернова Н.И. *Математическая статистика: Учеб. пособие* (2007). Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 148 с.
14. Turmukhametova, N.V., Shadrina, E.G., Soldatova, V.Y., & Ivantsova, E.N. (2021). Fluctuating asymmetry of the lamina of *Betula pendula* Roth in the context of different cities and industrial load. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 839(5), 052011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/839/5/052011>
15. 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>.

16. Shadrina, E.G., & Vol'pert, Y.L. (2018). Bioindication Assessment of Environmental Quality in Vicinity of Underground Nuclear Explosion Sites on the Territory of the West Yakutia Using the Level of Fluctuating Asymmetry in Plants and Animals. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 10(6S), 2950–2961. <https://doi.org/10.4314/jfas.v10i6s.223>.
17. Государственный доклад «О состоянии окружающей среды Республики Коми в 2022 году». (2023). Сыктывкар: Минприроды Республики Коми, 164 с.
18. Тюрин И.В. *Органическое вещество почвы и его роль в плодородии* (1965). М.: Наука. 320 с.
19. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве: Гигиенические нормативы (2006). М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 15 с.
20. Opekunova, M.G., Opekunov, A.Y., Kukushkin, S.Y., & Ganul, A.G. (2019). Background contents of heavy metals in soils and bottom sediments in the north of Western Siberia. *Eurasian Soil Science*, 52, 380–395.
21. Dalcorsio, G., Fasani, E., Manara, A., Visioli, G., & Furini, A. (2019). Heavy metal pollutions: state of the art and innovation in phytoremediation. *International journal of molecular sciences*, 20(14), 3412. <https://doi.org/10.3390/ijms20143412>.
22. Kabata-Pendias, A. (2010). *Trace elements in soils and plants*: Fourth edition. CRC Press, Taylor & Francis Group, New York, London. 505 p. <https://doi.org/10.1201/b10158>.
23. Karande, U.B., Kadam, A., Umrikar, B.N., Wagh, V., Sankhua, R.N., & Pawar, N.J. (2020). Environmental modelling of soil quality, heavy-metal enrichment and human health risk in sub-urbanized semiarid watershed of western India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6, 545–556.
24. Piper, C.S. (2019). *Soil and plant analysis*. Jodhpur (India): Scientific Publishers.

References:

1. Barišić Klisarić, N., & Miljković, D., Avramov, S., Živković, U., & Tarasjev, A. (2019). Radial and bilateral fluctuating asymmetry of Iris pumila flowers as indicators of environmental stress. *Symmetry*, 11(6), 818. <https://doi.org/10.3390/sym11060818>.
2. Kozlov, G., & Pushkarev, M. (2020). Sample size for bioindication of pollution level by the method of fluctuating asymmetry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 1001(1), 012104. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1001/1/012104>.
3. Zhelev, Z.M., Tsonev, S.V., & Angelov, M. V. (2019). Fluctuating asymmetry in *Pelophylax ridibundus* meristic morphological traits and their importance in assessing environmental health. *Ecological Indicators*, 107, 105589. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105589>.
4. Mendes, G., Boaventura, M.G., & Cornelissen, T. (2018). Fluctuating asymmetry as a bioindicator of environmental stress caused by pollution in a pioneer plant species. *Environmental entomology*, 47(6), 1479–1484. <https://doi.org/10.1093/ee/nvy147>.
5. Prihod'ko, S.A., & Shtirc, Y.A. (2018). Application of the morphometric method for determining the indicators of fluctuating asymmetry leaf plate Acer pseudoplatanus L. *Ukrainian Journal of Ecology*, 8(1), 194–210. https://doi.org/10.15421/2018_204.
6. Shadrina, E., & Turmukhametova, N., Soldatova, V., Vol'pert, Y., Korotchenko, I., & Pervyshina, G. (2020). Fluctuating asymmetry in morphological characteristics of Betula pendula Roth leaf under conditions of urban ecosystems: evaluation of the multi-factor negative impact. *Symmetry*, 12(8), <https://doi.org/10.3390/sym12081317>.
7. 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. https://doi.org/10.1007/978-94-011-0830-0_26.

8. 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). Order Ministry of Natural Resources No. 460-r dated 16.10.2003. Moscow: MNR, 24 p. (in Russ.).
9. Streltsov, A.B. (2003). *Regional system of biological monitoring*. Kaluga: Publishing house of the Kaluga Central Scientific and Technical Institute. 431 p. (in Russ.).
10. GOST 26423-85. Soils. Methods for determining the specific electrical conductivity, pH and dense residue of aqueous extract. (2011). Moscow: Publishing House of Standards, 8 p. (in Russ.).
11. GOST 26213-91. Soils. Methods for the determination of organic matter. (2011). Moscow: Publishing House of Standards, 6 p. (in Russ.).
12. Methodological guidelines for the determination of heavy metals in soils of farmland and crop production (1992). Prepared by A. V. Kuznetsov et al. 2nd ed., reprint. and additional. M.: TSINAO, 61 p. (in Russ.).
13. Chernova, N.I. *Mathematical statistics: Textbook* (2007). Novosibirsk: Novosibirsk State University, 148 p. (in Russ.).
14. Turmukhametova, N.V., Shadrina, E.G., Soldatova, V.Y., & Ivantsova, E.N. (2021). Fluctuating asymmetry of the lamina of *Betula pendula* Roth in the context of different cities and industrial load. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 839(5), 052011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/839/5/052011>.
15. Gubasheva, B.E., Idrissova, G. Z., & Tumenov, A.N. (2022). Assessment of the degree of air pollution by fluctuating asymmetry of leaves of various tree species. *Rudn journal of ecology and life safety*. 30(3), 417–427. <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2022-30-3-417-427> (in Russ.).
16. Shadrina, E.G., & Vol'pert, Y.L. (2018). Bioindication Assessment of Environmental Quality in Vicinity of Underground Nuclear Explosion Sites on the Territory of the West Yakutia Using the Level of Fluctuating Asymmetry in Plants and Animals. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 10(6S), 2950–2961. <https://doi.org/10.4314/jfas.v10i6s.223>.
17. *The State report "On the state of the environment of the Komi Republic in 2022"*. (2023). Syktyvkar: Ministry of Natural Resources of the Komi Republic, 164 p. (in Russ.).
18. Tyurin, I.V. *Soil organic matter and its role in fertility* (1965). Moscow: Nauka. 320 p. (in Russ.).
19. Maximum permissible concentrations (MPC) of chemicals in soil: Hygienic standards (2006). Moscow: Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor, 15 p. (in Russ.).
20. Opekunova, M.G., Opekunov, A.Y., Kukushkin, S.Y., & Ganul, A.G. (2019). Background contents of heavy metals in soils and bottom sediments in the north of Western Siberia. *Eurasian Soil Science*, 52, 380–395.
21. Dalcorsio, G., Fasani, E., Manara, A., Visioli, G., & Furini, A. (2019). Heavy metal pollutions: state of the art and innovation in phytoremediation. *International journal of molecular sciences*, 20(14), 3412. <https://doi.org/10.3390/ijms20143412>.
22. Kabata-Pendias, A. (2010). *Trace elements in soils and plants*: Fourth edition. CRC Press, Taylor & Francis Group, New York, London. 505 p. <https://doi.org/10.1201/b10158>
23. Karande, U. B., & Kadam, A., Umrikar, B. N., Wagh, V., Sankhua, R. N., & Pawar, N. J. (2020). Environmental modelling of soil quality, heavy-metal enrichment and human health risk in sub-urbanized semiarid watershed of western India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6, 545–556.
24. Piper, C.S. (2019). *Soil and plant analysis*. Jodhpur (India): Scientific Publishers.