

**И. С. Коротченко****Воздействие транспортно-промышленного загрязнения города Красноярска на стабильность развития и элементный состав *Betula pendula* Roth**

В работе представлен анализ изменения индекса флуктуирующей асимметрии (ИФА) листьев *Betula pendula* Roth и содержания тяжелых металлов под воздействием транспортно-промышленного загрязнения города Красноярска. Сравнение среднего содержания подвижных форм тяжелых металлов в почве с нормами выявило превышение ПДК (ОДК) по элементам: Pb — до 4 раз, Cd — до 1,5 раза, Cu — до 5,6 раза, Ni — до 3,5 раза, Zn — до 2 раз, Co — до 1,6 раза. В ответ на повышенное содержание металлов в почве концентрация тяжелых металлов в листьях *B. pendula* возросла в 1,2—40 раз по сравнению с контролем. Самый высокий уровень накопления тяжелых металлов выявлен в Советском районе Красноярска, где наблюдается более интенсивное воздействие автотранспорта. Под действием химического загрязнения среды изменился индекс флуктуирующей асимметрии листьев *B. pendula*. ИФА на участках колебался в пределах 0,051—0,075, что позволяет оценить качество природной среды как имеющей высокий уровень загрязнения; для контрольного участка — как низкий, так как ИФА листьев *B. pendula* в среднем равен 0,034. ИФА листьев *B. pendula* имеет значимую положительную корреляционную взаимосвязь с уровнем автотранспортной нагрузки, поэтому данный биоиндикатор применим для оценки уровня воздействия автотранспорта на окружающую среду.

**Ключевые слова:** *Betula pendula* Roth, загрязнение, промышленный город, почвенный покров, флуктуирующая асимметрия, тяжелые металлы.

**Введение**

Красноярск — административный промышленный центр Красноярского края, входит в перечень городов Российской Федерации, характеризующихся наибольшими значениями показателя «выбросы в атмосферу загрязняющих веществ от стационарных источников» [5], город-миллионер с высокой автотранспортной нагрузкой по данным аналитического агентства «АВТОСТАТ». Так, в 2019 г. в Красноярске на 1 тысячу человек приходилось 296 легковых автомобилей [15].

На территории Красноярска наряду с селитебными, рекреационными имеются и промышленные зоны. Красноярск разделен рекой Енисей в продольном направлении, водный поток которого не замерзает в зимнее время с момента постройки в 1972 г. Красноярской ГЭС, что обуславливает повышенную влажность воздуха. В долинах левобережья и правобережья Красноярска присутствуют три зонально-поясные экосистемы: горнотаежная, лесостепная, степная. Красноярск находится в зоне резко континентального климата, перепад температур 20—25 °С. Насаждения древесной растительности на территории Красноярска носят фрагментарный характер, их площади сокращаются [10; 13].

Перечисленные факторы обуславливают уникальность урбосреды Красноярска, оценку качества которой наряду с химическими целесообразно проводить и биоиндикационными методами. Изучение морфометрических параметров древесных растений города дает объективную оценку состояния среды их произрастания [7; 9; 16].

Широко распространенный метод оценки качества окружающей природной среды через исследование флуктуирующей асимметрии (ФА) листовой пластинки растений, позволяющей определить уровень гомеостаза организмов [19], показал, что стабильность развития городских насаждений зависит от степени воздействия антропогенного фактора [2; 8; 18].

© Коротченко И. С., 2022

Цель исследования — оценка состояния урбосреды Красноярска под воздействием автотранспорта через анализ морфометрических параметров и элементного состава листьев *B. pendula* Roth.

**Материал и методы исследования**

В качестве объекта исследования выбрана *B. pendula* Roth ввиду ее широкой распространенности в городе и разработанной методики оценки качества окружающей среды посредством ФА листьев *B. pendula* [17].

Отбор листовых пластинок с укороченного типа побега *B. pendula* проводили в конце августа 2020 г. на территории четырех экспериментальных площадок, расположенных в городе Красноярске. Все исследуемые участки, кроме контрольного, расположены в непосредственной близости от проезжей части на территории города (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика точек отбора листьев *B. pendula* Roth на территории Красноярска

Участок	Характеристика участка
<i>Рекреационная зона</i>	
1 — студгородок Красноярского государственного аграрного университета	Контрольный участок — рекреационная зона, микрорайон Ветлужанка Октябрьского района Красноярска. Тип посадок растений — групповой. Участок находится на удалении 1000 м от дорог. Отсутствует автотранспортная нагрузка
<i>Селитебная зона с транспортной нагрузкой</i>	
2 — ул. 9 Мая	Участок размещен вдоль улицы 9 Мая (Советский район г. Красноярска), характеризуется высокой автотранспортной нагрузкой. Тип посадок растений — рядовой
3 — ул. Академика Киренского	Территория со средней автотранспортной нагрузкой (Октябрьский район Красноярска). Тип посадок растений — групповой
<i>Рекреационная зона с транспортной нагрузкой</i>	
4 — Красная площадь	Участок с высокой автотранспортной нагрузкой (Железнодорожный район Красноярска). Тип посадок древесных растений — рядовой

На каждом участке обследовали по 10 деревьев. При выборе участка принимали во внимание, что береза является гелиофитом, поэтому модельные деревья отбирались в условиях полного солнечного освещения, кроме того, деревья относились к генеративному периоду онтогенеза. Указанные критерии отбора деревьев применены с учетом рекомендаций исследователей, показывающих зависимость индекса флуктуирующей асимметрии (ИФА) от освещения и периода онтогенеза *B. pendula* [17; 20; 21].

Измерения и расчеты интегральных показателей проводили согласно методике через отношения показателей (1 — ширина полулиста; 2 — длина второй от основания листа жилки второго порядка; 3 — расстояние между основаниями первой и второй жилок второго порядка; 4 — расстояние между концами этих жилок; 5 — угол между главной жилкой и второй от основания листа жилкой второго порядка) левой и правой сторон листовой пластинки:  $|L-R|/(L+R)$  [12].

После сбора листовые пластинки сканировали. Измерение признаков электронных изображений листовых пластинок проводили 5 человек с помощью программы ImageJ, информация о месте сбора листьев была зашифрована.

Для оценки автотранспортной нагрузки на исследуемых участках проводили подсчет проходящего автотранспорта в течение 1 часа три раза в день: с 7.00 до 8.00, с 13.00 до 14.00 и с 18.00 до 19.00, семь дней недели [11].

Использовалась следующая шкала автотранспортной нагрузки:

1 балл — нагрузка отсутствует;

- 2 балла — низкая нагрузка, до 500 автомобилей/час;
- 3 балла — средняя нагрузка, до 1499 автомобилей/час;
- 4 балла — высокая нагрузка, свыше 1500 автомобилей/час.

Одновременно взяты почвенные образцы методом «конверта» из верхнего слоя 0—20 см [4].

Пробоподготовка почвенных образцов включала высушивание до воздушно-сухого состояния, получение средней пробы, приготовление вытяжки ацетатно-аммонийным буферным раствором с pH 4,8 для определения валовых форм тяжелых металлов в почве и кислотной вытяжки (1M HNO<sub>3</sub>) — для подвижных форм тяжелых металлов в почве и растительных образцах (листья *B. pendula*) [14].

Концентрацию металлов (мг/кг) определяли для воздушно-сухой массы на анализаторе PinAAcle 900T. Анализы выполнены атомно-абсорбционным методом на базе Научно-исследовательского испытательного центра ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет».

Статистическая обработка данных проводилась в программе Statistica 6 с использованием дисперсионного анализа, коэффициента корреляции Спирмена.

### Результаты и их обсуждение

В Красноярске интенсивность транспортной нагрузки варьировала в пределах 1120—3702 автомашин/час. На исследуемых участках в потоке автотранспорта преобладали легковые автомобили (97%), участки характеризовались интенсивным движением в течение недели. Средняя за неделю интенсивность автотранспорта различалась по участкам: в Советском районе — 3299 шт., в Октябрьском — 1455 шт., в Железнодорожном — 1936 шт. (табл. 2).

Таблица 2

Интенсивность транспортной нагрузки, автомашин в час

Район Красноярска	День недели						
	Понедельник	Вторник	Среда	Четверг	Пятница	Суббота	Воскресенье
Советский (ул. 9 Мая)	3702	3605	3115	3203	3658	2886	2925
Октябрьский (ул. Академика Киренского)	1560	1498	1395	1680	1695	1236	1120
Железнодорожный (Красная площадь)	2256	1720	2142	1860	2230	1720	1624

Анализ содержания тяжелых металлов в почвенных образцах четырех участков показал, что на исследуемых участках, кроме контрольного, отмечается превышение ПДК (ОДК) подвижных форм свинца в 2,5—4 раза, меди в 3,3—5,6 раза, никеля в 1,5—3,5 раза, кобальта в 1,6 раза; на 2, 3, 4 участках валовые формы превышают ПДК (ОДК) по свинцу — до 2,3 раза, по меди, цинку и кобальту — до 1,7 раза (табл. 3).

В почве транспортной зоны Советского района Красноярска отмечено накопление тяжелых металлов в валовой и подвижной формах в наибольшей степени, особенно Pb, Cu, Ni, Zn, что согласуется с данными исследователей, которые отмечают эти элементы-токсиканты в придорожной пыли [13; 20].

Вследствие накопления тяжелых металлов в почвенном покрове наблюдалась аккумуляция тяжелых металлов и в листьях *B. pendula* (табл. 4).

Таблица 3

Содержание тяжелых металлов в почвенном покрове из участков отбора листьев *B. pendula* Roth, мг/кг

Участок	Элемент					
	Pb	Cd	Cu	Ni	Zn	Co
1 (контрольный)	13±2*	0,30±0,01	24,0±0,7	8,0±0,1	36±12	10,0±0,5
	2,50±0,02	0,20±0,01	2,2±0,1	1,3±0,3	13,0±0,9	2,00±0,06
2 (ул. 9 Мая)	75±11	3,5±0,4	80,0±1,6	94±2	153±47	17±3
	24±3	1,50±0,05	17±6	14±5	47±11	7±1
3 (ул. Академика Киренского)	34,0±0,1	1,2±0,3	58±11	44±5	56,0±0,9	15,0±0,7
	14,0±0,7	0,80±0,03	10±2	6±3	14±3	5,0±0,8
4 (Красная площадь)	45±9	0,70±0,04	76±5	87±10	123±24	27±1
	15,0±0,4	0,30±0,02	15,0±0,5	11±4	37±6	8,0±0,4
ПДК/ОДК [3]	32/6	3/1	55/3	85/4	100/23	16,2/5

\* Здесь и далее для участков 1—4 указано: среднее значение ± стандартное отклонение; сверху — содержание валовых форм тяжелых металлов, снизу — содержание подвижных форм тяжелых металлов.

Таблица 4

Содержание тяжелых металлов в листьях *B. pendula* Roth, мг/кг

Участок	Элемент					
	Pb	Cd	Cu	Ni	Zn	Co
1 (контрольный)	0,10±0,03	0,30±0,02	8,0±0,5	4,0±0,3	24,0±1,2	0,09±0,01
2 (ул. 9 Мая)	4,0±0,3	1,00±0,03	16,0±0,6	25,0±0,4	126±33	1,0±0,6
3 (ул. Академика Киренского)	0,80±0,05	0,70±0,03	10,0±2,3	6,0±0,8	28,0±6,1	0,50±0,02
4 (Красная площадь)	1,0±0,2	0,40±0,03	15,0±4,8	8,0±0,9	36,0±5,7	0,9±0,1

Максимальное содержание элементов в листьях обнаружено у деревьев, произрастающих в Советском районе Красноярска на участке 2. Так, по сравнению с контрольным участком концентрация свинца в листьях больше в 40 раз, кадмия — в 3 раза, никеля — в 6 раз, цинка — в 5 раз, кобальта — в 11 раз.

Наибольшие различия между участками по накоплению тяжелых металлов в листьях деревьев обнаружены по таким металлам, как свинец, кобальт, цинк, никель.

Значения ИФА для исследуемых участков Красноярска позволяют, согласно шкале В. М. Захарова [12], дифференцировать участки по степени нарушения стабильности развития *B. pendula* (табл. 5).

Так, на контрольном участке — студгородок Красноярского государственного аграрного университета, где отсутствует автотранспортная нагрузка, показатель ИФА варьирует от 0,032 до 0,036 и указывает на нормальное развитие растений (1 балл).

Наибольшие значения ИФА выявлены в селитебных зонах Красноярска с высокой транспортной нагрузкой — в Советском (0,075) и Железнодорожном (0,073) районах, что соответствует 5 баллам по шкале оценки качества среды по величине ИФА и характеризует состояние среды как критическое. На неблагоприятную экологическую обстановку на ул. 9 Мая указывает также исследование Е. В. Авдеевой, А. В. Снегиревой, Н. Е. Киреева [1].

В селитебной зоне со средней автотранспортной нагрузкой показатель ИФА листьев *B. pendula* составил 0,051, что соответствует 4 баллам по шкале оценки качества среды по величине ИФА.

Таблица 5

Интегральные показатели, характеризующие качество урбосреды Красноярска

Интегральные показатели	Участок			
	1 (контрольный)	2 (ул. 9 Мая)	3 (ул. Академика Киренского)	4 (Красная площадь)
Величина показателя стабильности развития (ИФА)	0,034±0,02	0,075±0,01	0,051±0,03	0,073±0,04
Качество среды	1 балл, условная норма	5 баллов, критическое состояние	4 балла, сильно загрязненный район	5 баллов, критическое состояние
Автотранспортная нагрузка, характеристика	1 балл, нагрузка отсутствует	4 балла, высокая нагрузка	3 балла, средняя нагрузка	4 балла, высокая нагрузка

Анализируя зависимость стабильности развития *B. pendula* от интенсивности движения автотранспорта, можно отметить отсутствие значимых различий между исследуемыми участками и значимое влияние автотранспортной нагрузки на ИФА. Корреляция между показателями ИФА листьев *B. pendula* и автотранспортной нагрузкой оказалась статистически значимой (критерий Спирмена = 0,99 при  $p < 0,05$ ) (рис. 1).

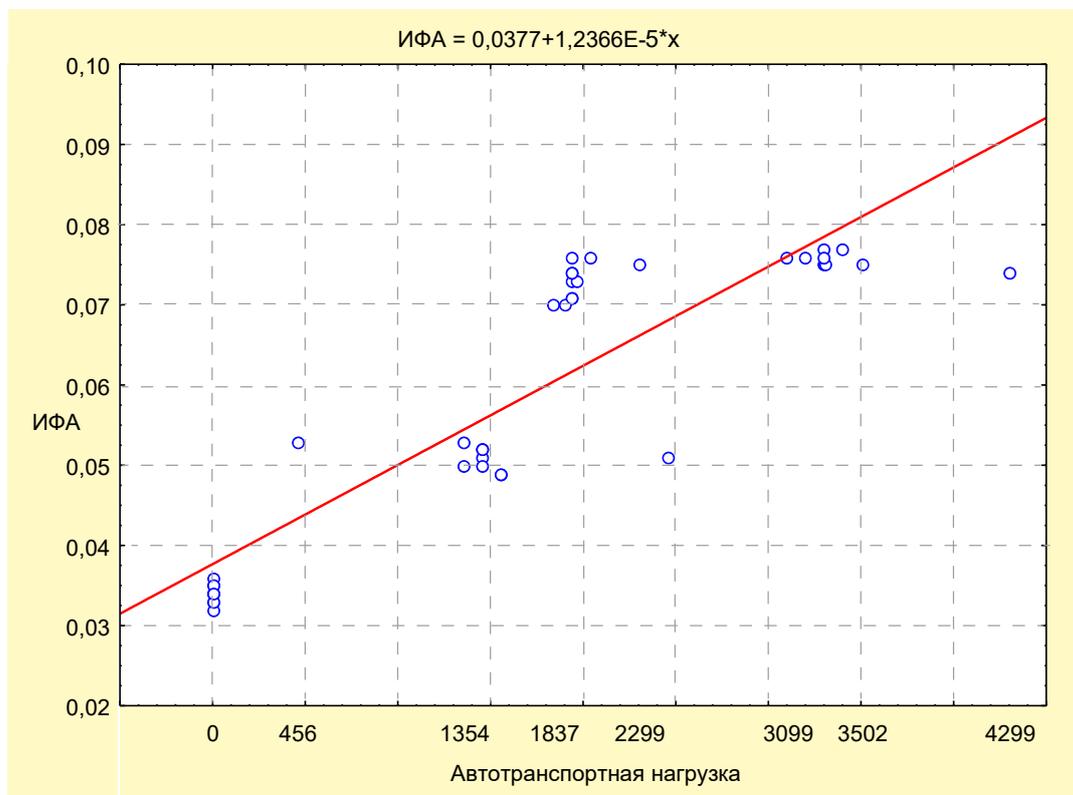


Рис. 1. Результаты регрессионного анализа, показывающие зависимость ИФА листьев *B. pendula* Roth от автотранспортной нагрузки

Анализ корреляционных связей между содержанием тяжелых металлов в почве, растениях и автотранспортной нагрузкой, а также между содержанием тяжелых металлов в



спортной нагрузкой) < Железнодорожный (рекреационная зона с высокой автотранспортной нагрузкой) < Советский (селитебная зона с высокой автотранспортной нагрузкой).

На стабильность развития *B. pendula* в условиях Красноярска оказало негативное воздействие транспортно-промышленное загрязнение среды, а именно высокие значения количества машин, концентраций элементов (Pb, Cd, Cu, Ni, Zn, Co) в почве и листьях.

Проведенное исследование по методикам В. М. Захарова, А. Т. Чубинишвили, С. Г. Дмитриева и др. [6], а также [12] еще раз подтверждает возможность использования березы в качестве биоиндикатора загрязнения в городских условиях.

Для улучшения экологической обстановки на ул. 9 Мая (Советский район Красноярска) необходимо провести корректирующие мероприятия по шумозащите, озеленению с учетом высокой автотранспортной нагрузки территории.

#### Список использованной литературы

1. Авдеева Е. В., Снегирева А. В., Киреев Н. Е. Оценка качества объекта озеленения специального назначения (на примере примагистральной территории улицы 9 Мая города Красноярска) // Хвойные бореальной зоны. 2019. Т. 37, № 1. С. 7—16.
2. Байкалова Т. В., Байкалов П. С., Коротченко И. С. Содержание тяжелых металлов в почвенном покрове, листьях березы под воздействием промышленности г. Красноярска // Вестник КрасГАУ. 2017. № 5. С. 123—130.
3. Гигиенические нормативы 2.1.7.2041-06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. Введ. 2006-01-04. М. : Изд-во стандартов, 2006. 11 с.
4. ГОСТ 17.4.4.02-84. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. М. : Стандартинформ, 2008. 8 с.
5. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае в 2020 году». Красноярск, 2021. 337 с.
6. Здоровье среды: практика оценки / В. М. Захаров, А. Т. Чубинишвили, С. Г. Дмитриев [и др.]. М. : Центр экологической политики России, 2000. 320 с.
7. Кладько Ю. В., Бенькова В. Е. Радиальный рост древесных видов в условиях высокой антропогенной нагрузки г. Красноярска // Сибирский лесной журнал. 2018. Т. 4. С. 49—57.
8. Клевцова М. А., Михеев А. А. Экодиагностика урбанизированной среды по морфометрическим показателям листовых пластинок *Betula pendula* Roth // Региональные геосистемы. 2020. Т. 44, № 4. С. 432—445. DOI: 10.18413/2712-7443-2020-44-4-432-445.
9. Коротченко И. С. Биоиндикация загрязнения районов г. Красноярска по величине флуктуирующей асимметрии листовой пластинки вяза приземистого // Вестник КрасГАУ. 2015. № 11 (110). С. 67—72.
10. Коротченко И. С., Алексеева А. Н. Флуктуирующая асимметрия хвои *Pinus sylvestris* L. как биоиндикационный показатель загрязнения природных сред города Красноярска // Вестник Оренбургского государственного педагогического университета. Электронный научный журнал. 2021. № 2 (38). С. 27—38. URL: [http://vestospu.ru/archive/2021/articles/3\\_38\\_2021.pdf](http://vestospu.ru/archive/2021/articles/3_38_2021.pdf). DOI: 10.32516/2303-9922.2021.38.3.
11. Методика определения выбросов автотранспорта для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферы городов. М., 1999. 9 с.
12. Методические рекомендации по выполнению оценки качества среды по состоянию живых существ (оценка стабильности развития живых организмов по уровню асимметрии морфологических структур): распоряжение Росэкологии от 16 октября 2003 г. № 460-р. М., 2003. 24 с.
13. Мучкина Е. Я., Бадмаева С. Э., Коротченко И. С., Горлушкина К. С. Анализ распределения подвижных форм тяжелых металлов в почвенном покрове промышленно урбанизированной территории г. Красноярска // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24, № 4. С. 66—71. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-4-66-71.
14. РД 52.18.289-90. Руководящий документ. Методические указания. Методика выполнения измерений массовой доли подвижных форм металлов (меди, свинца, цинка, никеля, кадмия, кобальта, хрома, марганца) в пробах почвы атомно-абсорбционным анализом. Дата введения 01.06.91. Утвержден Государственным комитетом СССР по гидрометеорологии. М., 1990. 37 с.
15. Рейтинг российских городов-миллионников по обеспеченности автомобилями в 2019 году [Электронный ресурс] // Автостат: аналитическое агентство. ООО «Автомобильная статистика», 2005—2022. URL: <https://www.autostat.ru/press-releases/41923/> (дата обращения: 04.01.2022).

16. Скрипальщикова Л. Н., Стасова В. В. Стабильность развития листовой пластинки березы повислой в пригородах Красноярска // Механизмы устойчивости растений и микроорганизмов к неблагоприятным условиям среды : сб. материалов Годичного собрания Общества физиологов растений России. 2018. С. 1135—1138. DOI: 10.31255/978-5-94797-319-8-1135-1138.

17. Assessment of Plant Status by the Stability of Development in Natural and Anthropogenic Conditions (Fluctuating Asymmetry of Leaf Features of the Silver Birch, *Betula pendula* Roth) / V. M. Zakharov, N. A. Sharova, I. E. Trofimov [et al.] // Biology Bulletin. 2020. Vol. 47, N 2. P. 186—190. DOI: 10.1134/S1062359020020119.

18. Lu M. Qualitative and Quantitative Indicators of Foliar Mass of Woody Plants in Urban Greenspaces According to the Level of Air Pollution // Asian Journal of Water, Environment and Pollution. 2021. Vol. 18, N 3. P. 11—19. DOI: 10.3233/AJW210024.

19. Moller A. P., Swaddle J. P. Asymmetry, developmental stability, and evolution. Oxford : Oxford Univ. Press, 1997. 291 p.

20. Shadrina E., Turmukhametova N., Soldatova V., Vol'pert, Y., Korotchenko I., Pervyshina G. Fluctuating asymmetry in morphological characteristics of *Betula pendula* Roth leaf under conditions of urban ecosystems: evaluation of the multi-factor negative impact // Symmetry. 2020. Vol. 12, N 8. DOI: 10.3390/sym1208131.7.

21. Turmukhametova N. V., Shadrina E.G., Soldatova V. Yu., Ivantsova E. N. Fluctuating asymmetry of the lamina of *Betula pendula* Roth in the context of different cities and industrial load // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 839, 052011. DOI: 10.1088/1755-1315/839/5/052011.

Поступила в редакцию 04.02.2022

**Коротченко Ирина Сергеевна**, кандидат биологических наук, доцент  
Красноярский государственный аграрный университет  
Российская Федерация, 660049, Красноярск, пр-т Мира, 90  
E-mail: [kisaspi@mail.ru](mailto:kisaspi@mail.ru)  
ORCID: 0000-0002-9099-9537

UDC 502/504(571.51)

**I. S. Korotchenko**

### **Impact of transport and industrial pollution in Krasnoyarsk on the development stability and elemental composition of *Betula pendula* Roth**

The paper presents the analysis of changes in the fluctuating asymmetry index (IFA) of leaves of *B. pendula* Roth and the content of heavy metals under the influence of transport and industrial pollution of the city of Krasnoyarsk. Comparison of average content of mobile forms of heavy metals in soil with norms revealed the excess of MPC (APC) for the elements: Pb up to 4 times, Cd up to 1,5 times, Cu up to 5,6 times, Ni up to 3,5 times, Zn up to 2 times, Co up to 1,6 times. In response to the increased content of metals in the soil, the concentration of heavy metals in the leaves of *B. pendula* from the roadway increased by 1,2—40 times compared to the control. It was found that the level of accumulation of heavy metals in the greatest extent occurs in the Sovetsky district of Krasnoyarsk, where there is a more intense impact of motor transport. The index of fluctuating asymmetry (IFA) of *B. pendula* leaves changed under the influence of chemical pollution. IFA in the areas ranged from 0,051 to 0,075, which makes it possible to assess the quality of the natural environment as having a high level of pollution, and in the control area — as low, since the IFA of *B. pendula* leaves is 0,034 on average. The IFA of *B. pendula* leaves has a significant positive correlation with the level of traffic load, so this bio-indicator is applicable to assess the level of vehicular impact on the environment.

**Key words:** *Betula pendula* Roth, pollution, industrial city, soil cover, fluctuating asymmetry, heavy metals.

**Korotchenko Irina Sergeevna**, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor  
Krasnoyarsk State Agrarian University  
Russian Federation, 660049, Krasnoyarsk, Prospect Mira, 90  
E-mail: [kisaspi@mail.ru](mailto:kisaspi@mail.ru)  
ORCID: 0000-0002-9099-9537

## References

1. Avdeeva E. V., Snegireva A. V., Kireev N. E. Otsenka kachestva ob"ekta ozeleneniya spetsial'nogo naznacheniya (na primere primagistral'noi territorii ulitsy 9 Maya goroda Krasnoyarska) [Assessment of the quality of a special-purpose landscaping object (on the example of the main territory of 9 May Street in Krasnoyarsk)]. *Khvoynye boreal'noi zony* [Conifers of the boreal area], 2019, vol. 37, no. 1, pp. 7—16. (In Russian)
2. Baikalova T. V., Baikalov P. S., Korotchenko I. S. Soderzhanie tyazhelykh metallov v pochvennom pokrove, list'yakh berezy pod vozdeistviem promyshlennosti g. Krasnoyarska [The content of heavy metals in the soil cover, birch leaves under the influence of the industry of Krasnoyarsk]. *Vestnik KrasGAU — Bulletin of KrasGAU*, 2017, no. 5, pp. 123—130. (In Russian)
3. *Gigienicheskie normativy 2.1.7.2041-06. Predel'no dopustimye kontsentratsii (PDK) khimicheskikh veshchestv v pochve. Vved. 2006-01-04* [Hygienic standards 2.1.7.2041-06. Maximum allowable concentrations (MPC) of chemicals in soil. Enacted 2006-01-04]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 2006. 11 p. (In Russian)
4. *GOST 17.4.4.02-84. Okhrana prirody. Pochvy. Metody otbora i podgotovki prob dlya khimicheskogo, bakteriologicheskogo, gel'mintologicheskogo analiza* [GOST 17.4.4.02-84. Protection of Nature. Soils. Methods for taking and preparing samples for chemical, bacteriological, helminthological analysis]. Moscow, Standartinform Publ., 2008. 8 p. (In Russian)
5. *Gosudarstvennyi doklad "O sostoyanii i okhrane okruzhayushchei sredy v Krasnoyarskom krae v 2020 godu"* [State report "On the state and protection of the environment in the Krasnoyarsk Territory in 2020"]. Krasnoyarsk, 2021. 337 p. (In Russian)
6. Zakharov V. M., Chubinishvili A. T., Dmitriev S. G. [et al.]. *Zdorov'e sredy: praktika otsenki* [Environmental Health: Assessment Practice]. Moscow, Tsentr ekologicheskoi politiki Rossii Publ., 2000. 320 p. (In Russian)
7. Klad'ko Yu. V., Ben'kova V. E. Radial'nyi rost drevesnykh vidov v usloviyakh vysokoi antropogennoi nagruzki g. Krasnoyarska [Radial Growth of Tree Species in the Conditions of High Anthropogenic Load in the City of Krasnoyarsk]. *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2018, vol. 4, pp. 49—57. (In Russian)
8. Klevtsova M. A., Mikheev A. A. Ekodiagnostika urbanizirovannoi sredy po morfometricheskim pokazatelyam listovykh plastinok *Betula pendula* Roth [The ecodiagnosics of the urbanized environment by morphometric indicators of the leaves *Betula pendula* Roth]. *Regional'nye geosistemy*, 2020, vol. 44, no. 4, pp. 432—445. DOI: 10.18413/2712-7443-2020-44-4-432-445. (In Russian)
9. Korotchenko I. S. Bioindikatsiya zagryazneniya raionov g. Krasnoyarska po velichine fluktuiruyushchei asimmetrii listovoi plastinki vyaza prizemistogo [Bioindication of pollution of districts of Krasnoyarsk in size of the fluctuating asymmetry of the sheet plate of Siberian elm]. *Vestnik KrasGAU — Bulletin of KrasGAU*, 2015, no. 11 (110), pp. 67—72. (In Russian)
10. Korotchenko I. S., Alekseeva A. N. Fluktuiruyushchaya asimmetriya khvoi *Pinus sylvestris* L. kak bioindikatsionnyi pokazatel' zagryazneniya prirodnykh sred goroda Krasnoyarska [Fluctuating asymmetry of needles of *Pinus sylvestris* L. as a bioindication mark of environmental pollution in the city of Krasnoyarsk]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta. Elektronnyi nauchnyi zhurnal — Vestnik of Orenburg State Pedagogical University. Electronic Scientific Journal*, 2021, no. 2 (38), pp. 27—38. Available at: [http://vestospu.ru/archive/2021/articles/3\\_38\\_2021.pdf](http://vestospu.ru/archive/2021/articles/3_38_2021.pdf). DOI: 10.32516/2303-9922.2021.38.3. (In Russian)
11. *Metodika opredeleniya vybrosov avtotransporta dlya provedeniya svodnykh raschetov zagryazneniya atmosfery gorodov* [Methodology for Determining Vehicle Emissions for Conducting Summary Calculations of Urban Atmospheric Pollution]. Moscow, 1999. 9 p. (In Russian)
12. *Metodicheskie rekomendatsii po vypolneniyu otsenki kachestva sredy po sostoyaniyu zhivykh sushchestv (otsenka stabil'nosti razvitiya zhivykh organizmov po urovnyu asimmetrii morfologicheskikh struktur): rasporyazhenie Rosekologii ot 16 oktyabrya 2003 g. № 460-r* [Guidelines for assessing the quality of the environment according to the state of living beings (assessment of the stability of the development of living organisms in terms of the level of asymmetry of morphological structures). Order of Rosecology dated Oct. 16, 2003 No. 460-r]. Moscow, 2003. 24 p. (In Russian)
13. Muchkina E. Ya., Badmaeva S. E., Korotchenko I. S., Gorusheva K. S. Analiz raspredeleniya podvizhnykh form tyazhelykh metallov v pochvennom pokrove promyshlennno urbanizirovannoi territorii g. Krasnoyarska [Assessment of Heavy Metals Distribution in Soil Cover of Industry-Urban Area of Krasnoyarsk]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii — Ecology and Industry of Russia*, 2020, vol. 24, no. 4, pp. 66—71. DOI: 10.18412/1816-0395-2020-4-66-71. (In Russian)
14. *RD 52.18.289-90. Rukovodyashchii dokument. Metodicheskie ukazaniya. Metodika vypolneniya izmerenii massovoi doli podvizhnykh form metallov (medi, svintsa, tsinka, nikelya, kadmiya, kobal'ta, khroma, margantsa) v probakh pochvy atomno-absorbtsionnym analizom. Data vvedeniya 01.06.91. Utverzhden Gosudarstvennym komitetom SSSR po gidrometeorologii* [RD 52.18.289-90. Guidance document. Methodical instructions. Method for measuring the mass fraction of mobile forms of metals (copper, lead, zinc, nickel, cadmium, cobalt, chromium,

manganese) in soil samples by atomic absorption analysis. Enacted date 01.06.91. Approved by the USSR State Committee for Hydrometeorology]. Moscow, 1990. 37 p. (In Russian)

15. Reiting rossiiskikh gorodov-millionnikov po obespechennosti avtomobilyami v 2019 godu [Rating of Russian million-plus cities by car supply in 2019]. *Avtostat: analiticheskoe agentstvo. OOO "Avtomobil'naya statistika"* [Avtostat: analytical agency. Automotive Statistics LLC], 2005—2022. available at: <https://www.autostat.ru/press-releases/41923/>. Accessed: 04.01.2022. (In Russian)

16. Skripal'shchikova L. N., Stasova V. V. Stabil'nost' razvitiya listovoi plastinki berezy povisloi v prigorodakh Krasnoyarska [Stability of leaf blade development of the birch in the suburbs of Krasnoyarsk]. *Mekhanizmy ustoichivosti rastenii i mikroorganizmov k neblagopriyatnym usloviyam sredy: sb. materialov Godichnogo sobraniya Obshchestva fiziologov rastenii Rossii* [Mechanisms of resistance of plants and microorganisms to adverse environmental conditions. A collection of materials from the Annual Meeting of the Society of Plant Physiologists of Russia], 2018, pp. 1135—1138. DOI: 10.31255/978-5-94797-319-8-1135-1138. (In Russian)

17. Zakharov V. M., Sharova N. A., Trofimov I. E. [et al.] Assessment of Plant Status by the Stability of Development in Natural and Anthropogenic Conditions (Fluctuating Asymmetry of Leaf Features of the Silver Birch, *Betula pendula* Roth). *Biology Bulletin*, 2020, vol. 47, no. 2, pp. 186—190. DOI: 10.1134/S1062359020020119.

18. Lu M. Qualitative and Quantitative Indicators of Foliar Mass of Woody Plants in Urban Greenspaces According to the Level of Air Pollution. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 2021, vol. 18, no. 3, pp. 11—19. DOI: 10.3233/AJW210024.

19. Moller A. P., Swaddle J. P. *Asymmetry, developmental stability, and evolution*. Oxford, Oxford Univ. Press, 1997. 291 p.

20. Shadrina E., Turmukhametova N., Soldatova V., Vol'pert, Y., Korotchenko I., Pervyshina G. Fluctuating asymmetry in morphological characteristics of *Betula pendula* Roth leaf under conditions of urban ecosystems: evaluation of the multi-factor negative impact. *Symmetry*, 2020, vol. 12, no. 8. DOI: 10.3390/sym12081317.

21. Turmukhametova N. V., Shadrina E.G., Soldatova V. Yu., Ivantsova E. N. Fluctuating asymmetry of the lamina of *Betula pendula* Roth in the context of different cities and industrial load. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 839, 052011. DOI: 10.1088/1755-1315/839/5/052011.