

**ОЦЕНКА СТАБИЛЬНОСТИ РАЗВИТИЯ АССИМИЛЯЦИОННОГО АППАРАТА
БЕРЕЗЫ ПОВИСЛОЙ МЕТОДАМИ ДЕНДРОИНДИКАЦИИ
(на примере скверов города Красноярска)**

Е. В. Авдеева, И. В. Кухар

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: Rahuk@mail.ru

Аннотация. Роль зелёных насаждений, и отдельных пород в частности, в улучшении экологической комфортности городской среды общепризнанна. Ввиду значительной гетерогенности антропогенного воздействия и его специфических характеристик в пределах городской среды, внедрение конкретных видов древесной растительности в практику озеленения должно предваряться комплексной оценкой их адаптивности к локальным условиям и типам насаждений. Рекомендации по масштабному применению дендрофлоры возможны лишь после детального исследования резистентности растений к существующей техногенной нагрузке в конкретных городских биотопах. Учет специфики загрязнения и категории насаждений является необходимым условием успешной интродукции и устойчивого развития древесных растений в урбанизированной среде.

Предложен метод определения оценки качества условий произрастания растений по показателю асимметричности площади половинок листовых пластин древесных растений. Объектом исследования служили средневозрастные растения берёзы повислой, находящихся в одинаковых условиях по уровню освещенности, влажности, но с различной интенсивностью антропогенной нагрузки. Для оценки устойчивости развития *Betula pendula* использовали два критерия: коэффициент асимметрии, определяемый по пяти листовым параметрам, и индекс асимметричности, рассчитанный на основе площади половинок листьев с применением методов В. М. Захарова [Захаров, 1987] и модифицированной авторской методики.

Анализ корреляции между площадью листовых пластинок и степенью загрязнения окружающей среды продемонстрировал общую тенденцию к снижению стабильности развития. Обнаружены статистически значимые обратные корреляции: повышение техногенной нагрузки приводит к уменьшению площади листовых пластинок *Betula pendula* и усилению их асимметрии.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что разработанная и протестированная методика биоиндикации, основанная на анализе асимметрии листовых пластинок через соотношение площадей их половинок, корректно отражает происходящие изменения в окружающей среде. Данный метод может быть рекомендован для оперативной оценки качества городской среды в рамках экологического мониторинга.

Ключевые слова: городские искусственные насаждения, мониторинг, биоиндикация, лист, береза повислая, асимметрия.

Conifers of the boreal area. 2025, Vol. XLIII, No. 4, P. 40–49

**EVALUATION OF THE STABILITY OF DEVELOPMENT OF THE ASSIMILATION APPARATUS
OF DROOPING BIRCH USING DENDROINDICATION METHODS
(using the example of public gardens in Krasnoyarsk)**

E. V. Avdeeva, I. V. Kukhar

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: Rahuk@mail.ru

Annotation. The role of green spaces, and individual species in particular, in improving the environmental comfort of the urban environment is generally recognized. Due to the significant heterogeneity of anthropogenic impact and its specific characteristics within the urban environment, the introduction of specific types of woody vegetation into landscaping practices should be preceded by a comprehensive assessment of their adaptability to local conditions and types of plantings. Recommendations for the large-scale use of dendroflora are possible only after a detailed study of plant resistance to the existing technogenic load in specific urban biotopes. Taking into account the specifics of pollution and the category of plantings is a prerequisite for the successful introduction and sustainable development of woody plants in an urbanized environment. A method is proposed for determining the assessment of the quality of plant growing conditions based on the asymmetry of the area of halves of leaf blades of woody plants. The object of the study

was middle-aged silver birch plants, located in the same conditions in terms of illumination and humidity, but with different intensities of anthropogenic load. To assess the sustainability of *Betula pendula* development, two criteria were used: the asymmetry coefficient determined by five leaf parameters, and the asymmetry index calculated based on the area of leaf halves using the methods of V. M. Zakharov [Zakharov, 1987] and a modified author's method.

Analysis of the correlation between the area of leaf blades and the degree of environmental pollution demonstrated a general tendency towards a decrease in the stability of development. Statistically significant inverse correlations were found: an increase in technogenic load leads to a decrease in the area of *Betula pendula* leaf blades and an increase in their asymmetry.

The results obtained indicate that the developed and tested bioindication method based on the analysis of leaf blade asymmetry through the ratio of the areas of their halves correctly reflects the changes occurring in the environment. This method can be recommended for the prompt assessment of the quality of the urban environment as part of environmental monitoring.

Keywords: urban artificial plantations, monitoring, bioindication, leaf, drooping birch, asymmetry.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из ключевых индикаторов комфортности городской среды является степень обеспеченности населения территориями, занятыми зелеными насаждениями. Природно-климатические факторы местности оказывают значительное влияние на планирование, развитие и модернизацию городов, определяя направления их пространственного расширения и концентрацию промышленных и транспортных узлов.

В городских скверах, парках, на улицах и площадях все большее распространение получают местные виды древесных растений. Однако, учитывая гетерогенность техногенного воздействия на различные участки городской территории и его специфику, рекомендации по интенсивному использованию тех или иных видов деревьев могут быть сформулированы только после анализа их адаптивности к конкретным условиям и категориям зеленых насаждений. Многочисленные научные исследования подтверждают, что древесные растения могут служить инструментами мониторинга состояния городской среды, поскольку их таксационные (высота, диаметр ствола и кроны) и морфологические характеристики (размеры листовой пластинки и прочие) отражают уровни экологической опасности в городской среде [1–5; 10; 12; 13; 15; 19; 20].

В ряде научных работ береза повислая рассматривается как индикатор качества городской среды, при этом в качестве признаков-маркеров выступают разнообразные показатели, включая жизненный потенциал вида, морфометрические параметры, индекс стабильности развития и другие [6; 9; 10; 11; 18; 22].

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследования служили средневозрастные растения березы повислой (*Betula pendula* Roth.), находящиеся в одинаковых условиях по уровню освещенности, влажности, но с различной интенсивностью антропогенной нагрузки.

Методология биоиндикации базируется на теории «стабильности развития», предложенной А. В. Яблоковым, В. М. Захаровым и их коллегами [8], которые эмпирически продемонстрировали, что негативные внешние факторы индуцируют изменения в стабильности онтогенеза живых организмов, что проявляется в нарушениях морфогенетических процессов. Эти нарушения, в свою очередь, поддаются количественной оценке.

Оценка флуктуирующей асимметрии билатеральных организмов, как индикатора антропогенного воздействия, является надежным и широко используемым методом. В дендроиндикации, основанной на данном подходе, древесные растения служат в качестве модельных объектов для мониторинга антропогенной нагрузки. Древесные растения, будучи прикрепленными к конкретной территории на протяжении всего жизненного цикла, испытывают кумулятивное воздействие как почвенной, так и воздушной среды, отражающее интегральную картину экологической обстановки.

Сбор образцов осуществлялся в начале сентября, после завершения фазы активного роста листового аппарата, но до начала процесса осеннего опадения листьев, что позволяло избежать искажений результатов, связанных с естественным старением тканей. Листья отбирались из нижней части кроны, с укороченных побегов (рис. 1, а), расположенных на ветвях, ориентированных по всем сторонам света, для обеспечения репрезентативности выборки и минимизации влияния локальных факторов. Собранный материал (рис. 1, б) сканировался с разрешением 300 dpi.

Для достижения большей достоверности, анализ собранных данных осуществлялся с применением программного обеспечения КОМПАС. С каждого листа были получены данные по пяти характеристикам, измеренным с левой и правой сторон: 1 – ширина половины листа (см. рис. 2, а); 2 – длина второй боковой жилки, отсчитанной от основания; 3 – дистанция между основаниями первой и второй боковых жилок; 4 – дистанция между кончиками этих же жилок; 5 – угол между центральной жилкой и второй боковой жилкой; идущей от основания. Оценка стабильности развития изучаемых видов осуществлялась на основе двух индикаторов: индекса асимметрии, рассчитанного по пяти параметрам листовой пластинки (согласно методу В. М. Захарова) [7], и индекса асимметрии, определенного по площади половин листа (по авторской методике). Измеряемые характеристики листа березы повислой изображены на рис. 2, б.

Для определения степени асимметрии использовался метод, предложенный В. М. Захаровым и соавторами, основанный на интегральном показателе – среднем относительном отклонении по каждому изучаемому признаку (параметру). Величины измерений, полученные для левой и правой сторон, обозначались

как $X_{\text{л}}$ и $X_{\text{п}}$, соответственно. Флуктуирующая асимметрия листовых пластинок рассчитывалась как частное от деления разности между значениями, полученными для левой и правой сторон, на их сумму.

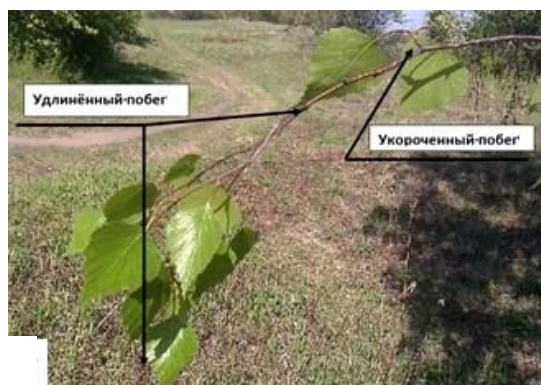
Для каждого листа рассчитывалось относительное расхождение признака между сторонами как среднее арифметическое относительных разностей признаков между левой и правой сторонами. Среднее относительное расхождение признака для всей выборки рассчитывалось как среднее арифметическое относительных расхождений сторон на признак для каждого листа.

Полученный показатель отражает степень асимметрии организма, для оценки которой В. М. Захаровым и соавторами предложена шкала отклонений. В этой шкале значения асимметрии до 0,055 соответствуют условной норме состояния среды, а значения, превышающие 0,7, сигнализируют о критическом состоянии среды [7]. Нами предложен способ оценки качества условий роста растений, основанный на измерении асимметрии площади половинок листовых пластин древесных растений. Как уже упоминалось, листовые пластины исследуемых видов обладают билатеральной симметрией, которая, являясь формой согласованности частей живых организмов, имеет важное общебиологическое значение.

В условиях городской среды техногенные факторы оказывают негативное воздействие на древесные растения, вызывая у них нарушения симметрии листовых пластин, что проявляется в виде флуктуирующей асимметрии – небольших случайных отклонений от билатеральной симметрии [17].

Предлагаемый авторский подход к определению типа условий произрастания растений, то есть к оценке качества окружающей среды, основан на измерении асимметричности площади половинок листовых пластин деревьев. Данный метод, подобно подходу В. М. Захарова, исходит из принципа подобия частей тела у билатерально-симметричных организмов, где отношение площадей подобных фигур равняется квадрату коэффициента подобия.

Показатель асимметрии листовой пластины служит аналогом коэффициента подобия и вычисляется как квадратный корень из отношения площадей половинок листа. Расчет коэффициента асимметрии листа по пяти параметрам (согласно методике В. М. Захарова) предполагает установление однозначного соответствия между пятью парами точек на листе. Наш метод является эквивалентным методу пяти параметров, так как оба они базируются на геометрическом подобии и позволяют переходить от одних измерений к другим.

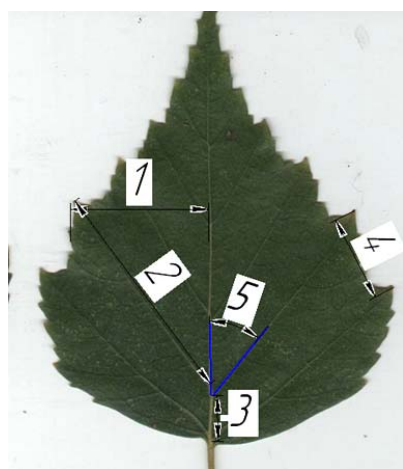


а

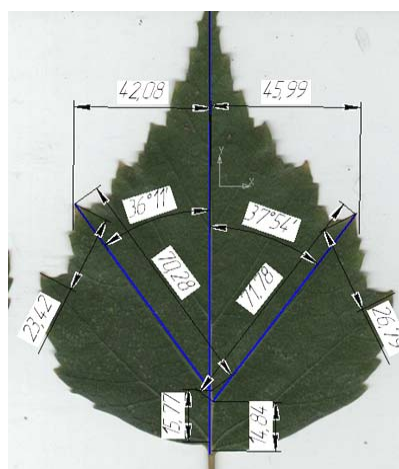


б

Рис. 1. Типы побегов (а) и пример выборки листовых пластин (б) березы повислой



а



б

Рис. 2. Параметры (а) и примеры измерения (б) листовых пластин березы повислой

Для повышения точности и достоверности результатов измерение площади половинок листа проводилось с точностью до 1 мм^2 с использованием специализированной программы LeafProg «Анализ листовой пластины древесных растений» (рис. 3), разработанной на кафедре лесного инжиниринга СибГУ им. М. Ф. Решетнева (свидетельство о гос. регистрации № 2009614523), авторами которой являются Е. В. Авдеева и А. А. Карпов. В процессе исследования листовые пластины разделялись на левую и правую половины, и для каждой из них программа LeafProg определяла площадь.

Степень неравномерности листовой пластины, измеряемая по соотношению площадей ее частей (рис. 3), рассчитывается как квадратный корень из отношения меньшей половины листа к большей. Для всей исследуемой группы асимметрия листовых пластин вычислялась как среднее значение. В заключение выполняется сопоставительный анализ изменения показателей

асимметрии листовых пластин, полученных с использованием двух различных подходов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование изменчивости характеристик ассимиляционного аппарата березы повислой в ответ на воздействие в условиях городской среды Красноярска проводилось на деревьях, подвергшихся различной техногенной нагрузке. Листья собирались в 9 городских скверах и на контрольном участке вблизи Плодово-ягодной станции, что дало возможность достоверно оценить воздействие аэротехногенных факторов и реакцию растений на них. Представленные в табл. 1 и 2 данные демонстрируют, что загрязнение окружающей среды оказывает влияние на асимметрию листовых пластин березы повислой, увеличивая ее величину с ростом техногенной нагрузки.

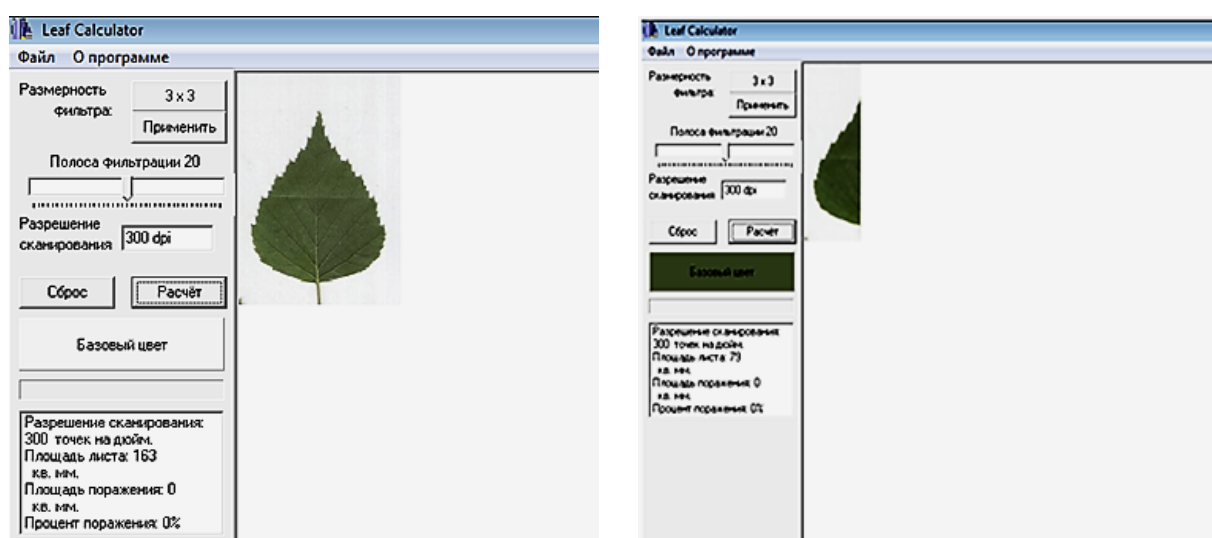


Рис. 3. Определение площади листовых пластин в программе LeafProg на примере листа березы повислой

Таблица 1

Расчетные значения асимметрии по пяти параметрам листа и величине асимметрии по площади половинок листа березы повислой

№ и «адрес» пункта наблюдения	Наименование сквера (место сбора листьев: центр сквера, периферия сквера)	Показатель асимметрии по площади половинок листовой пластины	Коэффициент асимметрии по пяти параметрам листа	Техногенные воздействия ИЗА ₄ , в долях ПДК
№ 1, Минусинская, 14д	«Плодово-ягодная станция»	3,036	0,05	12,0
	«Лесок» (центр)	3,143	0,052	
№ 21, ул. Красно-московская, 32д	«Серебряный» (центр)	3,254	0,059	13,8
	«Серебряный» (периф.)	3,273	0,06	
№ 5, Быковского, 4д	«Космонавтов» (центр)	3,173	0,058	13,9
	«Космонавтов» (периф.)	3,211	0,059	
№ 7, Матросова, 6д	«Панюковский» (центр)	3,297	0,06	16,0
	«Панюковский» (периф.)	3,315	0,064	
№ 8, ул. Кутузова, 92ж	«Сказочный» (центр)	3,347	0,064	16,4
№ 20, ул. 26 Бакинских комиссаров, 26д	«Одесский» (центр)	3,578	0,073	22,6
№ 9 ул. Чайковского, 7д	«Энтузиастов» (центр)	3,329	0,061	16,2
	«Энтузиастов» (периф.)	3,373	0,063	
	«Юбилейный» (центр)	3,376	0,064	
	«Юбилейный» (периф.)	3,394	0,069	
№ 3, ул. Сурикова, 54	«им. В.И. Сурикова» (центр)	3,657	0,076	25,5

Таблица 2
Статистические параметры исследуемых выборок березы повислой

№ и «адрес» пункта наблюдения	Наименование объекта	Объём выборки	\bar{X}	$\pm m$	$\pm \sigma$	V, %	Уровень изменчивости	P, %
Величина коэффициента асимметрии по пяти параметрам								
№ 1, ул. Минусинская, 14д	Плодово-ягодная станция	50	0,050	0,002	0,017	34,165	большой	4,832
	«Лесок»	50	0,052	0,004	0,031	50,412	большой	7,129
№ 21, ул. Красно- московская, 32д	«Серебряный»	100	0,060	0,003	0,028	47,385	большой	4,739
№ 5, ул. Быковского, 4д	«Космонавтов»	100	0,060	0,003	0,031	52,013	очень боль- шой	5,201
№ 7 ул. Матросова, 6д	«Панюковский»	100	0,062	0,004	0,038	61,916	очень боль- шой	6,192
№ 8, ул. Кутузова, 92ж	«Сказочный»	50	0,064	0,003	0,018	28,265	большой	3,997
№ 9 ул. Чайковского, 7д	«Энтузиастов»	100	0,062	0,004	0,042	67,388	очень боль- шой	6,739
	«Юбилейный»	100	0,060	0,005	0,048	72,708	очень боль- шой	7,271
№ 20, ул. 26 Бакинских комиссаров, 26д	«Одесский»	50	0,073	0,005	0,032	44,053	большой	6,230
№ 3 ул. Сурикова, 54	им. В. И. Сурикова	100	0,075	0,003	0,034	47,068	большой	4,707
Показатель асимметричности по площади половинок листа								
№ 1, ул. Минусинская, 14д	Плодово-ягодная станция	50	9,220	0,751	5,309	62,752	очень боль- шой	8,874
	«Лесок»	50	9,880	0,490	4,901	44,636	большой	4,464
№ 21, ул. Красно- московская, 32д	«Серебряный»	100	10,65	0,755	7,552	70,810	очень боль- шой	7,081
№ 5, ул. Быковского, 4д	«Космонавтов»	100	10,19	0,568	5,681	55,748	очень боль- шой	5,575
№ 7 ул. Матросова, 6д	«Панюковский»	100	10,93	0,719	7,189	68,729	очень боль- шой	6,873
№ 8, ул. Кутузова, 92ж	«Сказочный»	50	11,20	0,370	2,616	23,359	большой	3,303
№ 9 ул. Чайковского, 7д	«Энтузиастов»	100	11,23	0,605	6,053	53,877	очень боль- шой	5,388
	«Юбилейный»	100	11,46	0,770	7,703	64,191	очень боль- шой	6,419
№ 20, ул. 26 Бакинских комиссаров, 26д	«Одесский»	50	12,80	1,112	7,863	61,427	очень боль- шой	8,687
№ 3 ул. Сурикова, 54	им. В. И. Сурикова	100	13,38	0,811	8,111	60,150	очень боль- шой	6,015

Для определения статистической значимости расхождений в коэффициентах асимметрии, вычисленных на основе пяти морфологических характеристик листовых пластинок и показателя асимметрии, основанного на площади половинок листа, был выполнен анализ растений, произрастающих в центральной и периферийной частях сквера.

Результаты статистического анализа выявили отсутствие значимых различий между значениями, полученными для растений в центре и на периферии сквера. Критерий Стьюдента (t-критерий) показал, что эмпирическое значение t-статистики ($t_{\text{ф}}$) меньше табличного значения ($t_{\text{табл}}$). При уровне значимости $p = 0,01$ и числе степеней свободы $v = 98$, табличное значение t-критерия составляет 2,63 (согласно табл. 3 и 4), что свидетельствует об отсутствии статистически значимых различий.

В связи с существующей планировкой скверов, ни плотность зеленых насаждений по краям, ни размеры зон озеленения не позволяют снизить воздействие аэротехногенных факторов, что негативно сказывается

на состоянии листовых пластин березы повислой.

Необходимо отметить, что тенденция изменения асимметрии листовых пластинок прослеживается как при анализе коэффициентов, рассчитанных на основе пяти морфометрических параметров, так и при оценке асимметрии, определяемой по площади полулистьев. Данный факт подтверждается исследованиями, аналогичными проведенным в области биоиндикации.

Результаты проведенного исследования показали, что минимальные отклонения в развитии ассимиляционного аппарата растений наблюдаются на контрольном участке, расположенном вблизи Плодово-ягодной станции, а также в сквере «Лесок», где уровень загрязнения атмосферного воздуха относительно низок. Значения коэффициента асимметрии, рассчитанные по пяти параметрам листовых пластинок, для растений, произрастающих на данных территориях, не превышают установленных допустимых пределов, что соответствует нормальным показателям развития.

Таблица 3

Оценка достоверности различий коэффициентов асимметрии по 5 параметрам листьев березы повислой для растений, произрастающих на периферии и в центре объекта

Расположение на объекте	Показатель асимметричности листовых пластин по площади листьев					m _{1,2}	t _φ
	n (количество листьев)	\bar{X}	±m	±σ	X ₁ –X ₂		
«Серебряный»							
в центре сквера	50	10,59	2,011	14,217			
на периферии	50	10,71	1,258	8,896			
					–0,150	2,396	–0,063
«Космонавтов»							
в центре сквера	50	10,07	0,767	5,423			
на периферии	50	10,31	0,840	5,939			
					–0,240	1,149	–0,209
«Панюковский»							
в центре сквера	50	10,87	0,900	6,364			
на периферии	50	10,99	1,133	8,014			
					–0,040	1,462	–0,027
«Энтузиастов»							
в центре сквера	50	11,08	0,704	4,975			
на периферии	50	11,38	1,008	7,131			
					–0,310	1,242	–0,250
«Юбилейный»							
в центре сквера	50	11,4	0,934	6,607			
на периферии	50	11,52	1,244	8,798			
					–0,480	1,572	–0,305

Таблица 4

Оценка достоверности различий показателя асимметричности по площади листьев березы повислой для растений, произрастающих на периферии и в центре объекта

Расположение на объекте	Показатель асимметричности листовых пластин по площади листьев					m _{1,2}	t _φ
	n (количество листьев)	\bar{X}	±m	±σ	X ₁ –X ₂		
«Серебряный»							
в центре сквера	50	10,59	2,011	14,217			
на периферии	50	10,71	1,258	8,896			
					–0,150	2,396	–0,063
«Космонавтов»							
в центре сквера	50	10,07	0,767	5,423			
на периферии	50	10,31	0,840	5,939			
					–0,240	1,149	–0,209
«Панюковский»							
в центре сквера	50	10,87	0,900	6,364			
на периферии	50	10,99	1,133	8,014			
					–0,040	1,462	–0,027
«Энтузиастов»							
в центре сквера	50	11,08	0,704	4,975			
на периферии	50	11,38	1,008	7,131			
					–0,310	1,242	–0,250
«Юбилейный»							
в центре сквера	50	11,4	0,934	6,607			
на периферии	50	11,52	1,244	8,798			
					–0,480	1,572	–0,305

Значения показателей асимметрии листовых пластинок березы повислой, произрастающей в скверах «Серебряный» и «Космонавтов», колеблются в пределах от 3,17 до 3,27, что свидетельствует о наличии стрессовых факторов окружающей среды и начальной стадии отклонения от нормального развития. В скверах «Энтузиастов», «Сказочный», «Юбилейный» и «Панюковский» показатели асимметрии листовых пластинок варьируются от 3,29 до 3,39, что соответствует умеренному уровню отклонения от нормы и ха-

рактеризует условия произрастания как не вполне благоприятные.

Наибольшая потеря устойчивости развития растений наблюдалась в пробах, взятых в скверах «Одесский» и «им. В. И. Сурикова». Здесь параметры асимметрии листовых пластинок достигали значений 3,58 и более, что указывает на критическое состояние окружающей среды. Важно подчеркнуть, что эта закономерность прослеживается при анализе асимметрии листьев обоими использованными способами (см. табл. 2).

Изучение одного и того же явления – флуктуирующей асимметрии листовых пластин – с помощью двух различных методик, дало возможность установить степень изменения асимметрии листьев березы повислой, произрастающей в различных районах Красноярск. Полученные данные были сопоставлены с уровнем техногенного воздействия, основываясь на информации со стационарных постов мониторинга.

На рис. 4 изображена зависимость между асимметрией листовых пластинок и интенсивностью техногенного загрязнения в городской среде. Данная зависимость представлена для двух равнозначных методик, при этом единицы измерения унифицированы.

В заключение, оба метода исследования, а именно метод В. М. Захарова и авторская разработка, позволяют описать процесс изменения асимметрии листовых пластин. Кроме того, они отражают тенденцию изменения этого процесса в условиях города в зависимости от степени загрязнения атмосферного воздуха.

Коэффициенты и параметры уравнения представлены в табл. 5.

Значения коэффициента детерминации R^2 находятся в диапазоне от 0,9488 до 0,9525, а значение критерия Фишера значительно выше табличного, что свидетельствует об адекватности выбранной модели для описания исследуемого процесса. Полученное уравнение множе-

ственной регрессии демонстрирует статистическую значимость. Определение границ различных типов условий произрастания растений выполняется по уравнению Y_2 , используя значения x , соответствующие границам уровней качества среды, согласно методике В. М. Захарова.

В табл. 6 отображены точки, где линии тренда пересекают условные границы, определяющие качество среды (по методике В. М. Захарова) и характеризующие типы условий произрастания растений (согласно предложенной методике).

Изменение асимметрии листовых пластин, зависящее от концентрации ИЗА4 (в долях ПДК для человека), характеризуется следующими показателями: Y_1 – асимметричность площади листовых половинок; Y_2 – коэффициент асимметрии по пяти параметрам листа; x – ИЗА4 (в долях ПДК).

Результаты проведенных исследований указывают на то, что береза повислая весьма чувствительна к воздействию городской среды, а коэффициенты асимметрии листовых пластин служат индикатором ее состояния и условий произрастания.

На основе полученных данных (рис. 4) и в соответствии с методикой В. М. Захарова, создана шкала для оценки условий произрастания растений, основанная на показателе асимметричности площади листовых пластин (табл. 7).

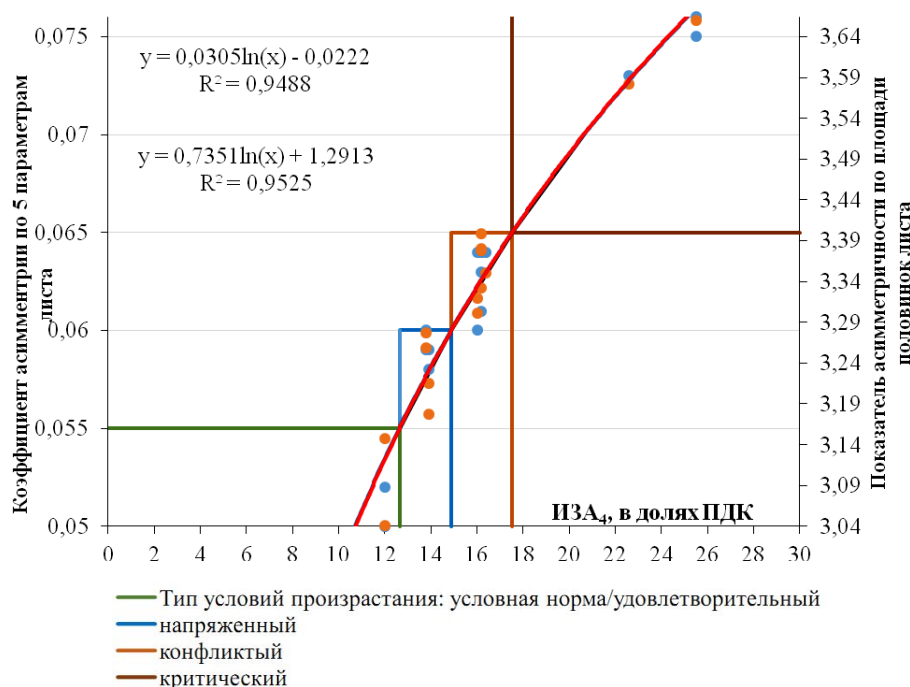


Рис. 4. Изменчивость асимметрии листовых пластин березы повислой от уровня техногенной нагрузки в условиях урбанизированной среды двумя эквивалентными методами исследования

Таблица 5
Коэффициенты уравнений и критерии адекватности модели

Процесс изменчивости асимметрии листовых пластин в зависимости от уровня загрязнения атмосферного воздуха (ИЗА ₄), в долях ПДК для человека, выраженный через:	a	b	R ²	F – критерий Фишера
Y_1 – коэффициент асимметрии по 5 параметрам листа	0,0305	–0,0222	0,9488	222,38
Y_2 – показатель асимметричности по площади половинок листовых пластин	0,7351	1,2913	0,9525	240,63

Примечание. R^2 – коэффициент детерминации; F – критерий Фишера.

Таблица 6
Границы уровней качества урбосреды

X – точки пересечения линий тренда с условными границами уровней качества среды		
Y ₁	x	Y ₂
0,055	12,56792	3,15195
0,06	14,80673	3,27245
0,065	17,44436	3,39296

Таблица 7
Оценка качества среды по показателям асимметрии листьев березы повислой (на примере г. Красноярск)

Коэффициент асимметрии по 5 параметрам листа [по методике В. М. Захарова]	Показатель асимметричности по площади половинок листа [по методике авторов]	Границы качества среды – ИЗА ₄ , в долях ПДК для человека	Тип условий произрастания растений [по методике авторов]	Оценка качества среды [по методике В. М. Захарова]
до 0,055	до 3,15	до 12,64	удовлетворительный	условно нормальное
0,056–0,06	3,16–3,27	12,65–14,89	напряженный	начальные отклонения от нормы
0,061–0,065	3,28–12,39	14,90–17,53	конфликтный	средний уровень отклонений от нормы
более 0,066	более 3,40	более 17,54	критический	существенный уровень отклонений от нормы/ критическое состояние

ВЫВОДЫ

Анализ условий произрастания показал, что на всех уровнях организации живых существ наблюдается реакция организмов на воздействие техногенных факторов городской среды. Изучение стабильности развития ассимиляционного аппарата исследуемых видов в условиях города позволяет сделать следующие выводы.

Наблюдается тенденция снижения стабильности развития, прямо пропорциональная увеличению техногенной нагрузки. Берёза повислая – наиболее чувствительна к техногенным условиям. Применяемые методы исследования достоверно отражают полученные зависимости.

Математическая модель, представляющая собой функцию взаимосвязи асимметрии листовых пластинок и уровня загрязнения воздуха, является инструментом прогнозирования. Уровень загрязнения воздуха (ИЗА₄, в долях ПДК) определяет тип условий произрастания растительности, что проявляется в изменчивости показателей асимметрии ассимиляционного аппарата. Показатели изменчивости листовых пластин отражают уровень загрязнения и, следовательно, предопределяют тип условий произрастания. В результате, полученные данные позволяют прогнозировать рост и развитие березы повислой на определенной территории, что позволяет принимать обоснованные решения по формированию структуры насаждений и выбору мероприятий по уходу.

Комбинирование коэффициентов и параметров асимметрии, рассчитанных различными методами, позволило разработать шкалу оценки качества среды и типа условий произрастания на основе асимметрии площади листовых пластин. Разработанная и апробированная методика биоиндикации, основанная на анализе асимметрии листовых пластин по соотношению площадей их половинок, адекватно отражает проис-

ходящие процессы и может быть рекомендована для экспресс-оценки качества городской среды в экологическом мониторинге. Применение данной методики и специального программного обеспечения значительно повышает точность результатов, сокращает сроки и стоимость исследований.

Проведённые исследования дают возможность судить о степени загрязнённости окружающей среды, анализируя асимметрию её листьев, а применение метода, основанного на оценке асимметрии площади листовых половинок, существенно ускоряет процесс и увеличивает точность получаемых данных. Этот вид подходит для использования в качестве индикатора, поскольку он надёжно определяет четыре типа мест произрастания, которые характеризуют состояние окружающей среды под воздействием человеческой деятельности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Авдеева Е. В. Зеленые насаждения в мониторинге окружающей среды крупного промышленного города: (на примере г. Красноярск) : автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Красноярск, 2008. 30 с.
2. Авдеева Е. В. Зеленые насаждения в мониторинге окружающей среды крупного промышленного города: на примере г. Красноярск : монография. Красноярск : СибГТУ, 2008. 219 с.
3. Авдеева Е. В., Надемянов В. Ф. Оценка стабильности развития березы повислой (*betula pendula*) в скверах г. Красноярск // Технологии и оборудование садово-паркового и ландшафтного строительства. Красноярск : СибГТУ, 2013. С. 11–14.
4. Авдеева Е. В., Кухар И. В. Роль скверов в развитии системы озеленения города Красноярск // Плодоводство, семеноводство, интродукция древесных растений : материалы XXI Международной научной конференции. Красноярск, 2018. Т. 21. С. 117–120.

5. Артемьев О. С. Методы таксации городских насаждений : монография. Красноярск : СибГТУ, 2003. 100 с.

6. Ветчинникова Л. В. Береза: вопросы изменчивости (морфо-физиологические и биохимические аспекты). Москва : Наука, 2004. 183 с.

7. Захаров В. М., Яблоков А. В. Анализ морфологической изменчивости как метод оценки состояния природных популяций // Новые методы изучения почвенных животных в радиоэкологических исследованиях. Москва : Наука, 1985. С. 176–185.

8. Здоровье среды: практика оценки / В. М. Захаров, А. Т. Чубинишвили, С. Г. Дмитриев [и др.]. Москва, 2000. 320 с.

9. Кухар И. В. Особенности роста березы повислой (*Betula pendula* Roth.) и липы мелколистной (*Liriodendron tulipifera* L.) в условиях урбанизированной среды (на примере скверов г. Красноярска) : автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Красноярск, 2023. 21 с.

10. Нефедова Т. А. *Betula pendula* Roth. как объект экологического мониторинга городской среды : автореф. дис. ... канд. биол. наук. Москва, 2003. 21 с.

11. Петункина Л. О., Сарсацкая А. С. Береза повислая, как индикатор городской среды // Вестник Кемеровского государственного университета, 2015. № 4 (64). Т. 3. С. 68–71.

12. Якубов Х. Г. Экологический мониторинг зеленых насаждений Москвы. Москва : ООО «Стагирит-Н», 2005. 264 с.

13. Avdeeva E., Kuhar I., Chernikova K. The Current State of the Landscaping System of a Large Industrial Center (for Example, the City of Krasnoyarsk). Published under licence by IOP Publishing Ltd. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1079, Chapter 3. 2021 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1079 042048. Doi:10.1088/1757-899X/1079/4/042048.

14. Jäger E. Möglichkeiten der Prognose synanthroper Pflanzenausbreitungen. Flora 180: 1988. Pp. 101–131. DOI: 10.1016/S0367-2530(17)30302-X.

15. Kozlov M. V., Wisley B. J., Koricheva J., Haukioja E. Fluctuating symmetry of birch leaves increases under pollution impact // Journal of Applied Ecology, 1996. Vol. 33. Pp. 1489–1495.

16. Palmer A. R. Waltzing with asymmetry // Bioscience. 1996, 46. Pp. 518–532. Doi: 10.2307/1312930.

17. Van Valen L. A study of fluctuating asymmetry // Evolution, 1962. Vol. 16, no. 2. Pp. 125–142. URL: <http://dx.doi.org/10.2307/2406192>.

18. Kuhar I., Avdeeva E. Research and Analysis of the State and Development of Woody Plants in The Squares of the City of Krasnoyarsk Published under licence by IOP Publishing Ltd IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 1079, Chapter 4. 2021 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1079 052003. DOI: 10.1088/1757-899X/1079/5/052003.

19. Епринцев С. А., Куролап С. А. Оценка природного каркаса крупных урбанизированных территорий Воронежской области как фактора экологической безопасности // Медико-экологическая диагностика состояния окружающей среды города Воронежа : сборник научных статей. Воронеж : Научная книга, 2017. С. 159–167.

20. Волкодаева М. В., Володина Я. А. О методах контроля состояния зеленых насаждений урбанизированных территорий // Системы контроля окружающей среды. 2023. № 4 (54). С. 65–70. DOI: 10.33075/2220-5861-2023-4-65-70.

21. Клепиков О. В., Самойлов А. С., Ушаков И. Б., Попов В. И., Куролап С. А. Комплексная оценка состояния окружающей среды промышленного города // Гигиена и санитария. 2018; 97(8): 686–692. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2018-97-8-686-692>.

22. Кухар И. В., Авдеева Е. В., Иванов Д. В., Черникова К. В. Дендроиндикация древесных растений в урбанизированной среде // Проблемы озеленения крупных городов : сборник материалов XXII научно-практического форума. Москва, 2023. С. 109–112.

23. Kukhar I. V., Ivanov D. V. To the question of inventory of landscape objects in Krasnoyarsk // Технологии и оборудование садово-паркового и ландшафтного строительства : сборник статей X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Красноярск, 2023. С. 84–97.

24. Аккумуляция техногенной пыли березняками разнотравными в зоне воздействия известняковых карьеров г. Красноярска / Л. Н. Скрипальщикова, В. В. Стасова, А. И. Татаринцев, М. А. Пляшечник // Вестник КрасГАУ. 2012. № 10(73). С. 96–100.

25. Безруких В. А., Авдеева Е. В., Селенина Е. А. Обоснование видового состава древесных растений с учетом дендроклиматического районирования территории Сибирского города и его пригородной зоны (на примере города Красноярска) // Хвойные бореальной зоны. 2020. Т. 38, № 5-6. С. 225–236.

26. Кухар И. В. Особенности роста березы повислой (*Betula pendula* Roth.) и липы мелколистной (*Liriodendron tulipifera* L.) в условиях урбанизированной среды (на примере скверов г. Красноярска) : дис. ... канд. с.-х. наук. Красноярск, 2023. 276 с.

REFERENCES

1. Avdeeva E. V. Zelenye nasazhdeniya v monitoringe okruzhayushej sredy krupnogo promyshlennogo goroda (na primere g. Krasnoyarska) : avtoref. dis. ... d-ra s.-h. nauk. Krasnoyarsk, 2008. 30 s.

2. Avdeeva E. V. Zelenye nasazhdeniya v monitoringe okruzhayushej sredy krupnogo promyshlennogo goroda: na primere g. Krasnoyarska : monografiya. Krasnoyarsk : SibGTU, 2008. 219 s.

3. Avdeeva E. V., Nademyanov V. F. Ocenka stabilnosti razvitiya berezy povisloy (*Betula pendula*) v skverah g. Krasnoyarska // Tehnologii i oborudovanie sadovoparkovogo i landshaftnogo stroitelstva. Krasnoyarsk : SibGTU, 2013. S. 11–14.

4. Avdeeva E. V., Kuhar I. V. Rol skverov v razvitiisistemy ozeleneniya goroda Krasnoyarska // Plodovodstvo, semenovodstvo, introdukcija drevesnyh rastenij : materialy XXI Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii. Krasnoyarsk, 2018. T. 21. S. 117–120.

5. Artemev O. S. Metody taksacii gorodskih nasazhdenij : monografiya. Krasnoyarsk : SibGTU, 2003. 100 s.

6. Vetchinnikova L. B. Bereza: voprosy izmenchivosti (morfo-fiziologicheskie i biokhimicheskie aspekty). Moskva : Nauka, 2004. 183 s.

7. Zaharov V. M., Yablokov A. V. Analiz morfologicheskoy izmenchivosti kak metod ocenki sostoyaniya prirodnih populyacij // *Novye metody izucheniya pochvennyh zhivotnyh v radioekologicheskikh issledovaniyakh*. Moskva : Nauka, 1985. S. 176–185.
8. Zdorove sredy: praktika ocenki / V. M. Zaharov, A. T. Chubinishvili, S. G. Dmitriev [i dr.]. Moskva, 2000. 320 s.
9. Kuhar I. V. Osobennosti rosta berezy povisloy (betula pendula roth.) i lipy melkolistnoj (tilia cordata mill.) v usloviyakh urbanizirovannoy sredy (na primere skverov g. Krasnoyarska) : avtoref. dis. ... kand. s.h. nauk. Krasnoyarsk, 2023. 21 s.
10. Nefedova T. A. Betula pendula Roth. kak obekt ekologicheskogo monitoringa gorodskoj sredy : avtoref. dis. ...kand. biol. nauk. Moskva, 2003. 21 s.
11. Petunkina L. O., Sarsackaya A. S. Bereza povislaya, kak indikator gorodskoj sredy // *Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015. № 4 (64). T. 3. S. 68–71.
12. Yakubov H. G. Ekologicheskij monitoring zelenyh nasazhdenij Moskvy. Moskva : OOO «StagiritN», 2005. 264 s.
13. Avdeeva E., Kuhar I., Chernikova K. The Current State of the Landscaping System of a Large Industrial Center (for Example, the City of Krasnoyarsk). Published under licence by IOP Publishing Ltd. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 1079, Chapter 3. 2021 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1079 042048. Doi:10.1088/1757-899X/1079/4/042048.
14. Jager E. Moglichkeiten der Prognose synanthroper Pflanzenausbreitungen. *Flora* 180: 1988. Rr. 101–131. DOI: 10.1016/S0367-2530(17)30302-X.
15. Kozlov M. V., Wisley B. J., Koricheva J., Haukioja E. Fluctuating symmetry of birch leaves increases under pollution impact // *Journal of Applied Ecology*, 1996. Vol. 33. Rr. 1489–1495.
16. Palmer A. R. Waltzing with asymmetry // *Bioscience*. 1996, 46. Rr. 518–532. Doi: 10.2307/1312930.
17. Van Valen L. A study of fluctuating asymmetry // *Evolution*, 1962. Vol. 16, no. 2. Rr. 125–142. URL: <http://dx.doi.org/10.2307/2406192>.
18. Kuhar I., Avdeeva E. Research and Analysis of the State and Development of Woody Plants in The Squares of the City of Krasnoyarsk Published under licence by IOP Publishing Ltd IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 1079, Chapter 4. 2021 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1079 052003. DOI: 10.1088/1757-899X/1079/5/052003.
19. Eprincev S. A., Kurolap S. A. Ocenka prirodnogo karkasa krupnyh urbanizirovannyh territorij Voronezhskoj oblasti kak faktora ekologicheskoy bezopasnosti // *Mediko-ekologicheskaya diagnostika sostoyaniya okruzhayushej sredy goroda Voronezha : sbornik nauchnyh statej*. Voronezh : Nauchnaya kniga, 2017. S. 159–167.
20. Volkodaeva M. V., Volodina Ya. A. O metodah kontrolya sostoyaniya zelenyh nasazhdenij urbanizirovannyh territorij // *Sistemy kontrolya okruzhayushej sredy*. 2023. № 4 (54). S. 65–70. DOI: 10.33075/2220-5861-2023-4-65-70.
21. Klepikov O. V., Samojlov A. S., Ushakov I. B., Popov V. I., Kurolap S. A. Kompleksnaya ocenka sostoyaniya okruzhayushej sredy promyshlennogo goroda // *Gigiena i sanitariya*. 2018; 97(8): 686–692. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2018-97-8-686-692>.
22. Kuhar I. V., Avdeeva E. V., Ivanov D. V., Chernikova K. V. Dendroindikaciya drevesnyh rastenij v urbanizirovannoy srede // *Problemy ozeleneniya krupnyh gorodov : sbornik materialov XXII nauchnoprakticheskogo foruma*. Moskva, 2023. S. 109–112.
23. Kukhar I. V., Ivanov D. V. To the question of inventory of landscape objects in Krasnoyarsk // *Tehnologii i oborudovanie sadovo-parkovogo i landshaftnogo stroitelstva : sbornik statej X Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem*. Krasnoyarsk, 2023. S. 84–97.
24. Akkumulyaciya tehnogennoj pyli bereznyakami raznotravnyimi v zone vozdejstviya izvestnyakovyh karerov g. Krasnoyarska / L. N. Skripalshikova, V. V. Stasova, A. I. Tatarincev, M. A. Plyashechnik // *Vestnik KrasGAU*. 2012. № 10(73). S. 96–100.
25. Bezrukih V. A. Avdeeva E. V., Selenina E. A. Obosnovanie vidovogo sostava drevesnyh rastenij s uchetom dendroklimaticheskogo rajonirovaniya territorii Sibirskogo goroda i ego prigorodnoj zony (na primere goroda Krasnoyarska) // *Hvojnye borealnoj zony*. 2020. T. 38, № 5-6. S. 225–236.
26. Kuhar I. V. Osobennosti rosta berezy povisloy (betula pendula roth.) i lipy melkolistnoj (tilia cordata mill.) v usloviyakh urbanizirovannoy sredy (na primere skverov g. Krasnoyarska) : dis. ... kand. s.-h. nauk. Krasnoyarsk, 2023. 276 s.

© Авдеева Е. В., Кухар И. В., 2025

Поступила в редакцию 02.06.2025
Принята к печати 04.08.2025