

УДК 574.21

## КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ УРБОЭКОСИСТЕМЫ Г. СЛУЦКА

Т. А. БОНИНА<sup>1)</sup>, Ж. Э. МАЗЕЦ<sup>1)</sup>, Н. С. ПРОХОЦКАЯ<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский государственный педагогический университет имени Максима Танка,  
ул. Советская, 18, 220030, г. Минск, Беларусь

В исследовании приведены результаты комплексной оценки экологического состояния урбоэкосистемы г. Слуцка. Проведен анализ степени рекреационной нарушенности и степени устойчивости зеленых насаждений в условиях городской среды с разным уровнем антропогенной нагрузки: в пригородной зоне (контроль), центральной зоне Парка культуры и отдыха и на территории с высокой антропогенной нагрузкой среды, который находится вблизи промышленных предприятий г. Слуцка. Установлена низкая степень рекреационной нарушенности в контроле и в парковой зоне, тогда как в зоне промышленных предприятий состояние окружающей среды оценивается как угрожающее. Выявлена видоспецифическая реакция морфометрических изменений листовых пластинок *Betula pendula* Roth и *Tilia cordata* Mill. при использовании метода флуктуирующей асимметрии, отражающая особенности экологического состояния отдельных компонентов урбоэкоистемы. Отмечено, что древостой Парка культуры и отдыха находится в удовлетворительном состоянии и функционален как санитарно-защитная зона в условиях городской среды. Однако на участке, расположенном вблизи промышленных предприятий, состояние биоиндикаторов оценивается как критическое и позволяет предположить, что в данном районе достаточно высокий уровень загрязнения среды вредными веществами. В ходе детального изучения видоспецифических отличий морфометрических показателей *Betula pendula* и *Tilia cordata* выявлено, что наиболее варибельным показателем оказался угол между главной жилкой и второй от основания листа жилкой второго порядка. Именно здесь отмечаются четкие специфические различия между *Betula pendula* и *Tilia cordata*. Так, по этому показателю у *Betula pendula* установлен средний уровень в контроле и повышенный в условиях парка и промышленной зоны (до IV уровня), тогда как у *Tilia cordata* в контроле выявлен самый низкий уровень, а при повышении антропогенной нагрузки достигал критических значений и максимума в промышленной зоне. Следовательно, целесообразна разработка относительного интегрального показателя флуктуирующей асимметрии в сравнении с контролем для определенного вида растений. Таким образом, можно рассматривать *Tilia cordata* как эффективный биоиндикатор состояния урбоэкоистем. Полученные результаты позволяют рекомендовать экологическим службам г. Слуцка пересмотреть подходы к озеленению территории вокруг промышленных предприятий с учетом нарастающей антропогенной нагрузки.

**Ключевые слова:** *Betula pendula* Roth; *Tilia cordata* Mill.; флуктуирующая асимметрия; степень деградации насаждений.

### Образец цитирования:

Бонина ТА, Мазец ЖЭ, Прохоцкая НС. Комплексная оценка экологического состояния урбоэкоистемы г. Слуцка. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология.* 2023;2:40–47.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-2-40-47>

### For citation:

Bonina TA, Mazets ZhE, Prakhotskaya NS. Comprehensive assessment of the urban ecosystem ecological state of the city of Slutsk. *Journal of the Belarusian State University. Ecology.* 2023;2:40–47. Russian.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2023-2-40-47>

### Авторы:

**Татьяна Александровна Бонина** – кандидат химических наук, доцент; доцент кафедры общей биологии и ботаники.  
**Жанна Эмануиловна Мазец** – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры общей биологии и ботаники.  
**Надежда Сергеевна Прохоцкая** – студентка факультета естествознания.

### Authors:

**Tatsiana A. Bonina**, PhD (chemistry), docent; associate professor at the department of general biology and botany.  
[tatbonina@gmail.com](mailto:tatbonina@gmail.com)  
**Zhanna E. Mazets**, PhD (biology), docent; associate professor at the department of general biology and botany.  
[zhannamazets@mail.ru](mailto:zhannamazets@mail.ru)  
**Nadezhda S. Prakhotskaya**, student at the faculty of natural science.  
[nadyaprophotskaya@mail.ru](mailto:nadyaprophotskaya@mail.ru)

## COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE URBAN ECOSYSTEM ECOLOGICAL STATE OF THE CITY OF SLUTSK

T. A. BONINA<sup>a</sup>, Zh. E. MAZETS<sup>a</sup>, N. S. PRAKHOTSKAYA<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Belarusian State Pedagogical University named after Maxim Tank  
18 Saveckaja Street, Minsk 220030, Belarus

Corresponding author: T. A. Bonina (tatbonina@gmail.com)

The results of a comprehensive assessment of the Slutsk urban ecosystem ecological state have been discussed in the article. The analysis of the recreational disturbance degree and the grade of green planting's resistance in the urban environment with different levels of anthropogenic load was carried out: in the suburban area (control), the central zone of the Park of Culture and Recreation and in the territory with a high anthropogenic load of the environment, which is located near industrial enterprises of Slutsk city. A low degree of recreational disturbance has been established in the control and in the park zone, while in the zone of industrial enterprises the state of the environment was assessed as threatening. A species-specific reaction of morphometric changes in the leaf blades of *Betula pendula* Roth and *Tilia cordata* Mill. has been revealed using the fluctuating asymmetry method, which reflects the features of the individual components ecological state of the urban ecosystem. It was noted that the tree stand of the Park of Culture and Leisure is in a satisfactory condition and is functional as a sanitary protection zone in an urban environment. However, at the site located near industrial enterprises, the state of bioindicators is assessed as critical and suggests that in this area there is a rather high level of environmental pollution with harmful substances. In the course of a detailed study of species-specific differences in the morphometric parameters of *Betula pendula* and *Tilia cordata*, it has been revealed that the most variable indicator was the angle between the main vein and the second-order vein from the base of the leaf. It is here that there are clear specific differences between *Betula pendula* and *Tilia cordata*. Thus according to this indicator *Betula pendula* had an average level in the control and increased in the conditions of the park and the industrial zone (up to level IV), while *Tilia cordata* had the lowest level in the control, and with an increase in anthropogenic load it reached critical values and a maximum was in the industrial zone. It is noted that it is expedient to develop a relative integral indicator of fluctuating asymmetry in comparison with the control for a certain plant species. Thus, *Tilia cordata* can be considered as an effective bioindicator of the urban ecosystems' state. The obtained results make it possible to recommend the environmental services of the Slutsk city to reconsider approaches to greening the area around industrial enterprises, considering the growing anthropogenic load.

**Keywords:** *Betula pendula* Roth; *Tilia cordata* Mill.; fluctuating asymmetry; degree of plantation degradation.

### Введение

Процесс урбанизации в настоящее время связан с рядом экологических проблем и необходимостью объективной оценки состояния городской среды для обеспечения качества жизни и безопасности жизнедеятельности человека. Любая урбанизированная территория характеризуется повышенной антропогенной нагрузкой на окружающую среду. При этом развитие инфраструктуры города закономерно сопровождается ростом загрязнения атмосферного воздуха и почвы вредными для здоровья человека веществами. Обязательным элементом градостроительства являются садово-парковые территории, которые выполняют функцию санитарно-защитных зон и формируют «экологический каркас» в условиях городской среды. Зеленые насаждения не только создают привлекательный ландшафт жилых районов, но и улучшают состояние атмосферного воздуха, способствуют снижению шума, гармонизируют жизнь горожан [1]. В связи с этим важное значение имеет проведение постоянного мониторинга экологического состояния этих территорий для обеспечения поддержания возложенных на них функций и задач в условиях нарастающих антропогенных нагрузок.

Следует отметить, что данный вопрос достаточно хорошо освещен в научной литературе. Предметом изучения, как правило, являются особенности экологического состояния рекреационных зон крупных городов [2–8]. Результаты подобных исследований являются индивидуальными и специфичны для конкретных урбоэкосистем. Городская среда динамична и микроклимат отдельно взятой территории формируется под воздействием комплекса абиотических и биотических факторов, имеющих индивидуальные особенности, связанные с уникальностью конкретной инфраструктуры в масштабах города.

Наиболее неблагоприятное состояние зеленых насаждений фиксируется вблизи магистралей и действующих промышленных предприятий, что обусловлено, как правило, выбросами в окружающую среду вредных веществ в результате деятельности предприятий, а также использованием противогололедных реагентов. При этом происходит снижение адаптационных способностей растений, нарушение их развития и, как следствие, изменяется морфология листовых пластинок [7; 8].

Поэтому проведение мониторинговых исследований парков и скверов, состояния зеленых насаждений рядом с промышленными предприятиями с целью минимизации негативных воздействий является актуальной проблемой, в том числе и в рекреационных зонах небольших городов.

В настоящее время, наряду с физическими и химическими методами оценки качества среды, используются методы биоиндикации. Они позволяют выявить степень антропогенной нагрузки на популяционном и организменном уровнях по ответной реакции живых организмов, в частности по изменениям морфологии различных видов растений и отдельных органов. По литературным данным, достаточно информативным и достоверным показателем ситуации в городской среде является состояние листьев древесных растений. Установлено, что характер морфометрических изменений многолетних насаждений коррелирует с химической природой загрязняющего вещества на исследуемой территории. Игнорирование данного процесса может привести к утрате или снижению эффективности рекреационных и средообразующих функций зеленых насаждений городской среды [9–11].

Цель исследования – комплексная оценка состояния древесных насаждений как биоиндикаторов окружающей среды г. Слуцка. В настоящее время на территории города находится несколько крупных заводов, комбинатов и фабрик. Доминирующим фактором загрязнения является интенсивно растущая автотранспортная нагрузка и расширение автомобильных магистралей.

В центре города расположен Парк культуры и отдыха, представляющий крупную озелененную территорию, основным функциональным назначением которой является рекреация и отдых. Но вместе с тем зеленые насаждения на территории парка, прежде всего лиственные деревья, имеют важную экологическую значимость и являются ядром «зеленого каркаса», выполняющего функцию санитарно-защитной зоны градостроительной инфраструктуры.

### Материалы и методы исследования

Сбор материала и полевые исследования проводились с июля по август 2022 г. в урбозкосистемах г. Слуцка и пригородной зоны с разным уровнем антропогенного воздействия. В качестве контроля был выбран участок № 1 с низкой антропогенной нагрузкой среды, расположенный в пригородной зоне в д. Новодворцы, которая находится в 3 км от г. Слуцка. Участок № 2 расположен в центральной зоне Парка культуры и отдыха и участок № 3 («промзона» – зеленые насаждения на территории с высокой антропогенной нагрузкой среды), который находится вблизи предприятий: ОАО «Слуцкий сыродельный комбинат», РУП «Слуцкие пояса» и ОАО «Слуцкий сахарорафинадный комбинат» (рис. 1).



Рис. 1. Точки сбора материала: а – с низкой антропогенной нагрузкой (№ 1), б – парковая зона (№ 2), в – «промзона» (№ 3)

Fig. 1. Points of material collection: a – with low anthropogenic load (№ 1), b – park area (№ 2), c – «industrial zone» (№ 3)

При анализе степени деградации древостоя исследуемых участков использовали метод В. А. Алексеева [12]. Оценку жизненного состояния деревьев проводили на пробных площадках, размер которых составил 0,5 га. При этом в парковой зоне было проанализировано три площадки, а на участке № 3 площадка охватила всю доступную территорию с древостоем.

Древесным растениям в зависимости от общего состояния морфо-анатомических параметров присваивали определенный балл: здоровые – 0,9–1,0 балл; поврежденные – 0,7–0,89; сильно поврежденные – 0,4–0,69; отмирающие – 0,1–0,39; сухостой – 0–0,09. При этом учитывалось наличие или отсутствие отклонений в строении ствола, кроны, ветвей и побегов, доля сухих ветвей в кроне, целостность и состояние коры, а также пораженность деревьев вредителями и другими негативными природными и антропогенными факторами среды.

Расчет индекса состояния (жизненности) древостоя осуществляли по формуле:

$$I_n = \frac{n_1 + 0,7n_2 + 0,4n_3 + 0,1n_4}{n}, \quad (1)$$

где  $n_1, n_2, n_3, n_4$  – число здоровых, поврежденных, сильно поврежденных, отмирающих деревьев соответственно;  $n$  – общее число деревьев (включая сухостой) [12].



Оценку состояния окружающей среды проводили по вариации флуктуирующей асимметрии (ФА) листовых пластинок *Betula pendula* Roth и *Tilia cordata* Mill. Согласно научным данным, показатель ФА чувствителен к степени загрязнения вредными веществами среды обитания организма [13].

Исследования проводили в период полной сформированности листовых пластинок в конце вегетационного сезона. Сбор биологического материала проводили согласно методическим рекомендациям В. М. Захарова [13]. Листья собирали с деревьев, находящихся в средневозрастном онтогенетическом состоянии, в пределах нижней части кроны вокруг дерева на уровне поднятой руки с укороченных побегов. Из каждой зоны было взято равномерно с 4–5 деревьев по 20–25 листьев. С каждой точки сбора в итоге было собрано по 100 листьев *Betula pendula* и *Tilia cordata*. Уровень стабильности развития растений оценивался по величине флуктуирующей асимметрии пяти признаков листа, характеризующих стабильность формообразования листовой пластинки в онтогенезе: 1 – ширина левой и правой половинок листа (от границы центральной жилки до края листа); 2 – длина жилки второго порядка, второй от основания листа; 3 – расстояние между основаниями первой и второй жилок второго порядка; 4 – расстояние между концами этих же жилок; 5 – угол между главной жилкой и второй от основания листа жилкой второго порядка [13].

Все измерения проводились в миллиметрах [14]. Величина ФА определялась по формуле:

$$\text{ФА ср.} = \frac{1}{m \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{(L_{ij} - R_{ij})}{(L_{ij} + R_{ij})}, \quad (2)$$

где  $L_{ij}$  и  $R_{ij}$  – значение  $j$ -го признака у  $i$ -го листа соответственно слева и справа от плоскости симметрии. При этом  $m = 5$  (число признаков), а  $n = 100$  (количество листовых пластинок).

Для оценки качества среды использовалась пятибалльная шкала степени нарушения стабильности развития, разработанная В. М. Захаровым для *Betula pendula* [13].

Оценку амплитуды изменчивости изучаемых морфометрических признаков для каждой из сторон листовой пластинки определяли по коэффициенту вариации ( $C$ ), выраженную в % [15; 16]:

$$C = \sigma * 100 / M_{\text{ср}}, \quad (3)$$

где  $\sigma$  – среднее квадратичное отклонение, а  $M_{\text{ср}}$  – среднее значение по данному признаку.

Статистическую обработку данных проводили с помощью программы *Microsoft Excel*.

## Результаты исследования и их обсуждение

С целью первичной комплексной оценки экологического состояния Парка культуры и отдыха г. Слуцка как основной ландшафтно-рекреационной зоны города и озелененной территории общего пользования был осуществлен анализ степени рекреационной нарушенности на основе следующих параметров: степень вытоптанности напочвенного покрова (доля площади с обнаженной почвой или грунтом, %); количество пней спиленных и срубленных деревьев (шт./га); поврежденность древесной растительности (% поврежденных деревьев от их общего количества); оценка степени деградации древесных видов растений [17; 18].

В ходе исследования было выявлено, что степень вытоптанности напочвенного покрова составила 3 %. При этом было зафиксировано отсутствие спиленных и срубленных деревьев и слабо выраженная дорожно-тропиночная сеть.

Коэффициент степени деградации зеленых насаждений на территории парка (участок № 2), по В. А. Алексееву, составил 0,9. При этом в пригородной зоне в д. Новодворцы (участок № 1) с низкой антропогенной нагрузкой среды коэффициент составил 1,0 балл, а в «промзоне» (участок № 3) – 0,54 балла. Полученные результаты позволяют сделать вывод о низкой степени рекреационной нарушенности в контроле и урбозкосистеме парковой зоны, поскольку полученные коэффициенты соответствует здоровому жизненному состоянию древостоя, тогда как в зоне промышленных предприятий состояние окружающей среды оценивается как угрожающее. Следует отметить, что в структуре парка отсутствуют традиционные зоны аттракционов, спортивных площадок и другие территории для активного отдыха, что возможно и объясняет низкую рекреационную нагрузку.

На втором этапе исследования нами был проведен более детальный анализ экологического состояния и степени устойчивости зеленых насаждений исследуемых участков к вредным веществам антропогенного происхождения в условиях городской среды.

Уровень загрязнения среды устанавливали с помощью интегрального показателя величины флуктуирующей асимметрии листовых пластинок *Betula pendula* и *Tilia cordata*. По результатам исследования было выяснено, что ФА листовых пластинок *Betula pendula* и *Tilia cordata* на участке № 1 соответствует условно нормальному качеству среды (рис. 2 и 3) и позволяет сделать вывод о минимальной антропогенной нагрузке на контрольном участке. Сопоставимые значение с незначительным повышением интегральных показателей были получены для участка № 2 в центральной зоне парка. Следовательно,

древостой Парка культуры и отдыха находится в удовлетворительном состоянии и функционален как санитарно-защитная зона в условиях городской среды.

Наиболее высокие показатели ФА древесных насаждений наблюдались на участке № 3, расположенном вблизи промышленных предприятий. Состояние биоиндикаторов оценивается как критическое и позволяет предположить, что в данном районе достаточно высокий уровень загрязнения среды вредными веществами.

Следует отметить, что интегральный показатель флуктуирующей асимметрии листовых пластинок *Tilia cordata* во всех точках сбора был ниже, чем у *Betula pendula* (рис. 2, 3) и, согласно шкале В. М. Захарова, разработанной для *Betula pendula*, на участке № 3 обсуждаемый параметр у *Tilia cordata* соответствует среднему уровню. В связи с этим был определен относительный видоспецифичный уровень превышения показателей на исследуемых участках по сравнению с контрольным.

Таким образом, в точках № 2 и 3 процент превышения ФА относительно контрольных показателей у *Betula pendula* составил 10 и 75 % соответственно, тогда как у *Tilia cordata* этот процент был заметно выше – 42,9 и 114,3 %. Наиболее высокая степень отклонения ФА в сравнении с контрольным участком была выявлена у *Tilia cordata*, что согласуется с научными данными, исходя из которых *Tilia cordata* является наиболее чувствительным фитоиндикатором по отношению к загрязнению тяжелыми металлами городской среды [16].

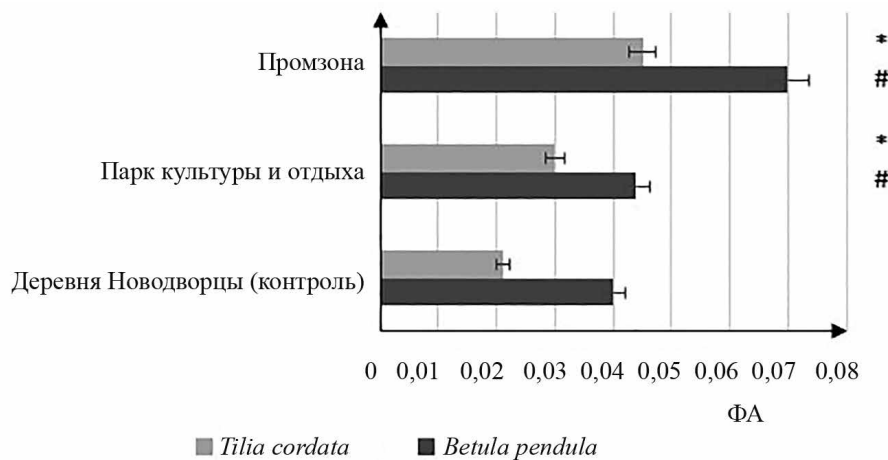


Рис. 2. Интегральный показатель флуктуирующей асимметрии листовых пластинок *Betula pendula* Roth и *Tilia cordata* Mill. в точках сбора

Примечание. \* Достоверно при  $p \leq 0,05$  по сравнению с контролем *Tilia cordata* Mill.; # достоверно при  $p \leq 0,05$  по сравнению с контролем *Betula pendula* Roth

Fig. 2. Integral indicator of fluctuating asymmetry of leaf blades of *Betula pendula* and *Tilia cordata* Mill. at collection points

Note. \* Significant at  $p \leq 0.05$  compared to *Tilia cordata* Mill. control; # significant at  $p \leq 0.05$  compared to control *Betula pendula* Roth

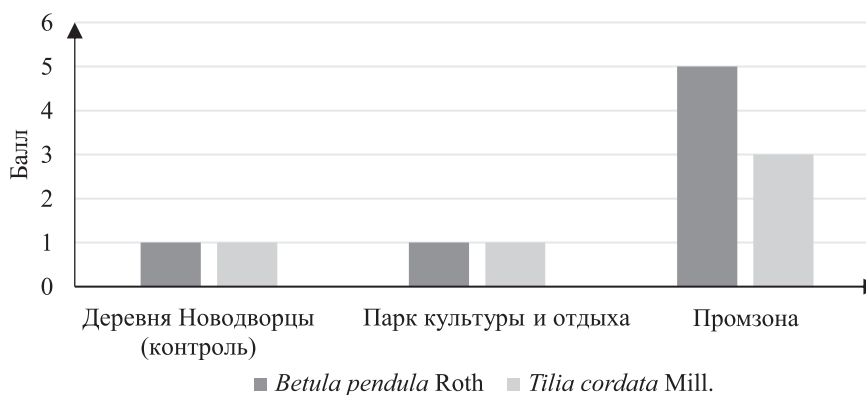


Рис. 3. Варьирование интегрального показателя флуктуирующей асимметрии листовых пластинок *Betula pendula* и *Tilia cordata* в точках сбора по балльной шкале

Fig. 3. Variation of the integral index of the fluctuating asymmetry of leaf blades of *Betula pendula* and *Tilia cordata* at collection points on a point scale

Полученные результаты указывают на необходимость учета видовой специфичности листовых пластинок при использовании метода флуктуирующей асимметрии и применения 5-балльной шкалы, разработанной изначально для *Betula pendula*. Следует отметить, что целесообразна разработка относительного интегрального показателя в сравнении с контролем для определенного вида растений. Подтверждение предварительных выводов и внесение конкретных корректировок в апробированную методику требует дополнительных исследований.

Для более детального изучения видоспецифических отличий морфометрических показателей *Betula pendula* и *Tilia cordata* был проведен сравнительный анализ на основе определения коэффициента вариации для каждого из 5 измеряемых признаков листовых пластинок (табл. 1, 2). В ходе анализа выявлено, что наиболее вариабельным показателем оказался угол между главной жилкой и второй от основания листа жилкой второго порядка, что соответствует 5 параметру. Однако здесь отмечаются четкие специфические различия между *Betula pendula* и *Tilia cordata*. Так, у *Betula pendula* установлен средний уровень (табл. 1) в контроле и повышенный в условиях парка и промзоны (до IV уровня), тогда как у *Tilia cordata* в контроле отмечен самый низкий уровень, а при повышении антропогенной нагрузки достигал критических значений и максимума в промзоне.

Таблица 1

**Коэффициент вариации признаков листа *Betula pendula* Roth в точках сбора**

Table 1

**Coefficient of variation of *Betula pendula* Roth leaf traits at collection points**

Метрические признаки листа	Точки сбора	1		2		3		4		5	
		л	п	л	п	л	п	л	п	л	п
Коэффициент вариации, %	1	1,67	1,98	2,75	5,75	5,63	6,28	1,64	1,79	21,75	26,98
	2	1,69	1,87	2,59	5,55	6,58	7,75	1,87	2,04	30,1	32,75
	3	4,08	3,805	4,28	5,25	4,51	4,02	7,49	9,39	28,58	27,03
Уровень изменчивости, балл	1	I	I	I	I	I	I	I	I	III	III
	2	I	I	I	I	I	II	I	I	IV	IV
	3	I	I	I	I	I	I	II	II	IV	IV

Таблица 2

**Коэффициент вариации признаков листа *Tilia cordata* Mill. в точках сбора**

Table 2

**Coefficient of variation of *Tilia cordata* Mill. leaf traits at collection points**

Метрические признаки листа	Точки сбора	1		2		3		4		5	
		л	п	л	п	л	п	л	п	л	п
Коэффициент вариации, %	1	2,88	2,12	5,21	5,19	0,04	0,04	8,69	8,81	6,35	6,97
	2	8,8	8,94	3,57	3,67	9,8	9,9	10,42	11,9	39,03	43,22
	3	17,05	15,36	6,99	7,86	9,5	9,3	12,64	14,6	56,96	55,41
Уровень изменчивости, балл	1	I	I	I	I	I	I	II	II	I	I
	2	II	II	I	I	II	II	II	II	V	V
	3	III	II	I	II	II	II	II	II	VI	VI

Таким образом, можно рассматривать *Tilia cordata* как эффективный биоиндикатор. При этом наиболее чувствительным параметром выступает величина угла между главной жилкой и второй от основания листа жилкой второго порядка. Формирование данного морфометрического показателя во многом связано с гистогенезом и работой прокамбия. Образовательные ткани часто подвергаются негативному действию среды, что приводит к асинхронной дифференцировке прокамбия в проводящие ткани [16].

## Заключение

В результате комплексных исследований на основе анализа ряда показателей проведена оценка состояния зеленых насаждений Парка культуры и отдыха как важного элемента природно-рекреационного каркаса урбоэкосистемы г. Слуцка. Установлено удовлетворительное состояние древесного яруса парковой зоны, обеспечивающего поддержание экологического баланса в городской среде.

На основе измерения интегрального показателя флуктуирующей асимметрии листовых пластинок *Betula pendula* и *Tilia cordata* в районе промышленных предприятий (ОАО «Слуцкий сыродельный комбинат», РУП «Слуцкие пояса» и ОАО «Слуцкий сахарорафинадный комбинат»), расположенных на улицах Тутаринова и Головащенко, качество среды оценивается как критическое. Полученные результаты позволяют рекомендовать экологическим службам города пересмотреть подходы к озеленению данной урбанизированной территории с учетом нарастающей антропогенной нагрузки.

Сравнительный анализ эффективности оценки уровня загрязнения среды методом флуктуирующей асимметрии листовых пластинок *Betula pendula* и *Tilia cordata* выявил различия по интегральным показателям и, соответственно, необходимость учета видоспецифичности биоиндикатора и относительного показателя в сравнении с контролем. Установлено, что наиболее чувствительным параметром выступает величина угла между главной жилкой и второй от основания листа жилкой второго порядка (на данный показатель необходимо обращать особое внимание). Таким образом, полученные данные требуют дальнейшего исследования, а методика В. М. Захарова нуждается в корректировке с учетом видовых особенностей формирования листовых пластинок древесных растений.

## Библиографические ссылки

1. Неверова ОА, Колмогорова ЕЮ. *Древесные растения и урбанизированная среда: экологические и биотехнологические аспекты*. Новосибирск: Наука; 2003. 222 с.
2. Сидоренко МВ, Юнина ВП, Ерофеева ЕА. Оценка экологического состояния рекреационных зон г. Нижнего Новгорода по уровням загрязнения почв тяжелыми металлами и биоиндикационным показателям листьев *Betula pendula* Roth. *Самарский научный вестник*. 2020;9(1):88–92.
3. Дорофеева ТБ. Анализ состояния городских насаждений в Пушкинском районе Санкт-Петербурга. *Биосфера*. 2012;4(2):158–166.
4. Бонина ТА, Маврищев ВВ, Аршан МВ. Многокомпонентная биоиндикация рекреационных зон г. Минска с повышенной антропогенной нагрузкой. *Вести БГПУ. Серия 3. Физика. Математика. Информатика. Биология. География*. 2019;1:5–9.
5. Кулагин АЮ. *Устойчивость и адаптация древесных растений: антропогенная трансформация окружающей среды и вопросы ликвидации накопленного экологического ущерба*. В: *Живые системы*. Саратов: Амирит, 2019. с. 144–146.
6. Гудзенко ЕО. Оценка экологического состояния зеленых насаждений города Ростова-на-Дону [автореферат диссертации]. Ростов-на-Дону: [б. и.]; 2016. 23 с.
7. Неверова ОА. *Опыт мониторинга городских древесных насаждений (на примере г. Кемерово)*. В: *Урбоэкосистемы проблемы и перспективы развития. Материалы международной научно-практической конференции*. Ишим: ИГПИ; 2008. с. 125–127.
8. Видякина АА, Семенова МВ. Влияние загрязнения воздуха на состояние древесных растений г. Тюмени. *Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения*. 2012;12:49–53.
9. Gorelova SV, Frontasyeva MV, Gorbunov AV. Bioindication and monitoring of atmospheric deposition using trees and shrubs. Materials of 27<sup>th</sup> Task Force Meeting of the UNECE ICP Vegetation. Paris: [publisher unknown]; 2014. p. 63.
10. Gillooly SE, Carr Shmool JL, Michanowicz DR. Framework for using deciduous tree leaves as biomonitors for intraurban particulate air pollution in exposure assessment. *Environ Monitoring Assessment*. 2016;7:456–479.
11. Уфимцева МД. Закономерности накопления химических элементов высшими растениями и их реакции в аномальных биогеохимических провинциях. *Геохимия*. 2015;5:450–465.
12. Алексеев ВА. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев. *Некоторые вопросы диагностики и классификации поврежденных загрязнением лесных экосистем*. В: *Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение*. Ленинград: Наука; 1990. с. 38–53.
13. Захаров ВМ. *Здоровье среды: методика оценки*. Москва: Центр экологической политики России; 2000. 66 с.
14. Клевцова МА, Фан Тхи Лан Ань. Биоиндикация экологического состояния урбанизированных территорий. *Вестник ВГУ. География. Геоэкология*. 2016;3:79–86.
15. Мамаев СА. *Формы внутривидовой изменчивости древесных растений (на примере семейства Pinaceae на Урале)*. Москва: Наука; 1972. 284 с.
16. Зыков ИЕ, Федорова ЛВ, Баранов СГ. Оценка биоиндикационного значения уровня изменчивости параметров листовых пластинок липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) в условиях города Орехово-Зуево и Орехово-Зуевского района. *Вестник МГОУ. Естественные науки*. 2015;1:15–21.
17. Ермакова АА. Проблемы определения рекреационных нагрузок и рекреационной емкости территорий. *Вестник ВГУ. География. Геоэкология*. 2009;2:16–20.
18. Исаченко ТЕ, Исаченко ГА, Озерова СД. Оценка рекреационной нарушенности и регулирование нагрузок на особо охраняемых природных территориях Санкт-Петербурга. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*. 2020;65(1):16–32.



## References

1. Neverova OA, Kolmogorova YeYU. *Drevesnyye rasteniya i urbanizirovannaya sreda: ekologicheskiye i biotekhnologicheskiye aspekty* [Woody Plants and the Urban Environment. Ecological and Biotechnological Aspects]. Novosibirsk: Nauka; 2003. 222 s. Russian.
2. Sidorenko MV, Yunina VP, Yerofeyeva YeA. *Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya rekreatsionnykh zon g. Nizhnego Novgoroda po urovnyam zagryazneniya pochvy tyazhelymi metallami i bioindikatsionnym pokazatelyam list'yev Betula pendula Roth* [Assessment of the ecological state of the recreational areas of Nizhny Novgorod according to the levels of soil pollution with heavy metals and bioindicative parameters of the leaves of *Betula pendula* Roth.]. *Samarskiy nauchnyy vestnik*. 2020;9(1):88–92. Russian.
3. Dorofeyeva TB. *Analiz sostoyaniya gorodskikh nasazhdeniy v Pushkinskom rayone Sankt-Peterburga* [Analysis of the state of urban plantings in the Pushkinsky district of St. Petersburg]. *Biosphere*. 2012;4(2):158–166. Russian.
4. Bonina TA, Mavrishchev VV, Arshan MV. *Mnogokomponentnaya bioindikatsiya rekreatsionnykh zon g. Minska s povyshennoy antropogennoy nagruzkoj* [Multicomponent bioindication of recreational areas of Minsk with increased anthropogenic load]. *Vesti BGPU. Seriya 3. Fizika. Matematika. Informatika. Biologiya. Geografiya*. 2019;1:5–9. Russian.
5. Kulagin AY. *Ustoychivost' i adaptatsiya drevesnykh rasteniy: antropogennaya transformatsiya okruzhayushchey sredy i voprosy likvidatsii nakoplennoy ekologicheskogo ushcherba* [Stability and adaptation of woody plants: anthropogenic transformation of the environment and the elimination of accumulated environmental damage]. Saratov: Amirit, 2019. p. 144–146. Russian.
6. Gudzenko YO. *Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya zelenykh nasazhdeniy goroda Rostova-na-Donu* [Assessment of the ecological state of green spaces in the city of Rostov-on-Don [PhD thesis]. Rostov-na-Donu: [publisher unknown]; 2016. 23 p. Russian.
7. Neverova OA. *Opyt monitoringa gorodskikh drevesnykh nasazhdeniy (na primere g. Kemerovo)* [Experience in monitoring urban tree plantations (on the example of the city of Kemerovo)]. In: *Urban ecosystems problems and development prospects: Proceedings of the international scientific-practical conference*. Ishim: IGPI; 2008. S. 125–127. Russian.
8. Vidyakina AA, Semenova MV. *Vliyaniye zagryazneniya vozdukha na sostoyaniye drevesnykh rasteniy g. Tyumeni* [Influence of air pollution on the state of woody plants in the city of Tyumen]. *Bulletin of ecology, forest science and landscape science*. 2012;12:49–53. Russian.
9. Gorelova SV, Frontasyeva MV, Gorbunov AV. *Influence of air pollution on the state of woody plants in the city of Tyumen*. *Bulletin of ecology, forest science and landscape science*. Paris: [publisher unknown]; 2014. p. 63.
10. Gillooly SE, Carr Shmool JL, Michanowicz DR. *Framework for using deciduous tree leaves as biomonitors for intraurban particulate air pollution in exposure assessment*. *Environ Monitoring Assessment*. 2016;7:456–479.
11. Ufimtseva MD. *Patterns of accumulation of chemical elements by higher plants and their reactions in anomalous biogeochemical provinces*. *Geokhimiya* [Geochemistry]. 2015;5:450–465. Russian.
12. Alekseyev VA. *Diagnostika zhiznennogo sostoyaniya derev'yev i drevostoyev. Nekotoryye voprosy diagnostiki i klassifikatsii povrezhdennykh zagryazneniyem lesnykh ekosistem*. In: *Lesnyye ekosistemy i atmosferye zagryazneniye*. [Diagnostics of the vital state of trees and forest stands. Some issues of diagnostics and classification of forest ecosystems damaged by pollution. In: *Forest Ecosystems and Air Pollution*]. Leningrad: Nauka; 1990. p. 38–53. Russian.
13. Zakharov VM. *Zdorov'ye sredy: metodika otsenki* [Health of the environment: assessment methodology]. Moscow: Center for Environmental Policy of Russia; 2000. 66 p. Russian.
14. Klevtsova MA, Fan Tkhi Lan An. *Bioindikatsiya ekologicheskogo sostoyaniya urbanizirovannykh territoriy* [Bioindication of the ecological state of urbanized territories]. *Bulletin of VSU. Geography. Geoecology*. 2016;3:79–86. Russian.
15. Mamayev SA. *Formy vnurividovoy izmenchivosti drevesnykh rasteniy (na primere semeystva Pinaceae na Urale)* [Forms of intraspecific variability of woody plants (on the example of the Pinaceae family in the Urals)]. Moscow: Science; 1972. 284 p. Russian.
16. Zykov IY, Fedorova LV, Baranov SG. *Otsenka bioindikatsionnogo znacheniya urovnya izmenchivosti parametrov listovykh plastinok lipy melkolistnoy (Tilia cordata Mill.) v usloviyakh goroda Orekhovo-Zuyevo i Orekhovo-Zuyevskogo rayona* [Evaluation of the bioindicative value of the level of variability of the parameters of leaf blades of small-leaved linden (*Tilia cordata* Mill.) in the conditions of the city of Orekhovo-Zuyevo and the Orekhovo-Zuyevsky district]. *Vestnik MGOU. Natural Sciences*. 2015; 1:15–21. Russian.
17. Yermakova AA. *Problemy opredeleniya rekreatsionnykh nagruzok i rekreatsionnoy yemkosti territoriy* [Problems of determining recreational loads and recreational capacity of territories]. *Bulletin of VSU. Geography. Geoecology*. 2009;2:16–20. Russian.
18. Isachenko TY, Isachenko GA, Ozerova SD. *Otsenka rekreatsionnoy narushennosti I regulirovaniye nagruzok na osobo okhranyayemykh prirodnykh territoriyakh Sankt-Peterburga* [Assessment of recreational disturbance and regulation of loads in specially protected natural areas of St. Petersburg]. *Bulletin of St. Petersburg University. Earth Sciences*. 2020;65(1):16–32. Russian.