

### БИОИНДИКАЦИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

М. А. Клевцова, Фан Тхи Лан Ань

Воронежский государственный университет, Россия

Поступила в редакцию 22 января 2016 г.

**Аннотация:** Представлены результаты оценки экологического состояния урбанизированных территорий по уровню флуктуирующей асимметрии листовой пластинки березы повислой (*Betula pendula* Roth.). Интегральный показатель асимметрии варьирует в пределах от 0,040 до 0,064. По результатам проведенных исследований составлены картосхемы распределения величины флуктуирующей асимметрии на территории города Воронежа.

**Ключевые слова:** биоиндикация, стрессовые условия окружающей среды, флуктуирующая асимметрия, береза повислая (*Betula pendula* Roth.), зеленые насаждения, урбанизированная среда.

**Abstract:** The assessment results of the urban areas ecological state by the level of fluctuating asymmetry of leaf lamina *Betula pendula* Roth are performed. Integral index of asymmetry varies from 0,040 to 0,064. According to the results of the research the maps of the distribution of fluctuating asymmetry in the territory of the Voronezh city were obtained.

**Key words:** bioindication, stressing environment, fluctuating asymmetry, European white birch (*Betula pendula* Roth.), green planting, urban environment.

Городская среда представляет собой специфическое образование, возникшее в результате взаимодействия существовавших ранее естественных ландшафтов и городской структуры. В результате чего возникают урбанизированные экосистемы. В ходе развития и увеличения площади города в значительной степени изменяется состояние атмосферного воздуха, микроклиматические параметры, почвенный покров. Все это нередко приводит к обострению экологической ситуации, меняет жизнедеятельность всех живых организмов. На растительные организмы в урбоэкосистемах влияет целый комплекс модифицированных экологических факторов, основными из которых являются антропогенные.

Неблагоприятные условия урбанизированных территорий отражаются как на отдельных анатомо-морфологических, биохимических, физиологических показателях, так и на внешнем облике (габитусе), устойчивости к фитопатогенам, продолжительности жизни растений. В связи с этим биоиндикационная оценка качества городской среды по реак-

ции растительных организмов является актуальным направлением экологического мониторинга.

Целью наших исследований являлась оценка состояния зеленых насаждений города Воронежа по вариации флуктуирующей асимметрии (ФА) листовых пластинок березы повислой (*Betula pendula* Roth.).

Для достижения поставленной цели были решены две задачи.

1. Изучены морфометрические показатели насаждений березы повислой и оценена стабильность развития данного вида в условиях урбанизированной среды (на примере города Воронежа).

2. Построены биоиндикационные картосхемы с использованием программы MapInfo Professional.

Биоиндикация – оценка качества окружающей среды по состоянию ее биоты. Она основана на наблюдении за составом, численностью, отклонениями в развитии организмов-индикаторов. Так, к морфологическим отклонениям высших растений относят изменение окраски листьев, хлороз, пожелтение, некроз, увядание листьев идефолиация [3]. В силу этого листовые пластинки древесных растений представляют собой важный объект для

осуществления экофизиологических исследований. Следовательно, изменения, происходящие в ассимиляционном аппарате высших растений, могут служить достоверным информативным индикатором отрицательного влияния антропогенных факторов [5, 8].

В последние десятилетия предлагается довольно широкий спектр различных биоиндикационных исследований антропогенной нагрузки, основное требование, предъявляемое к подобного рода методам – простота и быстрота выполнения при высокой степени чувствительности и достоверности.

Показатели флуктуирующей асимметрии применяются для оценки стабильности индивидуального развития (онтогенеза) живых организмов и для оценки качества среды. Они выступают «главными характеристиками изменений гомеостаза (развития) с морфологической точки зрения» [6].

Выбор многолетних древесных растений в качестве объекта исследования объясняется несколькими причинами. Во-первых, у древесных форм растений ежегодно формируется ассимиляционный аппарат; во-вторых, многие виды довольно широко распространены и имеют выраженные признаки, что позволяет проводить регулярный мониторинг [14, 15].

Отсутствие абсолютно симметричных организмов является следствием несовершенства механизмов, контролирующих онтогенез, проявляющимся в их неспособности противостоять негативно воздействию факторов внешней среды [2].

Существует зависимость состояния гомеостаза живой системы (растения) от интенсивности действия факторов окружающей среды, которую доказали многие ученые в ходе исследований. Е. А. Ерофеевой с коллегами для оценки состояния гомеостаза березы использованы морфогенетические (флуктуирующая асимметрия) и биохимические показатели (содержание фотосинтетических пигментов) неспецифически изменяющиеся при действии любых стресс-факторов среды, в том числе и антропогенных. Объектом исследования являлась береза повислая (*Betula pendula* Roth.), произрастающая на территории 10-ти модельных участков лесопосадок, расположенных непосредственно вдоль автомагистралей нагорной части города Нижний Новгород. С помощью критерия Шапиро-Уилкса было установлено, что распределение всех исследованных показателей гомеостаза березы (содержание фотосинтетических пигментов в листовой пластинке, величина интегрального показателя ФА) не отличается от нор-

мального ( $p > 0,05$ ), поэтому для изучения зависимости данных показателей от величины потока автотранспорта использовали регрессионный анализ. Таким образом, Е. В. Ерофеевой с коллегами показано, что изменения состояния гомеостаза березы повислой при действии антропогенных факторов может иметь двухфазный характер. Нельзя исключить, что подобная зависимость может быть не только двухфазной, а также может иметь многофазный характер и проявляться при действии абсолютно любых экологических факторов [4].

Одной из острых проблем в крупных городах является загрязнение почвы тяжелыми металлами, которые оказывает значительное токсическое влияние на здоровье всех живых объектов, включая растения. Тяжелые металлы в большом количестве содержатся в выхлопных газах автотранспорта, и поэтому они накапливаются в почве в непосредственной близости от автострад.

При воздействии тяжелых металлов проявляются отрицательные изменения у растений: нарушение ростовых процессов и деления клеток, приводящее к нарушению развития морфологических структур; снижение интенсивности фотосинтеза и повреждение ассимиляционного аппарата растений.

Ю. В. Беляева [1] изучала влияние факторов среды на показатель ФА методами параметрического статистического анализа. Показано, что показатель ФА указывает на наличие в среде обитания живых организмов негативного фактора. Это могут быть абиотические, биотические, антропогенные факторы. Показатель ФА реагирует повышением на изменение фактора и стабилен при адаптации к данным условиям. Следовательно, на основании периодического определения уровня асимметрии можно проследить изменение среды обитания организма.

В Воронеже биоиндикационные исследования проводились А. И. Федоровой [13], Г. М. Мелькумовым, Д. Э. Волковым [10], Е. Ю. Ивановой [7], Н. Н. Назаренко, И. И. Корецкой, И. Д. Свистовой [12] и другими. Однако слабоизученными остаются вопросы интегральной оценки состояния урбанизированной среды с помощью видов-индикаторов и картографирование биоиндикационных результатов.

В течение летнего периода 2015 года в пределах городской черты Воронежа нами осуществлялся отбор образцов в 18 точках (таблица 1) и дополнительно были определены высота и диаметр обследованных деревьев березы повислой. Сбор материала проводился после завершения интен-

Точки отбора листовых пластинок березы повислой (*Betula pendula* Roth.)

№ точки	Местоположение	Функциональная зона*	Высота ( $\bar{H}$ ), м	Диаметр ствола на уровне 1,5 м ( $\bar{D}$ ), см
1	ул. Хользунова, 102	промышленно-транспортная	14	31
2	ул. 9 Января, 49		18	35
3	ул. Брусилова – Ленинский проспект		18	34
4	ул. Саврасова – ул. Заслонова		12	29
5	Московский проспект, 36		9	29
6	ул. Ломоносова, 83	жилая ЦИ	23	33
7	ул. Володарского, 60		17	60
8	ул. Героев Стратосферы, 8		20	23
9	ул. Дарвина, 1	рекреация	20	27
10	Парк «Орленок»		23	31
11	Парк «Авиастроителей»		17	24
12	Парк «Алые паруса»		23	28
13	СОК «Олимпик»		22	26
14	ул. Шишкова, 53	жилая ЧС	9	32
15	ул. Ломоносова, 1		17	34
16	ул. Нагорная, 65		12	37
17	ул. Ипподромная, 55		10	31
18	санаторий им. Горького	фон	24	27
19	п.г.т. Рамонь, ул. Тутукова		20	24

\* В жилой зоне выделено 2 подзоны: жилая ЦИ – центральная историческая часть города (включая общественно-деловую застройку и старую 5-ти-этажную застройку по обоим берегам); жилая ЧС – частный сектор (преимущественно одно-этажная жилая застройка).

сивного роста листьев. В средней полосе России это соответствует концу мая – началу июня. Размер листовых пластинок должен быть примерно одинаковым. Кроме того, отбор проводится только с укороченных побегов из нижней части кроны деревьев генеративного возраста [9].

Величина флуктуирующей асимметрии листовой пластинки березы повислой (*Betula pendula* Roth.) определялась на основе измерений следующих морфологических признаков, 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.

Величина флуктуирующей асимметрии (ФА) рассчитывается с помощью интегрального показателя – величины среднего относительного различия по признакам и рассчитывается по следующей формуле [4]:

$$\bar{A} = \frac{1}{m \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{(L_{ij} - R_{ij})}{(L_{ij} + R_{ij})}$$

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 березы повислой, разработанная В.М. Захаровым [4]. Диапазон значений интегрального показателя стабильности развития до 0,040 соответствует первому баллу (условная нор-

Средние значения морфометрических параметров листовых пластинок березы повислой (*Betula pendula* Roth.) ( $M_x \pm m_{Mx}$ )

№ точки	Признак					Интегральный
	1	2	3	4	5	
1	0,027±0,005	0,022±0,003	0,134±0,016	0,059±0,006	0,031±0,005	0,055±0,008
2	0,047±0,008	0,019±0,003	0,075±0,011	0,076±0,008	0,034±0,005	0,050±0,008
3	0,047±0,008	0,026±0,004	0,051±0,011	0,063±0,007	0,037±0,006	0,045±0,006
4	0,031±0,006	0,021±0,003	0,125±0,015	0,061±0,006	0,036±0,006	0,055±0,009
5	0,044±0,006	0,018±0,003	0,069±0,013	0,049±0,005	0,029±0,005	0,042±0,007
6	0,060±0,009	0,021±0,003	0,150±0,016	0,046±0,006	0,026±0,005	0,061±0,010
7	0,045±0,006	0,023±0,004	0,110±0,014	0,058±0,007	0,040±0,007	0,055±0,008
8	0,042±0,006	0,029±0,005	0,106±0,014	0,049±0,006	0,045±0,007	0,054±0,009
9	0,035±0,005	0,025±0,004	0,113±0,015	0,048±0,006	0,027±0,005	0,049±0,008
10	0,040±0,006	0,021±0,004	0,102±0,014	0,049±0,005	0,024±0,004	0,047±0,006
11	0,036±0,005	0,027±0,005	0,104±0,014	0,060±0,008	0,030±0,006	0,051±0,009
12	0,034±0,005	0,019±0,003	0,074±0,011	0,061±0,007	0,030±0,006	0,044±0,006
13	0,046±0,006	0,031±0,005	0,108±0,013	0,068±0,008	0,066±0,008	0,064±0,010
14	0,030±0,005	0,014±0,003	0,073±0,011	0,041±0,005	0,042±0,007	0,040±0,005
15	0,039±0,006	0,056±0,006	0,062±0,012	0,046±0,005	0,024±0,004	0,046±0,006
16	0,021±0,004	0,028±0,004	0,070±0,012	0,054±0,006	0,049±0,008	0,045±0,006
17	0,020±0,004	0,010±0,002	0,084±0,012	0,060±0,007	0,066±0,009	0,048±0,005
18	0,036±0,005	0,010±0,002	0,061±0,012	0,057±0,006	0,036±0,006	0,040±0,005
19	0,030±0,005	0,008±0,002	0,048±0,010	0,058±0,006	0,040±0,006	0,038±0,005

ма), от 0,040 до 0,044 – второму баллу (незначительные отклонения от нормы), от 0,045 до 0,049 – третьему баллу (средний уровень отклонений от нормы), от 0,050 до 0,054 – четвертому баллу (значительные отклонения от нормы), от 0,054 и выше – пятому баллу (критическое состояние). Значения интегрального показателя асимметрии, соответствующие первому баллу, наблюдаются, обычно, в выборках растений из благоприятных условий произрастания, например, из природных заповедников. Пятый балл – соответствует угнетенному состоянию растения. На основе полученных данных проводилось сравнение флуктуирующей асимметрии всех точек с фоновыми значениями.

Математическая обработка материала проводилась с помощью пакета анализа MS Excel и STATISTICA 6.1. Для интерпретации данных применялись программный продукт MapInfo Professional.

В ходе исследований проведено измерение по пяти параметрам 1800 экземпляров листовых пластинок березы повислой. Согласно, вышеприведенной методике был рассчитан индекс флуктуирующей асимметрии для всех точек отбора образцов. Полученные данные приведены в таблице 2.

Пределы колебания линейных размеров листьев в городской среде составляют: длина – 30...93 мм; ширина – 20...76 мм.

Из изученных признаков наибольшая величина ФА отмечена по 3 признаку (0,150) для образцов, отобранных на улице Ломоносова, 83. Наименьшая величина ФА – по 2 признаку (0,010), зафиксирована на улице Ипподромная, 55 и на территории санатория им. Горького.

Самая высокая величина ФА первого признака наблюдается в шестой точке (0,060 ± 0,009), расположенной по ул. Ломоносова, 83. В большинстве точек отклонение в развитии листовых пластинок по данному признаку выше, чем в фоновых. Самая низкая величина ФА наблюдается в пункте № 17 – ул. Ипподромная, 55 (0,020 ± 0,004).

Наибольшая величина ФА по второму признаку отмечается по ул. Ломоносова, 1 (0,056 ± 0,006), что в 7 раз больше фонового значения. Однако, несмотря на значительное отклонение по данному параметру, точка имеет низкий интегральный показатель.

Для всех мест отбора отмечено превышение показателя флуктуирующей асимметрии по сравнению с фоновыми точками. Исключением является



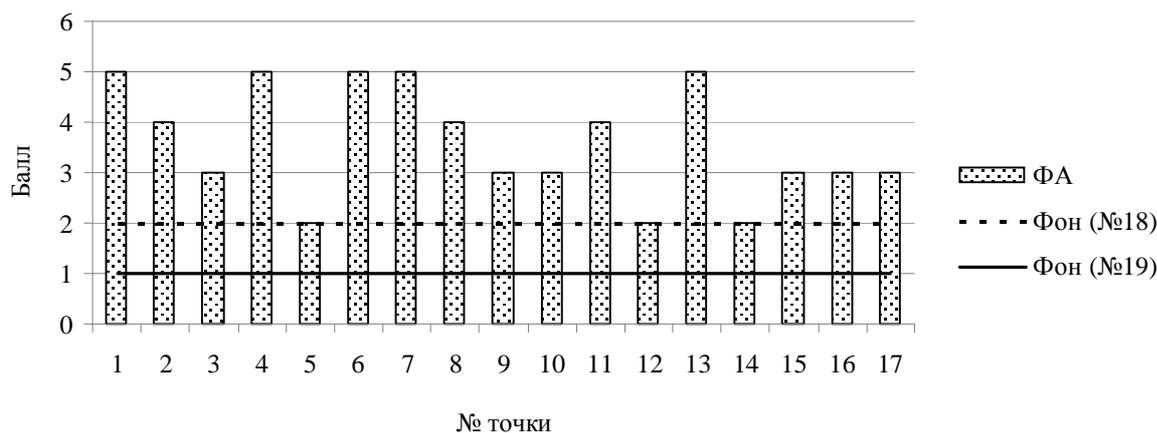


Рис. 2. Варьирование интегрального коэффициента флуктуирующей асимметрии листовых пластинок березы повислой по балльной шкале

стояние соответствует тем участкам, где организмы испытывают сильное негативное воздействие экологических факторов, которое приводит к ослаблению организма, снижению его устойчивости и возможной гибели [15].

Наибольшее отклонение от состояния условной нормы по величине интегрального показателя стабильности развития для березы повислой (*Betula pendula* Roth.) отмечено по ул. Хользунова, 102; ул. Саврасова – ул. Заслонова; ул. Володарского, 60, что соответствует критическому состоянию среды. Балльная шкала коэффициента ФА по исследуемым точкам приведена на рисунке 2.

Наименьший коэффициент асимметрии имели образцы, отобранные в следующих точках: ул. Шишкова, 53, парк «Алые паруса». По балльной шкале интегральное значение ФА соответствует двум баллам (незначительное отклонение от условной нормы).

Пункты, расположенные по ул. 9 Января, 49(№ 2), ул. Героев Стратосферы, 8(№ 8), Парк «Авиастроителей» (ул. Полины Осипенко) (№ 11) имеют 4 балла по пятибалльной шкале (значительное отклонение от нормы). Точка № 2 расположена вблизи одной из крупных магистральных улиц города, где наблюдается интенсивное движение автотранспорта. Высокий уровень асимметрии имеет точка № 13 (СОК «Олимпик»). Данный факт можно объяснить высокой рекреационной нагрузкой в течение летнего периода. В связи с чем наблюдается в первую очередь переуплотнение почвы. Уход за зелеными насаждениями на данной территории отсутствует.

По степени ухудшения состояния городской среды можно выстроить функциональные зоны в следующий ряд: рекреационная – жилая ЧС – жилая ЦИ – промышленно-транспортная.

В целом, полученные данные, свидетельствуют о том, что экологическая ситуация на исследуемой территории оценивается не ниже двух баллов, а это указывает на неблагоприятные условия произрастания. Критическое состояние среды отмечается в промышленно-транспортной зоне.

Таким образом, на примере березы повислой показана правомерность использования морфологических критериев оценки жизненного состояния древесных растений в системе экологического мониторинга городской среды.

На основе проведенных нами исследований можно сделать следующие выводы.

Во-первых, применение метода флуктуирующей асимметрии для анализа листовых пластинок березы повислой показало высокую специфичность данного вида для интегральных оценок состояния среды. Проведенное исследование позволяет рекомендовать березу повислую в качестве вида-индикатора для экологического мониторинга территории города Воронежа.

Во-вторых, наиболее высокий показатель флуктуирующей асимметрии отмечен на улицах с высокой транспортной нагрузкой и наличием промышленных предприятий, низкий уровень асимметрии отмечается преимущественно в рекреационных зонах (исключением является точка № 13 – СОК «Олимпик»).

В-третьих, превышение фоновых значений отмечено в 53 % случаев по 1, 3, 4 признакам. Наименьшие отклонения зафиксированы по 5 признаку (угол между центральной и второй жилками). Из изученных признаков наибольшая величина асимметрии отмечена по 3 признаку для образцов, отобранных на улице Ломоносова, 83. Наименьшая величина – по 2 признаку, зафиксирована на ул. Ипподромная, 55.

Критические условия для произрастания индикаторного вида отмечены по ул. Хользунова, 102; ул. Саврасова – ул. Заслонова; ул. Володарского, 60. Наиболее благоприятные условия характерны для фоновых точек, а также по ул. Шишкова, 53 и в парке «Алые паруса».

При оценке качества среды по показателю флуктуирующей асимметрии необходимо учитывать комплекс факторов, включающих как антропогенные стрессоры, так и природные, и возможное их влияние на показатель стабильности развития. Например, отклонения в развитии органов и неспособность живых организмов поддерживать гомеостаз развития, может быть обусловлено и влиянием климатических факторов.

Результаты наших исследований имеют интегральный характер вследствие того, что одновременно установлено как общее состояние окружающей среды, так и уровень отклонений от нормы при оценке стабильности развития растительного организма.

**Исследование выполнено при финансовой поддержке Русского географического общества - Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 13-05-41401\_а.**

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляева Ю. В. Показатели флуктуирующей асимметрии *Betulapendula* Roth. в естественных и антропогенных условиях Тольятти / Ю. В. Беляева // Самарская лука: проблемы региональной и глобальной экологии. – 2014. – Т. 23, № 3. – С. 167-174.
2. Влияние лесопатологического состояния березы повислой на величину флуктуирующей асимметрии листовой пластинки // Д. Б. Гелашвили [и др.] // Поволжский экологический журнал. – 2007. – № 2. – С. 106-115.
3. Евгеньев М. И. Тест-методы и экология / М. И. Евгеньев // Соросовский образовательный журнал. – 1999. – № 11. – С. 29-34.
4. Ерофеева Е. А. Двухфазная зависимость некоторых эколого-морфологических и биохимических параметров листовой пластинки березы повислой от уровня автотранспортного загрязнения / Е. А. Ерофеева, В. С. Сухова, М. М. Наумова // Поволжский экологический журнал. – 2009. – № 4. – С. 288-295.
5. Захаров В. М. Асимметрия животных / В. М. Захаров. – Москва : Наука, 1987. – 261 с.
6. Захаров В. М. Здоровье среды: методика оценки / В. М. Захаров. – Москва : Центр экологической политики России, 2000. – 66 с.
7. Иванова Е. Ю. Оценка состояния атмосферного воздуха города Нововоронежа биологическими методами / Е. Ю. Иванова // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. География. Геоэкология. – 2013. – № 1. – С. 157-162.
8. К методологии экофизиологических исследований листьев древесных растений / Л. М. Кавеленова [и др.] // Поволжский экологический журнал. – 2008. – № 3. – С. 200-210.
9. Каплин В. Г. Биоиндикация состояния экосистем : учебное пособие / В. Г. Каплин. – Самара : Самарская государственная академия, 2001. – 143 с.
10. Мелькумов Г. М. Флуктуирующая асимметрия листовых пластинок клена остролистного (*Acer platanoides* L.) как тест экологического состояния паркоценозов городской зоны / Г. М. Мелькумов, Д. Э. Волков // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. География. Геоэкология. – 2014. – № 3. – С. 95-98.
11. Методические рекомендации по выполнению оценки качества среды по состоянию живых существ (оценка стабильности развития живых организмов по уровню асимметрии морфологических структур) / Центр экологической политики России [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.ecopolicy.ru/upload/MetRecom.doc>. – (дата обращения 15.09.2015).
12. Назаренко Н. Н. Биоиндикация почв транспортных зон г. Воронежа / Н. Н. Назаренко, И. И. Корецкая, И. Д. Свистова // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. География. Геоэкология. – 2015. – № 1. – С. 46-50.
13. Федорова А. И. Биоиндикация загрязнения городской среды / А. И. Федорова // Известия АН. Сер. географическая. – 2002. – № 1. – С. 72-80.
14. Fluctuating asymmetry: methods, theory, and applications / J. H. Graham [et al.] // *Symmetry*. – 2010. – № 2. – P. 466-540.
15. Palmer A.R. Fluctuating asymmetry as a measure of developmental stability: implications of nonnormal distributions and power of statistical tests / A. R. Palmer, C. Strobeck // *Acta Zool. Fenn.* – 1992. – Vol. 191. – P. 57-72.

#### REFERENCES

5. Zakharov V. M. Asimetriya zivotnykh / V. M. Zakharov. – Moskva : Nauka, 1987. – 261 s.
6. Zakharov V. M. Zdorov'e sredi: metodika otsenki / V. M. Zakharov. – Moskva : Tsentr ekologicheskoy politiki Rossii, 2000. – 66 s.
7. Ivanova E. Yu. Otsenka sostoyaniya atmosfernogo vozdukhа goroda Novovoronezha biologicheskimi metodami / E. Yu. Ivanova // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Geografiya. Geoekologiya. – 2013. – № 1. – S. 157-162.
8. К методологии экотизиологических исследований лист'ев древесных растений / L. M. Kavelenova [i dr.] // Povolzhskiy ekologicheskii zhurnal. – 2008. – № 3. – S. 200-210.
9. Kaplin V. G. Bioindikatsiya sostoyaniya ekosistem : uchebnoe posobie / V. G. Kaplin. – Samara : Samarskaya gosudarstvennaya akademiya, 2001. – 143 s.
10. Mel'kumov G. M. Fluktuiruyushchaya asimetriya listovykh plastinok klena ostrolistnogo (*Acer platanoides* L.) kak test ekologicheskogo sostoyaniya parkotsenozov gorodskoy zony / G. M. Mel'kumov, D. E. Volkov // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Geografiya. Geoekologiya. – 2014. – № 3. – S. 95-98.
11. Metodicheskie rekomendatsii po vypolneniyu otsenki kachestva sredi po sostoyaniyu zhivykh sushchestv (otsenka stabil'nosti razvitiya zhivykh organizmov po urovnyu asimetrii morfologicheskikh struktur) / Tsentr ekologicheskoy politiki Rossii [Elektronnyy resurs]. – URL : <http://www.ecopolicy.ru/upload/MetRecom.doc>. – (data obrashcheniya 15.09.2015).
12. Nazarenko N. N. Bioindikatsiya pochv transportnykh zon g. Voronezha / N. N. Nazarenko, I. I. Koretskaya, I. D. Svistova // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Geografiya. Geoekologiya. – 2015. – № 1. – S. 46-50.
13. Fedorova A. I. Bioindikatsiya zagryazneniya gorodskoy sredi / A. I. Fedorova // Izvestiya AN. Ser. geograficheskaya. – 2002. – № 1. – S. 72-80.
14. Fluctuating asymmetry: methods, theory, and applications / J. H. Graham [et al.] // Symmetry. – 2010. – № 2. – P. 466-540.
15. Palmer A.R. Fluctuating asymmetry as a measure of developmental stability: implications of nonnormal distributions and power of statistical tests / A. R. Palmer, C. Strobeck // Acta Zool. Fenn. – 1992. – Vol. 191. – P. 57-72.

Клевцова Марина Александровна  
кандидат географических наук, доцент кафедры геоэкологии и мониторинга окружающей среды факультета географии, геоэкологии и туризма Воронежского государственного университета, г. Воронеж, т. (473) 266-56-54, 8-904-214-67-74, E-mail: [klevtsova@geogr.vsu.ru](mailto:klevtsova@geogr.vsu.ru)

Фан Тхи Лан Ань  
магистр факультета географии, геоэкологии и туризма Воронежского государственного университета, г. Воронеж, т. (473) 266-56-54, E-mail: [phananh.tn.vn@gmail.com](mailto:phananh.tn.vn@gmail.com)

Klevtsova Marina Alexandrovna  
PhD in Geography, Associate Professor at the professorate of geoecology and environmental monitoring, Department of geography, geoecology and tourism, Voronezh State University, Voronezh, tel. (473) 266-56-54, 8-904-214-67-74, E-mail: [klevtsova@geogr.vsu.ru](mailto:klevtsova@geogr.vsu.ru)

Phan Thi Lan Anh  
Master of the Department of geography, geoecology and tourism, Voronezh State University, Voronezh, tel. (473) 266-56-54, E-mail: [phananh.tn.vn@gmail.com](mailto:phananh.tn.vn@gmail.com)