

## Сравнительная характеристика экологических условий промышленных городов Центрального Черноземья с использованием методов биоиндикации

М. А. Клевцова , А. А. Михеев

Воронежский государственный университет, Российская Федерация  
(394018, г. Воронеж, Университетская пл., 1)

**Аннотация:** Цель настоящих исследований заключалась в сравнительной характеристике экологических условий произрастания древесных растений двух промышленно развитых городов Центрального Черноземья – Воронежа и Липецка.

**Материалы и методы.** В летний период 2021 года было проведено обследование зеленых насаждений. В качестве видов-индикаторов выступали береза повислая (*Betula pendula* Roth.) и тополь итальянский (*Populus italica* (Du Roi) Moench). Всего было исследовано 65 пунктов мониторинга в Воронеже и 44 участка в Липецке. Морфометрическими параметрами, по которым проводилась сравнительная характеристика экологических условий, являлись следующие: длина, ширина, площадь, флуктуирующая асимметрия листовых пластинок. С использованием методов биоиндикации всего проанализировано более 4500 экземпляров листьев.

**Результаты и обсуждение.** Выявлено уменьшение размеров листовых пластинок и увеличение флуктуирующей асимметрии в зоне влияния промышленных выбросов предприятий (в Воронеже в окрестностях Акционерного общества «Воронежсинтезкаучук», в Липецке – в зоне влияния металлургического комбината). Высокие значения интегрального показателя флуктуирующей асимметрии зафиксированы и на крупных перекрестках магистральных улиц. Кластерный анализ на основе четырех морфометрических параметров позволил сгруппировать сходные по условиям участки. Так, в большинстве случаев (для вида-индикатора березы повислой), точки, расположенные в одной функциональной зоне или территориально близкие, имеют более тесную связь.

**Выводы.** На морфометрические параметры древесных растения при произрастании в условиях городской среды оказывают влияние модифицированные абиотические факторы, выбросы загрязняющих веществ от стационарных и передвижных источников.

**Ключевые слова:** урбанизированные территории, окружающая среда, биоиндикация, экологические условия, зеленые насаждения, древесные растения.

**Источник финансирования:** Исследования проведены при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект 20-17-00172.

**Для цитирования:** Клевцова М. А., Михеев А. А. Сравнительная характеристика экологических условий промышленных городов Центрального Черноземья с использованием методов биоиндикации // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология, 2022, № 3, с. 86-96. DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2022/3/86-96>

### ВВЕДЕНИЕ

В России 75 % населения проживает в городских поселениях – городах и поселках городского типа, где жизнедеятельность населения во многом связана с комфортностью урбанизированных тер-

риторий. Одним из способов оптимизации городской среды является создание зеленых насаждений разного функционального назначения (рекреационного, санитарно-гигиенического, декоративно-художественного). Зеленые насаждения



представляют собой совокупность древесных, кустарниковых и травянистых растений<sup>1</sup>. На растительные организмы воздействует комплекс экологических факторов окружающей среды. Экологические условия влияют на распространение, жизнедеятельность и продолжительность жизни растений.

На урбанизированных территориях растения часто испытывают стресс, т.к. произрастают в большинстве случаев в среде, которая не является оптимальной по ряду экологических факторов. Как отмечают отечественные [2, 3, 16] и зарубежные [19, 22, 23] ученые в связи с этим происходят изменения метаболизма, физиологии, развития и в итоге – морфологии растений.

В настоящее время изучение состояния древесных растений в городских условиях является предметом исследований многих ученых: Кавеленовой Л.М. [7], Опекуновой М.Г. с соавт. [18], Прохоровой Н.В. и Макаровой Ю.В. [14], Кулагина А.Ю. и Тагировой О.В. [10], Бухариной И.Л. и Гибадулиной И.И. [1], Ерофеевой Е.А. [5] и многих других, что свидетельствует об актуальности данной проблематики для России, в том числе городов Центрального Черноземного региона (ЦЧР).

Вопросы состояния внутригородских систем озеленения для городов ЦЧР важны в связи с расположением данной территории в условиях недостаточного увлажнения в лесостепной и степной природных зонах. Сохранение существующих лесов и лесопарковых комплексов, реконструкция и создание объектов озеленения в связи с преждевременным старением древесных растений, правильный и своевременный уход за насаждениями требует разработки четко структурированной системы управления качеством зеленого фонда.

Целью наших исследований являлась сравнительная характеристика экологических условий произрастания древесных растений двух промышленно развитых городов Центрального Черноземья – Воронежа и Липецка.

Для достижения данной цели нами поставлены и решены следующие задачи: сделать краткую инвентаризацию зеленых насаждений рассматриваемых территорий для выявления видов-индикаторов; провести полевые и камеральные работы по определению морфометрических показателей древесных растений (длина, ширина, площадь, флуктуирующая асимметрия листовых пластинок) с использованием методов биоиндикации;

сравнить на основе морфометрических параметров территории с разными экологическими условиями; разработать рекомендации по оптимизации существующей системы озеленения.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования выступали зеленые насаждения, произрастающие на урбанизированных территориях крупных промышленно развитых городов Центрального Черноземья – Воронежа и Липецка.

Полевые работы были проведены в летний период 2021 года. Лабораторно-экспериментальная часть выполнена в аттестованной эколого-аналитической лаборатории Воронежского государственного университета.

На основе предварительной краткой инвентаризации выявлены наиболее распространенные виды древесных растений. Для города Воронежа такими являются следующие: тополь итальянский (*Populus italica* (Du Roi) Moench), вяз низкий (*Ulmus pumila* L.), береза повислая (*Betula pendula* Roth.), липа сердцевидная (*Tilia cordata* Mill.), клен остролистный (*Acer platanoides* L.), клен американский (*Acer negundo* L.), конский каштан обыкновенный (*Aesculus hippocastanum* L.), сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), для города Липецка – клен остролистный, береза повислая, тополь итальянский, липа сердцевидная, сосна обыкновенная. Таким образом, видовые списки имеют сходство, поэтому в роли видов-индикаторов в наших исследованиях выступали – береза повислая и тополь итальянский.

На территории города Воронежа заложено 65 ключевых участков (фоновая точка – территория санатория имени Горького), в пределах Липецка – 44 (фон – территория Садового некоммерческого товарищества «Березка», далее СНТ «Березка»). В каждой точке произрастает 10-25 экземпляров деревьев вида-индикатора. Всего было обследовано более 2000 особей. Местоположение точек подробно освещено в наших публикациях [8, 9].

Все точки распределены по четырем функциональным зонам: промышленная, транспортная, рекреационная и жилая. Соотношение представлено в таблице 1.

Следует отметить, что площадь города Воронежа составляет – 596,51 км<sup>2</sup>, численность населения – 1 048 738 человек (по состоянию на 01.01.2022); для Липецка данные показатели равны соответственно 330,15 км<sup>2</sup> и 496 447. То есть

<sup>1</sup>ГОСТ 28329-89 Озеленение городов. Термины и определения. Москва: Стандартинформ, 2006. 8 с.

Распределение пунктов мониторинга по функциональным зонам, %  
 [Table 1. Distribution of monitoring points by functional areas, %]

Функциональная зона / Functional area	Город Воронеж / Voronezh City	Город Липецк / Lipetsk City
Жилая	17	30
Рекреационная	6	16
Транспортная	37	30
Промышленная	38	23
Фон	2	2

Липецк территориально и по населенности меньше, чем Воронеж примерно в два раза. Плотность населения ниже, чем в Воронеже на 15 %. Оба населенных пункта расположены на границе Среднерусской возвышенности и Окско-Донской низменности, примерно на одной высоте над уровнем моря, по обоим берегам реки Воронеж. В данных городах имеются водохранилища (Воронежское в городе Воронеже и Матырское в городе Липецке).

С точки зрения техногенного воздействия, то данные населенные пункты имеют хорошо развитую промышленность. В Воронеже основным стационарным источником загрязнения является предприятие химической отрасли – Акционерное общество «Воронежский синтетический каучук» (АО «Воронежсинтезкаучук»). Это предприятие локализовано в левобережной части города, относится к I классу опасности. Имеет широкую палитру компонентов выбросов: оксиды углерода, серы, азота, фенол, формальдегид, стирол, бензол и другие.

В Липецке расположено предприятие металлургического комплекса – Публичное акционерное общество «Новолипецкий металлургический комбинат» (ПАО «НЛМК»). Комбинат полного цикла является источником повышенного экологического риска, в выбросах которого широко представлены углеводороды, оксиды, тяжелые металлы и другие загрязняющие вещества.

Структура выбросов в атмосферный воздух такова, что в городе Воронеже преобладают передвижные источники, то есть автомобильный транспорт (более 80 % от общего валового выброса), а в Липецке – стационарные (более 65 %).

Мы определяли следующие биоиндикационные параметры листовых пластинок: длину, ширину, площадь, флуктуирующую асимметрию. В каждом пункте мониторинга проводился отбор образцов – не менее 150 листьев без визуально

выраженных повреждений. Далее случайным образом отбирали 25 листовых пластинок и проводили необходимые замеры [11]. Согласно принятым методикам [15] данный объем наблюдений достаточен для получения репрезентативных данных. Биоиндикация по указанным параметрам листовых пластинок относится к уровню морфологических отклонений [12]. Причем, несмотря на ряд ограничений, выбор методов биоиндикации обусловлен наличием ряда преимуществ по сравнению с инструментальными методами [12, 14]: быстрота, дешевизна и достоверность данных при анализе ответной реакции организмов на воздействие комплекса факторов окружающей среды.

Для определения площади фотосинтезирующих органов проводилось сканирование листьев. Затем полученное бинарное изображение обрабатывалось в программе APFill Ink&Toner Coverage Meter [4] и рассчитывалась средняя площадь листьев по каждому пункту мониторинга. Более подробно схема и принципы определения данного показателя описаны в нашей работе 2020 года [8].

Показатель флуктуирующей асимметрии листовых пластинок определяли по методике, разработанной Захаровым В.М. с соавт. [6] и утвержденной Министерством природных ресурсов РФ в 2003 году<sup>2</sup>. Для этого с каждого листа с обеих сторон (с левой и правой половинки) делали пять замеров. Далее все данные рассчитывали по алгоритму нормированной разности.

Обработка полученных данных проводилась с использованием методов математической статистики [13]. Вычисления осуществляли с помощью программного обеспечения Microsoft Excel 2016 и Statistica 10.0. Для каждой выборки вычисляли стандартные статистические показатели (среднеарифметические значения, стандартные отклонения, ошибки среднеарифметических, коэффици-

<sup>2</sup> Методические рекомендации по выполнению оценки качества среды по состоянию живых существ (оценка стабильности развития живых организмов по уровню асимметрии морфологических структур) / утверждены распоряжением Министерства природных ресурсов РФ от 16.10.2003 года № 460-р. Москва, 2003. 24 с.

енты вариации, точность данных). Данные проверяли на соответствие закону нормального распределения (Гаусса-Лапласа). Для сравнительной характеристики и анализа сходства экологических условий в пунктах мониторинга использовали кластерный анализ.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим вариабельность индикационных признаков. На исследуемой территории города Воронежа длина листа березы повислой изменяется в пределах от 50,56 (точка № 41 – улица Богдана Хмельницкого) до 73,16 мм (№ 63 – ботанический сад Воронежского госуниверситета). В Липецке диапазон данного показателя составляет от 45,20 (точка № 13 – улица Юношеская, 19) до 69,0 мм (№ 22 – парк Победы). Ширина листовая пластинки березы на территории Воронежа изменяется в пределах от 40,32 (точка № 58 – улица Нагорная, 65) до 60,16 мм (точка № 28 – перекресток Бульвар Победы – улица 60 Армии). По Липецку данный параметр принимает значения от

32,08 (точка № 32 – улица Зои Космодемьянской, 224) до 54,84 мм (точка № 22 – парк Победы).

Площадь листьев березы повислой изменяется в следующем диапазоне для Воронежа от 11,23 (точка № 31 – улица Героев Стратосферы, 186) до 24,30 см<sup>2</sup> (точка № 65 – лесной массив вблизи поселка Репное); для Липецка – от 7,89 (точка № 32 – улица Зои Космодемьянской, 224) до 21,26 см<sup>2</sup> (точка № 44 – зеленые насаждения в районе СНТ Березка).

Анализ данных показателей указывает на уменьшение длины, ширины и площади листьев березы повислой в Липецке по сравнению с Воронежем. В 88 % точек в Воронеже значение площади листьев меньше, чем в фоновой точке (20,60 см<sup>2</sup>); в Липецке в 97 % пунктов мониторинга отмечается уменьшение площади листовых пластинок по сравнению с фоном (21,26 см<sup>2</sup>).

Для насаждений тополя итальянского вариабельность рассматриваемых параметров приведена в таблице 2.

Таблица 2

Крайние значения морфометрических параметров листовых пластинок тополя итальянского  
[Table 2. Extreme values of morphometric parameters of *Populus italica* leaves]

Индикационный параметр / Indication parameter	Город Воронеж / Voronezh City	Номер точки (местоположение) / Point number (location)	Город Липецк / Lipetsk City	Номер точки (местоположение) / Point number (location)
длина, мм - минимум	51,16±1,34	№ 37 (ул. Лебедева, 2д)	49,52±1,19	№ 10 (перекресток ул. Водопьянова и пр-та Победы) № 23 (Верхний парк)
	80,16±1,39	№ 15 (ул. Дарвина, 1)	80,24±2,46	
ширина, мм - минимум	44,88±0,92	№ 35 (ул. Ростовская, ост. Шинный завод)	47,68±1,63	№ 40 (ул. Ленинградская, 6) № 26 (ул. Краснознаменная, 2Б)
	82,44±1,98	№ 15 (ул. Дарвина, 1)	74,24±2,24	
площадь листа, см <sup>2</sup> - минимум	13,26±0,58	№ 35 (ул. Ростовская, ост. Шинный завод)	13,89±0,64	№ 6 (ул. Ковалева, 126Б) № 44 (СНТ Березка)
	39,42±0,98	№ 15 (ул. Дарвина, 1)	28,34±0,92	

Для тополя итальянского зафиксировано минимальное значение длины по Липецку. Наименьшая ширина листа отмечается в Воронеже. Площадь листовых пластинок имеет больший диапазон колебаний в Воронеже, 90 % точек

характеризуется уменьшением площади по сравнению с фоном (31,21 см<sup>2</sup>). По Липецку во всех пунктах наблюдается снижение данного показателя по сравнению с фоновым значением (28,34 см<sup>2</sup>).

Среднеарифметические значения морфометрических параметров листовых пластинок ( $M \pm m_M$ )  
[Table 3. Arithmetic mean values of morphometric parameters of leaves ( $M \pm m_M$ )]

Индикационный параметр / Indication parameter	Город Воронеж / Voronezh City		Город Липецк / Lipetsk City	
	<i>Betula pendula</i>	<i>Populus italica</i>	<i>Betula pendula</i>	<i>Populus italica</i>
длина, мм	61,41±0,90	65,84±0,92	56,81±1,00	64,37±1,09
ширина, мм	49,28±0,83	62,80±1,19	43,64±0,92	60,72±1,09
площадь листа, см <sup>2</sup>	16,23±0,51	23,90±0,85	13,74±0,59	21,48±0,61
флуктуирующая асимметрия	0,055±0,001	0,089±0,02	0,056±0,001	0,087±0,001

В таблице 3 приведены данные исследуемых морфометрических параметров фотосинтезирующего аппарата (среднее арифметическое ( $M$ ) и ошибка среднего арифметического ( $m_M$ ) по каждому показателю).

Усредненные данные показывают меньшие значения морфометрических параметров по Липецку. Причем для березы повислой наблюдается уменьшение параметров до 15 %, а по тополи доходит лишь до 10 %.

Наиболее частой причиной минимизации размеров фотосинтетического аппарата является закупорка устьиц пылевидными частицами, а, следовательно, нарушение процессов фотосинтеза и транспирации [3]. Происходит аккумуляция ксенобиотиков в тканях и клетках, вследствие чего нарушаются процессы саморегуляции.

Известно, что от площади листовых пластинок зависит поглощение растением фотосинтетически активной радиации. При уменьшении размеров вегетативных органов под влиянием стрессовых факторов среды происходит сокращение ассимиляционного аппарата, а, следовательно, снижение фотосинтетической продуктивности. При повреждении листьев загрязняющими веществами и поражении вредителями, фитопатогенами (бактериями, вирусами, грибами) на листьях появляются различные пятна хлоротичного вида и некротические участки. Таким образом, экологические факторы (абиотические, биотические, антропогенные) среды обитания растений влияют на размеры листовых пластинок.

Следует отметить, что характер повреждения листового аппарата зависит также от биологических особенностей вида, онтогенетического состояния организма, адаптационных возможностей. Береза повислая в данном случае реагирует на колебания стрессовых факторов среды более сильно, чем тополь итальянский, что объясняется большей устойчивостью последнего.

Охарактеризуем степень отклонения в стабильности развития листовых пластинок видов-индикаторов по показателю флуктуирующей асимметрии. При этом следует учесть, что на появление асимметрии у билатеральных структур влияют не только экологические, но и генетические факторы (мутация, гибридизация, инбридинг) [20].

Если рассматривать средние значения флуктуирующей асимметрии листьев, то для березы повислой несколько выше этот показатель в Липецке, а у тополя итальянского – в Воронеже (см. табл. 3). Вариабельность данного параметра выше по березе в Липецке, по тополи – в Воронеже (рис. 1).

Минимальные значения флуктуирующей асимметрии зафиксированы в Воронеже у березы по улице Шишкова (точка № 53), в ботаническом саду ВГУ (№ 63), в поселках Боровом (№ 64) и Репном (№ 65). Максимальные значения  $I_{FA}$  отмечены по Московскому проспекту (№ 12), на пересечении улиц 9 Января и Антонова-Овсеенко (№ 27), улице Холмистой (№ 40).

Для Липецка минимум данного параметра наблюдается в парке Победы (точка № 22), парке «Быханов сад» (№ 19), на улице 20 Партсъезда (№ 2), улице Профсоюзной (№ 28). Наибольшая асимметричность отмечена в следующих точках: улица Циолковского, 43 (№ 4), улица Катукова, 56 (№ 11), улица Морская, 56 (№ 29).

Сравнение показателя с фоновыми значениями показало превышение во всех пунктах мониторинга по Воронежу, и в 31 точке из 33 по Липецку (незначительно ниже фона  $I_{FA}$  только по улице 20 Партсъезда и в парке Победы).

По тополи итальянскому минимальные значения в Воронеже зафиксированы по улице Степана Разина (№ 21), улице Депутатской (№ 59), проспекту Труда (№ 49). Максимум наблюдается вблизи шинного завода (точка № 35), в окрестностях АО «Воронежсинтезкаучук» (№ 31-33).

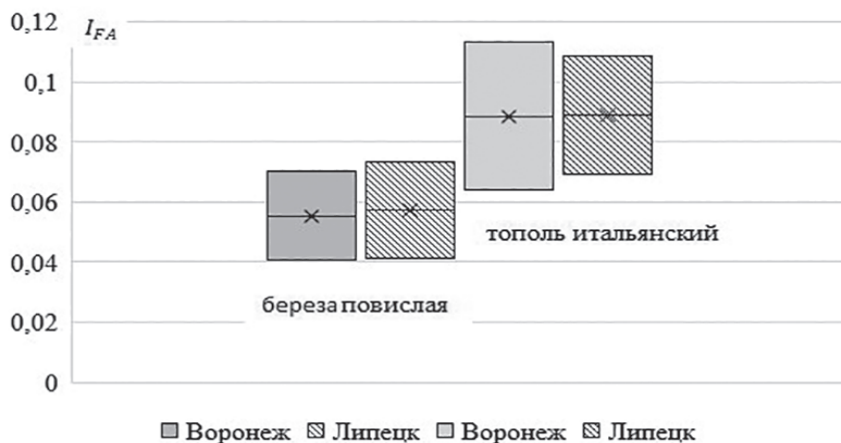


Рис. 1. Диапазоны вариабельности интегрального показателя флуктуирующей асимметрии [Fig. 1. Ranges of variability of the integral index of fluctuating asymmetry]

В Липецке наименьшие значения флуктуирующей асимметрии отмечены по улице Желябова (точка № 3), в сквере имени В. Н. Маркова (№ 21), в Верхнем парке (№ 23), а наибольшие – по улице Краснознаменной (№ 26), улице Энергостроителей (№ 30), улице Metallургов (№ 37).

Интегральный показатель флуктуирующей асимметрии листовых пластинок тополя итальянского во всех точках в обоих городах превышает соответствующие фоновые значения. В Липецке наибольшая асимметрия отмечена в зоне влияния производственных площадок Новолипецкого металлургического комбината и в окрестностях Особой экономической зоны Липецка, а в Воронеже – вблизи АО «Воронежсинтезкаучук», Закрытого акционерного общества «Воронежский шинный завод», а также в районе окружной автодороги по улице Антонова-Овсеенко.

Для сравнения экологических условий, а также особенностей онтогенеза древесных растений нами осуществлена попытка установления связи между исследуемыми параметрами на основе метода иерархической агломеративной классификации. С помощью программного продукта STATISTICA 10.0 был проведен кластерный анализ на основе метода Варда, в основе которого лежит оценка расстояний между кластерами с помощью элементов дисперсионного анализа.

На рисунках 2 и 3 приведены результаты кластер-анализа по четырем исследуемым индикаторным признакам: длина, ширина, площадь, флуктуирующая асимметрия листовой пластинки. На горизонтальной оси показаны сгруппированные пункты мониторинга в соответствии с номерами точек [8, 9]. В качестве меры близости между объектами (меры подобия) было выбрано

Хеммингово расстояние, или манхэттенское расстояние (расстояние городских кварталов), или сити-блок расстояние. Оно рассчитывается как среднее разностей по координатам. В отличие от евклидова расстояния влияние отдельных выбросов меньше, так как координаты не возводятся в квадрат, результаты же в целом подобны метрике Евклида [17].

Рассмотрим результаты классификации точек для березы повислой. Для города Воронежа характерно три кластера и еще один обособленный (точки № 64 и № 65, расположенные в левобережной части города). В первый кластер вошли точки № 17 и № 27 (обе расположены на крупных перекрестках), более удалена точка № 31. Тесную связь имеют точки № 8 (улица 60-й Армии, 27) и № 60 (улица Циолковского, 127). Затем микрогруппу образуют точки № 58 и № 63, более удалена точка № 22 (улица Хользунова, 102).

Второй кластер включает микрогруппу ряда точек, расположенных в жилой зоне (№ 9, № 51, № 54, № 55). Показательна схожесть точек № 18 (Московский проспект, 144) и № 62 (окрестности спортивно-оздоровительного комплекса «Олимпик»), которые находятся территориально довольно близко. В этот кластер входят также точки № 15, № 29 (площадь Черняховского), № 53. Примечательно, что точки преимущественно расположены в северной части города.

Третий кластер можно разделить на четыре микрогруппы. В одну входят точки промышленной зоны левобережья (№ 36 и № 39). Ко второй принадлежат точки № 3 (улица Лидии Рябцевой, 516), № 5 (улица Лебедева, 2) и № 10 (проспект Патриотов, 24). В следующую объединены пункты № 30 (перекресток проспекта Труда и переулка

Комбикормового), № 44 (улица Холмистая, 20), № 50 (улица 9 Января, 180). В последнюю микрогруппу входят точки № 2 (улица 9 Января), № 52

(улица Лизюкова, 73а), № 41 (улица Богдана Хмельницкого, 35), № 28 (перекресток Бульвара Победы и улицы 60-й Армии).

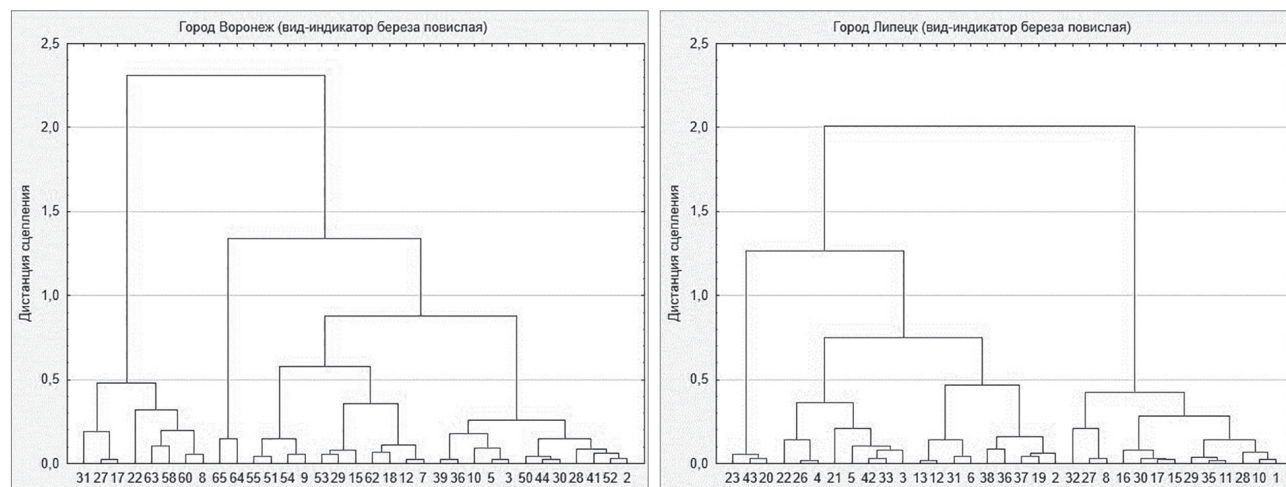


Рис. 2. Дендрограмма иерархической кластеризации в четырехмерном пространстве признаков листовых пластинок березы повислой по методу Варда (манхэттенское расстояние, стандартизированные данные) [Fig. 2. Dendrogram of hierarchical clustering in the four-dimensional space of morphometric features of *Betula pendula* leaf plates by the Ward's method (Manhattan distance, standardised data)]

Проанализируем результаты кластеризации для города Липецка (рис. 2). Выделяются четыре кластера с рядом микрогрупп. Первый мини кластер включает только три точки № 20, № 23, № 43 (все они находятся в парках). Второй кластер объединяет две группы: первая – № 22 и № 26, № 4, вторая – № 3 и № 33 (Осенний проезд, 1), № 42 (проспект Мира, 38), № 5 (улица Опытная, 2) и наиболее удалена точка № 21 (находится в сквере). В третьем кластере тесную связь имеют точки № 12 (улица Гагарина, 101) и № 13; далее № 6 и № 31 (улица Архангельская, 2) – расположены в промышленной зоне; № 36 (улица Ферросплавная, 2вЛ2) и № 38 (особая экономическая зона), далее объединены точки № 37 и № 19, № 2. В четвертом кластере отмечается ряд микрогрупп: 1) № 8 (перекресток улицы Липовской и улицы Семашко) и № 27 (улица Волгоградская, 40), более удалена точка № 32; 2) точки № 30, № 17 (перекресток улицы Яна Берзина и улицы Водопьянова), № 15 (улица Катюкова, 4), № 16 (улица Московская, 85); 3) точки № 35 (улица 9 Мая, 18) и № 11, № 29; 4) точки № 10 и № 1 (улица 40 лет Октября, 4), более удалена точка № 28.

На основе анализа данных древовидных диаграмм в целом прослеживается следующая закономерность: более тесную связь имеют пункты, расположенные либо в одной функциональной зоне, либо территориально близкие. Между отдельными кластерами связь более слабая.

По тополю итальянскому мы видим, исходя из дендрограммы (см. рис. 3), выделение нескольких микрогрупп. Посмотрим на некоторые из них. В Воронеже, например, имеют тесную связь точки № 5 (улица Лебедева, 2), № 47 (улица Волгоградская, 48), № 33 (улица Менделеева, 1л/1), № 3 (улица Лидии Рябцевой, 51б). Все эти пункты, за исключением последнего, находятся в промышленной зоне, пункт №3 – условно можно отнести к транспортной зоне.

По Липецку в одну микрогруппу объединены точки № 35 (улица 9 Мая, 18), № 26, № 31, № 28, № 20 (Нижний парк), расположенные в жилой или рекреационной зонах. Имеют высокую степень связи пункты № 13, № 39 (Грязинское шоссе, вл. 5) и № 41 (улица Metallургов, 7), которые входят в транспортную зону.

Однако, есть и микрогруппы, например, № 56 (улица Ипподромная, 55), № 36 (улица Циолковского, 27), № 28 (перекресток Бульвара Победы и 60-й Армии), объединяющие точки из разных функциональных зон и территориально далеко расположенные. Для тополя итальянского таких случаев значительно больше, чем для березы.

В связи с этим можно предположить ряд гипотез. Так, разбиение территории по функциональному зонированию требует более дробной классификации, поскольку один и тот же участок нередко можно отнести сразу к нескольким зонам, например, транспортной и жилой.

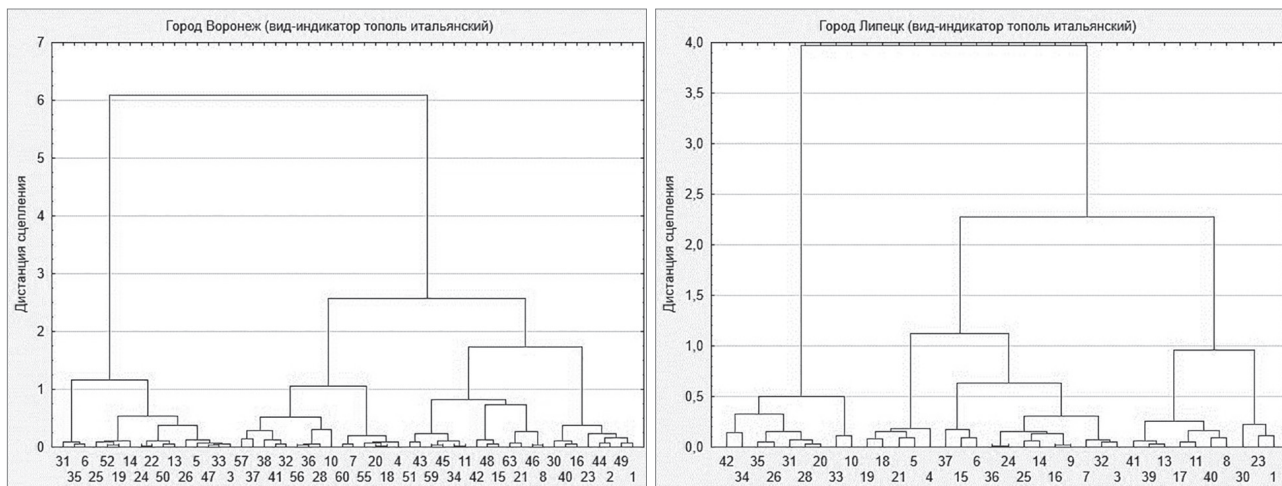


Рис. 3. Дендрограмма иерархической кластеризации в четырехмерном пространстве признаков листовых пластинок тополя итальянского по методу Варда (манхэттенское расстояние, стандартизированные данные) [Fig. 3. Dendrogram of hierarchical clustering in the four-dimensional space of morphometric features of *Populus italica* leaf plates by the Ward's method (Manhattan distance, standardised data)]

Кроме того, в кластеризации участвовали только четыре морфометрических параметра, однако, для более полной картины целесообразно дополнить биоиндикацию также биогеохимическими исследованиями.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Древесные растения на территории крупных населенных пунктов произрастают в условиях существенно трансформированной среды обитания. Нами выявлены существенные отклонения биоиндикационных параметров (длины, ширины, площади, флуктуирующей асимметрии листовых пластинок) по сравнению с контролем в районах с повышенной техногенной нагрузкой для обоих городов – Воронежа и Липецка. Используемые в качестве объекта исследования виды-индикаторы (береза повислая и тополь итальянский) являются чувствительными к стрессовым экологическим условиям и могут быть использованы для оценки состояния окружающей среды на основе комплекса морфометрических параметров листовых пластинок.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бухарина И.Л., Гибадулина И.И. Изменение мезоструктурных характеристик липы мелколистной в условиях техногенного загрязнения среды (на примере г. Набережные Челны) // *Экобиотех*, 2020, т. 3, № 3, с. 401-411.
2. Бухарина И.Л., Поварнищина Т.М., Ведерников К.Е. *Эколого-биологические особенности древесных растений в урбанизированной среде*. Ижевск: ФГОУ ВПО Ижевская ГСХА, 2007. 216 с.
3. Горышина Т.К. *Растение в городе*. Ленинград: Издательство ЛГУ, 1991. 148 с.
4. Дмитриев Н.Н., Хуснидинов Ш.К. *Методика ускоренного определения площади листовой поверх-*

ности сельскохозяйственных культур с помощью компьютерных технологий // *Вестник КрасГАУ*, 2016, № 7 (118), с. 88-93.

5. Ерофеева Е.А. Флуктуирующая асимметрия листа *Betula pendula* (*Betulaceae*) в условиях автотранспортного загрязнения (г. Нижний Новгород) // *Растительные ресурсы*, 2015, т. 51, № 3, с. 366-383.

6. *Здоровье среды: методика оценки. Оценка состояния природных популяций по стабильности развития: методическое пособие для заповедников* / В.М. Захаров, А.С. Баранов, В.И. Борисов и др. Москва: Центр экологической политики России, 2000. 66 с.

7. Кавеленова Л.М. Экологические основы и принципы построения системы фитомониторинга урбосреды в лесостепи // *Вестник Самарского государственного университета. Естественнонаучная серия*, 2003, № S2, с. 182-191.

8. Клевцова М.А. Создание тематической геоинформационной системы «Городская биота» / этапы, методики, критерии оценки // *Региональная экологическая диагностика состояния воздушной среды промышленных городов*, Воронеж, 2020, с. 148-161.

9. Клевцова М.А., Виноградов П.М. Биогеохимические параметры листовых пластинок березы повислой как показатель экологической напряженности урбанизированной среды города Липецка // *Экологическая оценка состояния воздушного бассейна крупных промышленных городов Центрального Черноземья*, 2021, с. 152-166.

10. Кулагин А.Ю., Тагирова О.В. Специфичность экологических условий Уфимского промышленного центра и динамика формирования листьев *Betula pendula* Roth. // *Известия Уфимского научного центра РАН*, 2017, № 3-1, с. 94-98.

11. *Методы экологических исследований: учебное пособие для вузов* / Н.В. Каверина, Т.И. Прожорина, Е.Ю. Иванова и др. Воронеж-Санкт-Петербург: Научная книга, 2019. 354 с.



12. Опекунова М.Г. *Биоиндикация загрязнений: учебное пособие*. Санкт-Петербург: Издательство Санкт-Петербургского государственного университета, 2004. 265 с.
13. *Практикум по информационным технологиям: учебное пособие для вузов* / С.А. Куролап и др. Воронеж: Воронежский государственный университет, 2008. 265 с.
14. Прохорова Н.В., Макарова Ю.В. Древесные растения в системе озеленения промышленных городов как фитоиндикаторы полиметаллического загрязнения урбосреды // *Сборник научных трудов Государственного Никитского ботанического сада*, 2018, т. 147, с. 85-87.
15. Уткин А.И., Ермолова Л.С., Уткина И.А. *Площадь поверхности лесных растений: сущность, параметры, использование*. Москва: Наука, 2008. 292 с.
16. Уфимцева М.Д., Терехина Н.В. *Фитоиндикация экологического состояния урбогеосистем*. Санкт-Петербург: Наука, 2005. 339 с.
17. Халафян А.А. STATISTICA 6. *Статистический анализ данных: учебное пособие для студ. вузов*. Москва: Бином, 2010. 522 с.
18. Экологический мониторинг загрязнения территории Васильевского острова Санкт-Петербурга с использованием тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) / М.Г. Опекунова, Л.С. Захарян, О.В. Вокуева, А.О. Константинова // *Известия Русского географического общества*, 2011, т. 143, № 2, с. 31-44.
19. Batala E., Tsitsoni T. Street tree health assessment: a tool for study of urban greenery // *Int. J. Sus. Dev. Plann.*, 2009, vol. 4, no. 4, pp. 345-356.
20. Fluctuating Asymmetry of Plant Leaves: Batch Processing with LAMINA and Continuous Symmetry Measures / J.H. Graham, M.J. Whitesell, II M. Fleming, H. Hel-Or, E. Nevo, S. Raz // *Symmetry*, 2015, 7, pp. 255-268.
21. How do ecologists select and use indicator species to monitor ecological change? Insights from 14 years of publication in Ecological Indicators / Ahmed A.H. Siddiga, Aaron M. Ellisonb, Alison Ochsc, Claudia Villar-Lee-mand and Matthew K. Laub // *Ecological Indicators*, 2016, 60, pp. 223-230. DOI: 10.1016/j.ecolind.2015.06.036.
22. Klingenberg C.P. Size, shape, and form: concepts of allometry in geometric morphometrics // *Development genes and evolution*, 2016, 226 (3), pp. 113-137.
23. Kurteva M. Bioindication ability of tree and shrub species under industrial environmental pollution // *Natura Montenegrina, Podgorica*, 2008, no. 7 (2), pp. 485-503.

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Поступила в редакцию 22.03.2022

Принята к публикации 05.09.2022

---

---

## GEOECOLOGY

---

---

UDC 504.05:581.5 (470.322:470.324)

ISSN 1609-0683

DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2022/3/86-96>

### Comparative Characteristics of the Environmental Conditions of Industrial Cities in the Central Black Soil Region Using Bioindication Methods

M.A. Klevtsova ✉, A.A. Mikheev

Voronezh State University, Russian Federation  
(1, Universitetskaya sq., Voronezh, 394018)

**Abstract:** The purpose of the present study was to compare the ecological conditions of woody plants growing in two industrially developed cities of the Central Black Soil Region - Voronezh and Lipetsk.

**Materials and methods.** During the summer of 2021, a survey of green spaces was conducted. The indicator species were the overhanging birch (*Betula pendula* Roth.) and Italian poplar (*Populus italica* (Du Roi) Moench). A total of 65 monitoring sites in Voronezh and 44 sites in Lipetsk were investigated. The morphometric parameters used for comparative characterization of environmental conditions were the following: length, width, area, and fluctuating asymmetry of leaf laminae. More than 4,500 leaf samples were analyzed using bioindication methods.

© Klevtsova M.A., Mikheev A.A., 2022

✉ Marina A. Klevtsova, e-mail: [marin-m@yandex.ru](mailto:marin-m@yandex.ru)



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

**Results and discussion.** A decrease in the size of leaf plates and an increase in fluctuating asymmetry in the zone of influence of industrial emissions of enterprises (in Voronezh in the neighborhood of JSC Voronezhskintezkauchuk, in Lipetsk - in the zone of influence of metallurgical plant) were revealed. High values of integral index of fluctuating asymmetry were also recorded at major intersections of main streets. Cluster analysis on the basis of four morphometric parameters allowed to group similar in terms of conditions sites. Thus, in most cases (for the indicator birch tree species), points located in the same functional area or territorially close to each other have a closer relationship.

**Conclusions.** The morphometric parameters of woody plants when growing in urban environments are affected by modified abiotic factors, pollutant emissions from stationary and mobile sources.

**Key words:** urbanised areas, environment, bioindication, ecological conditions, green spaces, woody plants.

**Funding:** The research was supported by the Russian Science Foundation, project 20-17-00172.

**For citation:** Klevtsova M.A., Mikheev A.A. Comparative Characteristics of the Environmental Conditions of Industrial Cities in the Central Black Soil Region Using Bioindication Methods. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografiya. Geoekologiya*, 2022, no. 3, pp. 86-96 (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2022/3/86-96>

#### REFERENCES

1. Bukharina I.L., Gibadulina I.I. Izmenenie mezostrukturnykh kharakteristik lipy melkolistnoy v usloviyakh tekhnogenogo zagryazneniya sredy (na primere g. Naberezhnye Chelny) [Changes in the mesostructural characteristics of small-leaved linden under conditions of technogenic pollution of the environment (on the example of Naberezhnye Chelny)]. *Ekobiotech*, 2020, vol. 3, no. 3, pp. 401-411. (In Russ.)
2. Bukharina I.L., Povarnitsina T.M., Vedernikov K.E. *Ekologo-biologicheskie osobennosti drevesnykh rasteniy v urbanizirovannoy srede* [Ecological and biological features of woody plants in an urbanized environment]. Izhevsk: FGOU VPO Izhevskaya GSKhA, 2007. 216 p. (In Russ.)
3. Goryshina T.K. *Rastenie v gorode* [Plant in the city]. Leningrad: Izdatel'stvo LGU, 1991. 148 p. (In Russ.)
4. Dmitriev N.N., Khusnidinov Sh.K. Metodika uskorenogo opredeleniya ploshchadi listovoy poverkhnosti sel'skokhozyaystvennykh kul'tur s pomoshch'yu komp'yuternykh tekhnologiy [Methods for the accelerated determination of the leaf surface area of agricultural crops using computer technology]. *Vestnik KrasGAU*, 2016, no. 7 (118), pp. 88-93. (In Russ.)
5. Erofeeva E.A. Fluktuiruyushchaya asimmetriya lista *Betula pendula* (Betulaceae) v usloviyakh avtotransportnogo zagryazneniya (g. Nizhny Novgorod) [Fluctuating leaf asymmetry of *Betula pendula* (Betulaceae) under conditions of road pollution (Nizhny Novgorod)]. *Rastitel'nye resursy*, 2015, vol. 51, no 3, pp. 366-383. (In Russ.)
6. *Zdorov'e sredy: metodika otsenki. Otsenka sostoyaniya prirodnykh populyatsiy po stabil'nosti razvitiya: metodicheskoe posobie dlya zapovednikov* [Environmental health: assessment methodology. Assessment of the state of natural populations in terms of development stability: a methodological guide for nature reserves] / V.M. Zakharov, A.S. Baranov, V.I. Borisov i dr. Moscow: Tsentr ekologicheskoy politiki Rossii, 2000. 66 p. (In Russ.)
7. Kavelenova L.M. *Ekologicheskie osnovy i printsipy postroeniya sistemy fitomonitoringa urbosredy v lesostepi* [Ecological bases and principles of building a system of phytomonitoring of the urban environment in the forest-steppe]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo universiteta. Estestvennonauchnaya seriya*, 2003, no. S2, pp. 182-191. (In Russ.)
8. Klevtsova M.A. Sozdanie tematicheskoy geoinformatsionnoy sistemy «Gorodskaya biota» / etapy, metodiki, kriterii otsenki / [Creation of the thematic geoinformation system «Urban biota» / stages, methods, evaluation criteria] / *Regional'naya ekologicheskaya diagnostika sostoyaniya vozduшной sredy promyshlennykh gorodov*, 2020, pp. 148-161. (In Russ.)
9. Klevtsova M.A., Vinogradov P.M. Biogeokhimicheskie parametry listovykh plastinok berezy povisloy kak pokazatel' ekologicheskoy napryazhennosti urbanizirovannoy sredy goroda Lipetska [Biogeochemical parameters of the leaf plates of the hanging birch as an indicator of the ecological stress of the urbanized environment of the Lipetsk city]. *Ekologicheskaya otsenka sostoyaniya vozdušnogo basseyna krupnykh promyshlennykh gorodov Tsentral'nogo Chernozem'ya*, 2021. pp. 152-166. (In Russ.)
10. Kulagin A. Yu., Tagirova O. V. Spetsifichnost' ekologicheskikh usloviy Ufimskogo promyshlennogo tsentra i dinamika formirovaniya list'ev *Betula pendula* Roth. [Specificity of ecological conditions of the Ufa industrial center and the dynamics of the formation of leaves of *Betula pendula* Roth.]. *Izvestiya Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2017, no. 3-1, pp. 94-98. (In Russ.)
11. *Metody ekologicheskikh issledovaniy: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Methods of environmental research: a textbook for universities] / N. V. Kaverina, T. I. Prozhorina, E. Yu. Ivanova i dr. Voronezh-Saint-Petersburg: Nauchnaya kniga, 2019. 354 p. (In Russ.)
12. Opekunova M.G. *Bioindikatsiya zagryazneniy: uchebnoe posobie* [Bioindication of pollution: a textbook]. Saint Petersburg: Izdatel'stvo Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta, 2004. 265 p. (In Russ.)
13. *Praktikum po informatsionnym tekhnologiyam: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Workshop on information technology: textbook for universities] / S.A. Kurolap i dr. Voronezh: Voronezhskiy gosudarstvennyy universitet, 2008. 265 p. (In Russ.)
14. Prokhorova N.V., Makarova Yu.V. *Drevesnye rasteniya v sisteme ozeleneniya promyshlennykh gorodov*

как фитоиндикаторы полиметаллического загрязнения городских территорий [Woody plants in the landscaping system of industrial cities as phytoindicators of polymetallic pollution of the urban environment]. *Sbornik nauchnykh trudov Gosudarstvennogo Nikitskogo botanicheskogo sada*, 2018, vol. 147, pp. 85-87. (In Russ.)

15. Ufimtseva M. D., Terekhina N. V. *Fitoindikatsiya ekologicheskogo sostoyaniya urbogeosistem* [Phytoindication of the ecological state of urban geosystems]. Saint-Petersburg: Nauka, 2005. 339 p. (In Russ.)

16. Utkin A. I., Ermolova L. S., Utkina I. A. *Ploshchad' poverkhnosti lesnykh rasteniy: sushchnost', parametry, ispol'zovanie* [Surface area of forest plants: essence, parameters, use]. Moscow: Nauka, 2008. 292 p. (In Russ.)

17. Khalafyan A. A. *STATISTICA 6. Statisticheskiy analiz dannykh: uchebnoe posobie dlya stud. vuzov*. [STATISTICA 6. Statistical data analysis: a textbook for students. Universities]. Moscow: Binom, 2010. 522 p. (In Russ.)

18. Ekologicheskii monitoring zagryazneniya territorii Vasil'evskogo ostrova Sankt-Peterburga s ispol'zovaniem topolya bal'zamicheskogo (*Populus balsamifera* L.) [Ecological monitoring of pollution of the territory of Vasilievsky Island of St. Petersburg using balsam poplar (*Populus balsamifera* L.)] / M. G. Opekunova, L. S. Zakharyan, O. V. Vokueva, A. O. Konstantinova. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*, 2011, vol. 143, no. 2, pp. 31-44. (In Russ.)

Клевцова Марина Александровна  
доцент кафедры геоэкологии и мониторинга окружающей среды факультета географии, геоэкологии и туризма, г. Воронеж, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-2947-4993, e-mail: marin-m@yandex.ru

Михеев Алексей Александрович  
преподаватель кафедры рекреационной географии, страноведения и туризма факультета географии, геоэкологии и туризма, г. Воронеж, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-8870-2554, e-mail: alexey.mikheev.88@gmail.com

19. Batala E., Tsitsoni T. Street tree health assessment: a tool for study of urban greenery. *Int. J. Sus. Dev. Plann.*, 2009, vol. 4, no. 4, pp. 345-356.

20. Fluctuating Asymmetry of Plant Leaves: Batch Processing with LAMINA and Continuous Symmetry Measures / J. H. Graham, M. J. Whitesell, II M. Fleming, H. Hel-Or, E. Nevo, S. Raz. *Symmetry*, 2015, 7, pp. 255-268.

21. How do ecologists select and use indicator species to monitor ecological change? Insights from 14 years of publication in Ecological Indicators / Ahmed A. H. Siddiga, Aaron M. Ellisonb, Alison Ochsc, Claudia Villar-Leemand and Matthew K. Laub. *Ecological Indicators*, 2016, 60, pp. 223-230. DOI: 10.1016/j.ecolind.2015.06.036.

22. Klingenberg C. P. Size, shape, and form: concepts of allometry in geometric morphometrics. *Development genes and evolution*, 2016, 226 (3), pp. 113-137.

23. Kurteva M. Bioindication ability of tree and shrub species under industrial environmental pollution. *Natura Montenegrina, Podgorica*, 2008, no. 7 (2), pp. 485-503

**Conflict of interests:** The authors declare no information of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Received: 22.03.2022

Accepted: 05.09.2022.

Marina A. Klevtsova  
Cand. Sci. (Geogr.), Assoc. Prof. at the Department of Geoecology and Environmental Monitoring, Faculty of Geography, Geoecology and Tourism, Voronezh, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-2947-4993, e-mail: marin-m@yandex.ru

Alexey A. Mikheev  
Lecturer at the Department of Recreational Geography, Regional Studies and Tourism, Faculty of Geography, Geoecology and Tourism, Voronezh, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-8870-2554, e-mail: alexey.mikheev.88@gmail.com