



УДК 504.05:581.151 (470.324)  
DOI 10.52575/2712-7443-2023-47-3-472-488

## Биоиндикационная оценка техногенного загрязнения урбанизированной среды по реакциям тополя итальянского (*Populus italica* (Du Roi) Moench)

Клевцова М.А., Михеев А.А.

Воронежский государственный университет,  
Россия, 394018, г. Воронеж, Университетская пл, 1  
E-mail: klevtsova@geogr.vsu.ru

**Аннотация.** Биоиндикационные исследования являются неотъемлемой частью современного мониторинга окружающей среды урбанизированных зон. Цель данных исследований состояла в оценке экологического состояния территории г. Воронежа с использованием методов биоиндикации. В летний период 2023 года было проведено обследование 26 пунктов на территории города. В качестве вида-индикатора выступал тополь итальянский (*Populus italica* (Du Roi) Moench). В ходе исследования определяли следующие морфометрические параметры листовых пластинок: длина, ширина, площадь, а также количество пылевидных частиц, осажденное на листовой поверхности. Выявлена корреляционная достоверная связь между длиной и шириной листьев. Наблюдается уменьшение размеров листовых пластинок в зонах с высокой степенью техногенного прессинга, в особенности в промышленных районах Левобережья, а также в транспортных узлах (на пересечениях крупных магистральных улиц). Зольность листовых пластинок возрастает в промышленно-транспортных зонах по сравнению с жилыми и рекреационными. Кластерный анализ на основе четырех показателей позволил сгруппировать сходные по экологическим условиям участки города. Накопление пыли на листовых пластинках связано с наличием пылевидных частиц в воздухе, а также факторами, способствующими поступлению пыли с поверхности почвы (отсутствие травянистого покрова, длительный бездождный период и другие). Максимальная запыленность листьев тополя итальянского зафиксирована в промышленно-транспортных районах. Результаты исследования позволили выявить территории с высоким уровнем техногенного загрязнения.

**Ключевые слова:** биоиндикация, урбанизированная среда, загрязнение окружающей среды, тополь итальянский, листовая пластинка, запыленность, зольность

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-17-00172, <https://rscf.ru/project/20-17-00172>

**Для цитирования:** Клевцова М.А., Михеев А.А. 2023. Биоиндикационная оценка техногенного загрязнения урбанизированной среды по реакциям тополя итальянского (*Populus italica* (Du Roi) Moench). Региональные геосистемы, 47(3): 472–488. DOI: 10.52575/2712-7443-2023-47-3-472-488

---

## Bioindicative Assessment of Technogenic Pollution of the Urbanized Environment According to the Reactions of *Populus italica* (Du Roi) Moench

Marina A. Klevtsova, Aleksey A. Mikheev  
Voronezh State University,  
1 Universitetskaya pl., Voronezh, 394018, Russia  
E-mail: klevtsova@geogr.vsu.ru

**Abstract.** Carrying out regular research to assess the ecological state of urbanized areas is an important scientific direction. To obtain reliable information, in addition to instrumental methods, bioindication

methods are used. In this case, the set of bioindicative features plays an important role. We used such indicators as length, width, area, ash content of leaves. The content of dust on the leaves of the indicator species of *Populus italica* (Du Roi) Moench was determined. Such comprehensive studies for the territory of the city of Voronezh were carried out for the first time. 26 points with different environmental conditions were surveyed. Comparison of industrial, transport, residential and recreational areas according to bioindicative parameters of woody plants was carried out. In the course of using cluster analysis of data, zones with a high level of stress factors for the growth of woody plants were identified. With an increase in environmental pollution, the size of leaf blades decreases and their ash content increases. There is an excess of bioindicative parameters at all sampling points compared to the control plot. Areas with a high content of dust-like particles on leaf blades were identified. The research results allow us to give recommendations for further monitoring of urban areas.

**Key words:** bioindication, urbanized environment, environmental pollution, *Populus italica* (Du Roi) Moench, leaf blade, dust content, ash content

**Acknowledgments:** The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 20-17-00172, <https://rscf.ru/project/20-17-00172/>.

**For citation:** Klevtsova M.A., Mikheev A.A. 2023. Bioindicative Assessment of Technogenic Pollution of the Urbanized Environment According to the Reactions of *Populus italica* (Du Roi) Moench. Regional Geosystems, 47(3): 472–488. DOI: 10.52575/2712-7443-2023-47-3-472-488

---

## Введение

В настоящее время негативным фактором, влияющим на экологическую обстановку в крупных населенных пунктах, является загрязнение окружающей среды. При этом качество среды обеспечивает устойчивое функционирование урбоэкосистем. Вследствие чего оценка состояния территории городов, в частности их разных функциональных зон, является актуальным направлением современных исследований в данной области.

В научной сфере достаточно часто применяют методы биоиндикации, позволяющие непосредственно выявить разноаспектные качества окружающей среды, а также влияние стрессовых факторов на жизнедеятельность живых организмов. Биоиндикационные методы не предполагают предварительной идентификации конкретных химических соединений или физических воздействий, однако они отличаются доступностью в применении, не требуют существенных финансовых затрат и дают возможность осуществлять мониторинг в постоянном режиме [Биологический контроль..., 2007]. При этом биоиндикация представляет собой выявление и анализ экологически существенных природных и антропогенных нагрузок на основе ответных реакций на них живых организмов и чаще всего непосредственно в среде их обитания.

В качестве объектов исследования часто выступают виды-индикаторы, в частности древесные растения, произрастающие в тех или иных экологических условиях. Для диагностики состояния окружающей среды используют такие биоиндикационные показатели, как площадь листовых пластинок, флуктуирующая асимметрия, зольность тех или иных органов, пылеудерживающая способность. Так, среди современных отечественных работ, основанных на данных индикационных признаках, можно отметить результаты исследований по г. Красноярску [Скрипальщикова и др., 2012], г. Москве [Чернышенко, 2012], г. Омску [Денисова, 2014], г. Улан-Удэ [Лыкшитова, Ловцова, 2014], г. Петрозаводску [Июффе, 2014], г. Тольятти [Беляева, 2015], Нижегородской области [Бессчетнов, Бессчетнова, 2019], г. Волгограду [Глинянова и др., 2019]. В зарубежной литературе данная проблематика поднимается в разных странах и регионах: в США [Nowak et al., 2006], Казахстане [Кентбаева, 2018], Венгрии [Hrotkó et al., 2021], Индии [Chaturvedi et al., 2012; Meravi et al., 2021], Великобритании [Corada et al., 2021], Китае [Chen et al., 2016], Республике Корея [Kim et al., 2023].



Для г. Воронежа – самого крупного областного центра Центрального Черноземья – биоиндикационные исследования приведены в ряде работ таких ученых, как Якушева А.Б. [2011], Разинковой А.К. и Перельгиной Е.Н. [2016], а также наших трудах [Клевцова, Добрава, 2019; Клевцова, Михеев, 2020].

Якушев А.Б. в 2010–2011 гг. рассчитал эффективность газопоглощения озелененными территориями общего пользования на основе данных о выбросах от автотранспорта и видовом составе насаждений по крупным улицам города [Якушев, 2011]. При этом в работе не приводятся сведения о влиянии эмиссии промышленных предприятий, а также о пылеулавливающей способности древесных растений.

Разинкова А.К. и Перельгина Е.Н. [2016] изучали видовой состав насаждений общего пользования, возраст, жизненное состояние и наличие патологических признаков. При этом отсутствует анализ факторов, влияющих на жизнедеятельность древесных растений, произрастающих в разных экологических условиях на территории города.

Последние десятилетия мы занимаемся проблемой оценки состояния урбанизированной среды г. Воронежа на основе методов биоиндикации. При этом современные комплексные данные по сравнительной характеристике разных экологических условий с учетом загрязнения среды взвешенными частицами отсутствуют.

Целью настоящего исследования является анализ некоторых биоиндикационных параметров листовых пластинок тополя итальянского (*Populus italica* (Du Roi) Moench), произрастающего на территории крупного промышленного центра – г. Воронежа.

Для достижения данной цели были поставлены и решены следующие задачи:

- осуществлено рекогносцировочное обследование территории города с последующим отбором растительных образцов в разных функциональных зонах, а также проведена серия анализов по определению биоиндикационных параметров на базе эколого-аналитической лаборатории Воронежского государственного университета;
- сделан сравнительный анализ различных функциональных зон города по комплексу биоиндикационных признаков у вида-индикатора;
- выявлены территории города со стрессовыми экологическими условиями для произрастания древесных растений.

### Объекты и методы исследования

В зеленых зонах значительного числа городов России от европейской части до Дальнего Востока массово представлены насаждения тополей [Борзенкова и др., 2022]. Экземпляры рода *Populus* лучше всего подходят для озеленения магистралей, живых массивов, мемориальных комплексов и других объектов. Продолжительность жизни тополя во многом зависит от правильных условий выращивания и может достигать 80 лет. Представители данного рода зарекомендовали себя в качестве достоверных видов-индикаторов, что подтверждено многочисленными исследованиями разных ученых в области биоиндикации тех или иных территорий [Федорова и др., 2010; Бессчетнов, Бессчетнова, 2019].

На территории России наиболее широко распространены тополь черный (*Populus nigra* L.), осина (*Populus tremula* L.), тополь белый (*Populus alba* L.), тополь лавролиственный (*Populus laurifolia* Ledeb.), тополь душистый (*Populus suaveolens* Fisch.), а также многочисленные гибриды. В Воронеже среди древесных растений в искусственных насаждениях преобладают представители рода *Populus*, а на отдельных территориях города (Левобережный и Советский районы) составляют 60–70 %. Таким образом, получается, что лидирующими породами по встречаемости и доле участия являются именно тополя. Тополь итальянский считается одной из наиболее подходящих пород для озеленения г. Воронеж [Федорова и др., 2010]. При этом тополя в последние десятилетия используются довольно редко в качестве посадочного материала.

Воронеж является динамично развивающимся городом-миллионером европейской части России. Основным источником загрязнения воздушной среды остается автомобильный транспорт (более 85 % от валового выброса). При этом специфические компоненты поступают от промышленных предприятий, формируя зоны повышенного экологического риска, в частности в левобережной части города – окрестности АО «Воронежсинтезкаучук» и ЗАО «Воронежский шинный завод».

Согласно официальным данным Воронежского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды – филиала ФГБУ «Центрально-Черноземное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды», осуществляющего мониторинг загрязнения атмосферного воздуха на пяти станциях наблюдения, уровень загрязнения в Воронеже в 2021 году был высокий. Концентрации взвешенных веществ, диоксида азота, формальдегида и марганца выше санитарно-гигиенических норм. Средняя за год концентрация взвешенных веществ в целом по городу составляет 1,1 ПДК. Наибольшая запыленность воздуха отмечена в Левобережном районе вблизи автотранспортной магистрали, где среднегодовая концентрация достигает 1,4 ПДК (ПНЗ № 7 – ул. Лебедева, 2), максимальная разовая составляет – 1,4 ПДК [Ежегодник состояния..., 2022].

В ходе выполнения рекогносцировочных работ нами определено 25 точек отбора растительного материала в разных функциональных зонах города Воронежа. В качестве контрольной (фоновой) точки выбрана территория санатория им. Горького. В табл. 1 указаны пункты мониторинга, в которых в течение летнего периода 2023 года проводился отбор образцов для последующего анализа.

Таблица 1  
Table 1Места отбора листовых пластинок тополя итальянского  
Places of selection of leaves of *Populus italica*

№ точки отбора	Местоположение	Функциональная зона
1	ул. 9 Января, 49	промышленная
2	ул. Л. Рябцевой, 51 б	-//-
3	ул. 9 января, 180	-//-
4	ул. Лебедева, 2	-//-
5	ул. Ростовская, 58/4	-//-
6	ул. Героев Стратосферы, 18б	-//-
7	ул. Красный Октябрь, 2/1	-//-
8	ул. Менделеева, 1л/1	-//-
9	ул. Циолковского, 27	-//-
10	ул. Ильюшина, 12б	-//-
11	ул. Богдана Хмельницкого, 35	-//-
12	ул. 60-й Армии, 27	транспортная
13	пр-т Патриотов, 24	-//-
14	ул. Дарвина, 1	-//-
15	перекресток Московского проспекта и ул. Хользунова	-//-
16	перекресток ул. 9 Января и ул. Антонова-Овсеенко	-//-
17	Ленинский пр-т, 149	-//-
18	перекресток Ленинского проспекта и ул. Брусилова	-//-
19	перекресток ул. Димитрова и ул. Волгоградской	-//-
20	ул. Вл. Невского, 53	жилая
21	ул. Лизюкова, 73 а	-//-
22	ул. Ломоносова, 114/4	-//-
23	ул. Депутатская, 10	-//-
24	ул. Циолковского, 127	-//-
25	ботанический сад ВГУ	рекреационная
26	санаторий им. Горького	фон



Следует отметить, что морфометрические параметры листьев данного вида-индикатора в этих точках мы определяли последние пять лет, а пылеулавливающую способность впервые с 2018 года.

В каждом пункте произрастает не менее 10 экземпляров тополя итальянского. В выборку включали листовые пластинки без визуальных повреждений случайным образом, отобранные по всему периметру дерева с нижней части до высоты 2 м от поверхности почвы. В целом проанализировано более 1200 образцов.

После отбора растительный материал транспортировали в лабораторию и последовательно определяли следующие биоиндикационные параметры: длина, ширина, площадь, зольность листовых пластинок, а также количество, накопившейся на их поверхности пыли.

Следует отметить, что для определения запыленности листовых пластинок необходимо соблюдать следующее правило: отбор проводится не ранее, чем через три дня после выпадения атмосферных осадков, в резиновых перчатках в чистые пластиковые пакеты с последующей транспортировкой в лабораторию и анализом в течение суток.

В стационарных условиях количество осевшей на листьях пыли определяли гравиметрическим методом с точностью 0,0001 г. Для этого дистиллированной водой осуществляли смыв с поверхности каждой листовой пластинки на предварительно высушенный фильтр. После чего фильтр снова высушивался в сушильном шкафу до абсолютно сухого состояния при температуре 105 °С. Количество пыли определяли в расчете на 1 см<sup>2</sup> поверхности листовой массы тополя итальянского. Кроме того, осуществлен расчет скорости осаждения пыли за сутки по методике, изложенной в одной из наших работ [Клевцова, Доброва, 2019].

На втором этапе проведения измерений определяли длину, ширину и площадь листовых пластинок тополя итальянского. В последние годы мы используем для оценки данного параметра компьютерные технологии. Листья сканируются с разрешением 600 dpi, а затем обрабатывается полученное черно-белое изображение в программе *APFill Ink&Toner Coverage Meter*. Расчет средней площади листовых пластинок (см<sup>2</sup>) по каждой точке осуществлялся по разработанной нами формуле, подробно описанной в работе за 2020 год [Клевцова, 2020].

Последним определяемым биоиндикационным параметром служила зольность листовых пластинок. На аналитических весах бралась навеска воздушно-сухого материала (1 г). Далее проводилось озоление сначала с доступом кислорода при открытой дверце в двухкамерной печи с последующим озолением при температуре 450–500 °С до постоянного веса. После чего образцы хранились в эксикаторе до полного остывания и снова взвешивались.

Точность данных, полученных в результате наших лабораторных исследований, подтверждена с помощью методов статистического анализа в программе *Statistica 10.0* и *Microsoft Excel 2016*.

### Результаты и их обсуждение

Определение морфометрических параметров листовых пластинок тополя итальянского показало, что на рассматриваемой территории г. Воронежа длина варьировала от 54 до 79 мм, а ширина от 48 до 82 мм. Все данные были статистически обработаны и проверены на соответствие закону нормального распределения, степень варьирования данных биоиндикационных показателей средняя или малая, а репрезентативность их высокая (табл. 2). Максимальные значения зафиксированы в точке № 14 (ул. Дарвина, 1), а минимальные по длине – в точке № 10 (ул. Ильюшина, 12б), по ширине – № 6 (ул. Героев Стратосферы, 18 б).

Таблица 2  
Table 2Морфометрические параметры листовых пластинок тополя итальянского  
Morphometric parameters of leaves *Populus italica*

Точка отбора	Длина				Ширина			
	$M \pm m_M$ , мм	$\pm \sigma$	V, %	$P_r$ , %	$M \pm m_M$ , мм	$\pm \sigma$	V, %	$P_r$ , %
1	69,2 ± 2,37	11,85	17,14	3,43	64,5 ± 2,68	13,42	20,82	4,16
2	57,9 ± 1,87	9,34	16,13	3,23	50,1 ± 1,58	7,90	15,77	3,15
3	68,3 ± 2,09	10,47	15,33	3,07	58,1 ± 1,58	7,88	13,55	2,71
4	61,1 ± 1,53	7,63	12,48	2,50	54,2 ± 1,33	6,67	12,31	2,46
5	66,3 ± 1,97	9,83	14,83	2,97	63,9 ± 1,70	8,49	13,29	2,66
6	65,2 ± 1,86	9,29	14,25	2,85	48,9 ± 1,49	7,43	15,20	3,04
7	55,7 ± 1,58	7,90	14,17	2,83	57,4 ± 1,57	7,84	13,66	2,73
8	60,0 ± 2,08	10,42	17,35	3,47	53,3 ± 1,76	8,78	16,47	3,29
9	60,8 ± 1,41	7,03	11,56	2,31	63,9 ± 1,29	6,44	10,09	2,02
10	53,9 ± 1,10	5,48	10,17	2,03	55,0 ± 1,27	6,36	11,56	2,31
11	58,6 ± 1,32	6,61	11,28	2,26	60,9 ± 2,10	10,51	17,26	3,45
12	68,1 ± 1,25	6,24	9,16	1,83	73,6 ± 2,20	10,28	14,92	2,98
13	54,6 ± 1,05	5,23	9,58	1,92	61,4 ± 1,38	6,88	11,20	2,24
14	79,5 ± 1,39	6,97	8,77	1,75	82,0 ± 2,00	9,98	12,18	2,44
15	71,6 ± 1,53	7,64	10,67	2,13	66,2 ± 2,62	13,08	19,74	3,95
16	64,2 ± 1,22	6,10	9,51	1,90	58,6 ± 1,42	7,12	12,14	2,43
17	65,0 ± 1,68	8,42	12,95	2,59	53,7 ± 1,15	5,76	10,72	2,14
18	61,0 ± 1,43	7,17	11,75	2,35	52,7 ± 1,61	8,03	15,23	3,05
19	75,6 ± 3,03	15,15	20,03	4,04	70,8 ± 2,85	14,25	20,13	4,03
20	69,1 ± 2,10	10,50	15,20	3,04	68,8 ± 1,65	8,27	12,02	2,40
21	73,6 ± 1,81	9,04	12,27	2,45	64,1 ± 1,88	9,42	14,70	2,94
22	64,2 ± 1,88	9,39	14,63	2,93	60,5 ± 1,01	5,07	8,37	1,67
23	67,4 ± 1,58	7,91	11,74	2,35	69,0 ± 1,54	7,27	11,18	2,24
24	65,0 ± 1,21	6,04	9,29	1,86	62,4 ± 1,81	9,06	14,52	2,90
25	64,9 ± 1,55	7,47	11,92	2,38	75,8 ± 1,26	6,29	8,29	1,66
26	76,6 ± 2,69	13,44	17,55	3,51	71,3 ± 2,83	14,16	19,86	3,97

Примечание. Номера точек в таблице приведены согласно научному проекту.  $M \pm m_M$  – среднее арифметическое  $\pm$  ошибка среднего арифметического;  $\pm \sigma$  – среднее квадратическое отклонение; V – коэффициент вариации;  $P_r$ , % – точность данных.

Нами подтверждена положительная достоверная корреляционная связь средней силы между длиной и шириной листа ( $r \pm m_r = 0,67 \pm 0,15$ ) [Куролуп и др., 2008]. Коэффициент детерминации составил 45 %, что указывает на то, что почти половина изменений одного признака обусловлено изменениями другого. Данная закономерность прослеживалась нами и в предыдущие годы [Клевцова, Михеев, 2020].

Согласно методическим указаниям профессора Куролапа С.А. с коллегами [Куролап и др., 2008] степень варьирования длины и ширины листьев малая или средняя, точность данных достаточная  $P_r \leq 5\%$ .

Информативным биоиндикационным параметром, позволяющим оценить благоприятность условий произрастания, является площадь листовых пластинок (рис. 1). Данный морфометрический признак изменяется от 14,01 до 28,9 см<sup>2</sup>. При этом максимальное среднее значение отмечено в ботаническом саду (28,19 см<sup>2</sup>), минимальное – по ул. Ильюшина, 126 (14,18 см<sup>2</sup>). Для промышленной зоны средние показатели составляют 18,5 см<sup>2</sup>, для транспортной – 21,8 см<sup>2</sup>, для жилой – 25,2 см<sup>2</sup>, для рекреационной – 28,3 см<sup>2</sup>.

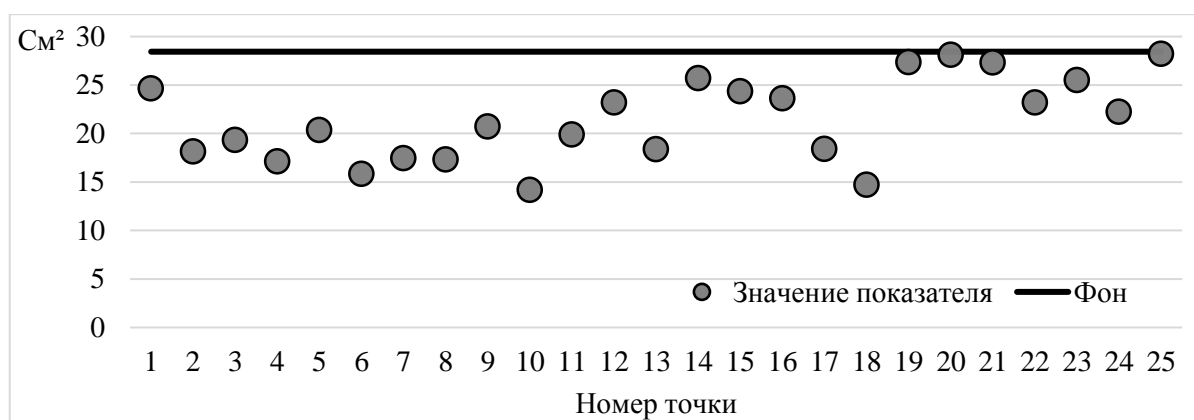


Рис. 1. Разброс среднеарифметических значений площади листовых пластинок относительно фона  
 Fig. 1. Scatter of the arithmetic mean values of the leaf area relative to the control

Таким образом, наблюдается уменьшение размеров фотосинтезирующего аппарата при усилении стрессовых факторов внешней среды. Прежде всего, влияет наличие загрязняющих веществ в атмосферном воздухе и почвенном покрове, а также дефицит влаги, который затрудняет поступление влаги в летний период и влияет на процессы жизнедеятельности. Признаки минимизации листовых пластинок в урбанизированных условиях у тополя итальянского обычно не проявляются в визуально различимых повреждениях в виде, например, хлорозов и некрозов. При этом в целом уменьшение площади листьев, а также их массы влечет за собой ухудшение жизненного состояния древесных растений. Так, в промышленно-транспортных зонах встречается на 10–15 % больше сухостойных экземпляров, изреженность кроны отдельных экземпляров достигает 30 % и более, наблюдается явление суховершинности. При этом деревья, произрастающие в жилых районах, имеют меньший процент повреждений кроны и ассимилирующих органов. Реже встречаются и поражения листового аппарата вредителями и фитопатогенами.

Содержание минеральных элементов (зольность) определялось путем сжигания биомассы и удаления органических веществ. В результате озоления остается зола, или зольный остаток, количество которого зависит от разных факторов как внутренних, так и внешних. К первым относятся видовые особенности растений, их возраст, а также специфичность того или иного органа, ткани. Так, например, зольность листьев больше, чем коры деревьев. К внешним факторам, определяющим зольный состав растительных тканей, относятся условия произрастания древесных растений, в частности климатические и почвенные, наличие загрязнителей в воздушной среде и почвенном покрове [Кавеленова и др., 2001].

В ходе исследования нами выявлено, что во всех точках отбора средние значения зольности листьев тополя превышают фоновые (рис. 2).

Минимальные значения зафиксированы в ботаническом саду ВГУ (9,7 %) и по ул. Дарвина (9,81 %). Максимальное содержание золы отмечено в промышленных зонах Левобережья города: в зоне влияния АО «Воронежсинтезкаучук» и ЗАО «Воронежский шинный завод», а также на перекрестках магистральных улиц (зольность более 20 %).

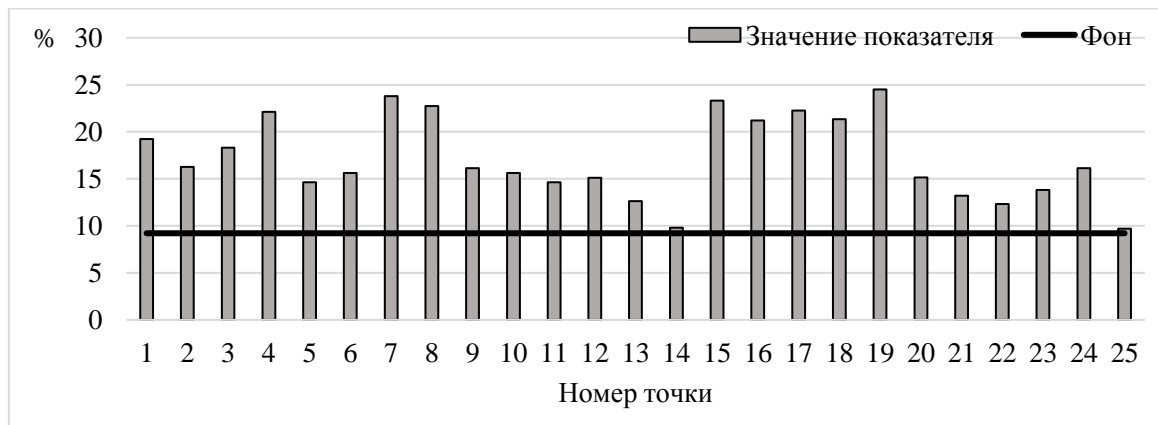


Рис. 2. Зольность листовых пластинок тополя итальянского на территории города Воронежа  
Fig. 2. Ash content of leaves of *Populus italica* in the territory of Voronezh city

Атмосферный воздух в городской среде содержит различные химические соединения, в том числе и тяжелые металлы. Поступление их на территории г. Воронежа происходит как за счет стационарных источников, так и передвижных (преимущественно автомобильного транспорта). Кроме фолиарного пути, ксенобиотики проникают в растения и через корневые системы из почвы. При этом происходит их накопление в надземной биомассе. Как отмечает профессор Опекунова М.Г. с коллегами [2015] при благоприятных гидрометеорологических условиях (теплая весна и обильные осадки в начале лета) происходит усиление процессов жизнедеятельности, а, следовательно, переход ряда микроэлементов из почвенного покрова в надземную часть растений. Так, в июне 2023 года в Воронеже выпало 179 % месячной нормы осадков.

Таким образом, наблюдается увеличение среднего содержания зольных элементов в листовых пластинках тополя итальянского при произрастании древесных растений в функциональных зонах в следующей последовательности: транспортная зона (18,78 %) > промышленная (18,10 %) > жилая (14,13 %) > рекреационная (9,46 %). В целом показатель зольности можно использовать для оценки загрязнения окружающей среды, что подтверждено и другими исследованиями [Кавеленова и др., 2001].

Для сравнения экологических условий произрастания, а, следовательно, степени благоприятности/экстремальности среды обитания для растений, нами проведен кластерный анализ по четырем признакам: длина, ширина, площадь и зольность листьев. С использованием программы *STATISTICA 10.0* данные обработаны методом Варда. Для наглядного представления результатов построена дендрограмма (рис. 3), показывающая графически связь точек, где производился отбор растительного материала. В качестве метрики, т. е. функции расстояния, было выбрано Хеммингово расстояние, или манхэттенское расстояние (расстояние городских кварталов), или сити-блок расстояние. Оно рассчитывается как среднее разностей по координатам. Данная мера подобия имеет меньшую степень влияния отдельных значений признака.

По данным параметрам точки отбора сгруппированы в два крупных кластера, каждый из которых состоит из двух кластеров поменьше. В первый кластер входят пункты №№ 4, 8, 7, 10, 18 – все они расположены на левом берегу в основном в промышленной зоне.



Второй кластер состоит из двух групп: первая включает точки №№ 6, 16, 17, а вторая – №№ 2, 3, 15, 19. Здесь наблюдается сочетание территорий с высокой транспортной нагрузкой (например, перекрестки ул. 9 Января, Ленинского пр-та, Московского пр-та, ул. Димитрова) и ряд участков с повышенной эмиссией стационарных источников загрязнения (например, точка № 6, расположенная на ул. Героев Стратосферы).

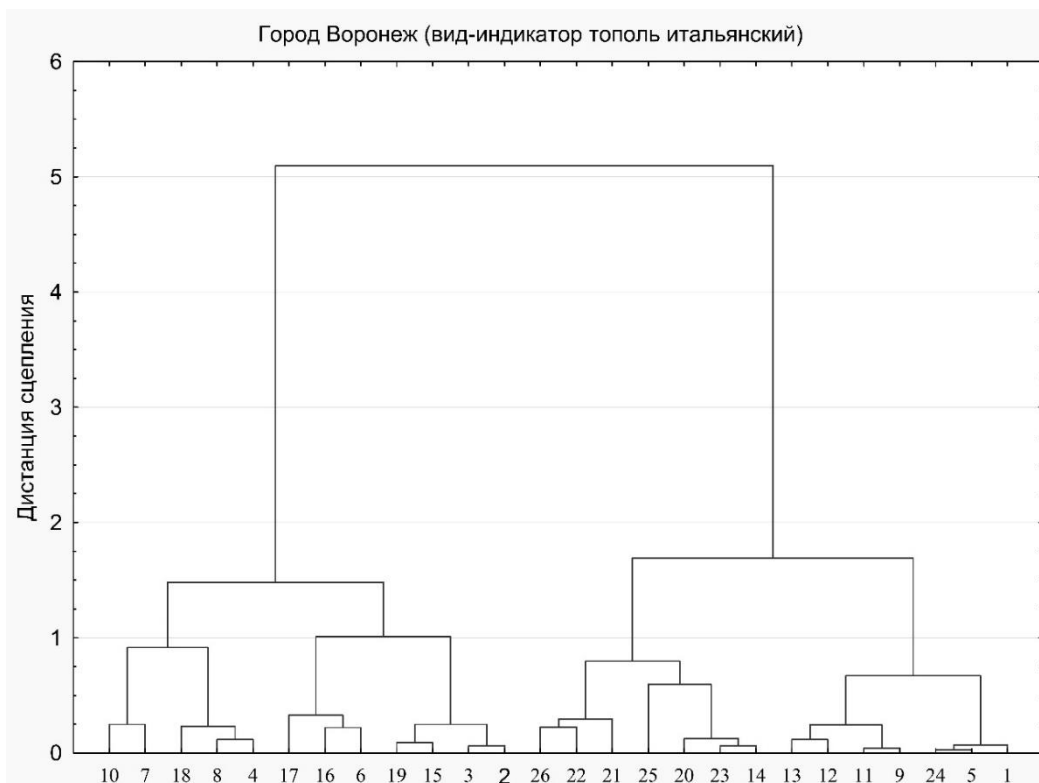


Рис. 3. Дендрограмма иерархической кластеризации в четырехмерном пространстве признаков листовых пластинок тополя итальянского по методу Варда (манхэттенское расстояние, стандартизированные данные)

Fig. 3. Dendrogram of hierarchical clustering in a four-dimensional space of features of leaves of *Populus italica* according to the Ward method (Manhattan distance, standardized data)

Третий кластер образуют две группы. Первая объединяет пункты №№ 21 и 22 – это жилые зоны, а также № 26 (фоновый участок). Вторая группа включает точки №№ 14, 20, 23, 25, из которых все, за исключением № 14, относятся к жилой. Все пункты данного кластера расположены на правобережной части города Воронежа.

Четвертый кластер объединяет две группы. В первую входят точки №№ 9, 11–13. Во вторую – №№ 1, 5, 24. В последней группе наблюдается сочетание двух точек на левом берегу с высокой степенью связи (ул. Ростовская, 58/4 и ул. Циолковского, 127), хоть и расположенных в разных функциональных зонах, а также точки № 1 (ул. 9 Января, 49). Вероятнее всего данные пункты сходны по экологическим условиям.

Количество пыли, оседающей на поверхности листьев, является величиной динамичной и зависит от многих факторов. Так, в ходе исследования нами получены следующие результаты. Во всех точках отбора наблюдается превышение запыленности листовых пластинок тополя по сравнению с фоновым участком от 2 до 5 раз (рис. 4).

В промышленно-транспортных зонах наблюдается увеличение количества пылевидных частиц как за счет эмиссии предприятий, так и за счет выбросов автотранспорта. Показательно увеличение в несколько раз запыленности в точках № 7 (ул. Красный Октябрь, 2/1) и № 8 (ул. Менделеева, 1л/1). Данная территория

непосредственно примыкает к промышленным площадкам АО «Воронежсинтезкаучук», а также имеет высокую транспортную нагрузку, причем как легковым, так и грузовым транзитным транспортом. Это объясняется тем, что здесь проходит участок Европейского автомобильного маршрута (Е38).

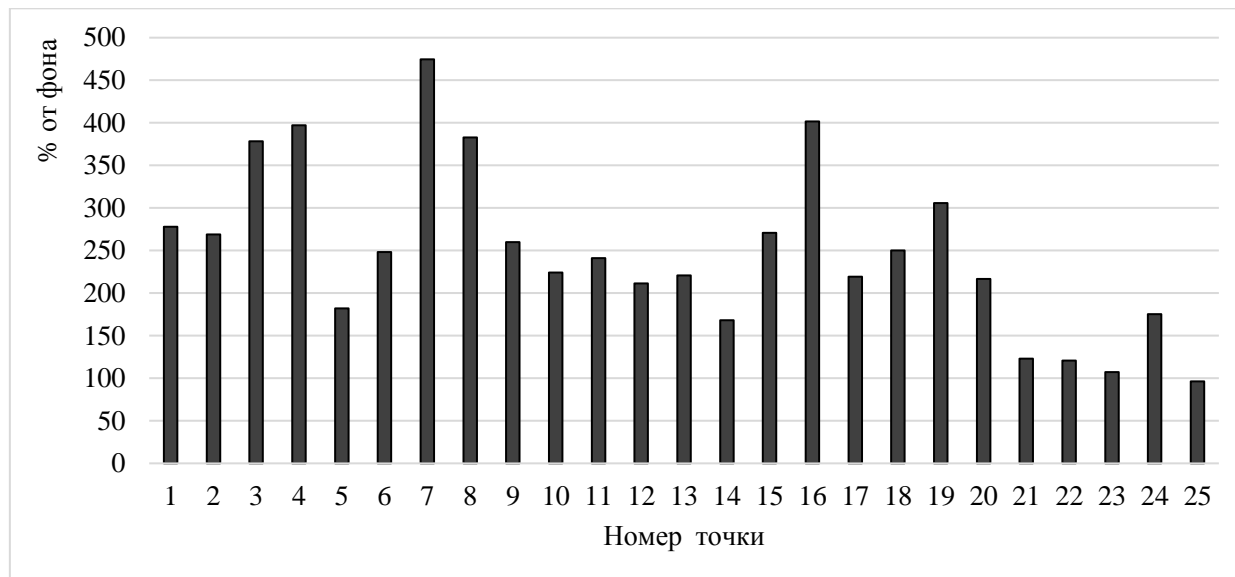


Рис. 4. Превышение количества пыли на листовых пластинках тополя итальянского по сравнению с фоновым участком

Fig. 4. Excess of the amount of dust on the leaves of *Populus italica* in comparison to the control

Наши результаты подтверждаются и другими исследователями. Так, Скрипальщикова Л.Н. с коллегами [Скрипальщикова и др., 2012] отмечает, что накопление и вариабельность химических элементов на поверхности растительности происходит в основном вблизи источников эмиссий в атмосферный воздух (карьеров, ТЭЦ, цементных заводов, автомагистралей) по сравнению с фоновыми участками.

Следует обратить внимание, что отбор образцов нами проводился в нижней части кроны, что является более информативным. Так, при исследовании территории г. Тольятти Беляева Ю.В. [Беляева, 2015] указывает на то, что максимальная запыленность наблюдается на листьях древесных растений в нижней части кроны. Количество оседающей пыли зависит как от наличия источника загрязнения, так и от ветровых потоков и физиологических особенностей самих деревьев. Промышленные территории характеризуются большим содержанием пылевидных частиц на листовой поверхности, чем в парковых зонах.

К аналогичным выводам приходит Иоффе А.О. [2014]. Она установила, что количество пыли на листьях изменяется на различной высоте, при этом на распределение оказывают влияние направление и сила ветровых потоков, расстояние до соседних зданий, а также архитектура самого здания. При этом запыленность воздуха зависит не только от наличия источников загрязнения, но и типа озеленения. Профессор Кентбаева Б.А. [2018] отмечает, что в более засушливые летние месяцы увеличивается количество пыли на листовых пластинках. Наибольшая концентрация наблюдается на высоте 1,5–2 м от поверхности почвы.

Следует отметить, что зеленые насаждения, исследуемые нами на территории г. Воронежа, являются одно-двурядными, состоящими преимущественно из монокультуры (тополя итальянского), реже групповые (в основном во дворах). При этом живые изгороди в виде кустарников, как правило, отсутствуют.

Еще одним фактором, влияющим на накопление пыли, являются погодные условия. Количество осадков, температура и ветер изменяют количество пылевидных частиц на листовой поверхности. Поэтому, нами была определена скорость осаждения пыли (рис. 5). Чем больше содержится пыли в воздухе, тем больше осажается ее на листьях.

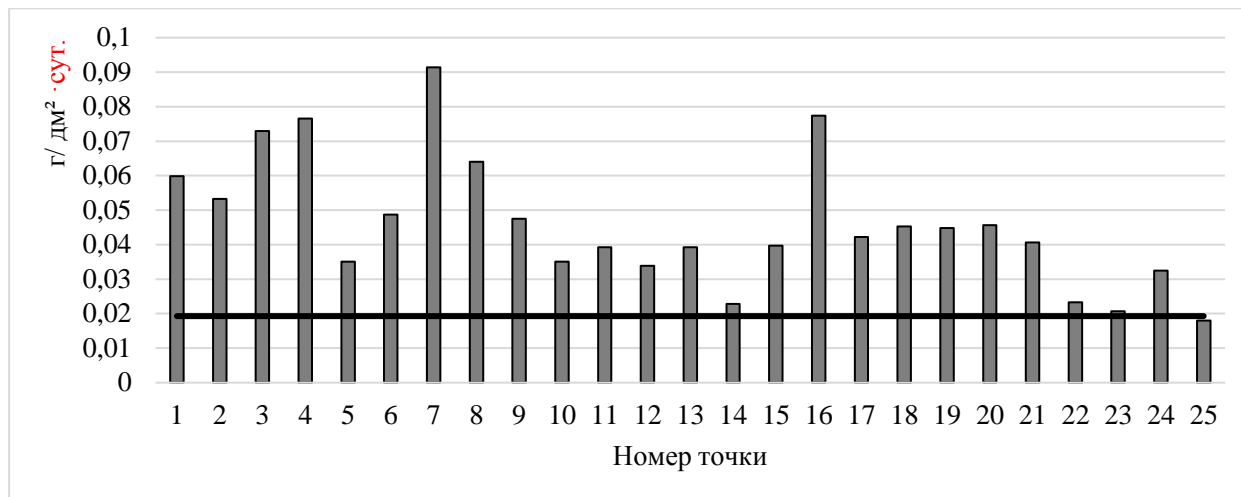


Рис 5. Скорость осаждения листовыми пластинами тополя итальянского по сравнению с фоновым участком

Fig. 5. The rate of deposition of leaves of *Populus italica* compared to control

Минимальные значения нами отмечены в селитебной и рекреационной зонах, максимальные – в промышленной. Следует отметить, что градация по функциональным зонам весьма условная, т. к. многие участки можно отнести сразу к нескольким. Например, промышленная часто включает и транспортные узлы, примыкающие к предприятиям.

Высокими значениями по скорости осаждения выделяется точка № 16, расположенная на пересечении ул. Антонова-Овсеенко и ул. 9 Января. Это один из самых высокозагрязненных участков окружной дороги города Воронежа, где автомобильный трафик составляет более 2,5 тыс. в час.

При этом, как отмечалось ранее, для определения запыленности листовых пластинок нужно учитывать погодные условия – минимум три дня без осадков до времени отбора. В противном случае часть накопленных пылевидных частиц смывается с листьев. В наших исследованиях мы учитывали этот аспект: в связи с довольно большим количеством осадков в течение июня – июля 2023 года временной лаг составлял именно три дня.

Так, Денисова Е.С. [2014] при изучении влияния выбросов предприятия ООО «Омсктехуглерод» показала, что сажа влияет на водный режим растений, увеличивая дефицит воды. При этом пылеулавливающая способность сильно зависит от видовых особенностей растений. Кроме того, на количество оседающей пыли влияют погодные условия: ветер и количество осадков. Лыкшитова Л.С. и Ловцова Н.М. [2014] пришли к аналогичным выводам при исследовании разных пород деревьев в г. Улан-Удэ: атмосферные осадки частично смывают пыль с листовой поверхности, а, следовательно, уменьшают их запыленность. При этом разные виды древесных растений проявляют отличную пылеулавливающую способность: так, например, сирень (*Syringa vulgaris* L.) в сравнении с яблоней (*Malus baccata* (L.) Borkh.) и вязом (*Ulmus pumila* L.) накапливает меньше пылевидных частиц, т. к. имеет гладкие листья.

Малинина Т.А. [2016], изучая запыленность воздуха на территории промышленных отвалов железорудного бассейна Курской магнитной аномалии, указывает на то, что

пылезадерживающая способность лесных насаждений зависит от погодных условий: жаркая и сухая погода способствует увеличению количества оседающей пыли на листьях, а пасмурная и влажная, наоборот, уменьшает процесс ее разноса и усиливает процесс смывания. Кроме того, запыленность листьев зависит от густоты и плотности древостоев. Чем выше густота и плотность лесных насаждений, тем выше количество осаждаемой пыли под пологом по сравнению с открытыми участками.

Следовательно, важное значение для оценки пылеулавливающей способности древесных растений имеет учет морфологических особенностей самих листовых пластинок. Используемый нами вид-индикатор (тополь итальянский) имеет простые цельные листья с гладкой поверхностью. Молодые листья клейкие, поэтому исследования проводятся после окончания ростовых процессов и в выборку не попадают листья на вершине побегов.

Ученые из Лондона [Corada et al., 2021] пытались установить, какие именно характеристики листовых пластинок способствуют улавливанию пылевидных частиц. Они пришли к выводу, что нет однозначной картины того, какие признаки являются ключевыми. При этом ученые отмечают, что листья с шероховатой, ворсистой или липкой поверхностью с тонким восковым слоем и большими и плотными устьицами, по-видимому, более эффективно накапливают твердые частицы, чем крупные, гладкие и неопушенные листья, покрытые толстым восковым слоем.

Следовательно, количество улавливаемой пыли зависит от строения поверхности листьев, так опушение способствует удержанию пылевидных частиц и тяжелых металлов. Это подтверждено Hrotkó K. с коллегами [Hrotkó et al., 2021] при исследовании территории г. Будапешта: липа серебристая больше накапливает пыль, чем клен остролистный и ясень обыкновенный, т. к. ее листья имеют опушение. К аналогичным выводам пришла группа ученых из Южной Кореи [Kim et al., 2023]: изогнутые микроструктуры волосатых трихом листьев растений увеличивают способность улавливать твердые частицы за счет увеличения напряженности электрического поля непосредственно вблизи трихом.

Профессор Чернышенко О.В. [2012], сравнивая ряд видов, произрастающих на территории г. Москвы, отмечает, что ключевыми критериями для оценки пылефильтрующей способности древесных растений являются следующие: морфологические характеристики листьев, их биомасса, количество и качество частиц пыли. Данные показатели имеют важное санитарно-гигиеническое значение при проектировании зеленых насаждений урбанизированных территорий [Chaturvedi et al., 2012].

При изучении запыленности листьев древесных растений необходимо учитывать, что частицы, которые оседают на их поверхности имеют разные размеры, а, следовательно, по-разному влияют на жизнедеятельность самих организмов. Это подтверждают результаты, полученные для территории г. Волгограда Глиняновой И.Ю. с коллегами [2019]. Ученые показали, что на поверхности листьев абрикоса обыкновенного накапливаются частицы разных размеров, в том числе и самые опасные для здоровья живых организмов – PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>. Количество мелкодисперсной пыли превышает фоновые значения во всех зонах, в том числе и селитебных, в связи с чем необходимо более детально изучать факторы, влияющие на распределение пылевидных частиц в воздухе и процессы ее удаления растениями.

Таким образом, необходимо помнить, что, несмотря на положительную роль в очищении атмосферного воздуха от пылевого загрязнения, растения при этом страдают. Так, угнетается в первую очередь процесс фотосинтеза [Meravi et al., 2021], а, следовательно, снижаются в целом процессы жизнедеятельности.

По запыленности листовых пластинок тополя итальянского выделены территории с высокими значениями показателя: на Левобережье – участки, примыкающие к промышленным площадкам АО «Воронежсинтезкаучук» (точки №№ 4, 7, 8); на Правобережье –



участки вдоль окружной автодороги (точка № 16). Примечательно, что пункт № 4 является местом мониторинговых наблюдений Воронежского ЦГМС – филиала ФГБУ «Центрально-Черноземное УГМС», которые также фиксируют превышение ПДК по взвешенным веществам в последние годы.

### Заключение

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

Во-первых, наблюдается уменьшение размеров листовых пластинок вида-индикатора почти во всех точках отбора растительного материала на территории г. Воронежа по сравнению с фоновым участком. Выявлена положительная достоверная прямая корреляционная связь между изменением длины и ширины листа ( $r \pm m_r = 0,67 \pm 0,15$ ).

Во-вторых, определение содержания зольных элементов в листьях тополя итальянского подтвердило закономерность большей зольности листьев деревьев, произрастающих в промышленно-транспортной зоне ( $> 18,78\%$ ), по сравнению с рекреационными территориями ( $9,46\%$ ) и жилыми районами ( $14,13\%$ ). Зольный остаток во всех пунктах отбора выше фоновых значений.

В-третьих, кластерный анализ по четырем признакам показал, что более тесную связь имеют пункты, расположенные либо в одной функциональной зоне, либо территориально близкие. Между отдельными группами и кластерами связь более слабая. При этом тесная связь далеко расположенных точек объясняется сходными экологическими условиями. А связь ряда точек из разных функциональных зон свидетельствует о довольно условном делении по данному признаку точек отбора.

В-четвертых, количество пыли, оседающей на поверхности листьев тополя итальянского, зависит от многих факторов: погодных условий, наличия источников пылевого загрязнения, высоты расположения листвы и других. При этом, наличие в зоне произрастания древесных растений техногенных источников пылевидных частиц в воздухе обуславливает увеличение количества оседающей пыли на поверхности листьев. Наибольшее содержание пыли зафиксировано на Левобережье в зонах, прилегающих к промышленным площадкам и прохождения крупных транспортных магистралей, на Правобережье города Воронежа вблизи окружной автодороги (участок ул. Антонова-Овсенко). Эти данные сопоставимы с результатами мониторинговых наблюдений официальных служб.

Таким образом, мы наблюдаем дуалистическую роль древесных растений на урбанизированных территориях. С одной стороны, древесные растения в городской среде удаляют ряд загрязняющих веществ из атмосферного воздуха (в частности пыль), что способствует очищению и улучшению его качества. В связи с чем озеленение является одним из дополнительных методов оздоровления урбанизированных территорий. С другой стороны, ответные реакции самих растений могут быть маркерами экологического состояния окружающей среды. Поэтому подобные исследования позволяют выявить зоны с экстремальными условиями среды обитания, прежде всего, для растений, которые, в первую очередь, очень чувствительны к состоянию атмосферного воздуха.

### Список источников

- Биологический контроль окружающей среды: биоиндикация и биотестирование. 2007. Под ред. Мелеховой О.П., Егоровой Е.И. М., Издательский центр «Академия», 288 с.
- Ежегодник состояния загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2021 год. 2022. Электронный ресурс. URL: [http://voeikovmgo.ru/images/stories/publications/2022/ejegodnik\\_zagr\\_atm\\_2021+.pdf](http://voeikovmgo.ru/images/stories/publications/2022/ejegodnik_zagr_atm_2021+.pdf) (дата обращения: 10.08.2023).

Куролап С.А., Нестеров Ю.А., Фетисов Ю.М. 2008. Практикум по информационным технологиям. Воронеж, Воронежский государственный университет, 265 с.

### Список литературы

- Беляева Ю.В. 2015. Распределение показателей количества пыли на листовых пластинках *Betula pendula* Roth., произрастающей в г.о. Тольятти. Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 17(4–5): 989–993.
- Бессчетнов П.В., Бессчетнова Н.Н. 2019. Тополь белый (*Populus alba* L.) в объектах озеленения Нижегородской области: корреляция и регрессия параметров листового аппарата. Вестник Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии, 2(22): 25–31.
- Борзенкова Т.Г., Костина М.В., Насимович Ю.А. 2022. Культивируемые тополя (*Populus*, *Salicaceae*) Хабаровска. Социально-экологические технологии, 12(1): 9–21. DOI: 10.31862/2500-2961-2022-12-1-9-21
- Глинянова И.Ю., Азаров В.Н., Фомичев В.Т. 2019. Фитомониторинг как метод оценки загрязнения атмосферного воздуха городской среды мелкодисперсной пылью. Биосферная совместимость: человек, регион, технологии, 1(25): 42–53. DOI: 10.21869/23-11-1518-2019-25-1-42-53
- Денисова Е.С. 2014. Аккумуляция некоторыми сельскохозяйственными растениями техногенной пыли сажевых заводов. Омский научный вестник, 2(134): 196–199.
- Иоффе А.О. 2014. Определение уровня запыленности на территории г. Петрозаводска. Фундаментальные исследования, 6–4: 753–759.
- Кавеленова Л.М., Здетовский А.Г., Огневенко А.Я. 2001. К специфике содержания зольных веществ в листьях древесных растений в городской среде в условиях лесостепи (на примере Самары). Химия растительного сырья, 3: 85–90.
- Кентбаева Б.А. 2018. Пылеулавливающая способность листовых пластинок боярышника. Известия высших учебных заведений. Лесной журнал, 3(363): 20–27. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.20
- Клевцова М.А. 2020. Создание тематической геоинформационной системы «Городская биота»: этапы, методики, критерии оценки. В кн.: Региональная экологическая диагностика состояния воздушной среды промышленных городов. Воронеж, Цифровая полиграфия: 148–161.
- Клевцова М.А., Доброва Е.А. 2019. Биоиндикационная оценка пылеулавливающей способности листовых пластинок тополя итальянского в условиях техногенного загрязнения городской среды. В кн.: Оценка и геоинформационное картографирование медико-экологической ситуации на территории города Воронежа. Воронеж, Цифровая полиграфия: 147–160.
- Клевцова М.А., Михеев А.А. 2020. Экодиагностика урбанизированной среды по морфометрическим показателям листовых пластинок *Betula pendula* Roth. Региональные геосистемы, 44(4):432–445. DOI: 10.18413/2712-7443-2020-44-4-432-445
- Лыкшитова Л.С., Ловцова Н.М. 2014. Морфологическая адаптация деревьев и кустарников к загрязнению атмосферного воздуха г. Улан-Удэ. Вестник Бурятского государственного университета. Биология, География, 4–1: 51–54.
- Малинина Т.А. 2016. Санитарно-гигиеническая роль лесных насаждений на отвалах Курской магнитной аномалии. Лесотехнический журнал, 6(1(21)): 20–27. DOI: 10.12737/18724
- Опекунова М.Г., Сомов В.В., Сокульская Ю.С., Кукушкин С.Ю., Цапарина Л.Ю., Папаян Э.Э. 2015. Воздействие природных и антропогенных факторов на элементный состав растения Башкирского Зауралья. Биосфера, 7(2): 181–198.
- Разинкова А.К., Перельгина Е.Н. 2016. Видовое разнообразие и патологическое состояние уличных придорожных посадок г. Воронежа. Лесотехнический журнал, 6(2(22)): 36–46. DOI: 10.12737/19952
- Скрипальщикова Л. Н., Стасова В.В., Татаринцев А.И., Пляшечник М.А. 2012. Аккумуляция техногенной пыли березняками разнотравными в зоне воздействия известняковых карьеров г. Красноярска. Вестник КрасГАУ, 10(73): 96–100.
- Федорова А.И., Шунелько Е.В., Михеева М.А. 2010. Причины суховершинности и усыхания пирамидальных тополей в г. Воронеже. Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация, 2: 106–114.



- Чернышенко О.В. 2012. Пылефильтрующая способность древесных растений. Лесной вестник, 3: 7–10.
- Якушев А.Б. 2011. Значение зеленых насаждений в очищении воздушного бассейна г. Воронежа. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки, 21(116): 12–18.
- Chaturvedi R.K., Prasad S., Savita R., Obaidullah S.M., Pandey V., Singh H. 2012. Effect of Dust Load on the Leaf Attributes of the Tree Species Growing Along the Roadside. Environmental monitoring and assessment, 185(1): 383–391. DOI: 10.1007/s10661-012-2560-x
- Chen L., Liu C., Zou R., Yang M., Zhang Z. 2016. Experimental Examination of Effectiveness of Vegetation as Bio-Filter of Particulate Matters in the Urban Environment. Environmental Pollution, 208 (A): 198–208. DOI: 10.1016/j.envpol.2015.09.006
- Corada K., Woodward H., Alaraj H., Collins C.M., Nazelle A. 2021. A Systematic Review of the Leaf Traits Considered to Contribute to Removal of Airborne Particulate Matter Pollution in Urban Areas. Environmental Pollution, 269: 116104. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.116104
- Hrotkó K., Gyeviki, M., Sütöriné, D.M., Magyar L., Mészáros R., Honfi P., Kardos L. 2021. Foliar Dust and Heavy Metal Deposit on Leaves of Urban Trees in Budapest (Hungary). Environ Geochem Health, 43: 1927–1940. DOI: 10.1007/s10653-020-00769-y
- Kim J., Kim J., Kim Y., Taesik GT., Lee S.J. 2023. Accelerated Settling Velocity of Airborne Particulate Matter on Hairy Plant Leaves. Journal of Environmental Management, 332: 117313. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.117313
- Meravi N., Singh P.K., Prajapati S.K. 2021. Seasonal Variation of Dust Deposition on Plant Leaves and Its Impact on Various Photochemical Yields of Plants. Environmental Challenges, 4: 100166. DOI: 10.1016/j.envc.2021.100166
- Nowak D.J., Crane D.E., Stevens J.C. 2006. Air Pollution Removal by Urban Trees and Shrubs in the United States. Urban Forestry & Urban Greening, 1(3–4): 115–123. DOI: 10.1016/j.ufug.2006.01.007

## References

- Belyaeva Yu.V. 2015. Distribution Indicator of the Number of Dust on the Leaf Blade *Betula Pendula* Roth., Growing in Togliatti. Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 17(4–5): 989–993 (in Russian).
- Besschetnov P.V., Besschetnova N.N. 2019. Topol' belyy (*Populus alba* L.) v ob"ektakh ozelene-niya Nizhegorodskoy oblasti: korrelyatsiya i regressiya parametrov listovogo apparata [White Poplar (*Populus alba* L.) in Landscaping Objects of the Nizhny Novgorod Region: Correlation and Regression of Leaf Apparatus Parameters]. Vestnik Nizhegorodskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii, 2(22): 25–31.
- Borzenkova T.G., Kostina M.V., Nasimovich Yu.A. 2022. Cultivated Poplars (*Populus*, *Salicaceae*) of Khabarovsk. Environment and Human: Ecological Studies, 12(1): 9–21 (in Russian). DOI: 10.31862/2500-2961-2022-12-1-9-21
- Glinyanova I.Yu., Azarov V.N., Fomichev V.T. 2019. Phytomonitoring as a Metod of the Assessment of Atmospheric Air Pollution by Urban Environment by Fine Dust. Biospheric compatibility: human, region, technologies, 1(25): 42–53 (in Russian). DOI: 10.21869/23-11-1518-2019-25-1-42-53
- Denisova E.S. 2014. The Accumulation of Some Crop Plants Anthropogenic Dust of Carbon Factories. Omsk Scientific Bulletin, 2(134): 196–199 (in Russian).
- Ioffe A.O. 2014. Determination of Dustiness Level on the Territory of Petrozavodsk. Fundamental research, 6–4: 753–759 (in Russian).
- Kavelenova L.M., Zdetovetskiy A.G., Ognevenko A.Ya. 2001. K spetsifike sodержaniya zol'nykh veshchestv v list'yakh drevesnykh rasteniy v gorodskoy srede v usloviyakh lesostepi (na primere Samary) [On the Specificity of the Content of Ash Substances in the Leaves of Woody Plants in an Urban Environment in Forest-Steppe Conditions (on the Example of Samara)]. Khimiya rastitelnogo syria, 3: 85–90.
- Kentbaeva B.A. 2018. Dust-Catching Capacity of the Hawthorn Leaf Blade. Bulletin of Higher Educational Institutions. Russian Forestry Journal, 3(363): 20–27 (in Russian). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2018.3.20

- Klevtsova M.A. 2020. Sozdanie tematicheskoy geoinformatsionnoy sistemy "Gorodskaya biota": etapy, metodiki, kriterii otsenki [Creation of the Thematic Geoinformation System "Urban Bio-Ta": Stages, Methods, Evaluation Criteria]. In: Regional'naya ekologicheskaya diagnostika sostoyaniya vozduшной среды promyshlennykh gorodov [Regional Ecological Diagnostics of the State of the Air Environment of Industrial Cities]. Voronezh, Publ. Tsifrovaya poligrafiya: 148–161.
- Klevtsova M.A., Dobrova E.A. 2019. Bioindikatsionnaya otsenka pyleulavlivayushchey sposobno-sti listovykh plastinok topolya ital'yanskogo v usloviyakh tekhnogennogo zagryazneniya gorodskoy sredy [Bioindicative Assessment of the Dust-Capturing Capacity of Italian Poplar Leaf Blades Under Conditions of Technogenic Pollution of the Urban Environment]. In: Otsenka i geoinformatsionnoe kartografirovaniye mediko-ekologicheskoy situatsii na territorii goroda Voronezha [Assessment and Geoinformation Mapping of the Medical and Environmental Situation in the City of Voronezh]. Voronezh, Publ. Tsifrovaya poligrafiya: 147–160.
- Klevtsova M.A., Mikheev A.A. 2020. The ecodiagnosics of the urbanized environment by morphometric indicators of the leaves *Betula pendula* Roth. Regional Geosystems, 44(4): 432–445 (in Russian). DOI: 10.18413/2712-7443-2020-44-4-432-445
- Lykshytova L.S., Lovtsova N.M. 2014. Morphological Adaptation of Trees and Shrubs to Atmosphere and Air Pollution in Ulan-Ude. Bulletin of Buryat State University. Biology, Geography, 4–1: 51–54 (in Russian).
- Malinina T.A. 2016. Sanitary-Hygienic Role of Forest Plantations on the Blade of the Kursk Magnetic Anomalies. Forestry Engineering Journal, 6(1(21)): 20–27 (in Russian). DOI: 10.12737/18724
- Opekunova M.G., Somov V.V., Sokul'skaya Yu.S., Kukushkin S.Yu., Tsaparina L.Yu., Papyan E.E. 2015. Vozdeystvie prirodnykh i antropogennykh faktorov na elementnyy sostav raste-niya Bashkirskogo Zaural'ya [The Impact of Natural and Anthropogenic Factors on the Elemental Composition of the Plant of the Bashkir Trans-Urals]. Biosfera, 7(2): 181–198.
- Razinkova A.K., Perelygina E.N. 2016. Species Diversity and Pathological States Landings Roadside Street in Voronezh. Forestry Engineering Journal, 6(2(22)): 36–46 (in Russian).
- Skripalshchikova L.N., Stasova V.V., Tatarintsev A.I., Plyashechnik M.A. 2012. Anthropogenic Dust Accumulation by Grassy Type Birch Forests in Lime Pits Influence Zone Near Krasnoyarsk City. the Bulletin of KrasGAU, 10(73): 96–100 (in Russian).
- Fedorova A.I., Shunelko E.V., Mikheeva M.A. 2010. The Reasons of Dry Tops and Drying of Voronezh City. Proceedings of Voronezh State University. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy, 2: 106–114 (in Russian).
- Chernyshenko O.V. 2012. Pylefil'truyushchaya sposobnost' drevesnykh rasteniy [Dust Filtering Capacity of Woody Plants]. Lesnoy vestnik, 3: 7–10.
- Yakushev A.B. 2011. The Value of Green Spaces in the Purification of the Air Basin of the City of Voronezh. Belgorod State University Scientific Bulletin. Natural Sciences Series, 21(116): 12–18 (in Russian).
- Chaturvedi R.K., Prasad S., Savita R., Obaidullah S.M., Pandey V., Singh H. 2012. Effect of Dust Load on the Leaf Attributes of the Tree Species Growing Along the Roadside. Environmental monitoring and assessment, 185(1): 383–391. DOI: 10.1007/s10661-012-2560-x
- Chen L., Liu C., Zou R., Yang M., Zhang Z. 2016. Experimental Examination of Effectiveness of Vegetation as Bio-Filter of Particulate Matters in the Urban Environment. Environmental Pollution, 208(A): 198–208. DOI: 10.1016/j.envpol.2015.09.006
- Corada K., Woodward H., Alaraj H., Collins C.M., Nazelle A. 2021. A Systematic Review of the Leaf Traits Considered to Contribute to Removal of Airborne Particulate Matter Pollution in Urban Areas. Environmental Pollution, 269: 116104. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.116104.
- Hrotkó K., Gyeviki, M., Sütöriné, D.M., Magyar L., Mészáros R., Honfi P., Kardos L. 2021. Foliar Dust and Heavy Metal Deposit on Leaves of Urban Trees in Budapest (Hungary). Environ Geochem Health, 43: 1927–1940. DOI: 10.1007/s10653-020-00769-y
- Kim J., Kim J., Kim Y., Taesik GT., Lee S.J. 2023. Accelerated Settling Velocity of Airborne Particulate Matter on Hairy Plant Leaves. Journal of Environmental Management, 332: 117313. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.117313
- Meravi N., Singh P.K., Prajapati S.K. 2021. Seasonal Variation of Dust Deposition on Plant Leaves and Its Impact on Various Photochemical Yields of Plants. Environmental Challenges, 4: 100166. DOI: 10.1016/j.envc.2021.100166





Nowak D.J., Crane D.E., Stevens J.C. 2006. Air Pollution Removal by Urban Trees and Shrubs in the United States. *Urban Forestry & Urban Greening*, 1(3–4): 115–123. DOI: 10.1016/j.ufug.2006.01.007

*Поступила в редакцию 03.08.2023;*  
*поступила после рецензирования 02.09.2023;*  
*принята к публикации 10.09.2023*

*Received August 03, 2023;*  
*Revised September 02, 2023;*  
*Accepted September 10, 2023*

**Конфликт интересов:** о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.  
**Conflict of interest:** no potential conflict of interest related to this article was reported.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Клевцова Марина Александровна**, кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры геоэкологии и мониторинга окружающей среды, Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия

**Михеев Алексей Александрович**, преподаватель кафедры рекреационной географии, страноведения и туризма, Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Marina A. Klevtsova**, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department of Geoecology and Environmental Monitoring, Voronezh State University, Voronezh, Russia

**Aleksey A. Mikheev**, Lecturer, Department of Recreational Geography, Regional Studies and Tourism, Voronezh State University, Voronezh, Russia