



УДК 504.05:581.151 (470.322)
DOI 10.52575/2712-7443-2021-45-4-558-575

Изменение морфометрических параметров листовых пластинок *Populus italica* (Du Roi) Moench под влиянием эмиссии загрязняющих веществ промышленных предприятий

Клевцова М.А., Михеев А.А.

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

Аннотация. Биоиндикация состояния урбанизированной среды является наиболее актуальной в крупных промышленных центрах. Липецк – центр металлургической промышленности, характеризующиеся высокой эмиссией загрязняющих веществ. Выявлено изменение экологического состояния насаждений древесных растений в зоне влияния промышленных выбросов. Определены основные морфометрические показатели листовых пластинок тополя итальянского (*Populus italica* (Du Roi) Moench): длина, ширина, площадь, флуктуирующая асимметрия. В исследованиях использована методика В.М. Захарова, а также собственные методические разработки по определению площади листьев. Выявлено уменьшение размеров листовых пластинок и увеличение флуктуирующей асимметрии в зоне влияния промышленных выбросов металлургического комбината, а также цементного завода. Высокие значения интегрального показателя флуктуирующей асимметрии зафиксированы и на крупных перекрестках магистральных улиц. Полученные нами результаты согласуются с данными официальных служб в области мониторинга атмосферного воздуха.

Ключевые слова: биоиндикация, зеленые насаждения, *Populus italica* (Du Roi) Moench, морфометрические показатели, загрязняющие вещества, промышленные предприятия.

Благодарности: исследования проведены при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект 20-17-00172.

Для цитирования: Клевцова М.А., Михеев А.А. 2021. Изменение морфометрических параметров листовых пластинок *Populus italica* (Du Roi) Moench под влиянием эмиссии загрязняющих веществ промышленных предприятий. Региональные геосистемы, 45 (4): 558–575. DOI: 10.52575/2712-7443-2021-45-4-558-575

The Change in the Morphometric Parameters of Leaves *Populus italica* (Du Roi) Moench Under the Influence of Emissions of Pollutants of Industrial Enterprises

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

Abstract. In the conditions of large industrial centers, stressful conditions for the growth of plants are formed. In particular, the assessment of the impact of the emission of pollutants from metallurgical enterprises is an urgent problem for the city of Lipetsk. The change in the ecological state of woody plantations under the influence of industrial emissions has been revealed. The diagnostics of responses of

green spaces to a complex of environmental factors was carried out. The indicator species was the *Populus italica* (Du Roi) Moench. The research used the technique of V.M. Zakharova, as well as their own methodological developments for determining the area of leaves. A decrease in the morphometric parameters of leaf in the zone of influence of industrial emissions has been established. The index of fluctuating asymmetry also increases with an increase in the intensity of stress factors. Significant deviations from the norm are also noted at the intersection of large main streets. Our results are consistent with the data of official services in the field of atmospheric air monitoring.

Keywords: bioindication, green spaces, *Populus italica* (Du Roi) Moench, morphometric indicators, pollutants, industrial enterprises.

Acknowledgements: the research was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation, project 20-17-00172.

For citation: Klevtsova M.A., Mikheev A.A. 2021. The Change in the Morphometric Parameters of Leaves *Populus italica* (Du Roi) Moench Under the Influence of Emissions of Pollutants of Industrial Enterprises. Regional geosystems, 45 (4): 558–575 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2021-45-4-558-575

Введение

Промышленные предприятия выступают источником повышенной экологической опасности в силу эмиссии загрязняющих веществ в окружающую среду. Практически все современные города России являются центрами тех или иных производств. Однако экологическая обстановка будет во многом зависеть от категории опасности предприятия и токсичности его выбросов. Наличие совершенных систем очистки и замкнутых циклов производства позволяет минимизировать отрицательные эффекты для населения и природного комплекса города. Тем не менее, в ряде регионов экологическая обстановка остается довольно напряженной.

К наиболее опасным с экологической точки зрения относятся металлургические комплексы. Так, на долю черной металлургии в России приходится $\frac{1}{4}$ всех выбросов пыли и оксида углерода, $\frac{1}{2}$ выбросов оксида серы. В целом очень широк спектр загрязняющих веществ, в частности в значительных количествах содержится сероводород, углеводороды, тяжелые металлы (более 60 ингредиентов) [Алборов и др., 2013].

При этом древесные растения в городской среде являются эффективным средством снижения загрязнения окружающей среды за счет поглощения и нейтрализации атмосферных токсикантов. Тем не менее, поглощая загрязняющие вещества, растения испытывают стресс, который приводит в конечном итоге к ухудшению жизненного состояния, снижению продолжительности жизни и преждевременному их отмиранию.

В связи с этим биоиндикационные исследования являются неотъемлемым аспектом экологического мониторинга. Нестабильность развития организма отражает его неспособность развиваться в неблагоприятных условиях окружающей среды. Анализ флуктуирующей асимметрии основан на диагностике случайных отклонений от идеальной симметрии у билатеральных структур (например, листовых пластинок) [Graham et al., 2010]. Стрессовые условия влияют на гомеостаз растений, и парные органы растут с заметными различиями при двусторонней симметрии [Parsons, 1992]. Например, флуктуирующая асимметрия связана с загрязнением [Kozlov et al., 1996], затенением [Puerta-Piñero et al., 2008], характеристиками почвы [Cornelissen, Stiling, 2011] и различием в питательных веществах для растений [Santos et al., 2013]. Во всех этих примерах у растений, развивающихся в неблагоприятной среде обитания, фиксировались высокие уровни асимметрии в зависимости от стрессовых условий.

Анализ литературных источников показал, что довольно много публикаций посвящено изучению состояния древесных растений. В следующих работах объектом исследования



являются представители рода *Populus* L.: пирамидальные формы тополя белого (*Populus alba* L.) на территории Нижегородской области [Бессчетнов, Бессчетнова, 2019], тополя пирамидального (*Populus pyramidalis* Borkh.) в Воронеже [Клевцова, Виноградов, 2015], тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) в Красноярске и Назарово [Коротченко и др., 2020], Ачинске [Коротченко, 2014], Красноярске [Попельницкая, Попов, 2017], [Скрипальщикова, Стасова, 2014], тополя советского пирамидального (*Populus sovietica pyramidalis*, Jabl.) в Йошкар-Оле [Овчинников и др., 2020]; тополя черного (*Populus nigra* L.) в Краснодаре [Савинова, Хмара, 2017], Махачкале [Магомедова, Касимова, 2008].

Ряд зарубежных ученых также изучают ответную реакцию на стрессовые условия окружающей среды видов, относящихся к роду *Populus* L. В научных статьях освещены результаты исследований для следующих регионов: г. Костанай, Казахстан (вид-индикатор – *Populus balsamifera* L.) [Кобланова, Бакытбеккызы, 2019]; Ивано-Франковская область, Украина (вид-индикатор – *Populus pyramidalis* L.) [Glibovytska, Karavanovych, 2018]; г. Турку, Финляндия (вид-индикатор – *Populus tremula* L.) [Kozlov et al., 2019]; г. Черкассы, Украина (вид-индикатор – *Populus pyramidalis*) [Корнелюк, Конякин, 2014]; Бурлинский район Западно-Казахстанской области, Республика Казахстан (вид-индикатор – *Populus nigra* L.) [Masenov et al., 2016]; г. Бишкек, Киргизская Республика (вид-индикатор – *Populus alba* L.) [Темиркул, Бикиров, 2019].

Для Липецка данная проблематика рассматривается в работах О.А. Шепелевой, О.В. Поповой и А.И. Федоровой.

В 2000–2007 гг. О.А. Шепелевой проведены биоиндикационные исследования с использованием трех видов: березы повислой (*Betula pendula* Roth.), рябины обыкновенной (*Sorbus aucuparia* L.) и тополя черного (*Populus nigra* L.) пирамидальной формы. Отбор листовых пластинок производился в пяти районах Липецка на следующих территориях: жилая, придорожная и промышленная зона. В качестве контроля использовались образцы из парковой зоны Липецка и в пределах Задонского района Липецкой области. Показатели флуктуирующей асимметрии листьев рябины обыкновенной не показали прямой связи от экологических условий произрастания. Максимальные отклонения от нормы у листовых пластинок тополя черного пирамидальной формы зафиксированы в придорожной зоне Советского района (0,071) и вблизи Новолипецкого металлургического комбината (0,071). Флуктуирующая асимметрия листовых пластинок березы повислой достигает наибольших значений в придорожной полосе (0,059) и жилой зоне (0,050) района «Липецкий трактор», а также в зоне влияния комбината (0,051). Таким образом, О.А. Шепелева [2009] указывает на связь флуктуирующей асимметрии у тополя и березы с уровнем антропогенной нагрузки. Однако, для оценки современной экологической обстановки требуется повторить подобного рода исследования.

О.В. Попова и А.И. Федорова [2005] рассматривают влияние промышленного загрязнения металлургического комбината на состояние клена остролистного (*Acer platanoides* L.). Установлена зависимость повреждения листовых пластинок от содержания в них тяжелых металлов. Выделены зоны загрязнения в зависимости от удаленности от предприятия. Однако требуется изучение влияния выбросов и на другие виды древесных растений, которые широко представлены в зеленых насаждениях г. Липецка.

Таким образом, на основе анализа теоретических и практических материалов по данной проблематике, нами была поставлена цель, которая заключалась в изучении морфометрических параметров листовых пластинок тополя итальянского (*Populus italica* (Du Roi) Moench) при произрастании в условиях эмиссии загрязняющих веществ промышленными предприятиями, в частности, металлургического комплекса. Для сравнения проводились исследования в различных по функциональной принадлежности зонах г. Липецка: промышленной, жилой, транспортной и рекреационной. Следует отметить, что подобное деление условное, в силу того что транспортная зона фактически представлена на всей территории. Что касается рекреационной зоны, то в парках, скверах можно просле-

дить «краевой эффект» на их границах. Зачастую они обрамлены улицами с той или иной интенсивностью движения транспорта.

Данные исследования являются актуальными в связи с острой необходимостью изучения комплексного влияния крупного металлургического предприятия, а также возрастающей транспортной нагрузки на окружающую среду, и, в частности, на зеленые насаждения. Именно состояние растительности в первую очередь является маркером благополучия территории. Для растений характерен двойной газообмен, вследствие чего внутрь организма проникают не только жизненно необходимые вещества, но и ксенобиотики. Это приводит к более быстрым ответным реакциям на состояние атмосферного воздуха. Исследование возможных изменений стабильности развития растений позволяет выделить зоны потенциального экологического риска и для населения.

Объекты и методы исследования

В данной работе в качестве объекта исследования были взяты зеленые насаждения, произрастающие в разных функциональных зонах Липецка. В течение летнего периода 2021 г. проведено обследование 44 точек. В 37 пунктах произрастает вид-индикатор – тополь итальянский. Семнадцать точек – это места расположения стационарных и передвижных постов наблюдений официальных служб в сфере мониторинга (Липецкого центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды – филиала ФГБУ «Центрально-Черноземное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» и ФГБУ «Центр гигиены и эпидемиологии в Липецкой области»). По функциональной принадлежности все точки можно условно разделить на зоны: транспортная (12 точек), промышленная (9), жилая (10), рекреационная (6).

Для оценки влияния состояния окружающей среды требовалось определить вид-индикатор, ответная реакция которого позволила бы с большей долей достоверности судить о современной экологической обстановке с возможностью проведения мониторинга в последующие годы. Поэтому на предварительном этапе нами были обследованы некоторые магистральные улицы города (Московский пр-т, ул. Гагарина, пр-т Победы, ул. Зои Космодемьянской, ул. Metallургов), а также ряд парковых зон (Верхний и Нижний парки, парк «Быханов сад»). На основе полученных сведений выявлены наиболее распространенные на данной территории виды древесных растений. К ним относятся береза повислая (*Betula pendula* Roth.), тополь итальянский (*Populus italica* (Du Roi) Moench), липа мелколистная (*Tilia cordata* Mill.), клен остролистный (*Acer platanoides* L.). При этом доля участия в зеленых насаждениях первых двух видов, а также их встречаемость высокая (отмечены на всех исследуемых участках). Следовательно, для проведения сравнительного анализа в рамках научного проекта было решено использовать те же виды, что и для Воронежа. Таким образом, в качестве видов-индикаторов выступали береза повислая и тополь итальянский.

В отличие от березы повислой, тополь итальянский является интродуцентом, природный ареал которого – Средняя и Малая Азия. Это быстрорастущая порода, нетребовательная к почве и влаге. Корневая система довольно глубокая, что позволяет в целом хорошо справляться с дефицитом атмосферной влаги в городских условиях. Тополь итальянский устойчив к действию загрязняющих веществ. Однако в урбанизированной среде продолжительность жизни резко сокращается. В 20–25 лет наблюдается появление сухих ветвей в кроне с последующим усыханием вершины. Такие экземпляры требуют санитарной обрезки, а в случае суховершинности необходимо проводить кронирование. Однако для Липецка данный тип обрезки не отмечен, несмотря на наличие усыхающих экземпляров.

Липецк является крупнейшим промышленным центром Центрального Черноземья, вторым после Воронежа по численности населения (на 01.01.2021 – 503 216 чел.). Находится в центральной части Восточно-Европейской равнины. Особенностью рельефа явля-



ется то, что правобережная часть расположена в пределах Среднерусской возвышенности, а левобережная – на Окско-Донской низменности. Территория расчленена долиной р. Воронеж, а на северо-востоке примыкает к Матырскому водохранилищу.

В отличие от Воронежа, основным источником загрязнения окружающей среды являются промышленные предприятия. Ключевым из них выступает ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» (ПАО «НЛМК»), производственные площадки которого расположены в левобережной юго-восточной части города, в то время как основная селитебная зона находится на правобережной северо-западной части города. Этот момент несколько снижает вероятность влияния выбросов загрязняющих веществ от комбината. В связи с таким расположением промышленного предприятия, основным фактором, определяющим его воздействие на прилегающие территории, является направление ветра. За счет розы ветров наибольшее влияние выбросы ПАО «НЛМК» оказывают на юго-западную часть города.

Другими стационарными источниками загрязнения являются ООО «ЛТК Свободный сокол» (производство трубной продукции), АО «Липецкцемент», ООО «Липецкий силикатный завод», ПАО «Квадра» (Липецкая ТЭЦ-2), ООО «ЧСЗ-Липецк» (производство стекольных изделий), ООО «Йокохама Р.П.З.» (производство автомобильных шин), ООО «Липецкий силикатный завод» и ряд других. В целом на выбросы от предприятий Липецка в 2019 г. приходилось 88,5 % всех суммарных выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от стационарных источников Липецкой области [Доклад «Состояние и охрана...», 2020]. При этом основную долю, 266,086 тыс. т. (85,7 % от выбросов по области или 96,8 % по городу), составляют эмиссии Новолипецкого металлургического комбината.

Основные поллютанты атмосферного воздуха Липецка: взвешенные вещества, оксиды азота, оксиды углерода, диоксид серы, сероводород, фенол, формальдегид, бенз(а)пирен, а также тяжелые металлы (железо, цинк, марганец, свинец, хром, никель, медь). В разные годы, согласно данным официального мониторинга [Доклад «Состояние и охрана...», 2020], фиксируются превышения максимально-разовых значений ПДК по отдельным примесям.

Не менее существенным источником загрязнения окружающей среды города является автомобильный транспорт. В составе транспортного потока преобладают легковые автомобили (более 85 %), на грузовые автомобили и автобусы приходится около 15 %. Магистральные улицы расположены в основном на правобережной части, на левом берегу к ним можно отнести: пр-т Мира, ул. Металлургов, ул. Зои Космодемьянской, ул. 9 Мая. Загруженность отдельных участков достигает 20 тыс. транспортных средств за сутки (например, на ул. Студеновской – от перекрестка с ул. Лескова до перекрестка с ул. Заводской; на пр-те Победы – от перекрестка с ул. Юных натуралистов до Площади Победы). В промышленных зонах интенсивность движения автотранспорта средняя. С выбросами от передвижных источников в атмосферный воздух поступают оксиды углерода, оксиды азота, диоксиды серы, углеводороды, пыль, сажа и другие примеси.

Таким образом, загрязнение атмосферного воздуха Липецка формируется за счет совместного влияния выбросов стационарных (65 %) и передвижных источников (35 %).

В наших исследованиях основное внимание уделялось изучению промышленных зон в сравнении с остальными территориями – транспортными, селитебными, рекреационными. Условный фоновый участок расположен в районе СНТ «Березка» на максимальном удалении от основных источников техногенного воздействия.

Сбор растительного материала проводился в период, когда ростовые процессы закончены – с 10 по 31 июля 2021 г. С каждой точки отбирали случайным образом по 150 листовых пластинок равномерно по четырем сторонам света (не менее чем с пяти деревьев примерно одного возраста). Обязательное условие – это использование листьев без

видимых повреждений. Все образцы гербаризировались и хранились в специальных конвертах. У каждой листовой пластинки затем измеряли морфометрические параметры, показанные на рис. 1.

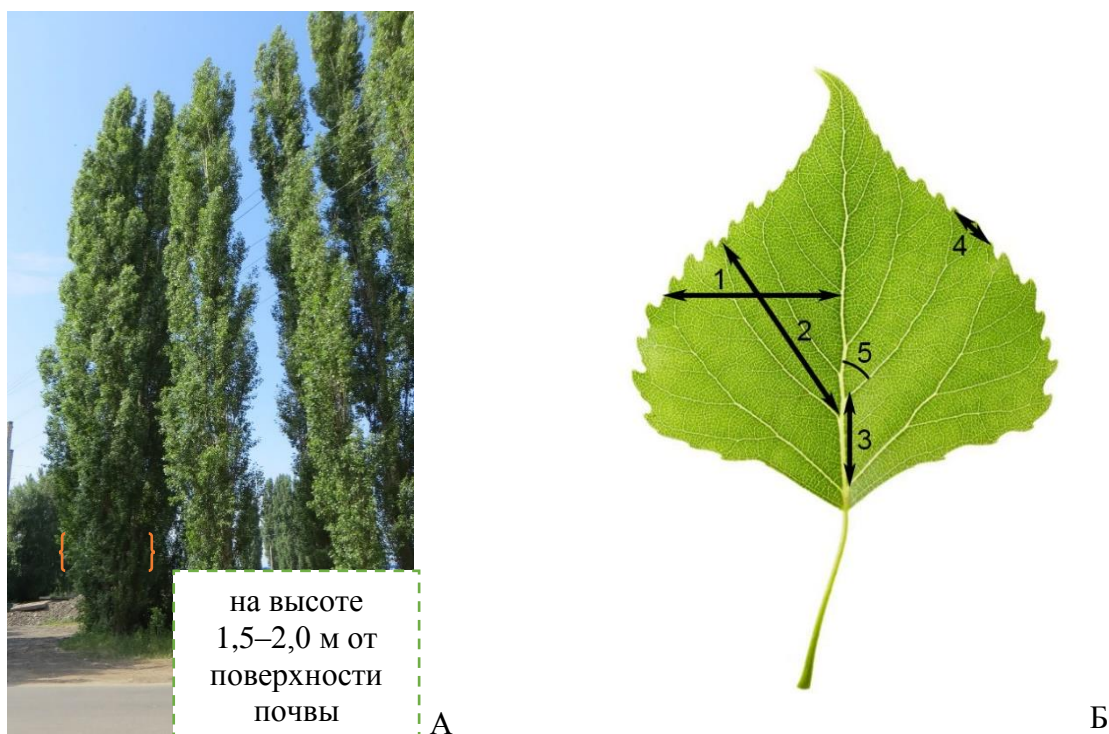


Рис. 1. Схема отбора и промеров листьев: А – отбор листовых пластинок тополя итальянского; Б – морфометрические параметры для определения флуктуирующей асимметрии листовой пластинки: 1 – ширина половинки листа; 2 – длина второй жилки от основания листа; 3 – расстояние между основаниями первой и второй жилок; 4 – расстояние между концами этих жилок; 5 – угол между главной и второй от основания жилкой

Fig. 1. The scheme of selection and measurement of leaves: А – Selection of leaves of *Populus italica*; Б – Morphometric parameters for determining the fluctuating asymmetry of the leaves: 1 – the width of the leaf; 2 – the length of the second vein from the base of the leaf; 3 – the distance between the bases of the first and second veins; 4 – the distance between the ends of these veins; 5 – the angle between the main and the second vein from the base

На территории Липецка нами было обследовано более 500 экземпляров тополя. Точность измерения морфометрических параметров составила до 0,5 мм (а для пятого признака – 1°). Трехкратное измерение показало ошибку менее 1 % от величины флуктуирующей асимметрии, что вполне допустимо для данной методики [Palmer, Strobeck, 2003]).

В основу данных исследований положены методические рекомендации, разработанные В.М. Захаровым с коллегами [Захаров и др., 2000; Методические рекомендации..., 2003]

Расчет интегрального показателя флуктуирующей асимметрии (I_{FA}) проводили с использованием алгоритма нормированной разности:

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

где m – количество измеряемых параметров; n – количество обработанных листьев; L – измерение j -параметра с левой стороны i -листа; R – измерение j -параметра с правой стороны i -листа.



Для относительной оценки состояния окружающей среды также применяли балльную градацию (табл. 1).

Таблица 1
Table 1

Шкала оценки состояния окружающей среды по величине интегрального показателя стабильности развития листовых пластинок *Populus italica* (Du Roi) Moench [Клевцова, Виноградов, 2015]
Scale for assessing the state of the environment by the value of the integral indicator of the stability of the development of leaves *Populus italica* (Du Roi) Moench [Klevtsova, Vinogradov, 2015]

Балл	Интегральный показатель флуктуирующей асимметрии	Степень отклонения от нормы
I	< 0,059	условная норма
II	0,060–0,069	начальное отклонение от нормы
III	0,070–0,079	средний уровень отклонений от нормы
IV	0,080–0,089	существенные (значительные) отклонения от нормы
V	> 0,089	критическое состояние

Кроме того, мы определяли площадь листовых пластинок по разработанной нами в 2020 г. методике. Для этого листья сканировали и с помощью программы APFill Ink&Toner Coverage Meter определяли процент заполнения изображения чернилами. По формуле (2) рассчитывали площади листовых пластинок (см²) по каждой точке:

$$\bar{S} = \frac{623,7(P_1+P_2+\dots+P_n)}{100 n_l}, \quad (2)$$

где 623,7 см² – общая площадь сканированного изображения (в нашем случае формат А4); P_1, P_2, P_n – процент заполнения чернилами сканированного изображения по данной точке от 1 до n ; n_l – общее количество сканированных листовых пластинок древесных растений по данной точке.

Статистическая обработка данных проводилась с помощью пакета анализа данных MS Excel 2016 и STATISTICA 10 (StatSoft Ink).

Для построения тематических карт использовали программную среду ГИС MapInfo Professional. Карты представляют собой поверхность, созданную путем пространственной интерполяции, с наложенными на нее изолиниями.

Результаты и их обсуждение

Морфометрические параметры листовых пластинок тополя итальянского на исследуемой территории Липецка варьируют в следующих пределах: длина – от 37 до 98 мм, ширина – от 34 до 94 мм. В выборке отсутствуют артефакты, т.е. резко отличающиеся от всей совокупности значения. В ходе проверки данных на соответствие закону нормального распределения (распределения Гауса-Лапласа) отмечена малая или средняя степень варьирования значений ($V < 20\%$). Репрезентативность данных высокая ($P_r < 5\%$).

Нами установлена корреляционная связь ($r \pm m_r$) [Практикум по информационным ..., 2008] между длиной и шириной листовой пластинки тополя итальянского (табл. 2). Так, в 89 % точках связь между параметрами достоверная положительная ($t_i > t_{\text{крит}}$). В 84 % точек связь средняя, в 11 % точек – сильная. Исключение составили следующие пункты: № 6, 8, 15, 39. В них связь недостоверна. Нами выдвинута гипотеза о нарушении роста фотосинтезирующего аппарата на данных участках по причине высокой степени стрессовых условий произрастания древесных растений. Две точки расположены на пере-

сечении крупных магистральных улиц Липецка, одна точка находится в зоне влияния цементного завода, а одна расположена на трассе и примыкает к цеху по производству агломератов НЛМК.

Таблица 2
Table 2

Морфометрические параметры листовых пластинок тополя итальянского
The morphometric parameters of the leaves *Populus italica* (Du Roi) Moench

Точка отбора	Местоположение	Длина			Ширина			$r \pm m_r$
		$M \pm m_M$, мм	$\pm \sigma$	V, %	$M \pm m_M$, мм	$\pm \sigma$	V, %	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	ул. 40 лет Октября, 4 (окрестности ПНЗ № 6)	65,4±1,71	8,57	13,1	60,72±1,56	7,78	12,8	0,65±0,16
3	ул. Желябова, 16 (окрестности передвижного поста № 5)	71,76±1,96	9,82	13,7	68,20±2,04	10,20	15,0	0,61±0,17
4	ул. Циолковского, 43	59,20±1,36	6,78	11,5	60,44±1,52	7,62	12,6	0,51±0,18
5	ул. Опытная, 2	65,32±1,49	7,44	11,4	63,72±2,00	9,99	15,7	0,64±0,16
6	ул. Ковалева, 126Б (район АО «Липецкцемент»)	53,32±1,13	5,64	10,6	49,32±1,26	6,32	12,8	0,34±0,20
7	Универсальный проезд, 5 (окрестности ПНЗ № 2)	59,76±1,11	5,55	9,3	56,6±1,68	8,40	14,8	0,59±0,17
8	перекресток ул. Липовской и ул. Семашко (окрестности передвижных постов № 8 и 9)	72,56±1,63	8,14	11,2	61,88±1,72	8,59	13,9	0,29±0,20
9	ул. Неделина, 4	61,76±1,23	6,17	10,0	56,76±1,13	5,64	9,9	0,56±0,17
10	перекресток ул. Водопьянова и пр-та Победы	49,52±1,19	5,9	12,0	52,72±1,22	6,10	11,5	0,62±0,16
11	ул. Катукова, 56	63,40±1,85	9,24	14,5	53,40±1,30	6,48	12,1	0,76±0,14
13	ул. Юношеская, 19	65,72±2,08	10,4	15,8	57,52±1,42	7,10	12,4	0,41±0,19
14	ул. Ударников, 104А	68,28±1,51	7,56	11,1	60,96±1,16	5,78	9,5	0,41±0,19
15	ул. Катукова, 4 (окрестности передвижного поста № 3)	48,80±1,68	8,41	17,2	52,40±1,86	9,3	17,4	0,37±0,19
16	ул. Московская, 85	65,08±1,59	7,96	12,2	60,00±1,22	6,08	10,1	0,51±0,18
17	перекресток ул. Яна Берзина и ул. Водопьянова (окрестности передвижного поста № 10)	64,60±2,09	10,46	16,2	53,16±0,90	4,50	8,46	0,46±0,19
18	ул. 50 лет НЛМК, 8 (набережная)	61,88±1,89	9,46	15,3	60,92±1,83	9,15	15,0	0,40±0,19
19	ул. Тельмана, 74 (парк «Быханов сад»)	63,00±0,87	4,33	6,9	63,72±1,46	7,28	11,4	0,47±0,18
20	ул. К. Маркса, 7 (Нижний парк)	63,68±1,16	8,31	13,0	68,80±2,24	11,22	16,3	0,48±0,18



Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
21	ул. Космонавтов, 54А (сквер им В.Н. Маркова)	64,60±2,09	10,46	16,2	53,16±0,90	4,5	8,46	0,51±0,18
23	ул. Ленина, Верхний парк (окрестности передв ижного поста № 6)	80,24±2,46	12,29	15,3	60,40±1,88	9,42	15,6	0,80±0,13
24	ул. Зои Космодемьян ской, 3	66,48±2,03	10,14	15,3	59,68±1,25	6,25	10,5	0,54±0,18
25	ул. Марины Расковой, 14	67,44±1,98	9,89	14,7	61,68±1,35	6,76	11,0	0,51±0,18
26	ул. Краснознаменная, 2Б (окрестности ПНЗ № 4)	67,52±1,63	8,15	12,1	74,24±2,24	11,19	15,1	0,76±0,14
28	ул. Профсоюзная, 2	61,76±1,43	7,17	11,6	67,72±2,22	11,08	16,4	0,47±0,18
30	ул. Энергостроителей, 13 (окрестности ПНЗ № 1)	70,20±2,13	10,67	15,2	50,92±1,42	7,10	13,9	0,60±0,17
31	ул. Архангельская, 2 (окрестности ПНЗ № 10)	64,48±2,03	10,14	15,7	71,60±1,72	8,58	12,0	0,56±0,17
32	ул. Зои Космодемьян ской, 224 (окрест ности передвижного поста № 7)	59,36±1,69	8,45	14,2	59,96±1,78	8,91	15,6	0,60±0,17
33	Осенний проезд, 14	58,84±1,30	6,49	11,0	61,96±2,40	12,02	19,4	0,39±0,19
34	ул. Алмазная, 18	53,76±1,51	7,55	14,0	62,28±1,73	8,63	13,9	0,61±0,17
35	ул. 9 мая, 18	62,84±1,77	8,85	14,1	69,12±2,16	10,82	15,7	0,84±0,11
36	ул. Ферросплавная, 2вл2	62,72±1,20	6,01	9,6	56,52±1,47	7,35	13,0	0,55±0,17
37	ул. Metallургов 22Г (окрестности пере движного поста № 2)	74,20±1,99	9,95	13,4	58,40±1,15	5,73	9,8	0,53±0,18
39	Грязинское шоссе, вл. 5	61,84±1,82	9,11	14,7	54,00±1,06	5,31	9,83	0,28±0,20
40	ул. Ленинградская, 6	57,56±1,35	6,76	11,8	47,68±1,63	8,15	17,1	0,62±0,16
41	ул. Metallургов, 7	60,00±1,73	8,65	14,4	51,76±1,63	8,13	15,7	0,39±0,19
42	пр-т Мира, 38 (окрест ности ПНЗ № 3)	56,04±1,54	7,68	13,7	66,68±1,92	9,60	14,4	0,79±0,13
44	зеленые насаждения в районе СНТ Березка	76,00±2,30	11,52	15,2	69,72±2,02	10,1	14,5	0,60±0,17

Примечание: номера точек в таблице приведены согласно техническому заданию в научном проекте РНФ. $M \pm m_M$ – среднее арифметическое \pm ошибка среднего арифметического; $\pm \sigma$ – среднее квадратическое отклонение; V – коэффициент вариации; $r \pm m_r$ – коэффициент корреляции длины и ширины листовой пластинки \pm ошибка коэффициента корреляции.

Распределение значений морфометрических параметров листовых пластинок тополя итальянского можно описать уравнением полиномиальной кривой. Для показателя длины – 6-й степени, для ширины – 5-й степени. Представленные на рис. 2 и 3 модели

являются адекватными, т.к. критерий аппроксимации $R^2 \geq 0,95$. Наиболее низкие значения длины листовых пластинок зафиксированы в точках № 10 и 15, ширины – в точках № 6 и 40.

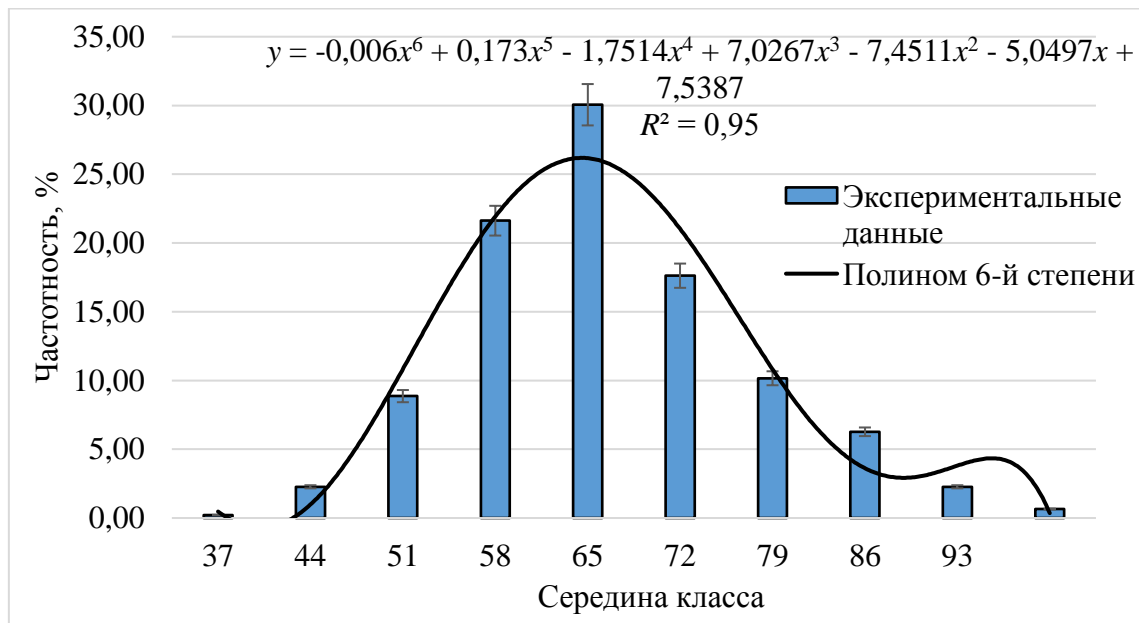


Рис. 2. Вариационный ряд длины листовых пластинок (мм) тополя итальянского
Fig. 2. The variational range of the length of the leaves (mm) of *Populus italica* (Du Roi) Moench

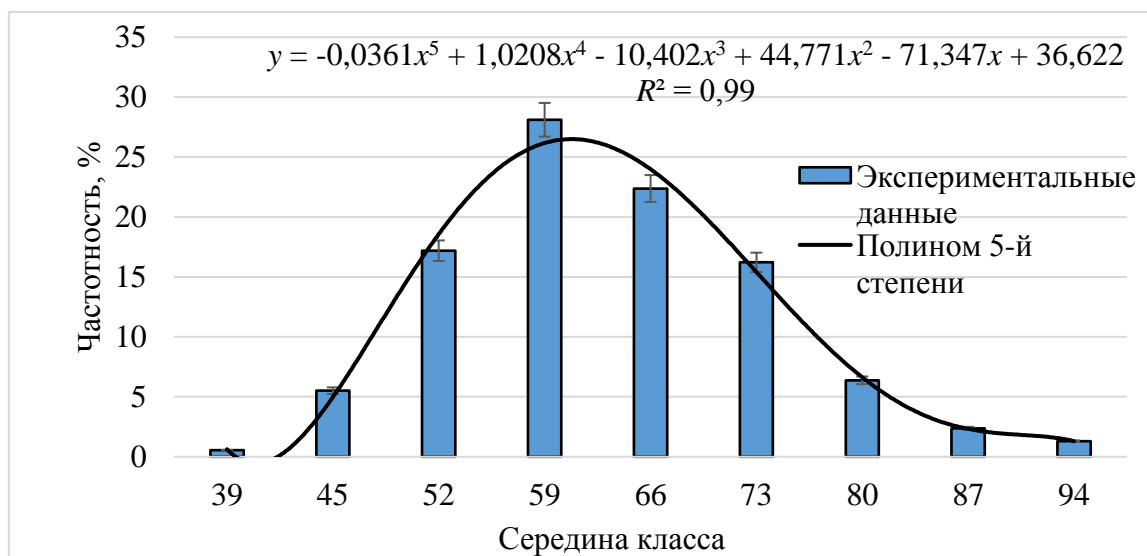


Рис. 3. Вариационный ряд ширины листовых пластинок (мм) тополя итальянского
Fig. 3. The variational range of the width of the leaves (mm) of *Populus italica* (Du Roi) Moench

Известно, что размеры листа у одного и того же вида могут изменяться как под влиянием загрязняющих веществ, так и в зависимости от многих факторов среды (увлажнение, температура и т.п.). Зачастую в стрессовых условиях происходит уменьшение размеров фотосинтезирующего аппарата, а также изменение формы листовых пластинок.

Устойчивость растений к промышленным газам основана на их способности к детоксикации вредных веществ, а также на функциональных особенностях, которые препятствуют проникновению газообразных соединений внутрь организма. В результате глубо-

кой перестройки на молекулярном, субклеточном, клеточном, тканевом и организменном уровнях, возможна преадаптация растений к загрязнению воздушной среды.

Кроме того, существенным компонентом выбросов как стационарных, так и передвижных источников являются пылевидные частицы. Так, на территориях, прилегающих к АО «Липецкцемент», растительный покров покрыт слоем цементной пыли, которая представляет собой смесь минералов, содержащих калий, кальций, алюминий. Такие пылевидные частицы нарушают процесс фотосинтеза, а, следовательно, и снижают прирост растений.

На рис. 4 представлены отклонения в стабильности развития листовых пластинок по пяти изучаемым признакам. Наибольшие абсолютные значения зафиксированы по 3-му признаку (расстояние между основаниями первой и второй жилок второго порядка), наименьшие по 1-му и 2-му признакам. По 1-му признаку во всех точках зафиксировано превышение относительно фона, по 2-му признаку 89 % значений превышает контроль, по 3-му признаку – 89 %, по 4-му признаку – 97 %, по 5-му признаку – 50 %. Следовательно, наиболее чувствительным является 1-й признак, наименее – 5-й.

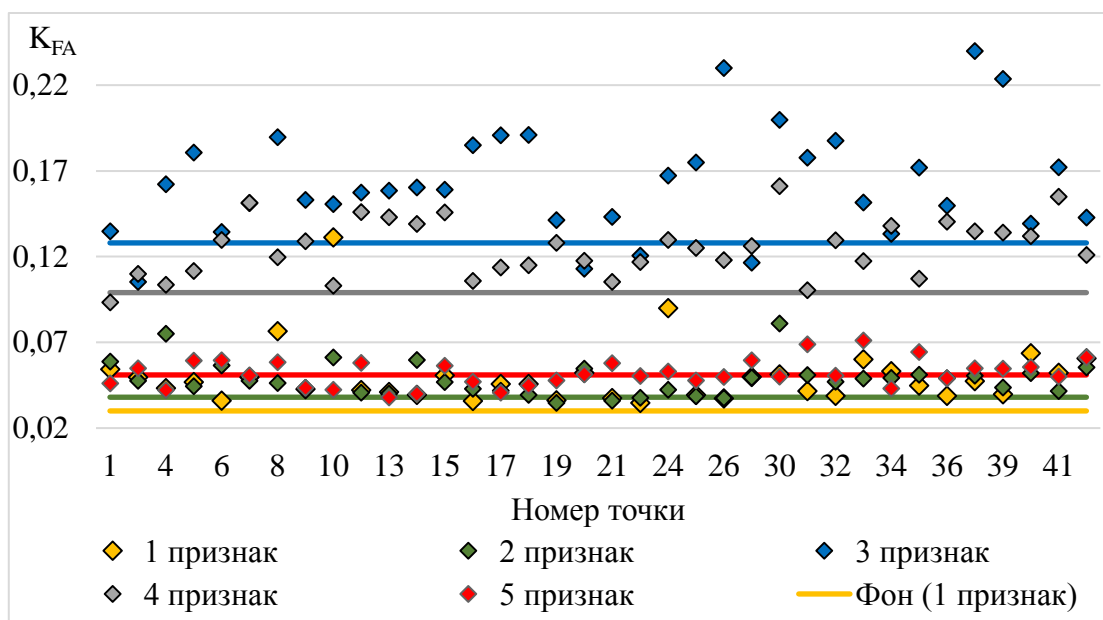


Рис. 4. Разброс среднеарифметических значений морфологических признаков относительно фоновых значений

Fig. 4. The spread of the arithmetic mean values of morphological features relative to the background values

Интегральный показатель флуктуирующей асимметрии листовых пластинок тополя итальянского варьирует на исследуемой территории Липецка в пределах от 0,072 до 0,109. В районе СНТ Березка I_{FA} составляет 0,069, что соответствует II баллу. Таким образом, во всех точках наблюдается превышение относительно фоновых значений (рис. 5).

Наибольшие значения коэффициента флуктуирующей асимметрии зафиксированы в следующих точках – № 8, 10, 24, 26, 30, 37, 39 ($I_{FA} > 0,095$), что соответствует V баллу и свидетельствует о критическом состоянии окружающей среды. Наименьшие значения отмечены в пунктах № 1, 3, 20, 21, 23 ($I_{FA} < 0,080$), что соответствует III баллу. Наиболее низкие показатели асимметрии отмечены в рекреационной зоне, высокие отклонения в стабильности развития наблюдаются у листовых пластинок деревьев в промышленной зоне – по ул. Metallургов, на Грязинском шоссе, а также по ул. Краснознаменной (микрорайон бывшего тракторного завода) и в окрестностях Особой экономической зоны, где расположены такие предприятия, как ООО «ЧСЗ-Липецк» и ООО «Йокохама Р.П.З.».

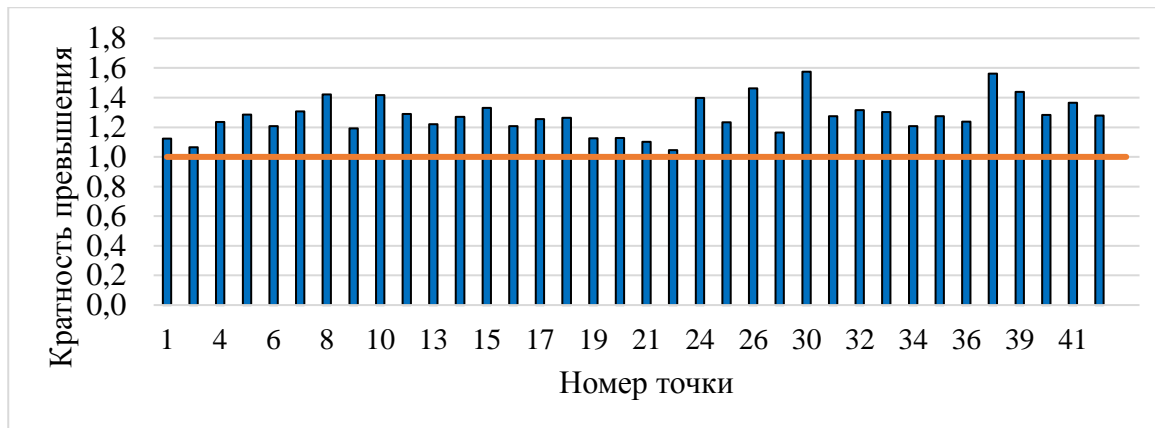


Рис. 5. Превышение интегрального показателя флуктуирующей асимметрии листовых пластинок относительно фонового значения

Fig. 5. The exceeding the integral index of fluctuating asymmetry of leaves relative to background value

Одним из основных компонентов выбросов НЛМК является сероводород, превышения ПДК_{м.р.} по которому периодически фиксируются в ПНЗ-4 (район бывшего тракторного завода). H₂S весьма токсичное для растений вещество, вызывающее нарушения как на клеточном уровне, так и на уровне ферментной системы.

Еще одним загрязняющим веществом, поступающим в атмосферный воздух в результате эмиссии предприятий, является диоксид серы. SO₂ вызывает нарушения ассимиляции, приводит к хлоротичным повреждениям (пожелтение листьев), а при длительном воздействии вызывает некрозы тканей.

Скорости поглощения газообразных примесей растительными организмами возрастают при увеличении их растворимости. Так, SO₂, NO₂ и ряд других растворимых соединений являются легкосорбируемыми загрязнителями. NO и CO плохо растворимы, поэтому абсорбируются относительно медленно или вообще не поглощаются растительностью.

При выпадении осадков поверхность листьев становится влажной и возрастает степень поглощения примесей в несколько раз [Смит, 1985]. При дефиците влаги в почве происходит закрытие устьиц, а, следовательно, затрудняется проникновение газов внутрь растения. Поэтому довольно засушливый период вегетации в 2021 г. способствовал меньшему поглощению растениями загрязнителей. Однако недостаток влаги вызывает замедление физиологических процессов и ухудшает рост и развития растений. Таким образом, даже при оптимальных значениях абиотических экологических факторов, древесные растения в городских условиях испытывают постоянный стресс разной интенсивности.

На основе метода интерполяции нами была построена тематическая биоиндикационная карта по показателю площади листовых пластинок (рис. 6). Наименьшие значения зафиксированы в районе АО «Липецкцемент», к юго-западу от основной промышленной площадки НЛМК (микрорайон бывшего тракторного завода), по ул. Metallургов (район ост. Коксохим), а также на пересечении ул. Водопьянова и пр-та Победы.

Попытка установить зависимость ($r \pm m_r$) между площадью листовых пластинок и интегральным показателем флуктуирующей асимметрии для всей совокупности данных показала отрицательную связь средней силы: $-0,60 \pm 0,14$. Можно предположить, что при увеличении размеров листа наблюдается уменьшение признаков асимметричности.

Помимо аэротехногенного загрязнения на растения существенное влияние оказывает состояние почвенного покрова. Изучение почв Х.А. Джувеликяном свидетельствует о формировании вокруг промышленных площадок НЛМК особых техногенных почв с

дальностью 1–1,5 км от источника. В поверхностном слое фиксируется превышение от 1ПДК до 7 ПДК по ряду тяжелых металлов: свинцу, хрому, никелю, цинку. Кроме того, в зоне влияния предприятия на поверхности почвы формируется техногенный слой мощностью до 2 см с щелочной реакцией среды и повышенным количеством крупной пыли. Автор отмечает, что влияние выбросов на состояние растительности зависит от расстояния до источника загрязнения. В радиусе до 500 м наблюдается угнетение травянистых и древесных растений [Джувеликян, 2010]. Другие авторы [Косинова, Фонова, 2015] также фиксируют в зоне влияния АО «НЛМК» многолетнее накопление тяжелых металлов за счет ветрового переноса.

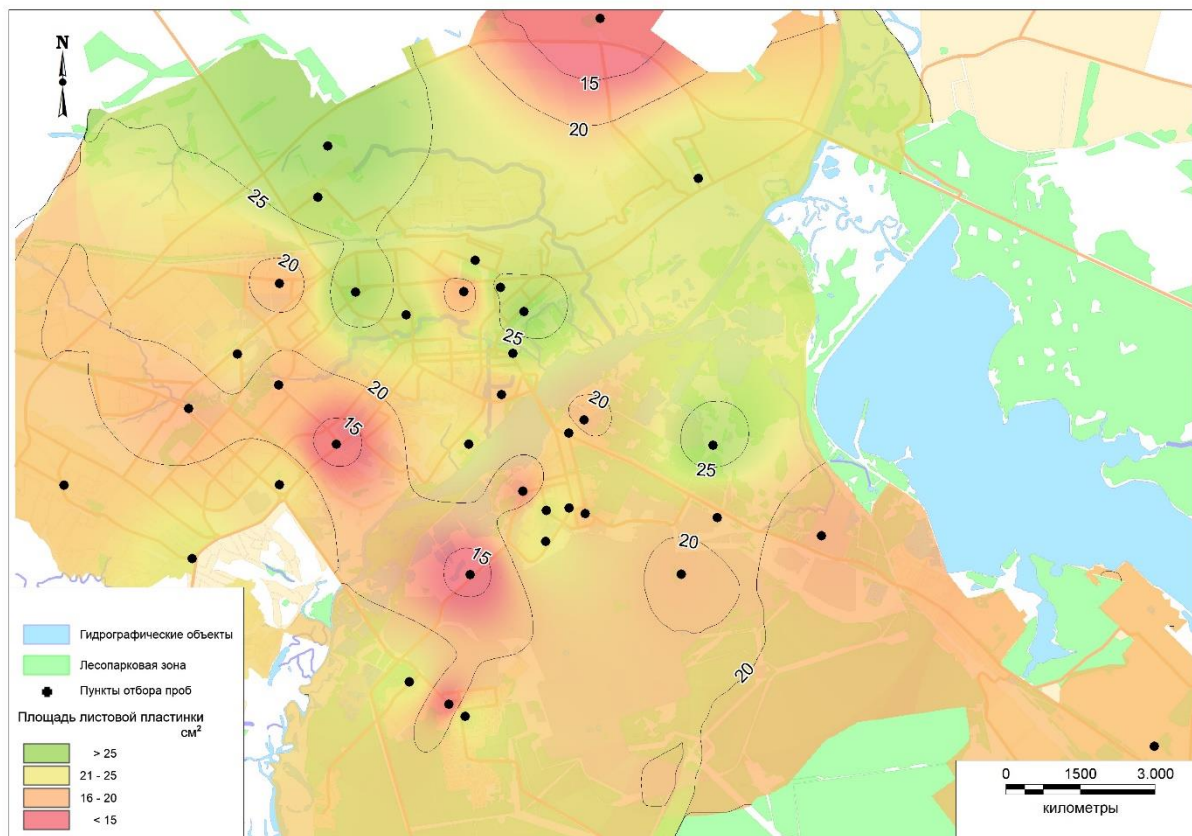


Рис. 6. Пространственное распределение показателя площади листовых пластинок тополя итальянского на территории Липецка (автор П.М. Виноградов)

Fig. 6. The spatial distribution of the indicator of the area of leaves *Populus italica* (Du Roi) Moench in the territory of Lipetsk city (author P.M. Vinogradov)

Таким образом, ответная реакция тополя итальянского при воздействии комплекса стрессовых факторов среды указывает на то, что абсолютно устойчивых к промышленным выбросам организмов не существует. Несмотря на то что данный вид, произрастая в городских условиях, не проявляет визуально выраженных повреждений ассимилирующих органов, происходит изменение таких морфометрических параметров, как размеры листовых пластинок и флуктуирующая асимметрия. Это служит биоиндикационным маркером состояния окружающей среды.

Заключение

На основе данных, полученных в ходе исследования, можно сделать следующие выводы.

Во-первых, оценка морфометрических параметров листовых пластинок тополя итальянского показала наличие отклонений в стабильности развития древесных растений, произрастающих на территории Липецка.

Во-вторых, зафиксировано уменьшение размеров листьев (длины и ширины) тополя итальянского по сравнению с фоновыми значениями. В 84 % точек обнаружена достоверная корреляционная связь между длиной и шириной листа. Только в четырех пунктах связь между данными параметрами недостоверна, что дает возможность предположить наличие высокой степени стрессовых условий произрастания древесных растений и нарушения роста фотосинтезирующего аппарата.

В-третьих, во всех точках отбора интегральный показатель флуктуирующей асимметрии I_{FA} превышает фоновые значения (0,069). Самая высокая асимметрия листовых пластинок отмечена в точках № 26, 30, 37, 39. Данные территории расположены в зоне влияния производственных площадок Новолипецкого металлургического комбината и в окрестностях Особой экономической зоны Липецка. Наименьшее значение I_{FA} отмечается в рекреационной зоне (в парках города). В жилебной зоне показатель флуктуирующей асимметрии изменяется от III до V баллов в зависимости от близости к источникам загрязнения.

В-четвертых, уменьшение площади листовых пластинок также фиксируется в зоне влияния эмиссии загрязняющих веществ промышленных предприятий (вблизи цементного завода, к юго-западу от основной промышленной площадки НЛМК, в районе коксохимического производства), а также на пересечении крупных магистральных улиц города (например, ул. Водопьянова и пр-та Победы). Установлена отрицательная достоверная связь между площадью листовой пластинки и флуктуирующей асимметрией. Следовательно, при увеличении размеров листа наблюдается уменьшение признаков асимметричности.

В-пятых, сравнительный анализ показал, что наши данные в целом согласуются с результатами мониторинга атмосферного воздуха официальных служб. Наибольшие концентрации загрязняющих выбросов фиксируются в микрорайоне бывшего тракторного завода. За счет воздушного переноса с промышленных площадок НЛМК эта территория находится в зоне повышенного влияния выбросов, что также подтверждается и исследованиями других ученых.

Таким образом, на рост и развитие древесных растений оказывают влияние не только газообразные загрязняющие вещества, но и метеорологические условия, а также состояние почвенного покрова. Следовательно, биоиндикационные показатели являются маркерами условий произрастания зеленых насаждений, т.е. свидетельствуют о благоприятности или экстремальности окружающей среды.

Список источников

1. Доклад «Состояние и охрана окружающей среды Липецкой области в 2019 году». 2020. Липецк, Управление экологии и природных ресурсов Липецкой области, 176 с.
2. Захаров В.М., Баранов А.С., Борисов В.И., Валецкий А.В., Кряжева Н.Г., Чистякова Е.К., Чубинишвили А.Т. 2000. Здоровье среды: методика оценки. Оценка состояния природных популяций по стабильности развития: методологическое руководство для заповедников. М., Центр экологической политики России, 66 с.
3. Методические рекомендации по выполнению оценки качества среды по состоянию живых существ (оценка стабильности развития живых организмов по уровню асимметрии морфологических структур). 2003. М., МПР РФ, 24 с.



4. Практикум по информационным технологиям. 2008. Под ред. В.С. Тикунова, С.А. Куролапа. Воронеж, Воронеж. гос. ун-т, 265 с.

Список литературы

1. Алборов И.Д., Харебов Г.З., Гасинов С.А., Пономарь Р.В. 2013. Влияние отходов цветной металлургии на экологию региона. Вестник Международной академии наук экологии, безопасности человека и природы, 18 (4): 9-11.
2. 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.
3. Джувеликян Х.А. 2010. Влияние техногенных факторов на городские и пригородные ландшафты Центрального Черноземья. Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация, 1: 68–75.
4. Клевцова М.А., Виноградов П.М. 2015. Геоэкологическая оценка состояния урбанизированных территорий биоиндикационными методами (на примере г. Воронежа). Экологические системы и приборы, 4: 3–13.
5. Кобланова С.А., Бакытбеккызы А. 2019. Фитомониторинг состояния рекреационных зон г. Костаная методом флуктуирующей асимметрии на примере тополя бальзамического (*Populus balsamifera*). Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии, 18: 508–510. DOI: 10.14258/pbssm.2019106.
6. Корнелюк Н.Н., Конякин С.Н. 2014. Влияние урботехногенной нагрузки на стабильность развития зеленых насаждений (на примере *Populus pyramidalis*). В кн.: Биоэкологическое краеведение: мировые, российские и региональные проблемы. Материалы 3-й всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвящённой 85-летию юбилею естественно-географического факультета, 14 ноября 2014, Самара, Изд-во ПГСГА: 123–128.
7. Коротченко И.С. 2014. Флуктуирующая асимметрия листовой пластинки тополя бальзамического (*Populus balsamifera*) в оценке качества среды города Ачинска. Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований, 6: 10–10. URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=5135> (дата обращения: 18.09.2021).
8. Коротченко И.С., Лебедев Н.А., Первышина Г.Г., Кондратюк Т.А., Медведева В.А. 2020. Влияние выбросов тепловых электростанций Красноярского края на стабильность развития тополя бальзамического. Успехи современного естествознания, 10: 85–90. DOI: 10.17513/use.37495.
9. Косинова И.И., Фонова С.И. 2015. Закономерности пространственного распределения загрязняющих веществ в городских условиях. Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология, 2: 122–124.
10. Смит У.Х. 1985. Лес и атмосфера. Взаимодействие между лесными экосистемами и примесями атмосферного воздуха. М., Прогресс, 432 с.
11. Магомедова М.А., Касимова К.А. 2008. Тополь и его использование в мониторинге загрязнения окружающей среды. Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки, 3 (4): 82–85.
12. Овчинникова Е.С., Макарова А.А., Чемякова Д.А. 2020. Содержание аскорбиновой кислоты в листьях тополя советского пирамидального в различных условиях произрастания. Студенческая наука и XXI век, 17 (19): 152–154.
13. Попельницкая И.М., Попов А.О. 2017. Флуктуирующая асимметрия листьев тополя бальзамического (*Populus balsamifera* L.) в городской среде. Успехи современного естествознания, 12: 72–78.
14. Попова О.В., Федорова А.И. 2005. Индикация дальности и интенсивности влияния Новолипецкого металлургического комбината на прилегающую территорию (по реакциям клена платанолистного). Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация, 1: 135–142.
15. Савинова О.А., Хмара И.В. 2017. Флуктуирующая асимметрия листьев тополя черного *Populus nigra* в юго-западной части города Краснодар, как метод индикации качества среды. В кн.: Вестник научно-технического творчества молодежи Кубанского ГАУ. Сборник статей по

материалам научно-исследовательских работ: в 4 томах, 22–25 марта 2017 года, Краснодар, Изд-во КубГАУ: 53–56.

16. Скрипальщикова Л.Н., Стасова В.В. 2014. Биоиндикационные показатели стабильности развития насаждений в нарушенных ландшафтах. Сибирский лесной журнал, 2: 62–72.

17. Темиркул К.К., Бикиров Ш. 2019. Оценка биоиндикационного потенциала *Populus alba* L. и *Quercus robur* L. в городе Бишкек. Colloquium-journal, 24–3 (48): 5–7.

18. Шепелева О.А. 2009. Влияние техногенного загрязнения на окружающую среду и здоровье населения города Липецка. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Липецк, 24 с.

19. Cornelissen T., Stiling P. 2011. Similar responses of insect herbivores to leaf fluctuating asymmetry. Arthropod-Plant Interactions, 5: 59–69. DOI: 10.1007/s11829-010-9116-1.

20. Glibovytska N.I., Karavanovych K.B. 2018. Morphological and physiological parameters of woody plants under conditions of environmental oil pollution. Ukrainian Journal of Ecology, 8 (3): 322–327.

21. Graham J.H., Raz S., Hel-Or H., Nevo E. 2010. Fluctuating Asymmetry: Methods, Theory, and Applications. Symmetry, 2 (2): 466–540. DOI: 10.3390/sym2020466.

22. Kozlov M.V., Wilsey B.J., Koricheva J., Haukioja E. 1996. Fluctuating asymmetry of Birch leaves increases under pollution impact. Journal of Applied Ecology, 33 (6): 1489–1495. DOI: 10.2307/2404787.

23. Kozlov M.V., Zverev V., Sandner T.M. 2019. Photosynthetic Efficiency is Higher in Asymmetric Leaves than in Symmetric Leaves of the Same Plant. Symmetry, 11 (6): 834. DOI: 10.3390/sym11060834.

24. Masenov K.B., Ashibekov S., Bakytbek A. 2016. The influence of gas processing facility on plants. The Way of Science, 12 (34): 14–17.

25. Palmer A.R., Strobeck C.H. 2003. Fluctuating asymmetry analyses revisited. In: Developmental Instability (DI): Causes and Consequences. Ed. By M. Polak. Oxford University Press: 279–319.

26. Parsons P.A. 1992. Fluctuating asymmetry – a biological monitor of environmental and genomic stress. Heredity, 68: 361–364. DOI: 10.1038/hdy.1992.51.

27. Puerta-Piñero C., Gómez J.M., Hódar J.A. 2008. Shade and herbivory induce fluctuating asymmetry in a mediterranean oak. International Journal of Plant Sciences, 169 (5): 631–635. DOI: 10.1086/533601.

28. Santos J.C., Alves-Silva E., Cornelissen T.G., Fernandes G.W. 2013. The effect of fluctuating asymmetry and leaf nutrients on gall abundance and survivorship. Basic and Applied Ecology, 14 (6): 489–495. DOI: 10.1016/j.baae.2013.06.005.

References

1. Alborov I.D., Kharebov G.Z., Gasinov S.A., Ponomar R.V. 2013. Vliyanie otkhodov tsvetnoy metallurgii na ekologiyu regiona [The impact of non-ferrous metallurgy waste on the ecology of the region]. Vestnik Mezhdunarodnoy akademii nauk ekologii, bezopasnosti cheloveka i prirody, 18 (4): 9–11.

2. Besschetnov P.V., Besschetnova N.N. 2019. White Poplar (*Populus Alba* L.) in Green Space of the Nizhny Novgorod Region: Correlation and Regression Parameters of Foliage. Vestnik Nizhegorodskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii, 2 (22): 25–31 (in Russian).

3. Dzhuvelikjan H.A. 2010. Influence Anthropogenic Factors on City and Suburban Landscapes of the Central Chernozem Region. Proceedings of Voronezh State University. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy, 1: 68–75 (in Russian).

4. Klevtsova M.A., Vinogradov P.M. 2015. The Geoecological Evaluation of Urban Areas Bioindicating Method (for Example Voronezh). Ecological Systems and Devices, 4: 3–13 (in Russian).

5. Koblanova S.A., Bakytbekkyzy A. 2019. Phytomonitoring of the State of Recreational Zones in Kostanay Using Fluctuating Asymmetry Method on *Populus Balsamifera*. Problems of botany of South Siberia and Mongolia, 18: 508–510 (in Russian). DOI: 10.14258/pbssm.2019106.

6. Kornelyuk N.N., Konyakin S.N. 2014. Quality Assessment of Urbo Technogenic Load of Stable Development of Green Plantings (on the Example of *Populus Pyramidalis*). In: Bioecological study of local lore: world, Russian and regional problems. Proceedings of the 3rd All-Russian Scientific and



Practical Conference with International Participation, dedicated to the 85th anniversary of the Faculty of Natural Sciences, November 14, 2014, Samara, Publ. PSGSA: 123–128 (in Russian).

7. Korotchenko I.S. 2014. Fluktuiruyushchaya asimmetriya listvoy plastinki topolya bal'zamicheskogo (*Populus balsamifera*) v otsenke kachestva sredy goroda Achinska [Fluctuating asymmetry of the leaf blade of balsam poplar (*Populus balsamifera*) in assessing the quality of the environment in the city of Achinsk]. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*, 6: 10–10. URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=5135> (accessed: 18 September 2021). (in Russian).

8. Korotchenko I.S., Lebedev N.A., Pervyshina G.G., Kondratyuk T.A., Medvedeva V.A. 2020. Influence of Emissions from Thermal Power Plants of the Krasnoyarsk Region on the Stability of Development of Balsamic Poplar. *Advances in current natural sciences*, 10: 85–90 (in Russian). DOI: 10.17513/use.37495.

9. Kosinova I.I., Fonova S.I. 2015. Regularities of Spatial Distribution of Pollutants in an Urban Environment. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2: 122–124 (in Russian).

10. Smit U.Kh. 1985. Les i atmosfera. Vzaimodeystvie mezhdu lesnymi ekosistemami i primesyami atmosfernogo vozdukh [Forest and atmosphere. Interaction between forest ecosystems and air pollutants]. Moscow, Publ. Progress, 432 p. (in Russian).

11. Magomedova M.A., Kasimova K.A. 2008. Topol' i ego ispol'zovanie v monitoringe zagryazneniya okruzhayushchey sredy [Poplar and its use in monitoring environmental pollution]. *Izvestiya Dagestanskogo gosudarstvennogo pedago-gicheskogo universiteta. Estestvennye i tochnye nauki*, 3 (4): 82–85 (in Russian).

12. Ovchinnikova E.S., Makarova A.A., Chemekova D.A. 2020. Soderzhanie askorbinovoy kisloty v list'yakh topolya sovetskogo piramidal'nogo v razlichnykh usloviyakh proizrastaniya [The content of ascorbic acid in the leaves of the Soviet pyramidal poplar under different growing conditions]. *Studencheskaya nauka i XXI vek*, 17 (19): 152–154 (in Russian).

13. Popel'nitskaya I.M., Popov A.O. 2017. Leaves` Fluctuating Asymmetry of Poplars (*Populus Balsamifera*) in the Urban Environment. *Advances in Current Natural Sciences*, 12: 72–78 (in Russian).

14. Popova O.V., Fedorova A.I. 2005. Definition of Range and Intensity Influence of Novolipetsk Metallurgical Manufacture on an Environment (the Example of a Acer Platanoides). *Proceedings of Voronezh State University. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy*, 1: 135–142 (in Russian).

15. Savinova O.A., Khmara I.V. 2017. Fluktuiruyushchaya asimmetriya list'ev topolya chernogo *Populus nigra* v yugo-zapadnoy chasti goroda Krasnodar, kak metod indikatsii kachestva sredy [Fluctuating asymmetry of poplar leaves of black *Populus nigra* in the southwestern part of the city of Krasnodar, as a method of indicating the quality of the environment]. In: *Vestnik nauchno-tehnicheskogo tvorchestva molodezhi Kubanskogo GAU [Bulletin of scientific and technical creativity of youth of the Kuban State Agrarian University]*. Collection of articles based on research materials: in 4 volumes, March 22–25, 2017, Krasnodar, Publ. KubSAU: 53–56.

16. Skripal'shchikova L.N., Stasova V.V. 2014. Bioindicative Parameters of Stand Growth Stability in the Disturbed Landscapes of Krasnoyarsk and Achinsk Forest-Steppe Regions. *Siberian Journal of Forest Science*, 2: 62–72 (in Russian).

17. Temirkul K.K., Bikirov Sh. 2019. Assessment of the Bioindication Potential of *Populus Alba* L. and *Quercus Robur* L. In Bishkek. *Colloquium-journal*, 24–3 (48): 5–7 (in Russian).

18. Shepeleva O.A. 2009. Vliyanie tekhnogennogo zagryazneniya na okruzhayushchuyu sredyu i zdorov'e naseleniya goroda Lipetska [Influence of technogenic pollution on the environment and health of the population of the city of Lipetsk]. Abstract. dis. ... cand. biol. sciences. Lipetsk, 24 p.

19. Cornelissen T., Stiling P. 2011. Similar responses of insect herbivores to leaf fluctuating asymmetry. *Arthropod-Plant Interactions*, 5: 59–69. DOI: 10.1007/s11829-010-9116-1.

20. Glibovytska N.I., Karavanovych K.B. 2018. Morphological and physiological parameters of woody plants under conditions of environmental oil pollution. *Ukrainian Journal of Ecology*, 8 (3): 322–327.

21. Graham J.H., Raz S., Hel-Or H., Nevo E. 2010. Fluctuating Asymmetry: Methods, Theory, and Applications. *Symmetry*, 2 (2): 466–540. DOI: 10.3390/sym2020466.

22. Kozlov M.V., Wilsey B.J., Koricheva J., Haukioja E. 1996. Fluctuating asymmetry of Birch leaves increases under pollution impact. *Journal of Applied Ecology*, 33 (6): 1489–1495. DOI: 10.2307/2404787.



23. Kozlov M.V., Zverev V., Sandner T.M. 2019. Photosynthetic Efficiency is Higher in Asymmetric Leaves than in Symmetric Leaves of the Same Plant. *Symmetry*, 11 (6): 834. DOI: 10.3390/sym11060834.
24. Masenov K.B., Ashibekov S., Bakytbek A. 2016. The influence of gas processing facility on plants. *The Way of Science*, 12 (34): 14–17.
25. Palmer A.R., Strobeck C.H. 2003. Fluctuating asymmetry analyses revisited. In: *Developmental Instability (DI): Causes and Consequences*. Ed. By M. Polak. Oxford University Press: 279–319.
26. Parsons P.A. 1992. Fluctuating asymmetry – a biological monitor of environmental and genomic stress. *Heredity*, 68: 361–364. DOI: 10.1038/hdy.1992.51.
27. Puerta-Piñero C., Gómez J.M., Hódar J.A. 2008. Shade and herbivory induce fluctuating asymmetry in a mediterranean oak. *International Journal of Plant Sciences*, 169 (5): 631–635. DOI: 10.1086/533601.
28. Santos J.C., Alves-Silva E., Cornelissen T.G., Fernandes G.W. 2013. The effect of fluctuating asymmetry and leaf nutrients on gall abundance and survivorship. *Basic and Applied Ecology*, 14 (6): 489–495. DOI: 10.1016/j.baae.2013.06.005.

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 кафедры геоэкологии и мониторинга окружающей среды факультета географии, геоэкологии и туризма Воронежского государственного университета, г. Воронеж, Россия

Михеев Алексей Александрович, преподаватель кафедры рекреационной географии, страноведения и туризма факультета географии, геоэкологии и туризма Воронежского государственного университета, г. Воронеж, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Marina A. Klevtsova, candidate of Geographical Sciences, Associate Professor of the Department of Geoecology and Environmental Monitoring of the Faculty of Geography, Geoecology and Tourism of the Voronezh State University, Voronezh, Russia

Alexey A. Mikheev, Lecturer at the Department of Recreational Geography, Regional Studies and Tourism of the Faculty of Geography, Geoecology and Tourism of the Voronezh State University, Voronezh, Russia