СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ НАУКИ. АГРОНОМИЯ

DOI: 10.32786/2071-9485-2021-01-02

LEAF BLADES OF BIOINDICATOR TREES: NEW POSSIBILITIES FOR ANALYSIS IN THE ASSESSMENT OF THE ENVIRONMENTAL STATE IN THE CONDITIONS OF THE ARID ZONE

K.N. Kulik¹, A.S. Isakov¹, V.V. Novochadov²

¹ Federal Research Centre of Agroecology, Amelioration and Protective Afforestation
of Russian Academy of Sciences, Volgograd, Russia

² Volgograd State University, Volgograd, Russia

Received 08.02.2021

Submitted 10.03.2021

Summary

The article presents the results of analyzing leaf blades of *Populus nigra* and *Elaeagnus angustifolia*, including the use of new methods of morphometric analysis. The authors conclude that this set of indicators reflects well the state of the external environment in the arid zone of Russia.

Abstract

Introduction. The relevance is due to the emergence of new imaging systems, increased sensitivity of photoindication methods and their computer processing. Of particular interest in this area are the options for quantitative analysis of color distribution (colorimetry). The authors consider it useful to expand the list of bioindicator trees in the arid zone by adding *Elaeagnus angustifolia* to their list. **Object.** The study area is located within the Ilovinsky, Gorodishchensky districts of the Volgograd Region and the Sovetsky district of Volgograd. **Materials and methods.** The material was obtained from sites with a low, moderate and high degree of anthropogenic load, which was expressed in an increased content of toxic trace elements in the soil and air pollution. In addition to the generally accepted methods for determining the geometry of the leaf blade (fluctuation asymmetry, area and shape complexity indicators), modern methods of analysis are used in the form of calculating color, azimuthal and vertical gradients. **Results and conclusion.** The fluctuation asymmetry confirmed its sensitivity for *P. nigra* and *E. angustifolia* in the arid zone: in areas with a high degree of anthropogenic load, its value was 1.2-1.6 times higher than in areas with a low degree of load. For the shape complexity indicator, the excess was 1.4-1.7 times, the asymmetry of the green intensity was significantly higher by 1.5 and 1.8. The longitudinal and transverse gradients of the green intensity also reacted quite noticeably to anthropogenic pollution, their values differed by 1.25-1.55 times when comparing the plots. When comparing the response amplitude to the high anthropogenic impact of the studied indicators, it was found that the most sensitive indicators for *P. nigra* were such as the asymmetry of the complexity of the shape and the longitudinal gradient of the green intensity. The fluctuation asymmetry and the longitudinal gradient of the green intensity are significant indicator for *E. angustifolia*. The comparison of the results between each other, between species, as well as between sites with different degrees and types of anthropogenic load allowed, on the basis of the proposed analysis, to develop criteria for assessing the state of the environment. A comparative analysis showed that the sensitivity of *E. angustifolia* to soil and air pollution is higher than that of *P. nigra*, which allows us to recommend this species as a bioindicator plant in the arid zone.

Key words: bioindication, arid land use, arid ecosystems, anthropogenic pollution, leaf blade, fluctuating asymmetry, computer morphometry, computer colorimetry, *Populus nigra*, *Elaeagnus angustifolia*.

Citation. Kulik K.N., Isakov A.S., Novochadov V.V. Leaf blades of bioindicator trees: new possibilities for analysis in the assessment of the environmental state in the conditions of the arid zone. *Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp.* 2021. 1(61). 25-36 (in Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2021-01-02.

Author's contribution. The authors of this study collected material, analyzed the received data and wrote the paper.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

УДК 635.914:57.085.2

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ АНАЛИЗА ЛИСТОВЫХ ПЛАСТИНОК ДЕРЕВЬЕВ-БИОИНДИКАТОРОВ В ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В УСЛОВИЯХ АРИДНОЙ ЗОНЫ

К. Н. Кулик¹, академик РАН, доктор сельскохозяйственных наук

А. С. Исаков¹, аспирант

В. В. Новочадов², доктор медицинских наук, профессор

¹Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций
и защитного лесоразведения РАН, г. Волгоград

²Волгоградский государственный университет, г. Волгоград

Дата поступления в редакцию 08.02.2021

Дата принятия к печати 10.03.2021

Актуальность обусловлена появлением новых систем визуализации, повышением чувствительности методов фотоиндикации и их компьютерной обработки. Особый интерес в этой области представляют варианты количественного анализа цветового распределения (цветометрии). Авторы считают полезным расширить список деревьев-биоиндикаторов в аридной зоне за счет введения в их список *Elaeagnus angustifolia*. **Объект.** Территория исследования – в пределах Иловлинского, Городищенского районов Волгоградской области и Советского района г. Волгограда. **Материалы и методы.** Материал был получен с участков с низкой, умеренной и высокой степенью антропогенной нагрузки, которая выражалась в повышенном содержании токсичных микроэлементов в почве и загрязнении воздуха. Помимо общепринятых методов определения геометрии листовой пластинки (флуктуационная асимметрия, показатели площади и сложности формы), применены современные способы анализа в виде расчета цветовых, азимутальных и вертикальных градиентов. **Результаты и выводы.** Показатель ФА подтвердил свою чувствительность для *P. nigra* и *E. Angustifolia* в аридной зоне: на участках с высокой степенью антропогенной нагрузки его величина была в 1,2-1,6 раза выше, чем на участках с низкой степенью нагрузки. Для показателя сложности формы превышение составило 1,4-1,7 раза, асимметрия интенсивности зеленого была достоверно выше в 1,5 и 1,8. Продольный и поперечный градиенты интенсивности зеленого также достаточно заметно реагировали на антропогенные загрязнения, их значения различались при сравнении участков в 1,25-1,55 раза. При сопоставлении амплитуды реакции на высокое антропогенное воздействие исследованных показателей было установлено, что наиболее чувствительными для *P. nigra* оказались такие показатели, как асимметрия сложности формы и продольный градиент интенсивности зеленого, а для *E. Angustifolia* – показатель ФА и продольный градиент интенсивности зеленого. Сопоставление результатов между собой, между видами, а также между участками с различной степенью и характером антропогенной нагрузки позволило на основе предложенного анализа выработать критерии для оценки состояния окружающей среды. При сравнительном анализе оказалось, что чувствительность *E. angustifolia* к загрязнениям почвы и воздуха выше, чем у представителей *P. nigra*, что позволяет рекомендовать этот вид в качестве растения-биоиндикатора в условиях аридной зоны.

Ключевые слова: биоиндикация, аридное землепользование, аридные экосистемы, антропогенные загрязнения, листовая пластинка деревьев, флуктуирующая асимметрия, компьютерная морфометрия, компьютерная цветометрия, *Rópuslus nigra*, *Elaeagnus angustifolia*.

Цитирование. Кулик К. Н., Исаков А. С., Новочадов В. В. Новые возможности анализа листовых пластинок деревьев-биоиндикаторов в оценке состояния окружающей среды в условиях аридной зоны. *Известия НВ АУК*. 2021. 1 (61). 25-36. DOI: 10.32786/2071-9485-2021-01-02.

Авторский вклад. Авторы настоящего исследования собрали материал, проанализировали полученные данные и написали рукопись.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение. Среди достаточно многообразных подходов к оценке уровня и характера загрязнения окружающей среды, прогнозирования его влияния на различные биосистемы и организм человека, фитоиндикация, по справедливости, востребована ввиду высокой чувствительности, высокой скорости получения информации и экономической целесообразности. К тому же результаты фитоиндикации легко можно использовать в прогностических моделях поведения экосистем при продолжении данных видов антропогенных воздействий. Максимально эффективен этот метод экологического контроля в отношении химических загрязнений атмосферного воздуха и почв. Структура антропогенного воздействия на природные сообщества в настоящее время характеризуется динамичностью как в плане территориального распределения, так и во временном аспекте. Доминировавшие ранее выбросы промышленных предприятий уступают место транспортным поллютантам далеко за пределами городских агломераций, интенсивно возрастает объем загрязнений от современного аграрного землепользования, нарастают площади, занятые свалками бытовых и промышленных отходов [7].

Преимущества методов биологической оценки, основанной на изменениях ежегодно обновляемых структур, у многолетних растений обладают рядом существенных преимуществ, поскольку могут свидетельствовать о состоявшемся факте загрязнения в момент, когда прямые измерения уже не дают доказательных результатов. При наличии градиента антропогенного воздействия биологические методы позволяют эффективно выявлять эпицентр и векторы распространения загрязнений [1, 12].

Растения в процессе адаптации к стрессовому воздействию неблагоприятных факторов среды изменяют свою жизнедеятельность и, как итог, морфологию наиболее динамичных структур.

Именно поэтому наиболее разработанными признаками реакции видов-биоиндикаторов на неблагоприятные воздействия со стороны окружающей среды являются изменение места и роли растения в сообществе, численности и макроанатомических особенностей растения. Наиболее чутко реагирует на токсические воздействия листовая часть растений [4]. Исходя из опыта было выработано общее представление о наиболее приемлемом виде-биоиндикаторе: это многолетнее древесное растение или древовидный кустарник с преимущественно стенотопным расселением в пределах ареала без тенденций к биоинвазии, достаточно стойкое в отношении фитопатогенов и фитофагов. В настоящее время в России в качестве биоиндикаторов с успехом используются представители родов *Betula*, *Titia*, *Álnus*, *Pópulus*, *Ácer*, *Ulmus*, *Padus* и др. [2, 8, 13, 14]. Перечень видов постоянно увеличивается, что свидетельствует об интересе исследователей в этом вопросе. Применительно к аридной зоне приходится признать, что многие из традиционных деревьев-биоиндикаторов находятся здесь на грани своих возможностей к адаптации, так что их применимость в качестве биоиндикаторов ограничена или принципиально невозможна. Необходимо использовать растения с высокой степенью адаптации к аридным условиям, но исследования в этом направлении немногочисленны [6, 17]. Представляется, что на эту роль может претендовать лох узколистный (*Elaeagnus angustifolia*) – растение с полным набором характеристик, необходимых для стабильного существования популяции в аридных условиях.

Для анализа листовой пластинки используется набор специальных количественных показателей, индексов и коэффициентов, которые позволяют сделать результаты биоиндикации достоверными и сопоставимыми. Наиболее распространен-

ными в практических исследованиях являются методы исследования флуктуирующей асимметрии (ФА) листовой пластинки. Выступая в качестве меры стабильности развития, флуктуирующая асимметрия характеризует способность организма к формированию генетически детерминированного фенотипа при минимальном уровне онтогенетических отклонений. Считается, что неблагоприятные воздействия приводят к искажению нормальной программы развития листа, что реализуется в его асимметричной морфологии [3, 5, 9, 11].

Возможности этого метода еще далеко не исчерпаны, а новые электронные системы визуализации позволяют в еще большей степени повысить чувствительность фитоиндикации. Особый интерес, с нашей точки зрения, представляют варианты количественного анализа цветового распределения (цветометрии) листовой пластинки, в том числе и варианты подсчета цветовой асимметрии, которые возможны при современных компьютерных технологиях.

Целью исследования является установление возможности использовать комплексный анализ листовой пластинки *Elaeagnus angustifolia* в сравнении с классическим биоиндикатором *Pópulus nigra* для анализа степени неблагоприятного воздействия антропогенной нагрузки на территорию.

Объект исследования. В качестве объектов исследования были выбраны участки на аридных территориях Волгоградской области, состояние атмосферного воздуха и почвы, а также характеристика фитоценозов, в пределах которых хорошо описаны по результатам предшествующих многолетних наблюдений [18, 20].

Обследованы три участка, отличающихся уровнем антропогенного воздействия:

- к югу от примыкания 3-й Продольной магистрали г. Волгограда к федеральной трассе Р-228 на расстоянии 30-50 м от места интенсивного движения транспортных средств (высокий уровень антропогенной нагрузки);
- в пределах частично деградированной защитной лесополосы в 1,5 км к югу от поселка им. Гули Королевой (умеренная нагрузка);
- в 1 км к западу от санатория «Качалинский» (многолетняя залежь с естественными куртинами – минимальный уровень антропогенной нагрузки).

Материалы и методы. Параметры размера и формы листьев были измерены в естественных популяциях *P. nigra* и *E. Angustifolia*. Материал для исследования собирали во второй декаде июня, после остановки роста листьев, по 10 образцов с десяти растений каждого вида на каждом из выбранных участков (6 выборок по 100 листьев). Выбирали здоровые зрелые растения без внешних повреждений, произрастающие отдельно, в составе небольших куртин или на внешнем ряду защитных лесополос. С каждого дерева выбирали равномерно со всех сторон неповрежденные листья среднего размера, расположенные на высоте 150-180 см от уровня почвы. Листья, собранные от одного растения, располагали в одном файле-пакете, маркировали как часть выборки данного вида на данном участке и хранили при температуре 4-8 °С не более трех суток до сканирования. Сканирование листьев осуществляли на аппарате Canon MF-4410, используя стандартное программное обеспечение производителя. Листовые пластинки сканировали 9 штук, сохраняя маркировку. Дальнейшую обработку отсканированных материалов производили с помощью программ открытого доступа ImageJ и Polosa. Результаты измерений обрабатывались в программе Microsoft Excel автоматически.

Показатель ФА рассчитывался как средний процент различий между результатами аналогичных измерений на правой и левой сторонам листовой пластинки. Набор из пяти признаков соответствовал рекомендациям Центра экологической политики России, разработанным на основе многолетнего изучения вариабельности листовой

пластинки березы повислой (*Betula pendula* Roth.) в качестве объекта для биоиндикации. Схема морфологических признаков для оценки флуктуационной асимметрии представлена на рисунке 1А.

Рисунок 1 – Схема морфологического анализа на примере листовой пластинки *P. nigra*. А.

Признаки для оценки ФА:

- 1 – ширина половины листа; 2 – длина второй жилки второго порядка;
3 – расстояние между основаниями первой и второй жилок второго порядка;
4 – расстояние между концами этих жилок; 5 – угол между главной жилкой
И второй жилкой второго порядка. Б. Бинаризация и определение сложности
формы и асимметрии площади: 1, 2 – площади левой и правой половин листа;
3, 4 – полупериметры левой и правой половин листа. В. Выделение секторов для
расчета интенсивности цвета программой Polosa. Г. Визуализация продольного
градиента интенсивности зеленого: по оси абсцисс (1 – 10) – секторы сканирования;
по оси ординат – интенсивность в усл. ед.

Figure 1 – Scheme of morphological analysis on the example of the leaf blades of *P. nigra*. А.

The characteristics to evaluate FA:

- 1 – width half-sheet; 2 – the length of the second vein of the second order; 3 – the distance
between the bases of the first and second ribs of the second order; 4 – distance between
the ends of the veins; 5 – the angle between the vein and the vein of the second order. Б.
Binarization and the definition of the complexity of the shape and asymmetry of the
square: 1, 2, the square of the left and right halves of the leaf; 3, 4 – propriety the left and

right halves of the sheet. V. Allocation of sectors to calculate the color intensity using the program Polosa. G. Visualization of the longitudinal gradient of the green intensity: along the abscissa axis (1-10) - scan sectors; along the ordinate axis-intensity in standard units

От перевода количественных результатов ФА в пятибалльную шкалу по степени загрязнения территории мы отказались, поскольку она хорошо отработана для *Betula pendula*, требует большого количества наблюдений для каждого нового вида, а такого объема материала в работе не было получено.

Средняя площадь листовой пластинки определялась после бинаризации изображения в программе ImageJ. Результат выражали в см².

После продольного рассечения изображения по главной жилке на левую и правую стороны автоматически определяли площадь каждой из сторон, а также полупериметры (рисунок 1Б). Для оценки асимметрии площади рассчитывали модуль разности площадей левой и правой половин листовой пластинки, после чего делили полученную величину на среднюю площадь листовой пластинки. Результат выражали в процентах.

Показатель сложности формы рассчитывали по формуле:

$$\text{ПСФ} = \sqrt{\frac{P^2}{4\pi S}},$$

где P – периметр в см, S – площадь листовой пластинки в см².

Аналогичным образом вычисляли показатели сложности формы для каждой половины листовой пластинки и рассчитывали асимметрию в процентах.

Средняя интенсивность зеленого рассчитывалась в условных единицах, исходя из нормирования в программе Polosa для 50 выбранных секторов в пределах листовой пластинки, величина показателя варьировала в пределах от 0 до 10, выражалась в усл. ед. Сопоставляя эти величины на левой и правой половинах листа, получали значения асимметрии по интенсивности зеленого, %. Аналогичным образом, с учетом того, что минимальная интенсивность зеленого приходилась на центральную область листовой пластинки, удавалось определять продольный (апикальный) и поперечный градиенты интенсивности зеленого, которые также выражали в процентах.

В качестве показателя амплитуды реакции на высокое антропогенное воздействие в условиях аридной зоны по каждому показателю использовали отношения величин для участка с низкой и высокой степенью воздействия как большее к меньшему.

В каждой выборке определяли среднее арифметическое (M), стандартное отклонение (δ) и стандартную ошибку (m). Значения, не укладывающиеся в диапазон ±3δ, были исключены из выборки как выпадающие. Выборки сравнивали при помощи t-критерия Стьюдента с уровнем достоверности P<0,05.

Результаты и обсуждение. Основные результаты исследования представлены в таблицах 1 и 2. Как видно из приведенных данных, средняя площадь листовой пластинки у тополя не является информативным показателем для определения степени антропогенной нагрузки. Это частично объясняется отбором листьев для анализа с выбраковкой заведомо отличных от некоторой усредненной морфологии листа. Похожая ситуация наблюдается и в отношении листьев *E. angustifolia*.

Асимметрия площади листовой пластинки была различна на участках с неодинаковой степенью антропогенной нагрузки, но достоверные различия для обоих исследованных видов выявлены лишь между показателями на участках с низкой и высокой степенью нагрузки, что свидетельствует о недостаточно высокой чувствительности данного признака для целей биомониторинга.

Показатель ФА подтвердил свою чувствительность и при использовании в

качестве биоиндикатора *P. nigra* в аридной зоне: на участках с умеренной и высокой степенью антропогенной нагрузки величина показателя превышала аналогичную на участке с низкой степенью в 1,19 и 1,6 раза, соответственно (оба $P < 0,05$). Сходные различия продемонстрированы и для *E. Angustifolia*, что позволяет считать использование данного показателя для данного вида приемлемым для биоиндикации в условиях аридной зоны.

Наиболее информативным из показателей компьютерной морфометрии оказался показатель сложности формы. При высокой степени антропогенной нагрузки его величина превышала аналогичную при низкой степени нагрузки для *P. nigra* в 1,65 раза ($P < 0,01$), для *E. Angustifolia* – в 1,38 раза ($P < 0,05$).

Стоит отметить, что у подавляющего большинства листьев асимметрия имела левостороннее доминирование, то есть величины показателей на левой половине листа были больше, чем на правой.

Величина средней интенсивности зеленого как для *P. Nigra*, так и для *E. Angustifolia* была меньше на участке с высокой степени антропогенной нагрузки, но это уменьшение не было значительным, что свидетельствует о невысокой чувствительности измеряемого признака.

Таблица 1 – Результаты анализа морфологии листовой пластинки *Pópulus nigra* в аридной зоне на участках с различной степенью антропогенной нагрузки ($M \pm m$)

Table 1 – Results of morphological analysis of *Pópulus nigra* leaf blade in the arid zone in areas with different degrees of anthropogenic load ($M \pm m$)

Показатель / Indicator	Степень антропогенной нагрузки / Rate of anthropogenic load		
	Низкая / Low	Умеренная / Average	Высокая / High
Компьютерная морфометрия / Computer morfometry			
Средняя площадь листовой пластинки, мм ² / Moderate area of leaf blade, mm ²	34,1 ± 2,43	38,4 ± 2,55	40,2 ± 3,18
Асимметрия площади листовой пластинки, % / Asymmetry leaf area, %	3,07 ± 0,212	3,40 ± 0,235	4,02 ± 0,286 *
Показатель флуктуирующей асимметрии, % / Index fluctuating asymmetry, %	4,84 ± 0,30	5,78 ± 0,37 *	7,06 ± 0,49 *
Асимметрия сложности формы, % / Complexity asymmetry shape, %	3,84 ± 0,27	4,10 ± 0,34	6,35 ± 0,42 *
Компьютерная цветометрия / Computer colorimetry			
Средняя интенсивность зеленого, усл.ед. / Moderate intensity green, c. u.	9,15 ± 0,71	8,43 ± 0,60	7,55 ± 0,58 *
Асимметрия интенсивности зеленого, % / Asymmetry intensity green, %	4,61 ± 0,28	5,26 ± 0,30 *	6,94 ± 0,45 *
Продольный градиент интенсивности зеленого, % / Longitudinal gradient intensity green, %	9,33 ± 0,68	12,50 ± 0,86 *	14,24 ± 1,03 *
Поперечный градиент интенсивности зеленого, % / Transverse gradient intensity green, %	3,75 ± 0,24	4,12 ± 0,29	4,69 ± 0,35 *

* – здесь и в таблице 2: достоверные различия со значениями в группе с низкой степенью антропогенной нагрузки

В противовес этому асимметрия интенсивности зеленого была достоверно выше уже на участке с умеренной степенью антропогенной нагрузки, а на фоне высокой

нагрузки оказывалась для *P. nigra* и *E. Angustifolia* в 1,51 и 1,81 раза в сравнении с величинами показателя при низкой степени антропогенной нагрузки, соответственно.

Таблица 2 – Результаты анализа морфологии листовой пластинки *Elaeagnus angustifolia* в аридной зоне на участках с различной степенью антропогенной нагрузки ($M \pm m$)

Table 2 – Results of morphological analysis of *Elaeagnus angustifolia* leaf blade in the arid zone in areas with different degrees of anthropogenic load ($M \pm m$)

Показатель Indicator	Степень антропогенной нагрузки Rate of anthropogenic load		
	Низкая / Low	Умеренная / Average	Высокая / High
Компьютерная морфометрия / Computer morfometry			
Средняя площадь листовой пластинки, мм ² / Moderate area of leaf blade, mm ²	10,6 ± 0,72	11,3 ± 0,78	11,8 ± 0,90
Асимметрия площади листовой пластинки, % / Asymmetry leaf area, %	2,79 ± 0,193	3,22 ± 0,247	4,05 ± 0,298 *
Показатель флуктуирующей асимметрии, % / Index fluctuating asymmetry, %	2,69 ± 0,22	3,29 ± 0,26 *	4,98 ± 0,38 *
Асимметрия сложности формы, % / Complexity asymmetry shape, %	3,47 ± 0,25	3,77 ± 0,29	4,80 ± 0,39 *
Компьютерная цветометрия / Computer colorimetry			
Средняя интенсивность зеленого, усл.ед. / Moderate intensity green, c. u.	7,08 ± 0,49	6,89 ± 0,44	6,33 ± 0,39
Асимметрия интенсивности зеленого, % / Asym- metry intensity green, %	2,75 ± 0,19	3,40 ± 0,28 *	4,98 ± 0,38 *
Продольный градиент интенсивности зеленого, % / Longitudinal gradient intensity green, %	6,80 ± 0,47	8,94 ± 0,55 *	9,36 ± 0,713 *
Поперечный градиент интенсивности зеленого, % / Transverse gradient intensitygreen, %	2,53 ± 0,17	3,02 ± 0,22	3,46 ± 0,28 *

Продольный и поперечный градиенты интенсивности зеленого также достаточно заметно реагировали на антропогенные загрязнения, их значения различались при сравнении участков в 1,25-1,55 раза.

При сопоставлении амплитуды реакции на высокое антропогенное воздействие исследованных показателей было установлено, что наиболее чувствительными для *P. nigra* оказались такие показатели, как асимметрия сложности формы и продольный градиент интенсивности зеленого, а для *E. Angustifolia* – показатель ФА и продольный градиент интенсивности зеленого (рисунок 2).

С учетом простоты определения последний показатель может быть с успехом внедрен в практическую деятельность в комплексе методов для оценки степени антропогенной нагрузки на территорию.

Как известно, листья являются основным органом фотосинтеза и предназначены для максимального захвата солнечного света и минимальной потери воды. Правильная морфология листьев имеет важное значение для перехвата света, скорости транспирации, фиксации углерода, фотосинтеза и запрограммирована с помощью различных генетических путей. И в итоге детерминирует развитие трех полярностей: адаксиально-абаксиальной, проксимально-дистальной (продольной) и медиально-латеральной (поперечной) [16, 19].

Органогенез листа инициируется в апикальной меристеме из группы делящихся, недифференцированных меристематических клеток. По мере их деления дочерние клетки достигают периферической зоны меристемы и вступают в детерминированный

рост. На конечный размер листа решающее влияние оказывает характер и продолжительность пролиферации меристематических клеток. В последующем существенное значение на форму и размеры листовой пластинки, а также на структуру ее края влияют постмитотические процессы увеличения клеток в размерах. Этот процесс чутко реагирует на внешние воздействия, в том числе на антропогенные токсиканты, что отражается на показателях в измеряемых признаках морфологии листовой пластинки [10, 15].

Рисунок 2 – Амплитуда реакции на высокое антропогенное воздействие в условиях аридной зоны по показателям анализа листовых пластинок *P. nigra* и *E. Angustifolia*

Figure 2 – The amplitude of the response to high anthropogenic impact in the arid zone according to the indicators of the analysis of leaf blades of *P. nigra* and *E. Angustifolia*

Выводы. В результате проведенных исследований оценки качества среды по асимметрии листьев черного тополя *P. nigra* и узколистого лоха *E. angustifolia* на трех участках в аридной зоне Волгоградской области, отличающихся уровнем антропогенного воздействия, можно сделать следующие выводы.

Высокая степень антропогенной нагрузки может быть выявлена по следующим изменениям листовой пластинки при компьютерной морфометрии: увеличению показателей ФА, асимметрии площади и сложности формы.

Показатели компьютерной цветометрии пригодны для оценки степени антропогенной нагрузки, при нарастании которой наблюдается уменьшение интенсивности зеленого, увеличение асимметрии, продольного и поперечного градиентов интенсивности зеленого.

Чувствительность *E. angustifolia* к загрязнению почвы и воздуха выше, чем у представителей *P. nigra*, что позволяет рекомендовать этот вид в качестве растения-биоиндикатора в условиях аридной зоны.

Библиографический список

1. Ашихмина Т. Я. Разработка методов биологического мониторинга техногенных территорий // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2013. № 1. С. 29-35.
2. Баранов С. Г., Зыков И. Е., Федорова Л. В. Изучение внутривидовой изменчивости липы мелколистной (*Titia cordata* Mill.) на основе билатеральной асимметрии листовых пластин // Вестник ТомГУ. Биология. 2012. № 2 (30). С. 134-145.
3. Зорина А. А. Методы статистического анализа флуктуирующей асимметрии // Принципы экологии. 2012. Т.1. № 3. С. 24-47.

4. К возможностям оценки функциональной активности листовых пластинок древесных растений / Л. М. Кавеленова [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 3-7. С. 2333-2336.
5. Кузнецова А. С., Сотникова Е. В. Биоиндикационные показатели стабильности развития листовой пластинки *Populus Tremula* в условиях воздействия транспортных потоков // Вестник РУДН, серия Экология и безопасность жизнедеятельности. 2016. № 3. С. 45-52.
6. Кулик К. Н., Пугачева А. М. Структура растительных сообществ залежных земель в системе куртинных защитных лесных насаждений в сухих степях // Аридные экосистемы. 2016. Т. 22. № 1(66). С. 77-85.
7. Кусова Н. Х., Макиев А. Д., Оказова З. П. Биомониторинг как способ контроля качества окружающей среды // В мире научных открытий. 2012. № 9. С. 167-174.
8. Ляшенко О. А. Биоиндикация и биотестирование в охране окружающей среды. СПб.: СПб ГТУРП, 2012. 67 с.
9. Низкий С. Е., Сергеева А. А. Флуктуирующая асимметрия листьев березы плосколистной (*Betula platyphylla* Sukacz.) как критерий качества окружающей среды // Вестник КрасГАУ. 2015. № 7. С. 14-17.
10. Протасова М. В., Проценко Е. П., Петрова И. В. Использование методов биоиндикации при исследовании экологического состояния городской среды // Экология. 2019. № 3. С. 136-140.
11. Собчак Р. О., Афанасьева Т. Г., Копылов М. А. Оценка экологического состояния рекреационных зон методом флуктуирующей асимметрии листьев *Betula pendula* Roth // Вестник ТомГУ. 2013. № 368. С. 195-199.
12. Турмухаметова Н. В. Использование морфометрических и фенологических показателей *Tilia cordata* Mill. для целей биоиндикации // Самарский научный вестник. 2019. Т. 8. № 4. С. 93-97.
13. Черных Е. П., Первышина Г. Г., Гоголева О. В. Экологическая оценка влияния автотранспорта на флуктуирующую асимметрию листьев черемухи обыкновенной // Вестник КрасГАУ. 2013. № 12. С. 137-141.
14. Якушевская Е. Б., Якимов Е. П. Растения – индикаторы состояния городской среды // Ученые записки Забайкальского государственного университета. Серия: Биологические науки. 2013. № 1. С. 116-121.
15. Du F., Guan C., Jiao Y. Molecular mechanisms of leaf morphogenesis // Mol. Plant. 2018. Vol. 11. P. 1117-1134.
16. Eigentler L., Sherratt J. A. An integrodifference model for vegetation patterns in semi-arid environments with seasonality // J. Math. Biol. 2020. Vol. 81. № 3. P. 875-904.
17. Influence of life form, taxonomy, climate, and soil properties on shoot and root concentrations of 11 elements in herbaceous plants in a temperate desert / M. He, F. A. Dijkstra, K. Zhang [et al.] // Plant and Soil. 2016. Vol. 398. № 102. P. 339-350.
18. Ivantsova E., Krylov P., Novochadov V. Components of anthropogenically transformed landscapes of South of Russia interaction // Adv. Eng. Res. 2020. Vol. 191. P. 80-83.
19. Kierzkowski D., Runions A., Vuolo F. A growth-based framework for leaf shape development and diversity // Cell. 2019. Vol. 177. P. 1405-1418.
20. Pugacheva A. M. Climatic fluctuation in dry steppes and their role in the demutation process // J. Arid Ecosystems. 2020. Vol. 10. Iss. 3. P. 181-187.

Conclusions. As a result of the conducted studies of the assessment of the environmental quality by the asymmetry of the leaves of the black poplar *P. nigra* and the narrow-leaved larch *E. angustifolia* at three sites in the arid zone of the Volgograd region, which differ in the level of anthropogenic impact, the following conclusions can be drawn. A high degree of anthropogenic load can be detected by the following changes in the leaf blade during computer morphometry: an increase in FA indicators, an asymmetry of the area and the complexity of the shape. Indicators of computer colorimetry are suitable for assessing the degree of anthropogenic load, with the increase of which there is a decrease in the intensity of green, an

increase in the asymmetry, the longitudinal and transverse gradients of the intensity of green. The sensitivity of *E. angustifolia* to soil and air pollution is higher than that of *P. nigra*, which makes it possible to recommend this species as a bioindicator plant in the arid zone.

References

1. Ashihmina T. Ya. Razrabotka metodov biologicheskogo monitoringa tehnogennyh territorij // Ispol'zovanie i ohrana prirodnih resursov v Rossii. 2013. № 1. P. 29-35.
2. Baranov S. G., Zykov I. E., Fedorova L. V. Izuchenie vnutrividovoj izmenchivosti lipy melkolistnoj (*Titia cordata* Mill.) na osnove bilateral'noj asimmetrii listovyh plastin // Vestnik TomGU. Biologiya. 2012. № 2 (30). P. 134-145.
3. Zorina A. A. Metody statisticheskogo analiza fluktuiruyushej asimmetrii // Principy jkologii. 2012. T. 1. № 3. P. 24-47.
4. K vozmozhnostyam ocenki funkcional'noj aktivnosti listovyh plastinok drevesnyh rastenij / L. M. Kavelenova [i dr.] // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. 2013. T. 15. № 3-7. P. 2333-2336.
5. Kuznecova A. S., Sotnikova E. V. Bioindikacionnye pokazateli stabil'nosti razvitiya listovoj plastinki *Populus Tremula* v usloviyah vozdejstviya transportnyh potokov // Vestnik RUDN, seriya jkologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. 2016. № 3. P. 45-52.
6. Kulik K. N., Pugacheva A. M. Struktura rastitel'nyh soobshchestv zaleznyh zemel' v sisteme kurtinnyh zaschitnyh lesnyh nasazhdenij v suhih stepyah // Aridnye jkosistemy. 2016. T. 22. № 1(66). P. 77-85.
7. Kusova N. H., Makiev A. D., Okazova Z. P. Biomonitoring kak sposob kontrolya kachestva okruzhayushej sredy // V mire nauchnyh otkrytij. 2012. № 9. P. 167-174.
8. Lyashenko O. A. Bioindikaciya i biotestirovanie v ohrane okruzhayushej sredy. SPb.: SPb GTURP, 2012. 67 p.
9. Nizkij S. E., Sergeeva A. A. Fluktuiruyuschaya asimmetriya list'ev berezy ploskolistnoj (*Vetula platyphylla* Sukacz.) kak kriterij kachestva okruzhayushej sredy // Vestnik KrasGAU. 2015. № 7. P. 14-17.
10. Protasova M. V., Prochenko E. P., Petrova I. V. Ispol'zovanie metodov bioindikacii pri issledovanii jekologicheskogo sostoyaniya gorodskoj sredy // Jekologiya. 2019. № 3. P. 136-140.
11. Sobchak R. O., Afanas'eva T. G., Kopylov M. A. Ocenka jekologicheskogo sostoyaniya rekreacionnyh zon metodom fluktuiruyushej asimmetrii list'ev *Betula pendula* Roth // Vestnik TomGU. 2013. № 368. P. 195-199.
12. Turmuhametova N. V. Ispol'zovanie morfometricheskikh i fenologicheskikh pokazatelej *Tilia cordata* Mill. dlya celej bioindikacii // Samarskij nauchnyj vestnik. 2019. T. 8. № 4. P. 93-97.
13. Chernyh E. P., Pervyshina G. G., Gogoleva O. V. Jekologicheskaya ocenka vliyaniya avtotransporta na fluktuiruyuschuyu asimmetriyu list'ev cheremuhi obyknovennoj // Vestnik KrasGAU. 2013. № 12. P. 137-141.
14. Yakushevskaya E. B., Yakimova E. P. Rasteniya - indikatory sostoyaniya gorodskoj sredy // Uchenye zapiski Zabajkal'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Biologicheskie nauki. 2013. № 1. P. 116-121.
15. Du F., Guan C., Jiao Y. Molecular mechanisms of leaf morphogenesis // Mol. Plant. 2018. Vol. 11. P. 1117-1134.
16. Eigentler L., Sherratt J. A. An integrodifference model for vegetation patterns in semi-arid environments with seasonality // J. Math. Biol. 2020. Vol. 81. № 3. P. 875-904.
17. Influence of life form, taxonomy, climate, and soil properties on shoot and root concentrations of 11 elements in herbaceous plants in a temperate desert / M. He, F. A. Dijkstra, K. Zhang [et al.] // Plant and Soil. 2016. Vol. 398. № 102. P. 339-350.
18. Ivantsova E., Krylov P., Novochadov V. Components of anthropogenically transformed landscapes of South of Russia interaction // Adv. Eng. Res. 2020. Vol. 191. P. 80-83.
19. Kierzkowski D., Runions A., Vuolo F. A growth-based framework for leaf shape development and diversity // Cell. 2019. Vol. 177. P. 1405-1418.

20. Pugacheva A. M. Climatic fluctuation in dry steppes and their role in the demutation process // J. Arid Ecosystems. 2020. Vol. 10. Iss. 3. P. 181-187.

Author's Information

Kulik Konstantin Nikolaevich, Federal Research Centre of agroecology, amelioration and protective afforestation of Russian Academy of Sciences (Russia, 400062, Volgograd, Universitetsky av., 97) Academician of the Russian academy of sciences, doctor of agricultural sciences, professor. Phone 8 (8442) 46-25-67, e-mail: kulikn@yandex.ru

Isakov Arteom Sergeevich, Federal Research Centre of agroecology, amelioration and protective afforestation of Russian Academy of Sciences (Russia, 400062, Volgograd, Universitetsky av., 97), Phone 8 (8442) 46-25-67, isakov-a@vfanc.ru

Novochadov Valery Valerjevich, professor of Department of Bioengineering and Bioinformatics, Volgograd State University (Russia, 400062, Volgograd, Universitetsky av., 100), doctor of medical sciences, professor. Phone 8 (8442) 46-08-06, e-mail: novochadov.valeriy@volsu.ru

Информация об авторах

Кулик Константин Николаевич, главный научный сотрудник ФНЦ агроэкологии РАН (РФ, 400062, г. Волгоград, пр-т Университетский, 97), академик РАН, доктор сельскохозяйственных наук, профессор. Тел. 8 (8442) 46-25-67, e-mail: kulikn@yandex.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-7124-8116>.

Исаков Артем Сергеевич, аспирант, младший научный сотрудник ФНЦ агроэкологии РАН (РФ, 400062, г. Волгоград, пр-т Университетский, 97) Тел. 8 (8442) 46-25-67, E-mail: isakov-a@vfanc.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-8922-2042>.

Новочадов Валерий Валерьевич, профессор кафедры биоинженерии и биоинформатики Волгоградского государственного университета Минобрнауки (РФ, 400062, г. Волгоград, пр-т Университетский, 100), доктор медицинских наук, профессор. Тел. 8 (8442) 46-08-06, e-mail: novochadov.valeriy@volsu.ru, **ORCID** <https://orcid.org/0000-0001-6317-7418>.