



УДК 504.05:581.151(470.324)
DOI 10.18413/2712-7443-2020-44-4-432-445

Экодиагностика урбанизированной среды по морфометрическим показателям листовых пластинок *Betula pendula* Roth.

Клевцова М.А., Михеев А.А.

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

Аннотация. Оценка состояния окружающей среды г. Воронежа основана на сравнении ответной реакции организма в разных точках отбора с целью выявления возможных отклонений от нормы. Величина флуктуирующей асимметрии листовых пластинок видов-индикаторов является наиболее доступным методом биоиндикации. Произведен расчет интегрального показателя I_{FA} по методике В.М. Захарова. Определены морфометрические параметры листовых пластинок березы повислой (*Betula pendula* Roth.) – длина и ширина. Установлено укорочение листьев по сравнению с контролем. Выявлена положительная корреляционная связь между длиной и шириной листовой пластинки. Величина интегрального показателя флуктуирующей асимметрии билатеральных структур в большинстве точек выше, чем на фоновом участке. Следовательно, выявленные закономерности свидетельствуют о наличии стрессовых факторов среды на урбанизированных территориях. Наибольшие отклонения от нормы, изучаемых параметров, отмечены в промышленно-транспортных зонах, что коррелирует с данными официальных служб в области мониторинга окружающей среды.

Ключевые слова: биоиндикация, береза повислая, флуктуирующая асимметрия, техногенная нагрузка, загрязнение окружающей среды.

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

Для цитирования: 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

The ecodiagnosics of the urbanized environment by morphometric indicators of the leaves *Betula pendula* Roth.

Marina A. Klevtsova, Alexey A. Mikheev

Voronezh State University,
1 Universitetskaya Pl., Voronezh, 394018, Russia
E-mail: klevtsova@geogr.vsu.ru

Abstract. Ecological diagnostics of the state of the environment in Voronezh city was carried out. Morphometric parameters of *Betula pendula* Roth leaves were determined. A method for evaluating fluctuating asymmetry is used in this article. This method is based on identifying deviations in the development of an organism under the influence of a complex of environmental factors of the environment. On the basis of five features, the integral index of leaf asymmetry was calculated. The results of the study show that in the studied territory of Voronezh city, the level of fluctuating asymmetry of *Betula pendula* Roth. leaves exceed the reference value. At the same time, in 44 % of points this corresponds to V point and is characterized as a critical state of the environment. The work also established a correlation between the length and width of the sheet. A decrease in the length of the leaf blades is observed in comparison with the control.

Keywords: bioindication, *Betula pendula* Roth., fluctuating asymmetry, technogenic load, environmental pollution.

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. 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

Введение

Зеленые насаждения играют важную роль в оздоровлении городской среды. Помимо создания оптимальных микроклиматических параметров, они выполняют санитарно-гигиенические функции. В частности, газофилтующая и пылеулавливающая способность различных видов древесных растений используется для уменьшения уровня загрязнения воздушной среды. Данная особенность растений объясняется тем, что часть поступающих в них газов ассимилируется в листовых пластинках. Кроме того, листья и ветви способны задерживать и осаждать пыль. При этом различия в пыле- и газоулавливающей способности объясняются биологическими особенностями самих растений. Однако не существует абсолютно стойких к воздействию неблагоприятных факторов среды видов. Кроме того, имеются и внутривидовые различия в стойкости (так называемая «индивидуальная стойкость») [Влияние загрязнений ..., 1981]. При этом отдельные экземпляры могут быть более устойчивыми к действию стрессоров, другие повреждаются в большей степени.

В настоящее время для определения содержания загрязняющих веществ в воздухе используют различные приборы с высокой степенью точности. Однако перечень определяемых компонентов обычно довольно ограничен. При этом в воздухе урбанизированных территорий содержатся сотни примесей, а их синергетический эффект можно зафиксировать обычно только по ответной реакции биоты. В частности, доказано, что именно растительные организмы в силу своего активного газообмена являются наиболее чувствительными индикаторами состояния окружающей среды, поэтому использование методов биоиндикации позволяет получить более полную картину о сложившейся экологической ситуации на той или иной территории.

Для оценки состояния окружающей среды довольно часто применяют показатель флуктуирующей асимметрии листовых пластинок. Он позволяет судить о стабильности развития организма в данных экологических условиях. Известно, что на появление асимметрии у билатеральных структур влияют две группы факторов: генетические (мутация, гибридизация, инбридинг) и экологические [Graham et al., 2010].

Анализ литературных источников показал, что проблема диагностики изменений у древесных растений под влиянием стрессовых факторов среды широко изучается. В ряде исследований в качестве вида-индикатора выступает береза повислая (*Betula pendula* Roth.). Так, биоиндикационная оценка качества среды рассматривается для следующих городов России: Барнаула [Ерещенко, Хлебова, 2013; Рунова, Гнаткович, 2013], Новочеркасска [Филиппов и др., 2014], Казани [Минакова и др., 2015a], Нижнекамска [Минакова и др., 2015b], Омска [Курило, Григорьев, 2015], Курска [Белякова, Тулупова, 2016], Владимира [Баранов, 2016], Уфы [Кулагин, Тагирова, 2017], Рязани [Уливатова, Федосова, 2019], Нижнего Новгорода [Erofeeva, Yakimov, 2020], Новотроицка [Бачурина, Куликова, 2019], Братска, Ачинска, Наро-Фоминска, Йошкар-Олы, Красноярска, Якутска [Shadrina et al., 2020], Москвы [Zakharov et al., 2020] и других. Для г. Воронежа данная проблематика



затрагивается в статьях [Калаев и др., 2011; Виноградов, 2014; Vostrikova et al., 2019], а также в наших работах в период с 2015 г. по настоящее время [Клевцова, Михеев, 2019].

Калаевым В.Н. с коллегами в 2011 г. [Калаев и др., 2011] проведены исследования флуктуирующей асимметрии березы повислой в пяти районах г. Воронежа в сравнении с данными контрольной точки (биостанция «Веневитиново»). Было выявлено, что наиболее загрязненными территориями являются Советский и Левобережный районы, среднезагрязненными – Центральный и Коминтерновский, а наименее загрязненным – Ленинский. В целом в г. Воронеже состояние среды ученые оценивали на момент исследования как среднезагрязненное. Однако в данной работе не обследован Железнодорожный район г. Воронежа, являющийся самым большим по площади в городе.

В 2019 г. [Vostrikova et al., 2019] группой ученых проведено изучение влияния разных условий окружающей среды на показатель флуктуирующей асимметрии и содержание общего белка в семенах березы повислой на территории Центрального Черноземья. Высокий уровень асимметрии был выявлен на загрязненных территориях по сравнению с контролем. Данные представлены только в целом по Воронежской области, а по г. Воронеж отсутствуют.

Некоторые зарубежные ученые также изучают состояние окружающей среды на основе анализа ответной реакции *Betula pendula* Roth. [Black-Samuelsson, Andersson, 2003; Franiel, 2008]. В последние годы в данной области опубликованы и современные теоретические материалы [Graham et al., 2010; Scheiner, 2014; Klingenberg, 2016; Kozlov, 2017; Tusić et al., 2018]. Среди них выделяются работы [Graham et al., 2010; Graham et al., 2015], в которых подробно освещены различные методы определения флуктуирующей асимметрии.

Таким образом, учитывая как теоретические, так и практические материалы, нами была поставлена цель, которая заключалась в сравнительном анализе ряда морфометрических параметров, в частности длины, ширины, флуктуирующей асимметрии листовых пластинок вида-индикатора (*Betula pendula* Roth.), произрастающего в городских условиях с разным уровнем техногенной нагрузки.

Актуальность настоящих исследований объясняется необходимостью регулярных наблюдений за экологическим состоянием зеленых насаждений как неотъемлемого компонента урбоэкосистем. На территории г. Воронежа расположено пять стационарных постов мониторинга за состоянием атмосферного воздуха, что не позволяет получать полную картину о современной экологической ситуации. Кроме того, используя только инструментальные методы, невозможно оценить комплексное влияние негативных факторов среды на живые организмы, в связи с чем биоиндикационные исследования являются дополнительным блоком в системе экологического мониторинга окружающей среды.

Объекты и методы исследования

В наших исследованиях в качестве объекта служили зеленые насаждения, произрастающие в разных функциональных зонах г. Воронежа. В течение летнего периода 2020 г. проведено обследование 34 точек. Из них девять – это места расположения стационарных и передвижных постов наблюдений официальных служб в сфере мониторинга (Воронежского 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 Воронежской области»). По функциональной принадлежности все точки можно условно разделить на зоны: транспортная (12 точек), промышленная (9), жилая (8), рекреационная (5).

Выбор древесной породы предполагает обязательное выполнение следующих условий: высокая степень встречаемости на территории; относительная быстрота исследований; репрезентативность результатов; наличие корреляционной связи между ответной

реакцией организма и интенсивностью действующих факторов среды. В связи с этим в качестве вида-индикатора выступала береза повислая (*Betula pendula* Roth.). Это аборигенный вид, быстрорастущий, морозоустойчивый. В засушливые годы на территории Воронежской области испытывает дефицит влаги, вследствие чего наблюдается усыхание отдельных ветвей и даже экземпляров. Подобное явление было зафиксировано в 2010 г., когда аномально жаркая погода и отсутствие осадков более 30 дней привело к ослаблению отдельных особей и их последующей гибели. В настоящее время данный вид остается одним из широко представленных в природном комплексе города как в естественных насаждениях, так и искусственно созданных.

Важной особенностью является то, что береза плохо переносит глубокую обрезку. Если удалить вершину, то меньше чем через 10 лет дерево погибнет, т.е. существенно сокращается продолжительность жизни. Это явление объясняется структурой коры. Поэтому борьба с суховершинностью у березы данным способом затруднена.

Кроме того, корневая система проникает в почву неглубоко, несмотря на то что хорошо развита. Это также сказывается на процессах жизнедеятельности, в частности, на водном обмене. В условиях повышенного переуплотнения почвы и дефицита влаги в городской среде наблюдается ухудшение процессов водного обмена.

Еще одним фактором, оказывающим сильное стрессовое воздействие, является присутствие в среде загрязняющих веществ, проникновение которых в растения происходит через надземные и подземные органы, что приводит к морфологическим, физиологическим, биохимическим и другим изменениям.

Воронеж является городом-миллионером с развитой инфраструктурой и промышленным комплексом. Наблюдающаяся в XXI в. тенденция к росту автомобильного транспорта привела к возросшей загруженности дорожной сети. В частности, на таких магистральных улицах, как Московский пр-т, ул. Антонова-Овсеенко, ул. Плехановская, ул. Кольцовская, Ленинский пр-т практически ежедневно на определенных участках наблюдаются заторы, а, следовательно, формируются зоны повышенной загазованности. Более 80 % от валового выброса в атмосферный воздух в последние годы приходится именно на автотранспорт.

Еще одним существенным источником загрязнения среды г. Воронежа остаются промышленные предприятия, среди которых наибольшую техногенную нагрузку оказывают следующие: филиал ПАО «Квадра» – «Воронежская генерация», ПАО «ВАСО», ОАО «Воронежсинтезкаучук», ЗАО «Воронежский шинный завод», Акционерное общество «Конструкторское бюро химавтоматики» (АО КБХА), АО «Воронежстальмост», ООО УК «Рудгормаш» и другие.

Таким образом, в наших исследованиях был сделан акцент на изучение промышленно-транспортных зон в сравнении с жилыми и рекреационными. В качестве фонового участка была выбрана территория санатория им. Горького.

Сбор растительного материала проводили в период с 10 по 31 июля 2020 г. Именно в этот период уже заканчиваются ростовые процессы. С каждой точки отбирали случайным образом по 150 листьев с укороченных побегов с высоты 1,5–2,0 м равномерно по четырем сторонам света (не менее чем с пяти деревьев примерно одного возраста). Обязательное условие – использование листьев без видимых повреждений. Все образцы гербаризировались и хранились в специальных конвертах. У каждой листовой пластинки затем измеряли следующие морфометрические параметры: 1 признак – ширина половинки листа; 2 признак – длина второй жилки от основания листа; 3 признак – расстояние между основаниями первой и второй жилок; 4 признак – расстояние между концами этих жилок; 5 признак – угол между главной жилкой и второй от основания жилкой. Точность данных составляла до 0,5 мм (трехкратное измерение показало ошибку менее 1 % от величины



флуктуирующей асимметрии, что вполне допустимо для данной методики [Palmer, Strobeck, 2003]). Общее количество обследованных деревьев составило более 500.

В основу научной работы положены методические рекомендации, разработанные Захаровым В.М. с коллегами [Здоровье среды ..., 2000].

Расчет интегрального показателя флуктуирующей асимметрии проводили с использованием алгоритма нормированной разности:

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

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 *Betula pendula* Roth. [Методические рекомендации..., 2003]
 Scale for assessing the state of the environment by the value of the integral indicator of the stability of the development of leaves *Betula pendula* Roth.

Балл	Интегральный показатель флуктуирующей асимметрии	Степень отклонения от нормы
I	< 0,040	Условная норма
II	0,040–0,044	Начальное отклонение от нормы
III	0,045–0,049	Средний уровень отклонений от нормы
IV	0,050–0,054	Существенные (значительные) отклонения от нормы
V	> 0,054	Критическое состояние

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

Построение тематических карт осуществляли в программной среде ГИС MapInfo Professional. Карты представляют собой поверхность, созданную путем пространственной интерполяции, с наложенными на нее изолиниями.

Результаты и их обсуждение

Линейные размеры листовых пластинок березы повислой на территории г. Воронежа варьируют в следующих пределах: длина – от 36 до 92 мм, ширина – от 21 до 77 мм. Резко отличающихся значений (артефактов) не обнаружено. Проверка данных на соответствие закону нормального распределения (распределения Гауса-Лапласа) показала малую или среднюю степень варьирования (V не превышает 20 %). Точность данных высокая ($P_r < 5$ %).

Попытка установить корреляционную связь ($r \pm m_r$) [Практикум по информационным ..., 2008] между длиной и шириной листовой пластинки показала следующие результаты (табл. 2). Связь между параметрами достоверная положительная ($t_i > t_{\text{крит}}$). В 67 % точек связь сильная, в остальных – средняя.

Таблица 2
Table 2

Морфометрические параметры листовых пластинок березы повислой
The morphometric parameters of the leaves *Betula pendula* Roth.

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
2	ул. 9 Января, 49	62,84±1,18	5,90	9,4	52,68±1,22	6,09	11,6	0,80±0,02
3	ул. Л. Рябцевой, 51б	61,32±0,84	4,20	6,8	51,48±0,90	4,49	8,7	0,43±0,04
5	ул. Лебедева, 2	63,64±1,43	7,13	11,2	53,67±1,11	5,57	10,4	0,83±0,01
7	ул. Ростовская, 58/4	63,80±1,66	8,29	13,0	50,48±1,49	7,46	14,8	0,81±0,01
8	ул. 60-й Армии, 27	61,28±1,43	7,15	11,7	46,32±1,2	6,02	13,0	0,64±0,03
9	ул. Березовая Роща, 8а	66,64±1,43	7,13	10,7	57,56±1,46	7,28	12,6	0,62±0,03
10	пр-т Патриотов, 24	67,04±1,48	7,40	11,0	56,76±1,04	5,21	9,2	0,59±0,03
12	Московский пр-т, 36	55,80±1,45	7,24	13,0	43,80±0,99	4,95	11,3	0,85±0,01
15	ул. Дарвина, 1	68,72±1,60	8,02	11,7	55,72±1,35	6,75	12,1	0,75±0,02
17	перекресток улиц Плехановской и Кольцовской	66,28±1,51	7,55	11,4	46,92±1,30	6,49	13,8	0,73±0,02
18	Московский пр-т, 149	65,48±1,39	6,96	10,6	52,01±1,17	5,85	11,3	0,79±0,02
22	ул. Хользунова, 102	66,72±1,03	5,15	7,7	45,2±0,93	4,64	10,3	0,53±0,03
27	перекресток улиц 9 Января и Антонова-Овсенко	62,64±1,58	7,88	12,6	44,44±1,17	5,87	13,2	0,66±0,02
28	перекресток бульвара Победы и ул. 60-й Армии	69,80±1,48	7,39	10,6	60,56±1,13	5,67	9,4	0,87±0,01
29	пл. Генерала Черняховского	56,76±1,30	6,50	11,5	47,01±1,40	7,01	14,9	0,59±0,03
30	перекресток пр-та Труда и пер. Комбикормового	64,52±0,85	4,24	6,6	53,64±1,22	6,1	11,4	0,60±0,03
31	ул. Героев Стратосферы, 18б	55,96±1,01	5,05	9,0	43,88±0,71	3,55	8,1	0,85±0,01
36	ул. Циолковского, 27	55,96±1,10	5,52	9,9	45,24±0,99	4,97	11,0	0,85±0,01
39	ул. Старых Большевиков, 47	64,76±1,37	6,85	10,6	52,68±0,94	4,69	8,9	0,76±0,02
41	ул. Богдана Хмельницкого, 35	50,92±0,89	4,47	8,8	47,72±1,11	5,54	11,6	0,55±0,03
44	ул. Холмистая, 20	57,04±1,13	5,64	9,9	47,32±1,39	6,97	14,7	0,56±0,03
50	ул. 9 Января, 180	64,16±1,20	5,98	9,3	52,84±1,18	5,89	11,1	0,76±0,02
51	ул. Вл. Невского, 53	59,48±0,89	4,47	7,5	52,44±0,97	4,87	9,3	0,64±0,03
52	ул. Генерала Лизюкова, 73 а	57,08±1,10	5,51	9,6	48,12±0,83	4,13	8,6	0,69±0,02
53	ул. Шишкова, 53	66,56±2,17	10,84	16,3	47,44±1,69	8,46	17,8	0,69±0,02

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
54	ул. Володарского, 60	58,84±0,94	4,68	8,0	50,60±0,85	4,23	8,4	0,80±0,02
55	ул. Ломоносова, 114/4	58,12±0,98	4,90	8,4	50,28±0,69	3,45	6,9	0,37±0,04
58	ул. Нагорная, 65	52,72±1,35	6,76	12,8	40,12±0,88	4,39	10,9	0,43±0,04
60	ул. Циолковского, 127	57,92±0,72	3,62	6,2	43,48±0,69	3,43	7,9	0,59±0,03
61	санаторий им. Горького	63,88±1,04	5,20	8,1	44,4±0,89	4,43	10,0	0,31±0,04
62	СОК «Олимпик»	62,48±1,35	6,76	10,8	50,12±1,05	5,25	10,5	0,66±0,02
63	ботанический сад ВГУ	72,64±1,12	5,6	7,7	53,12±0,79	3,97	7,5	0,30±0,04
64	лесной массив вблизи п. Боровое	55,92±0,97	4,83	8,6	46,04±0,83	4,17	9,1	0,60±0,03
65	лесной массив вблизи п. Репное	57,64±1,14	5,71	9,9	50,40±0,95	4,76	9,4	0,75±0,02

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, $r \pm m_r$ – коэффициент корреляции длины и ширины листовой пластинки \pm ошибка коэффициента корреляции.

Для оценки разброса значений морфометрических параметров листовых пластинок были построены блочные диаграммы (так называемые «ящики с усами»). Нижняя сторона блока (ящика) соответствует первому квартилю (Q_1), верхняя сторона – третьему квартилю (Q_3). Высота блока равна интерквартильному размаху (IQR). Линия в центре блока – это медиана (второй квартиль – Q_2). Квартили – это процентиля, которые делят набор данных на четыре равные группы. «Усы» – начинаются с концов ящика и заканчиваются на самом минимальном или максимальном значениях данных. В качестве фоновых приняты среднеарифметические значения длины и ширины листовых пластинок точки № 61 (контроль). Исходя из представленных на диаграмме данных (рис. 1) можно сделать вывод о том, что длина листьев в 64 % точек меньше, чем на фоновом участке. А ширина листа (рис. 2), наоборот, больше в 85 % точек, чем у контрольных экземпляров. Следовательно, в целом наблюдается укорочение листовых пластинок, т.е. они имеют не вытянутую ромбовидную форму. Это свидетельствует о проявлении адаптационной меры при произрастании в неблагоприятных условиях урбанизированной среды.

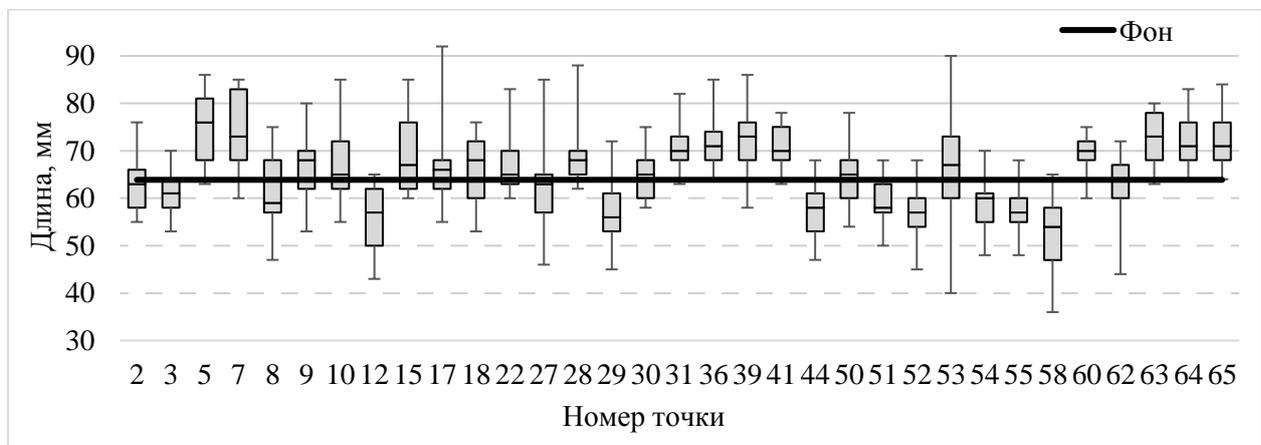


Рис. 1. Разброс значений длины листовых пластинок *Betula pendula* Roth.
Fig. 1. The spread of values of length of the leaves *Betula pendula* Roth.

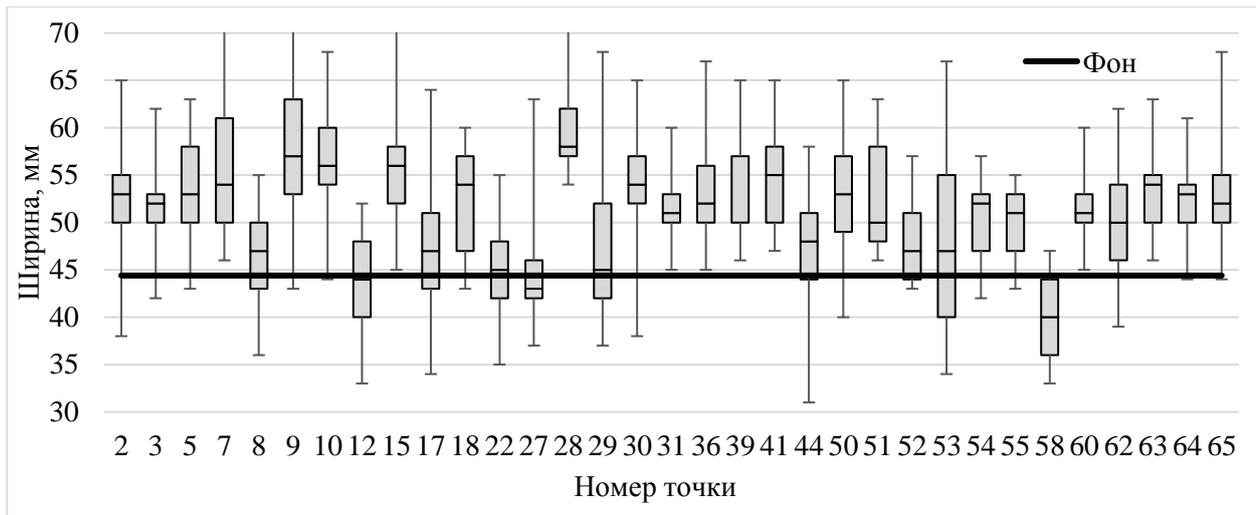


Рис. 2. Разброс значений ширины листовых пластинок *Betula pendula* Roth.

Fig. 2. The spread of values of width of the leaves of *Betula pendula* Roth.

Анализ флуктуирующей асимметрии листовых пластинок *Betula pendula* Roth. показал, что величина интегрального показателя стабильности развития у вида-индикатора на исследуемой территории г. Воронежа варьировала в пределах от 0,041 до 0,068. На фоновом участке I_{FA} составил 0,043. Только в двух точках данный параметр (№ 53 и № 64) несколько ниже, чем в контрольной (рис. 3).

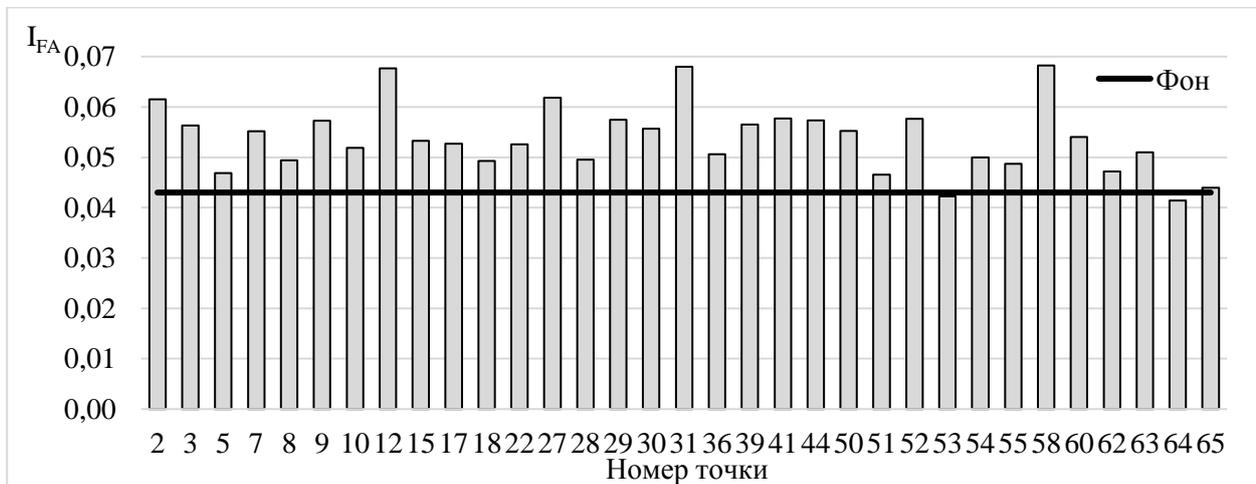


Рис. 3. Интегральное значение показателя флуктуирующей асимметрии листовых пластинок

Fig. 3. The integral value of the index of fluctuating asymmetry of the leaves of *Betula pendula* Roth.

Распределение значений флуктуирующей асимметрии можно описать уравнением полиномиальной кривой 5-й степени (рис. 4). Полученная модель является адекватной (критерий аппроксимации $R^2 = 0,99$). Данные характеризуются положительной асимметрией ($A_s = 1,01 \pm 0,083$; $t_{As} = 12,2$) и эксцессом ($E = 1,232 \pm 0,167$; $t_E = 7,37$).

Сравнение с данными наших исследований, проведенных в 2018 г. [Клевцова, Михеев, 2019] показало в целом увеличение интегрального показателя флуктуирующей асимметрии. Минимальные значения в 2020 г. зафиксированы по ул. Шишкова,

ул. Дарвина, ул. Ломоносова (как и в 2018 г.), ул. Вл. Невского, в районе СОК «Олимпик». Максимальные значения I_{FA} отмечены на ул. 9 Января (точка № 2), Московском пр-те (№ 12), на пересечении с ул. Антонова-Овсеенко (№ 27), в пос. Боровое (№ 64), пос. Репное (№ 65).

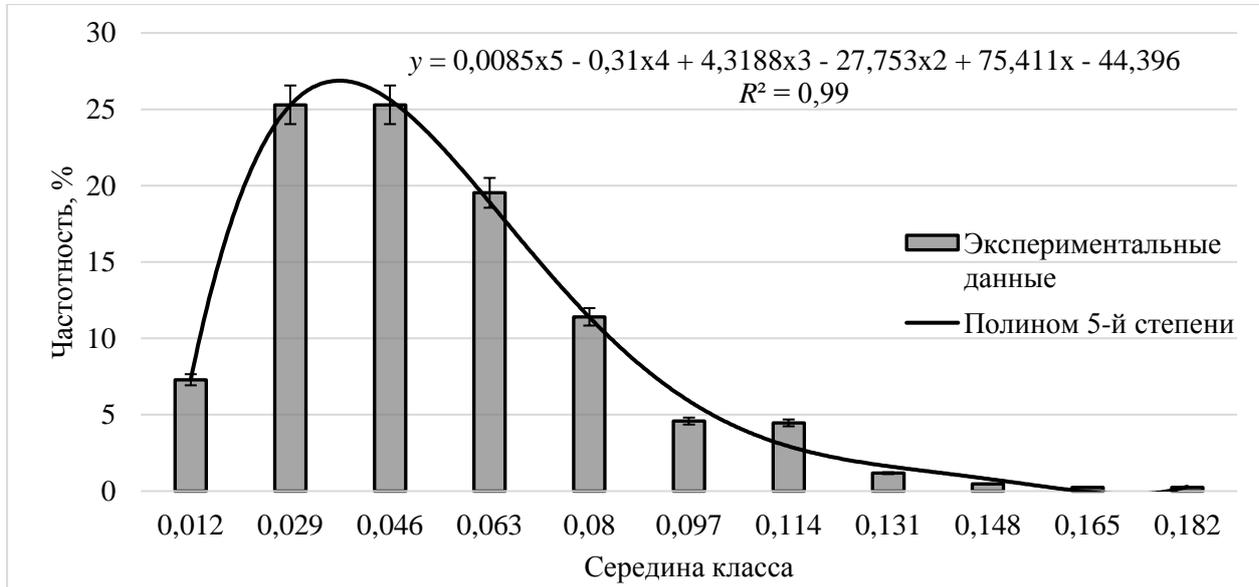


Рис. 4. Вариационный ряд величины флуктуирующей асимметрии листовых пластинок *Betula pendula* Roth.

Fig. 4. The variational series of the value of fluctuating asymmetry of the leaves of *Betula pendula* Roth.

Балльная оценка качества окружающей среды показала, что в большинстве точек интегральный показатель флуктуирующей асимметрии соответствует 4 или 5 баллу по шкале стабильности развития (значительное или критическое отклонение от нормы). Самые существенные изменения зафиксированы в точках № 12, № 31 и № 58. В целом наиболее высокие значения I_{FA} листовых пластинок отмечались в выборках листьев, отобранных в промышленно-транспортной зоне (рис. 5).

Согласно данным, представленным на рис. 5, можно отметить, что в левобережной части г. Воронежа стрессовые условия характерны для территорий, примыкающих к ОАО «Воронежсинтезкаучук» и ОАО ХК «Мебель Черноземья».

На правом берегу наиболее неблагоприятные условия зафиксированы в основном вдоль магистральных улиц с высокой интенсивностью движения (более 2500 автомобилей/час) – Московский пр-т и ул. 9 Января. Минимальные значения, соответствующие II баллам, отмечены в рекреационных и жилой зонах (например, в Северном микрорайоне и частном секторе по ул. Шишкова). Таким образом, наши данные в целом согласуются с результатами исследований П.М. Виноградова [Виноградов, 2014].

Следует отметить, что флуктуирующая асимметрия является ответной реакцией организма на влияние целого комплекса стрессовых факторов среды. Поэтому для установления причины нарушений стабильности развития древесных растений требуются дополнительные исследования.

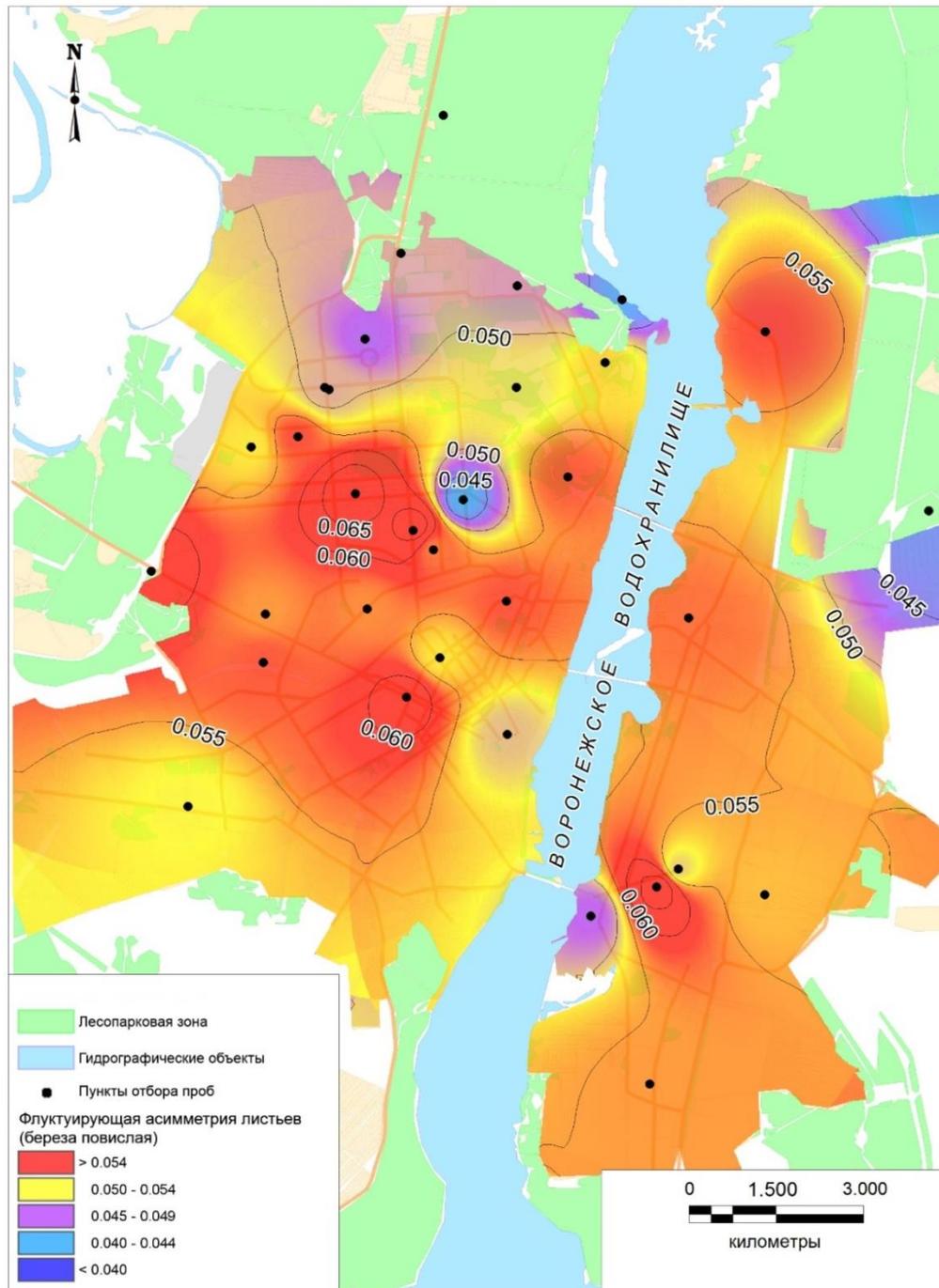


Рис. 5. Пространственное распределение показателя флуктуирующей асимметрии листовых пластинок березы повислой

Fig. 5. The spatial distribution of the fluctuating asymmetry index of the leaves of *Betula pendula* Roth.

Заключение

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

Во-первых, сравнительный анализ морфометрических параметров листовых пластинок березы повислой позволил выявить нарушения в стабильности развития древесных растений при произрастании в городских условиях.



Во-вторых, на исследуемой территории г. Воронежа наблюдается уменьшение длины листьев березы повислой и увеличение ширины по сравнению с контролем. Установлена достоверная корреляционная связь между данными морфометрическими параметрами.

В-третьих, сравнение интегрального значения флуктуирующей асимметрии показало, что только в двух точках (№ 53 и № 64) I_{FA} меньше фоновых (2 балла – начальное отклонение от нормы). В остальных местах отбора наблюдается превышение по сравнению с контролем. Наибольшие отклонения отмечены в промышленно-транспортных зонах (ул. 9 Января, 49; перекресток улиц 9 Января и Антонова-Овсеевского, ул. Г. Стратосферы, 18б; ул. Б. Хмельницкого, 35; Московский пр-т, 36 и др.).

В-четвертых, сравнение изучаемых параметров стабильности развития березы повислой с информацией официальных служб в области мониторинга окружающей среды показало общую тенденцию. Так, стрессовые условия среды для растений тяготеют к промышленно-транспортным зонам, где фиксируется наибольшее количество загрязняющих веществ в атмосферном воздухе. Однако, следует отметить, что на жизнедеятельность растительных организмов существенное влияние оказывают метеорологические и почвенные условия. Поэтому вариабельность показателя флуктуирующей асимметрии в разные годы (доказано при сравнении с предшествующими исследованиями) объясняется комплексным действием факторов урбанизированной среды.

Таким образом, результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что показатель флуктуирующей асимметрии является чувствительным биоиндикационным признаком для регистрации негативных реакций древесных растений под влиянием факторов урбанизированной среды.

Список источников

1. Влияние загрязнений воздуха на растительность: Причины. Воздействие. Ответные меры. 1981. М., Лесн. промышленность, 181 с.
2. Здоровье среды: методика оценки. Оценка состояния природных популяций по стабильности развития: методологическое руководство для заповедников. 2000. 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). МПР РФ. 2003. М., 24 с.
4. Куролап С.А., Нестеров Ю.А., Фетисов Ю.М. 2008. Практикум по информационным технологиям. Воронеж, Воронеж. гос. ун-т, 265 с.

Список литературы

1. Баранов С.Г. 2016. Феногенетический аспект листовых платин *Betula pendula* Roth. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки, 11 (232): 10–20.
2. Бачурина А.В., Куликова Е.А. 2019. Оценка качества среды на территории г. Новотроицка Оренбургской области по состоянию березы повислой. Леса России и хозяйство в них, 2 (69): 30–37.
3. Белякова О.И., Тулупова А.А. 2016. Оценка качества окружающей среды в разных районах города Курска методом флуктуирующей асимметрии листовых пластинок березы повислой и липы мелколистной. Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии, 2 (19): 68–74.
4. Виноградов П.М. 2014. Оценка качества среды обитания города Воронежа на основе анализа интегрального показателя стабильности развития березы повислой (*Betula pendula* Roth.) и тополя пирамидального (*Populus pyramidalis* Borkh.). Современные проблемы науки и образования, 6: 1678.

5. Ерещенко О.В., Хлебова Л.П. 2013. Изменение морфометрических параметров листовой пластинки березы повислой *Betula pendula* Roth. в условиях Барнаула. Известия Алтайского государственного университета, 3–2 (79): 26–30.
6. Калаев В.Н., Игнатова И.В., Третьякова В.В., Артюхов В.Г., Савко А.Д. 2011. Биоиндикация загрязнения районов г. Воронежа по величине флуктуирующей асимметрии листовой пластинки березы повислой. Вестник Воронежского государственного университета. Серия Химия. Биология. Фармация, 2: 168–175.
7. Клевцова М.А., Михеев А.А. 2019. Биоиндикационная оценка городских условий. Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. № 4: 76–82.
8. Кулагин А.Ю., Тагирова О.В. 2017. Специфичность экологических условий Уфимского промышленного центра и динамика формирования листьев *Betula pendula* Roth. Известия Уфимского научного центра РАН, 3–1: 94–98.
9. Курило Ю.А., Григорьев А.И. 2015. Изучение взаимосвязи между электрическим сопротивлением и флуктуирующей асимметрией листовой пластины березы повислой. Современные проблемы науки и образования, 1–1: 1794.
10. Минакова Е.А., Шлычков А.П., Шайхиев И.Г. 2015а. Оценка окружающей среды урбо-системы г. Казань с использованием метода биоиндикации: придорожные территории. Вестник Технологического университета, 18 (17): 225–229.
11. Минакова Е.А., Шлычков А.П., Шайхиев И.Г., Биктемирова Э.И. 2015б. Оценка качества городской среды промышленного города с использованием методов фитомониторинга (на примере г. Нижнекамск). Вестник Технологического университета, 18 (16): 283–286.
12. Рунова Е.М., Гнаткович П.С. 2013. Экологическая оценка рекреационных зон города Братска методом флуктуирующей асимметрии березы повислой. Фундаментальные исследования, 2 (11): 223–227.
13. Уливанова Г.В., Федосова О.А. 2019. Использование древесной растительности в комплексных агроэкологических исследованиях загрязнения воздушной среды. Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева, 1 (41): 69–78.
14. Филиппов Е.С., Иванисова Н.В., Куринская Л.В. 2014. О биоиндикации транспортно-селитебных ландшафтов методом флуктуирующей асимметрии. Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки, 6 (184): 68–72.
15. Black-Samuelsson S., Andersson S. 2003. The effect of nutrient stress on developmental instability in leaves of *Acer platanoides* (Aceraceae) and *Betula pendula* (Betulaceae). American Journal of Botany, 90 (8): 1107–1112.
16. Erofeeva E.A., Yakimov B.N. 2020. Change of leaf trait asymmetry type in *Tilia cordata* Mill. and *Betula pendula* Roth. under air pollution. Symmetry, 12 (5): 727.
17. Franiel I. 2008. Fluctuating asymmetry of *Betula pendula* Roth. leaves - an index of environment quality. Biodiversity Research and Conservation, 9/10: 7–10.
18. Graham J.H., Raz S., Hel-Or H., Nevo E. 2010. Fluctuating Asymmetry: Methods, Theory, and Applications. Symmetry, 2: 466–540.
19. Graham J.H., Whitesell M.J., Fleming II M., Hel-Or H., Nevo E., Raz S. 2015. Fluctuating Asymmetry of Plant Leaves: Batch Processing with LAMINA and Continuous Symmetry Measures. Symmetry, 7: 255–268.
20. Klingenberg C.P. 2016. Size, shape, and form: concepts of allometry in geometric morphometrics. Development genes and evolution, 226 (3): 113–137.
21. Kozlov M.V. 2017. Plant studies on fluctuating asymmetry in Russia: Mythology and methodology. Russian Journal of Ecology, 48 (1): 3–12.
22. Palmer A.R., Strobeck C.H. 2003. Fluctuating Asymmetry Analyses Revisited, Developmental Instab.: Causes and Consequences. Polak M, editor. Oxford University Press: 279–319.
23. Scheiner S.M. 2014. The genetics of phenotypic plasticity. XIII. Interactions with developmental instability. Ecology and evolution, 4 (8): 1347–1360.
24. Shadrina E., Turmukhametova N., Soldatova V., Vol'pert Y., Korotchenko I., Pervyshina G. 2020. Fluctuating Asymmetry in Morphological Characteristics of *Betula Pendula* Roth Leaf under Conditions of Urban Ecosystems: Evaluation of the Multi-Factor Negative Impact. Symmetry, 12 (8): 1317.



25. Tucić B., Budečević S., Manitašević Jovanović S.M., Vuleta A., Klingenberg C.P. 2018. Phenotypic plasticity in response to environmental heterogeneity contributes to fluctuating asymmetry in plants: first empirical evidence. *Journal of Evolutionary Biology*, 31 (2): 197–210.
26. Vostrikova T., Zemlyanukhina O., Kalaev V. 2019. Amount of Total Protein and fluctuating asymmetry of *Betula pendula* in Various Ecological Conditions. *Advances in Biological Sciences Research: 1st International Symposium Innovations in Life Sciences (ISILS 2019)*, 7: 357–360.
27. Zakharov V.M., Shadrina E.G., Turmukhametova N.V., Ivantsova E.N., Shikalova E.A., Soldatova V.Yu., Sharova N.A., Trofimov I.E. 2020. Assessment of plant status by stability of development in natural and anthropogenic conditions (fluctuating asymmetry of leaf characters of silver birch, *Betula pendula* Roth). *Biol. Bull.*, 47 (2): 186–190.

References

1. Baranov S.G. 2016. Phenogenetic aspect of asymmetry of leaf plate of *Betula pendula* Roth. *Belgorod State University Scientific Bulletin. Natural sciences*, 11 (232): 10–20. (in Russian)
2. Bachurina A.V., Kulikova E.A. 2019. Assessment of quality of the environment in the territory of the city of Novotroitsk of the Orenburg region as the condition of the *Betula pendula* Roth. *Lesa Rossii i hozjajstvo v nih*, 2 (69): 30–37. (in Russian)
3. Belyakova O.I., Tulupova A.A. 2016. Evaluation of environmental quality in different parts of the city of Kursk method of fluctuating asymmetry of sheet plates birch and basswood melkolistnoj. *Proceedings of the Southwest State University, Series: Engineering and Technologies*, 2 (19): 68–74. (in Russian)
4. Vinogradov P.M. 2014. The assessment of urban environment quality of Voronezh on the basis of analysis of *Betula pendula* Roth. and *populus pyramidalis* borkh. development stability parameter. *Modern problems of science and education*, 6: 1678. (in Russian)
5. Ereshenko O.V., Khlebova L.P. 2013. Changing the morphometric parameters of the leaf blade of birch *Betula pendula* Roth. in the Barnaul. *Izvestiya of Altai State University*, 3–2 (79): 26–30. (in Russian)
6. Kalaev V.N., Ignatova I.V., Tret'yakova V.V., Artyukhov V.G., Savko A.D. 2011. Bioindikatsiya zagryazneniya rayonov g. Voronezha po velichine fluktuiruyushchey asimmetrii listo-voy plastinki berezy povisloy [Bioindication of pollution in Voronezh districts by the value of fluctuating asymmetry of the leaf blade of the hanging birch]. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy*, 2: 168–175.
7. Klevtsova M.A., Mikheev A.A. 2019. The bioindication assessment of urban conditions. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology*, 4: 76–82. (in Russian)
8. Kulagin A.Yu., Tagirova O.V. 2017. Specificity of environmental conditions of Ufim industrial center and dynamics of formation of leaves *Betula pendula* Roth. *Proceedings of the RAS Ufa Scientific Centre*, 3–1: 94–98. (in Russian)
9. Kurilo Y.A., Grigoriev A.I. 2015. Study of the relationship between electrical resistance and fluctuating asymmetry a sheet of *betula pendula*. *Modern problems of science and education*, 1–1: 1794. (in Russian)
10. Minakova E.A., Shlychkov A.P., Shajhiev I.G. 2015. Ocenka okruzhajushhej sredy urbosistemy g. Kazan' s ispol'zovaniem metoda bioindikacii: pridorozhnye territorii [Environmental assessment of the urban system of Kazan using the bioindication method: roadside areas]. *Vestnik Tehnologicheskogo universiteta*, 18 (17): 225–229.
11. Minakova E.A., Shlychkov A.P., Shajhiev I.G., Biktemirova Je.I. 2015. Ocenka kachestva gorodskoj sredy promyshlennogo goroda s ispol'zovaniem metodov fitomonito-ringa (na primere g. Nizhnekamsk). *Vestnik Tehnologicheskogo universiteta*, 18 (16): 283–286.
12. Runova E.M., Gnatkovich P.S. 2013. Ecological estimation of recreational areas by city of bratsk fluctuating asymmetry silver birch. *Fundamental research*, 2 (11): 223–227. (in Russian)
13. Ulivanova G.V., Fedosova O.A. 2019. Use of wood vegetation in complex agro-ecological researches of air pollution. *Herald of Ryazan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostychev*, 1 (41): 69–78. (in Russian)

14. Filippov E.S., Ivanisova N.V., Kurinskaya L.V. 2014. On biological indication of transport-urban landscapes by fluctuating asymmetry method. *Bulletin of higher education institutes. North Caucasus Region. Natural sciences*, 6 (184): 68–72. (in Russian)
15. Black-Samuelsson S., Andersson S. 2003. The effect of nutrient stress on developmental instability in leaves of *Acer platanoides* (Aceraceae) and *Betula pendula* (Betulaceae). *American Journal of Botany*, 90 (8): 1107–1112.
16. Erofeeva E.A., Yakimov B.N. 2020. Change of leaf trait asymmetry type in *Tilia cordata* Mill. and *Betula pendula* Roth. under air pollution. *Symmetry*, 12 (5): 727.
17. Franiel I. 2008. Fluctuating asymmetry of *Betula pendula* Roth. leaves - an index of environment quality. *Biodiversity Research and Conservation*, 9/10: 7–10.
18. Graham J.H., Raz S., Hel-Or H., Nevo E. 2010. Fluctuating Asymmetry: Methods, Theory, and Applications. *Symmetry*, 2: 466–540.
19. Graham J.H., Whitesell M.J., Fleming II M., Hel-Or H., Nevo E., Raz S. 2015. Fluctuating Asymmetry of Plant Leaves: Batch Processing with LAMINA and Continuous Symmetry Measures. *Symmetry*, 7: 255–268.
20. Klingenberg C.P. 2016. Size, shape, and form: concepts of allometry in geometric morphometrics. *Development genes and evolution*, 226 (3): 113–137.
21. Kozlov M.V. 2017. Plant studies on fluctuating asymmetry in Russia: Mythology and methodology. *Russian Journal of Ecology*, 48 (1): 3–12.
22. Palmer A.R., Strobeck C.H. 2003. Fluctuating Asymmetry Analyses Revisited, *Developmental Instab.: Causes and Consequences*. Polak M, editor. Oxford University Press: 279–319.
23. Scheiner S.M. 2014. The genetics of phenotypic plasticity. XIII. Interactions with developmental instability. *Ecology and evolution*, 4 (8): 1347–1360.
24. Shadrina E., Turmukhametova N., Soldatova V., Vol'pert Y., Korotchenko I., Pervyshina G. 2020. Fluctuating Asymmetry in Morphological Characteristics of *Betula Pendula* Roth Leaf under Conditions of Urban Ecosystems: Evaluation of the Multi-Factor Negative Impact. *Symmetry*, 12 (8): 1317.
25. Tucić B., Budečević S., Manitašević Jovanović S.M., Vuleta A., Klingenberg C.P. 2018. Phenotypic plasticity in response to environmental heterogeneity contributes to fluctuating asymmetry in plants: first empirical evidence. *Journal of Evolutionary Biology*, 31 (2): 197–210.
26. Vostrikova T., Zemlyanukhina O., Kalaev V. 2019. Amount of Total Protein and fluctuating asymmetry of *Betula pendula* in Various Ecological Conditions. *Advances in Biological Sciences Research: 1st International Symposium Innovations in Life Sciences (ISILS 2019)*, 7: 357–360.
27. Zakharov V.M., Shadrina E.G., Turmukhametova N.V., Ivantsova E.N., Shikalova E.A., Soldatova V.Yu., Sharova N.A., Trofimov I.E. 2020. Assessment of plant status by stability of development in natural and anthropogenic conditions (fluctuating asymmetry of leaf characters of silver birch, *Betula pendula* Roth). *Biol. Bull.*, 47 (2): 186–190.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Клевцова Марина Александровна, кандидат географических наук, доцент кафедры геоэкологии и мониторинга окружающей среды Воронежского государственного университета, г. Воронеж, Россия

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Marina A. Klevtsova, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Department of Geocology and environmental monitoring of the Voronezh State University, Voronezh, Russia

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