

СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЛИСТЬЕВ БЕРЕЗЫ ПОВИСЛОЙ (*BETULA PENDULA* ROTH) В УСЛОВИЯХ ПРОМЫШЛЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ (УФИМСКИЙ ПРОМЫШЛЕННЫЙ ЦЕНТР, РЕСПУБЛИКА БАШКОРТОСТАН)

О.В. Тагирова✉, А.Ю. Кулагин

Уфимский Институт биологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (УИБ УФИЦ РАН), Россия, 450054, г. Уфа, Проспект Октября, д. 69

olecyi@mail.ru

Представлены результаты исследований состояния насаждений березы повислой (*Betula pendula* Roth) на территории Уфимского промышленного центра. Цель исследования — охарактеризовать сезонную изменчивость листьев березы среднелистной и мелколистной форм, произрастающих в условиях преобладающего нефтехимического загрязнения окружающей среды Уфимского промышленного центра. Относительное жизненное состояние насаждений в промышленной зоне и в рекреационно-ландшафтной зоне характеризуется как «здоровое». Использован интегральный показатель стабильности развития листьев березы. Применен новый методический подход, при котором исследования проводились на маркированных деревьях березы на маркированных листьях в период с июня по сентябрь 2022 г. Установлено, что по величине интегрального показателя стабильности развития насаждения (июнь — сентябрь) на территории промышленной зоны насаждения березы повислой соответствуют 5 баллам шкалы и показателю «критическое значение», а на территории рекреационно-ландшафтной зоны состояние насаждений соответствует 3 баллам, что обычно наблюдается в «загрязненных районах». Впервые выявлены морфологические отклонения в развитии листьев березы в течение вегетационного периода в промышленной зоне, и в рекреационно-ландшафтной зоне Уфимского промышленного центра. Анализ морфологических изменений листовых пластинок березы в течение вегетационного сезона свидетельствует об индивидуальной траектории сезонного развития отдельных листьев как у среднелистной формы, так и у мелколистной формы. При этом изменения отдельных параметров листа в сезонной динамике согласуются с физиологической активностью и адаптивными реакциями листьев на загрязнение окружающей среды — в наибольшей степени повреждаются вершина и периферийная часть листа. При обосновании лесохозяйственных мероприятий в городских условиях целесообразно осуществлять оценку состояния отдельных деревьев и насаждений с учетом экологической видоспецифичности, изменчивости и устойчивости березы повислой.

Ключевые слова: *Betula pendula* Roth, морфологическая изменчивость листьев, интегральный показатель, промышленное загрязнение

Ссылка для цитирования: Тагирова О.В., Кулагин А.Ю. Сезонная изменчивость листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) в условиях промышленного загрязнения окружающей среды (Уфимский промышленный центр, Республика Башкортостан) // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 3. С. 65–91. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-3-65-91

Успешное развитие живых организмов, находящихся в различных условиях обитания, связывают с координацией структурно-функциональных комплексов. Распространено мнение о том, что симметричность структур выступает показателем нормального роста и развития. Однако следует отметить, что факты морфологической и функциональной асимметричности у животных — расположение сердца, активность полушарий головного мозга и пр. — и растений — строение цветов и соцветий, форма листовой пластинки, фототропизм и пр. — являются

идентификационными признаками и согласуются с их успешным существованием в различных экологических условиях [1–6].

Известно, что листья различных видов рода Береза (*Betula* L.) характеризуются высокой степенью изменчивости [7, 8]. Изучены вопросы изменчивости вегетативных органов и эколого-биологические особенности берез [9–17], их внутривидовой изменчивости в географических культурах [18], географической и экологической изменчивости других древесных растений [19]. У листьев растений билатеральная симметрия встречается редко. По мнению авторов работ [20, 21], флуктуирующая асимме-

трия листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) как показатель отклонения от идеальной билатеральной симметрии может быть обусловлена различными экологическими факторами окружающей среды, а также фенотипическими и генотипическими отклонениями, происходящими в ходе их развития.

В работе [22] рассмотрена пригодность показателя флуктуирующей асимметрии для популяционных исследований, разработана система морфологических признаков (промеров листа) и применение статистических показателей для оценки стабильности развития березы повислой. В работе [23] показано нарушение стабильности развития при естественных неблагоприятных воздействиях (затененность) и при антропогенных воздействиях (химические загрязнения, воздействия радиации). Для оценки стабильности развития листьев по морфологическим признакам в работе [24] разработано методическое руководство как один из подходов к оценке качества окружающей среды. В работе [25] предложен онтогенетический подход при оценке стабильности развития, основанный на особенностях популяционной биологии развития, позволяющий выявлять изменения до появления явных признаков угнетенного состояния живого организма.

Практический интерес представляет применение показателей флуктуирующей асимметрии листьев при характеристике адаптивных особенностей березы повислой в условиях загрязнения окружающей среды. Для условий с выраженным нефтехимическим загрязнением окружающей среды впервые показана многолетняя динамика изменения показателя флуктуирующей асимметрии на сети постоянных пробных площадей (14 пробных площадей) в период с 2012 по 2017 гг. Общая характеристика изменений значений интегрального показателя формирования листьев в пределах Уфимского промышленного центра (УПЦ) [26–29] свидетельствует об отсутствии закономерности в части приуроченности к местоположению и комплексу природно-климатических и техногенных условий [30].

В связи с изложенным были проведены исследования многолетней и сезонной динамики изменений структурно-функционального состояния листьев березы повислой в насаждениях в промышленной зоне вблизи нефтеперерабатывающих предприятий и в рекреационной зоне [26, 31]. С учетом таких эколого-биологических особенностей березы, как: засухоустойчивость, зимостойкость, олиготрофность, устойчивость к промышленным

загрязнителям, которые характерны для УПЦ, получены результаты по исследованию изменения относительного жизненного состояния модельных деревьев березы повислой в период с 2012 по 2022 гг. [32]. На примере маркированных деревьев березы повислой впервые были установлены сезонные изменения интегрального показателя стабильности развития листьев и их морфологической изменчивости как показателя адаптивности в условиях промышленного загрязнения окружающей среды [33, 34].

Цель работы

Цель работы — характеристика сезонной изменчивости листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) мелколистной и среднелистной форм, произрастающих в условиях преобладающего нефтехимического загрязнения окружающей среды Уфимского промышленного центра.

При проведении исследований внимание было сосредоточено на рассмотрении соотношения показателей относительного жизненного состояния насаждений березы повислой и величины интегрального показателя стабильности развития, а также особенностей морфологических изменений листьев березы мелколистной и среднелистной форм в течение вегетационного периода в непосредственной близости к зоне воздействия нефтеперерабатывающих предприятий и в рекреационной зоне с использованием методов описательной статистики.

Материалы и методы

Исследования проведены на территории Уфимского промышленного центра.

Ландшафт в пределах исследуемой территории представлен пологоволнистыми междуречными равнинами, покатыми и пологими склонами долин, сложенными песчаниками, мергелями, конгломератами, известняками уфимского яруса, с широколиственными лесами на серых и темно-серых лесных почвах. Растительность представлена луговыми степями, остепненными лугами с ковылем, типчаком в сочетании с липово-снытевыми и дубово-коротконожковыми лесами, пашнями на их месте на темно-серых лесных почвах и выщелоченных черноземах. Средняя годовая температура воздуха составляет 3,8 °С, среднее годовое количество осадков 418 мм. Преобладают ветры южного и юго-западного направлений [35].

В настоящей работе представлены результаты исследований, выполненных в течение вегетационного периода 2022 г.

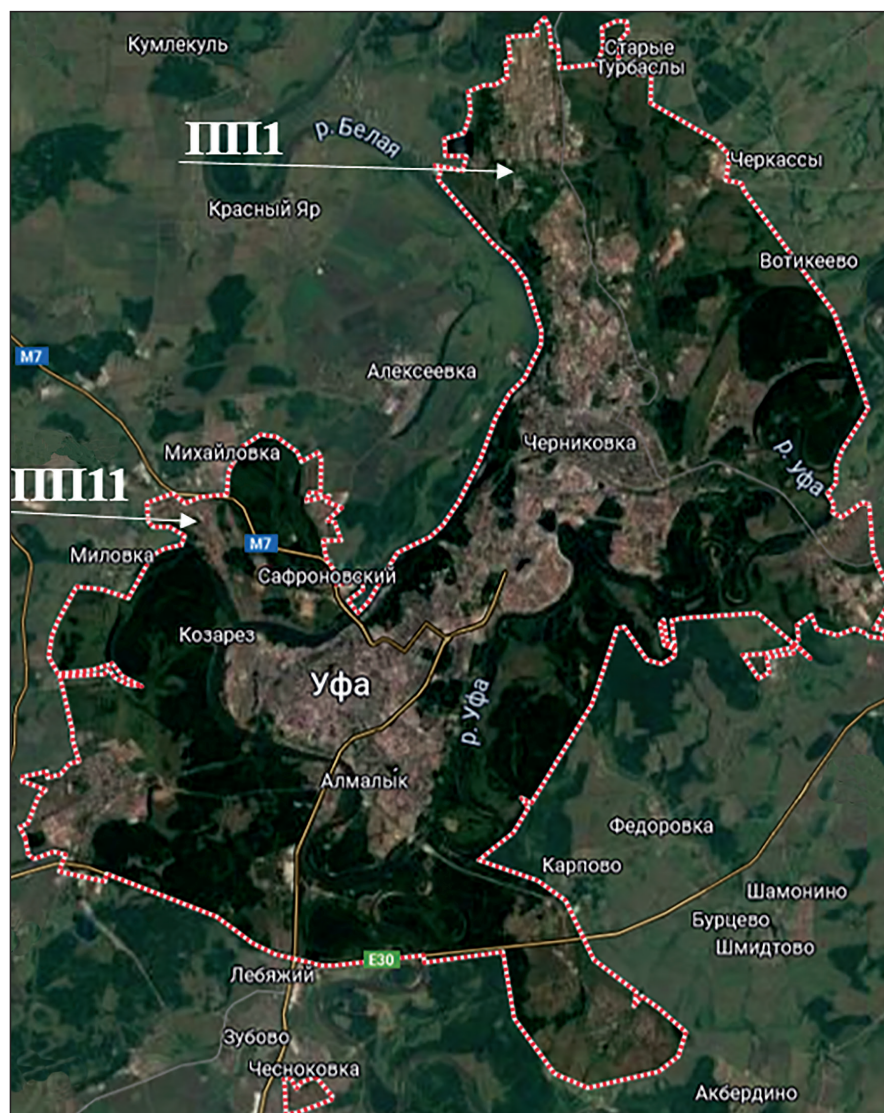


Рис. 1. Картосхема г. Уфы с размещением пробных площадей ПП-1 и ПП-11 [36]
Fig. 1. Map chart of Ufa with the location of sample areas ПП-1 and ПП-11 [36]

Пробная площадь 1 (ПП-1) расположена в северной части г. Уфы в 2...3 км от нефтеперерабатывающих предприятий — это промышленная зона; ПП-11 расположена в западной части г. Уфы на удалении 10...15 км от источников загрязнения — это селитебно-рекреационная зона (рис. 1).

Следует отметить, что в целом весь 2022 г. и вегетационный период характеризовались среднесезонными климатическими показателями (рис. 2, 3). Минимальная температура в 2022 г. для зимних месяцев была зафиксирована в январе и декабре и составила -31°C ; также в этот период наблюдались перепады температур с повышением до $+1^{\circ}\text{C}$. Максимальная температура в 2022 г. (см. рис. 2) была выявлена в период с июля по сентябрь и составила соответственно 32, 31, 32°C .

Постоянные ПП расположены на городской территории, на которой осуществляется благоустройство и проводятся лесохозяйственные мероприятия. Насаждения расположены в зоне воздействия нефтеперерабатывающих предприятий (ПП-1) и в селитебно-рекреационной зоне на территории парка «Волна» (ПП-11).

Таксационные характеристики древостоев выполнены стандартными методами [38, 39]. Определены высота деревьев (с помощью лазерного дальномера Nikon Laser Forestry Pro, Japan; точность до 0,1 м), диаметр ствола (на высоте 1,3 м от поверхности земли с помощью мерной вилки Haglof, Sweden; точность до 1 см), возраст (на высоте 0,4 м от поверхности земли с помощью приростного бурава Suunto, Finland отбирали керны с последующим подсчетом годичных колец на микроскопе МБС-1, Россия).

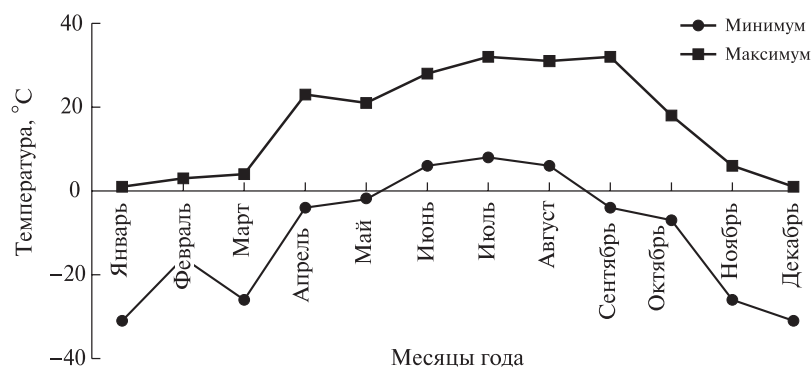


Рис. 2. Температурный режим 2022 г. [37]

Fig. 2. Temperature regime in 2022 [37]

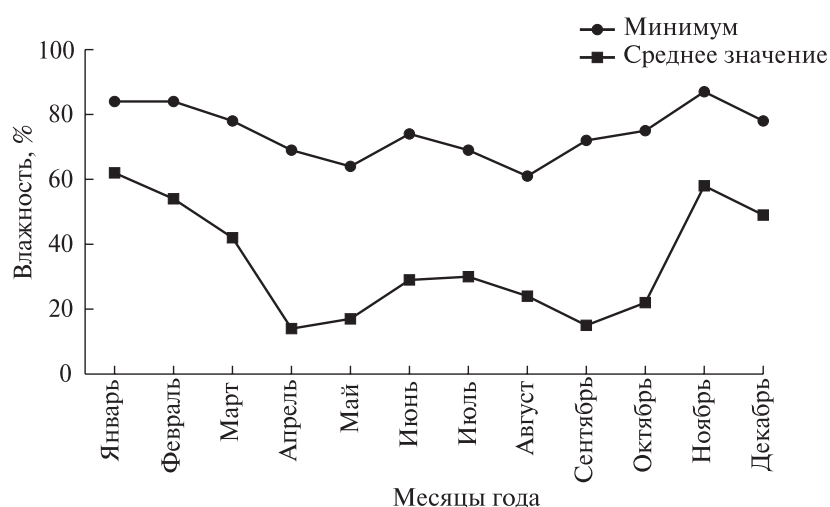


Рис. 3. Влажность воздуха в 2022 г. [37]

Fig. 3. Air humidity in 2022 [37]

По методу В.А. Алексеева [40] с дополнениями для лиственных древесных пород была проведена оценка относительного жизненного состояния (ОЖС) деревьев в 2010 г. и в 2022 г. [32, 33]. На фоне небольших изменений температурно-влажностного режима при снижении объемов поступлений промышленных выбросов в окружающую среду ОЖС насаждений березы на ПП-1 и ПП-11 изменилось от состояния «ослабленное» до состояния «здоровое».

В насаждениях березы повислой представлены деревья среднелистной и мелколистной форм. На ПП-1 и на ПП-11 были выявлены и промаркированы деревья березы повислой среднелистной и мелколистной форм. На каждом дереве в нижней части кроны в равных условиях распределения было выделено и пронумеровано по 10 листьев, растущих на брахибластах. В процессе наблюдений в течение июня — сентября некоторые из пронумерованных листьев были повреждены, либо утрачены (листопад).

При проведении работ был использован метод изучения морфологических признаков листьев, используемых для оценки стабильности развития растений, который позволяет получить интегральную оценку состояния организма на комплекс возможных воздействий, включая антропогенные факторы [24, 41–43].

Исследования проводились с июня по сентябрь (ежемесячно, в одни и те же сроки, из одной и той же части кроны с разных сторон — с севера, юга, запада, востока — с ветвей, равномерно расположенных на дереве), проводилось фотографирование (с помощью цифрового фотоаппарата Nikon D40) каждого пронумерованного листа.

На следующем этапе в камеральных условиях на компьютере проводили обработку фотографий листьев [26, 28, 29, 31, 44], выполняли замеры пяти показателей на левой и правой половине листа [24]. В дальнейшем результаты измерений обрабатывали и рассчитывали интегральный показатель стабильности развития листьев.

Величина асимметрии, как интегральный показатель стабильности развития листа рассчитывалась для комплекса признаков проявления асимметричности. При этом учитывался факт асимметрии, т. е. несходства значений признака на левой и правой половинах листа (рис. 4) [24]:

1-й признак — ширина левой и правой половин листа;

2-й признак — длина второй жилки второго порядка от основания листа;

3-й признак — расстояние между основаниями первой и второй жилок второго порядка;

4-й признак — расстояние между концами первой и второй жилок второго порядка;

5-й признак — угол между главной жилкой и второй от основания жилкой второго порядка.

В.М. Захаровым и др. [24] предложено использовать пятибалльную шкалу оценки отклонений состояния организма от условной нормы по величине интегрального показателя стабильности развития для березы повислой:

1 балл — $<0,040$ (условная норма);

2 балла — $0,040 \dots 0,044$ (слабое влияние неблагоприятных факторов);

3 балла — $0,045 \dots 0,049$ (в загрязненных районах);

4 балла — $0,050 \dots 0,054$ (в загрязненных районах);

5 баллов — $>0,054$ (критическое значение).

Полученные данные были обработаны с помощью описательной статистики и дисперсионного анализа (ANOVA), целью которого является сравнение средних значений выборок (групп). При проведении исследований к группам были отнесены величины интегрального показателя по одному из пяти признаков с июня по сентябрь по каждому из маркированных листьев на деревьях березы среднелистной формы и мелколистной формы в промышленной и селитебно-рекреационной зоне УПЦ.

При исследовании статистической значимости различия между несколькими группами, сравнивались выборочные дисперсии. Отметим, что к группам относятся величины интегрального показателя по одному из пяти признаков с июня по сентябрь по каждому из 10 листьев собранного с одного исследуемого дерева. Также отдельно анализировалась информация по каждому исследуемому дереву.

Численное выражение величины эффекта ANOVA определено с помощью «доли объясненной изменчивости»: R^2 — доля общей дисперсии (для данных, объединенных во всех группах), которая приходится на различия между средними значениями в группах. При этом сравнивается изменчивость средних значений в

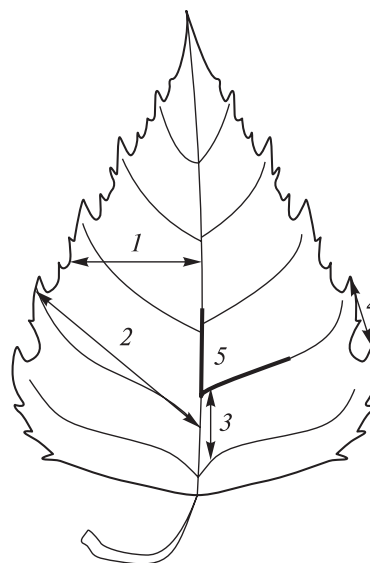


Рис. 4. Схема измерений морфологических признаков для оценки стабильности развития березы повислой (*Betula pendula* Roth) (1–5 — признаки асимметрии) [24]

Fig. 4. Scheme of morphological character measurements to assess the sustainability of birch (*Betula pendula* Roth) development (1–5 — asymmetry traits) [24]

группах с изменчивостью внутри групп. Большое значение означает, что значительная часть изменчивости обусловлена воздействием, определяющим группы.

$$R^2 = \frac{SS_B}{SS_T},$$

где SS_B — сумма квадратов между группами;

SS_T — общая сумма квадратов.

Эффект ANOVA может быть малым, средним и большим:

$R^2 = 0,01$ — маленький эффект;

$R^2 = 0,06$ — средний;

$R^2 = 0,14$ — большой.

F — значение измеряет различия между группами, т. е. отношение между средними значениями в группах и дисперсией внутри групп.

Если F -значение большое, то это указывает на статистически значимые различия между группами.

SS — сумма квадратов отклонений из-за каждого источника изменчивости;

df — число степеней свободы, сопоставленное с каждым источником;

MS — среднеквадратичное значение для каждого источника;

P — это вероятность того, что различия между группами были случайными и не связаны с фактором, который изучается.

Т а б л и ц а 1

Соотношение состояния насаждений березы повислой (*Betula pendula* Roth) и величины интегрального показателя стабильности ее развития на территории Уфимского промышленного центра (2022 г.)

Correlation between the state of birch (*Betula pendula* Roth) plantations and the value of the integral index of its development sustainability in the Ufa industrial centre (2022)

Номер пробной площади	Относительное жизненное состояние (Ln, %) (по Алексею В.А.) [40]	Величина асимметрии (по Захарову В.М. и др.) [24]
ПП-1 (промышленная зона)	82 здоровые	0,058 5 баллов — критическое значение
ПП-11 (селитебно-рекреационная зона)	91 здоровые	0,049 3 балла — средний уровень отклонения от нормы

Т а б л и ц а 2

Интегральный показатель стабильности развития листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) по пяти признакам в условиях Уфимского промышленного центра в 2022 г. у деревьев среднелистной и мелколистной форм

Integral index of leaf development sustainability of the birch (*Betula pendula* Roth) by five characteristics in the conditions of the Ufa industrial centre in 2022 for trees of medium-leaved and small-leaved forms

Период	Интегральный показатель							
	ПП-1				ПП-11			
	Среднелистная форма	Балл	Мелколиственная форма	Балл	Среднелистная форма	Балл	Мелколиственная форма	Балл
Июнь	0,059	5	0,050	4	0,052	4	0,047	3
Июль	0,046	3	0,053	4	0,052	4	0,049	3
Август	0,052	4	0,046	3	0,049	3	0,052	4
Сентябрь	0,079	5	0,050	4	0,053	4	0,061	5
Средний показатель	0,059	5	0,050	4	0,052	4	0,052	4

Если P -значение меньше выбранного уровня значимости (обычно 0,05), то можно отбросить нулевую гипотезу и утверждать, что между группами есть статистически значимые различия и они не случайны.

Параметрический критерий Бартлетта — статистический критерий, который позволил в данной работе определить однородность дисперсии зависимой переменной по пяти признакам. Переменные связаны корреляционной связью ($P < 0,05$). Однородность дисперсии дает возможность установить статистически значимые различия между средними значениями зависимой переменной в разных группах.

SDs — стандартное отклонение.

При обработке фактических материалов использованы апробированные методы исследований: методы изучения лесных сообществ [39], методы изучения флуктуирующей асимме-

трии [24]. Статистическую обработку результатов исследований выполняли в программах Microsoft Excel, Adobe Photoshop и GraphPad Prism [45].

Результаты и обсуждение

В течение вегетационного периода 2022 г. была проведена таксационная характеристика древостоев на ПП-1 и на ПП-11, а также оценено относительное жизненное состояние насаждений березы повислой [32] (табл. 1).

ПП-1 (промышленная зона). Формула древостоя 10Б. Средний диаметр ствола 25 см, средняя высота 22 м, средний возраст 55 лет. В условиях постоянного воздействия промышленных выбросов ОЖС березовых насаждений характеризуется как «здоровое». Густота кроны составляет 85...95 %. Наличие на стволе мерт-

вых сучьев 1...10 %. Степень повреждения листьев загрязнителями и насекомыми составляет 0...10 %. Суховершинность не выражена, фитопатологические повреждения незначительные.

ПП-11 (селитебно-рекреационная зона). Формула древостоя 10Б. Средний диаметр 26 см, средняя высота 24 м, средний возраст 58 лет. ОЖС насаждений — «здоровое». Густота кроны составляет 85...95 %. Наличие на стволе мертвых сучьев 1...5 %. Степень повреждения листьев составляет 0...10 %. Суховершинность не выражена, фитопатологические повреждения отсутствуют, энтомопоражения незначительные.

По показателям ОЖС насаждения березы повислой относятся к категории «здоровые». По величине интегрального показателя стабильности развития на ПП-1 насаждения березы повислой соответствует 5 баллам по шкале (показатель «критическое значение»), а на ПП-11 состояние насаждений соответствует 3 баллам по шкале («средний уровень отклонения»), что обычно наблюдается в загрязненных районах [24].

В результате проведенных исследований в зоне загрязнения (ПП-1) и в зоне относительного контроля (ПП-11) на основании расчетов были получены интегральные показатели в период вегетации (табл. 2).

На ПП-1 интегральный показатель стабильности развития насаждений березы повислой в течение вегетационного периода выше у дерева среднелистной формы — 5 баллов («критическое значение»), у дерева мелколистной формы — 4 балла (наблюдается в загрязненных районах, «средний уровень отклонения»). На ПП-11 интегральный показатель стабиль-

ности развития растений в течение вегетационного периода как у деревьев среднелистной формы, так и у деревьев мелколистной формы березы соответствует 4 баллам (наблюдается в загрязненных районах, «средний уровень отклонения») (см. табл. 2).

Показаны изменения в листьях березы в течение вегетационного периода [29]. Интегральный показатель стабильности развития листьев (среднелистная и мелколистная формы деревьев) рассчитывали по пяти признакам [31] (рис. 5–14). Полученные данные были статистически обработаны с помощью описательной статистики (табл. 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21) и дисперсионного анализа (ANOVA), использованного для сравнения средних значений выборок (табл. 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22). При проведении теста Бартлетта, определяли однородность дисперсии зависимой переменной по пяти признакам.

Экспериментальные исследования в промышленной зоне УПЦ

Каждый лист характеризуется индивидуальной траекторией развития и в течение вегетационного периода не прослеживаются закономерности в динамике изменений интегрального показателя стабильности развития листьев.

1-й признак — ширина левой и правой половин листа. Интегральный показатель стабильности развития листьев березы повислой в промышленной зоне за июнь — сентябрь по 1-му признаку не позволяет установить закономерности формирования морфологической структуры листа (рис. 5).

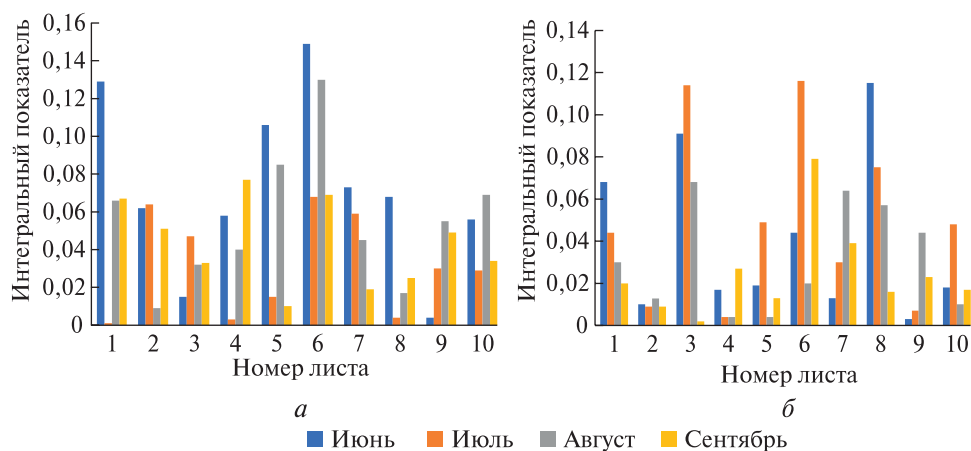


Рис. 5. Интегральный показатель стабильности развития листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) в промышленной зоне (за июнь — сентябрь 2022 г.) по 1-му признаку: а — среднелистная форма дерева; б — мелколистная форма дерева

Fig. 5. Integral index of leaf development sustainability of birch (*Betula pendula* Roth) in the industrial zone (for June — September 2022) according to the 1st trait: а — medium-leaved tree form; б — small-leaved tree form

Т а б л и ц а 3

Описательная статистика развития листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) по 1-му признаку (июнь — сентябрь 2022 г., промышленная зона)

Descriptive statistics of leaf development of birch (*Betula pendula* Roth) by 1 trait (June — September 2022, industrial zone)

Показатель	Июнь		Июль		Август		Сентябрь	
	Средне-листная форма	Мелко-листная форма	Средне-листная форма	Мелко-листная форма	Средне-листная форма	Мелко-листная форма	Средне-листная форма	Мелко-листная форма
Количество значений	10	10	10	10	10	10	10	10
Минимальное значение	0,004	0,003	0,001	0,004	0,009	0,004	0,01	0,002
Максимальное значение	0,149	0,115	0,068	0,116	0,13	0,068	0,077	0,079
Стандартное отклонение	0,04568	0,0387	0,02617	0,04105	0,03536	0,02506	0,02279	0,02164
Стандартная ошибка среднего значения	0,01444	0,01224	0,008274	0,01298	0,01118	0,007926	0,007208	0,006845
Коэффициент вариации, %	63,44	97,23	81,77	82,75	64,53	79,87	52,52	88,35

Т а б л и ц а 4

Дисперсионный анализ ANOVA развития листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) по 1-му признаку (июнь — сентябрь 2022 г., промышленная зона)

ANOVA analysis of variance of leaf development of birch (*Betula pendula* Roth) for the 1st trait (June — September 2022, industrial zone)

Вариация признака	Сумма квадратов SS	Число степеней свободы df	Среднеквадратичное значение MS	P-значение	F-значение	Доля общей дисперсии R ²	Разница между средними значениями (P < 0,05)
Среднелистная форма							
Между группами	0,008734	3	0,002911	0,0698	2,564	0,1761	Нет
Внутри групп	0,04087	36	0,001135	—	—	—	—
Итого	0,0496	39	—	—	—	—	—
Мелколистная форма							
Между группами	0,003526	3	0,001175	0,3623	1,099	0,08388	Нет
Внутри групп	0,03851	36	0,00107	—	—	—	—
Итого	0,04204	39	—	—	—	—	—

Повышенные значения коэффициента вариации свидетельствуют о высокой изменчивости характеристик по отношению к среднему показателю выборки (табл. 3). Совокупность неоднородная. При проведении дисперсионного анализа (табл. 4) по 1-му признаку «доля объясненной изменчивости» R^2 у среднелистной формы дерева можно отнести к категории «большой эффект», а у мелколистной формы дерева — к категории «средний эффект».

Для проверки равенства дисперсий был использован тест Бартлетта, как статистический критерий, который позволяет проверить равенство дисперсий нескольких выборок:

— среднелистная форма дерева: статистическое значение по тесту Бартлетта 5,007; P -зна-

чение 0,1713; по стандартному отклонению SDs ($P < 0,05$) достоверных различий нет;

— мелколистная форма дерева: статистическое значение по тесту Бартлетта 4,88; P -значение 0,1808; по стандартному отклонению SDs ($P < 0,05$) достоверных различий нет.

2-й признак — длина жилки второго порядка от основания листа. Интегральный показатель стабильности развития листьев березы в промышленной зоне за июнь — сентябрь по 2-му признаку свидетельствует о неравномерности развития отдельных листьев и не позволяет установить закономерности формирования морфологической структуры листа (рис. 6).

Коэффициент вариации более 100 % может быть при наличии значений, существенно отли-

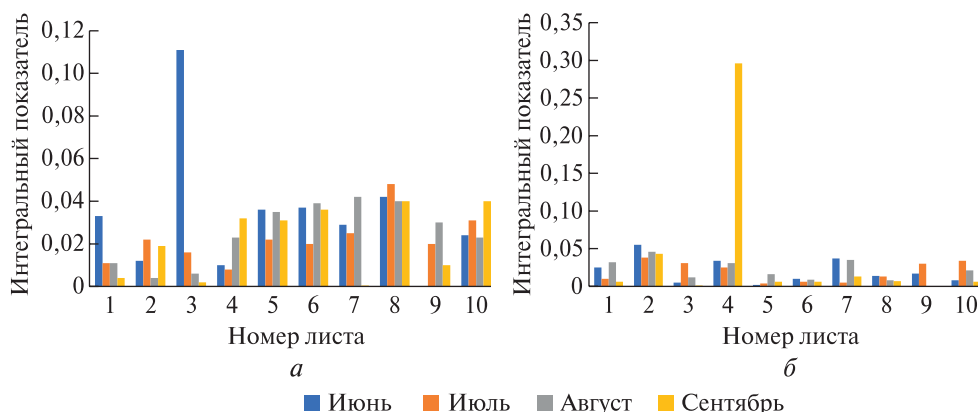


Рис. 6. Интегральный показатель стабильности развития листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) в промышленной зоне (за июнь — сентябрь 2022 г.) по 2-му признаку: *а* — среднелистная форма дерева; *б* — мелколистная форма дерева

Fig. 6. Integral index of leaf development sustainability of birch (*Betula pendula* Roth) in the industrial zone (June — September 2022) for the 2nd trait: *a* — medium-leaved tree form; *b* — small-leaved tree form

Т а б л и ц а 5

Описательная статистика развития листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) по 2-му признаку (июнь — сентябрь 2022 г., промышленная зона)

Descriptive statistics of birch (*Betula pendula* Roth) leaf development for the 2nd trait (June — September 2022, industrial zone)

Показатель	Июнь		Июль		Август		Сентябрь	
	Средне-листная форма	Мелко-листная форма	Средне-листная форма	Мелко-листная форма	Средне-листная форма	Мелко-листная форма	Средне-листная форма	Мелко-листная форма
Количество значений	10	10	10	10	10	9	10	9
Минимальное значение	0,0001	0,002	0,008	0,004	0,004	0,008	0,0004	0,001
Максимальное значение	0,111	0,055	0,048	0,038	0,042	0,046	0,04	0,296
Стандартное отклонение	0,03044	0,01689	0,01119	0,01329	0,0143	0,01329	0,01621	0,09581
Стандартная ошибка среднего значения	0,009625	0,005342	0,003537	0,004204	0,004522	0,004428	0,005127	0,03194
Коэффициент вариации, %	91,10	81,60	50,16	67,82	56,52	56,94	75,62	224,6

чающихся от средней величины. Такой результат свидетельствует о том, что в исследуемой совокупности сильна вариация признаков по отношению к средней величине (табл. 5).

По высокому *F*-значению (табл. 6) видно, что различия между группами статистически значимые.

При проведении дисперсионного анализа (см. табл. 6) по 2-му признаку «доля объясненной изменчивости» R^2 у среднелистной формы дерева можно отнести к категории «средний эффект», а у мелколистной формы дерева — к категории «маленький эффект».

По тесту Бартлетта:

— среднелистная форма дерева: статистическое значение по тесту Бартлетта 10,37; *P*-зна-

чение 0,0157; по стандартному отклонению *SDs* ($P < 0,05^*$) различия достоверны;

— мелколистная форма дерева: статистическое значение по тесту Бартлетта 49,27; *P*-значение $< 0,0001$; по стандартному отклонению *SDs* ($P < 0,05^{***}$) различия достоверны.

3-й признак — расстояние между основаниями первой и второй жилок второго порядка листа. Интегральный показатель стабильности развития листьев березы в промышленной зоне за июнь — сентябрь по 3-му признаку свидетельствует о неравномерности развития отдельных листьев и о формировании групп листьев по степени выраженности изменчивости интегрального показателя (рис. 7).

Т а б л и ц а 6

Дисперсионный анализ ANOVA развития листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) по 2-му признаку (июнь — сентябрь 2022 г., промышленная зона)

ANOVA analysis of variance of birch (*Betula pendula* Roth) leaf development for the 2nd trait (June — September 2022, industrial zone)

Вариация признака	Сумма квадратов <i>SS</i>	Число степеней свободы <i>df</i>	Среднеквадратичное значение <i>MS</i>	<i>P</i> -значение	<i>F</i> -значение	Доля общей дисперсии <i>R</i> ²	Разница между средними значениями (<i>P</i> < 0,05)
Среднелистная форма							
Между группами	0,0008928	3	0,000298	0,5108	0,7838	0,06131	Нет
Внутри групп	0,01367	36	0,00038	—	—	—	—
Итого	0,01456	39	—	—	—	—	—
Мелколистная форма							
Между группами	0,003252	3	0,001084	0,7076	0,4665	0,03953	Нет
Внутри групп	0,07901	34	0,002324	—	—	—	—
Итого	0,08227	37	—	—	—	—	—

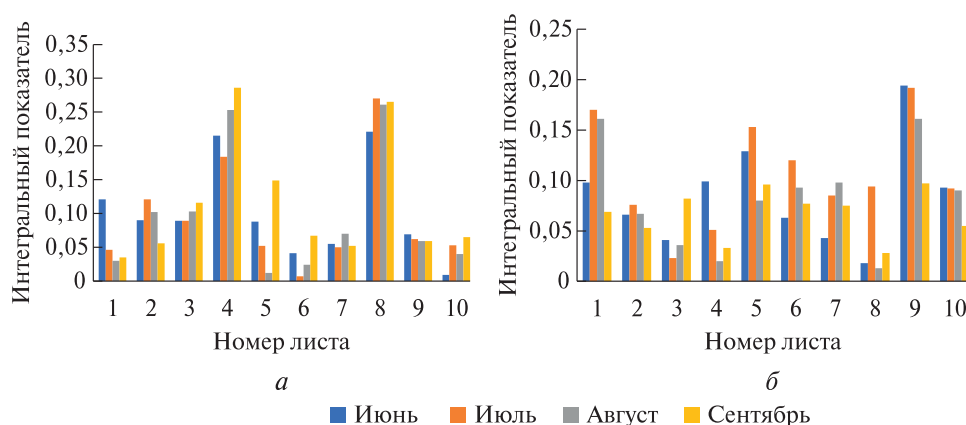


Рис. 7. Интегральный показатель стабильности развития листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) в промышленной зоне (за июнь — сентябрь 2022 г.) по 3-му признаку: *a* — среднелистная форма дерева; *б* — мелколистная форма дерева

Fig. 7. Integral index of leaf development sustainability of birch (*Betula pendula* Roth) in the industrial zone (for June — September 2022) according to the 3rd trait: *a* — medium-leaved tree form; *б* — small-leaved tree form

Коэффициент вариации по 3-му признаку менее 100 %. Это свидетельствует о том, что в исследуемой совокупности слабая вариация признаков по отношению к средней величине (табл. 7).

При проведении дисперсионного анализа (табл. 8) по 3-му признаку «доля объясненной изменчивости» R^2 у среднелистной формы дерева можно отнести к категории «маленький эффект», а у мелколистной формы дерева — к категории «средний эффект».

По тесту Бартлетта:

— среднелистная форма дерева: статистическое значение по тесту Бартлетта 0,8237; P -значение 0,8438; по стандартному отклонению SDs ($P < 0,05$) достоверных различий нет;

— мелколистная форма дерева: статистическое значение по тесту Бартлетта 5,794; P -значение 0,1221; по стандартному отклонению SDs ($P < 0,05$) достоверных различий нет.

4-й признак — расстояние между концами первой и второй жилок второго порядка листа. Интегральный показатель стабильности развития листьев среднелистной формы и мелколистной формы березы в промышленной зоне за июнь — сентябрь по 4-му признаку свидетельствует о неравномерности развития отдельных листьев (рис. 8). Коэффициент вариации значений более 100 % свидетельствует о том, что в исследуемой совокупности сильна вариация признаков по отношению к средней величине (табл. 9).

Т а б л и ц а 7

Описательная статистика развития листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) по 3-му признаку (июнь — сентябрь 2022 г., промышленная зона)

Descriptive statistics of leaf development of birch (*Betula pendula* Roth) according to the 3rd trait (June — September 2022, industrial zone)

Показатель	Июнь		Июль		Август		Сентябрь	
	Средне-листная форма	Мелко-листная форма	Средне-листная форма	Мелко-листная форма	Средне-листная форма	Мелко-листная форма	Средне-листная форма	Мелко-листная форма
Количество значений	10	10	10	10	10	10	10	10
Минимальное значение	0,009	0,018	0,007	0,023	0,012	0,013	0,035	0,028
Максимальное значение	0,221	0,194	0,27	0,192	0,261	0,161	0,286	0,097
Стандартное отклонение	0,06946	0,05086	0,07895	0,05322	0,09051	0,0515	0,0911	0,02392
Стандартная ошибка среднего значения	0,02196	0,01608	0,02497	0,01683	0,02862	0,01629	0,02881	0,007563
Коэффициент вариации, %	69,60	60,26	84,53	50,40	94,88	62,89	79,21	35,97

Т а б л и ц а 8

Дисперсионный анализ ANOVA развития листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) по 3-му признаку (июнь — сентябрь 2022 г., промышленная зона)

ANOVA analysis of variance of birch (*Betula pendula* Roth) leaf development for the 3rd trait (June — September 2022, industrial zone)

Вариация признака	Сумма квадратов <i>SS</i>	Число степеней свободы <i>df</i>	Среднеквадратичное значение <i>MS</i>	<i>P</i> -значение	<i>F</i> -значение	Доля общей дисперсии <i>R</i> ²	Разница между средними значениями (<i>P</i> < 0,05)
Среднелистная форма							
Между группами	0,002865	3	0,000955	0,9362	0,1387	0,01142	Нет
Внутри групп	0,2479	36	0,006887	—	—	—	—
Итого	0,2508	39	—	—	—	—	—
Мелколистная форма							
Между группами	0,007759	3	0,002586	0,3247	1,197	0,0907	Нет
Внутри групп	0,07779	36	0,002161	—	—	—	—
Итого	0,08555	39	—	—	—	—	—

При проведении дисперсионного анализа (табл. 10) по 4-му признаку «доля объясненной изменчивости» R^2 у среднелистной формы дерева можно отнести к категории «большой эффект», а у мелколистной формы дерева — к категории «маленький эффект».

По тесту Бартлетта:

– среднелистная форма дерева: статистическое значение по тесту Бартлетта 50,24; P -значение < 0,0001; по стандартному отклонению SD_s (P < 0,05****) различия достоверны;

– мелколистная форма дерева: статистическое значение по тесту Бартлетта 0,7247; P -значение 0,8674; по стандартному отклонению SD_s (P < 0,05) достоверных различий нет.

5-й признак — угол между главной жилкой и второй жилкой второго порядка от основания листа. Интегральный показатель стабильности развития листьев среднелистной формы и мелколистной формы березы в промышленной зоне за июнь — сентябрь по 5-му признаку свидетельствует о неравномерности развития отдельных листьев (рис. 9).

Коэффициент вариации значений менее 100 % свидетельствует о том, что в исследуемой совокупности слабая вариация признаков по отношению к средней величине (табл. 11).

При проведении дисперсионного анализа (табл. 12) по 5-му признаку «доля объясненной изменчивости» R^2 у среднелистной формы

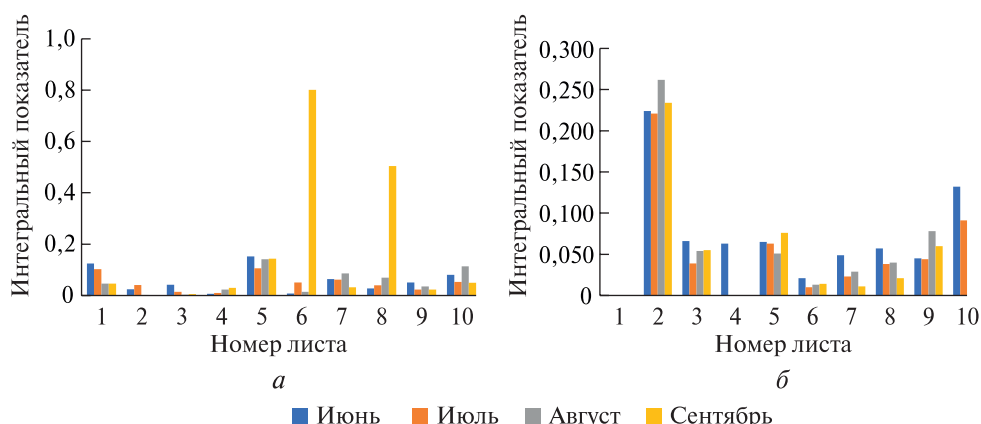


Рис. 8. Интегральный показатель стабильности развития листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) в промышленной зоне (за июнь — сентябрь 2022 г.) по 4-му признаку: *a* — среднелистная форма дерева; *б* — мелколистная форма дерева

Fig. 8. Integral index of leaf development sustainability of birch (*Betula pendula* Roth) in the industrial zone (for June — September 2022) by 4 traits: *a* — medium-leaved tree form; *б* — small-leaved tree form

Т а б л и ц а 9

Описательная статистика развития листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) по 4-му признаку (июнь — сентябрь 2022 г., промышленная зона)

Descriptive statistics of leaf development of birch (*Betula pendula* Roth) according to the 4th trait (June — September 2022, industrial zone)

Показатель	Июнь		Июль		Август		Сентябрь	
	Средне-листная форма	Мелко-листная форма	Средне-листная форма	Мелко-листная форма	Средне-листная форма	Мелко-листная форма	Средне-листная форма	Мелко-листная форма
Количество значений	10	10	10	9	10	8	10	8
Минимальное значение	0,006	0,021	0,01	0,01	0,002	0,013	0,001	0,011
Максимальное значение	0,152	0,224	0,106	0,221	0,141	0,262	0,801	0,234
Стандартное отклонение	0,04897	0,05958	0,03299	0,06296	0,04782	0,07884	0,27	0,07198
Стандартная ошибка среднего значения	0,01549	0,01884	0,01043	0,02099	0,01512	0,02787	0,0854	0,02545
Коэффициент вариации, %	84,88	78,40	66,12	96,70	89,89	108,2	165,4	108,4

дерева можно отнести к категории «средний эффект», а у мелколистной формы дерева — к категории «большой эффект».

Сосредоточение наибольшей физиологической активности происходит в основании листа, что может быть адаптивной реакцией — в условиях техногенеза наблюдаются повреждения в форме «краевого эффекта», при котором страдают вершина и периферия листа [46, 47].

По тесту Бартлетта:

– среднелистная форма дерева: статистическое значение по тесту Бартлетта 0,4305; P -значение 0,9339; по стандартному отклонению SDs ($P < 0,05$) достоверных различий нет;

– мелколистная форма дерева: статистическое значение по тесту Бартлетта 6,515; P -зна-

чение 0,0891; по стандартному отклонению SDs ($P < 0,05$) достоверных различий нет.

Дисперсионный анализ ANOVA показал, что между средними значениями сравниваемых групп по пяти признакам различий нет.

Для проверки предположения о равных дисперсиях совокупностей выборок был использован статистический тест Брауна — Форсайта. Получен результат о значительном отличии стандартного отклонения ($P < 0,05^{**}$) по 5-му признаку (угол между главной жилкой и второй от основания жилкой второго порядка) на ПП-1 у мелколистной формы дерева.

Однако каждый лист характеризуется индивидуальным развитием, что проявляется как адаптивная реакция на условия произрастания.

Т а б л и ц а 10

Дисперсионный анализ ANOVA развития листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) по 4-му признаку (июнь — сентябрь 2022 г., промышленная зона)

ANOVA analysis of variance of leaf development of birch (*Betula pendula* Roth) for the 4th trait (June — September 2022, industrial zone)

Вариация признака	Сумма квадратов SS	Число степеней свободы df	Среднеквадратичное значение MS	P-значение	F-значение	Доля общей дисперсии R ²	Разница между средними значениями (P < 0,05)
Среднелистная форма							
Между группами	0,09056	3	0,03019	0,2223	1,534	0,1134	Нет
Внутри групп	0,7083	36	0,01968	—	—	—	—
Итого	0,7989	39	—	—	—	—	—
Мелколистная форма							
Между группами	0,000744	3	0,000248	0,9834	0,05356	0,005157	Нет
Внутри групп	0,1434	31	0,004627	—	—	—	—
Итого	0,1442	34	—	—	—	—	—

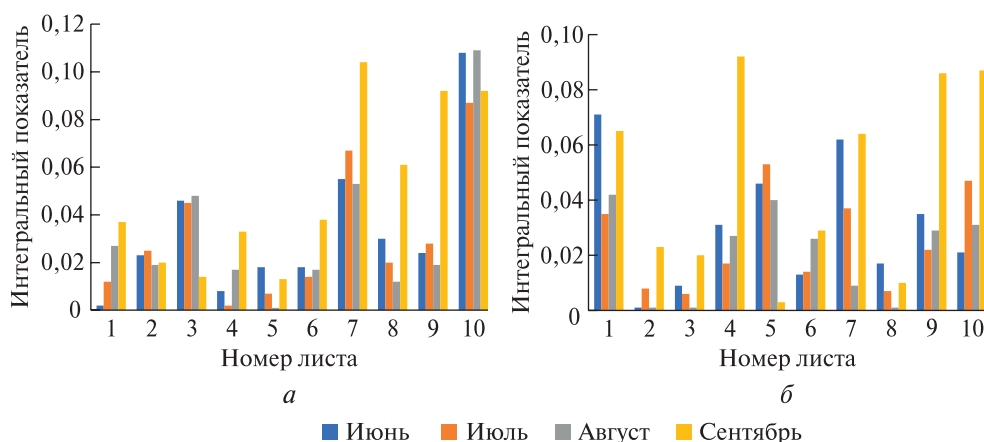


Рис. 9. Интегральный показатель стабильности развития листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) в промышленной зоне (за июнь — сентябрь 2022 г.) по 5-му признаку: а — среднелистная форма дерева; б — мелколистная форма дерева

Fig. 9. Integral index of leaf development sustainability of birch (*Betula pendula* Roth) in the industrial zone (June — September 2022) for the 5th trait: а — medium-leaved tree form; б — small-leaved tree form

Экспериментальные исследования в селитебно-рекреационной зоне УПЦ

1-й признак — ширина левой и правой половин листа. Интегральный показатель стабильности развития листьев среднелистной формы и мелколистной формы березы в селитебно-рекреационной зоне за июнь — сентябрь по 1-му признаку свидетельствует о неравномерности развития отдельных листьев (рис. 10).

Коэффициент вариации более 100 % для среднелистной формы березы в сентябре свидетель-

ствует о том, что в данной совокупности сильна вариация признаков по отношению к средней величине (табл. 13). При проведении дисперсионного анализа (табл. 14) по 1-му признаку «доля объясненной изменчивости» R^2 у среднелистной формы дерева можно отнести в большей степени к категории «средний эффект», у мелколистной формы дерева — к категории «средний эффект».

По тесту Бартлетта:

— среднелистная форма дерева: статистическое значение по тесту Бартлетта 3,424; P -значение 0,3308; по стандартному отклонению SDs ($P < 0,05$) достоверных различий нет;

Т а б л и ц а 11

**Описательная статистика развития листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth)
по 5-му признаку (июнь — сентябрь 2022 г., промышленная зона)**

**Descriptive statistics of birch (*Betula pendula* Roth) leaf development for 5 traits
(June — September 2022, industrial zone)**

Показатель	Июнь		Июль		Август		Сентябрь	
	Средне- листная форма	Мелко- листная форма	Средне- листная форма	Мелко- листная форма	Средне- листная форма	Мелко- листная форма	Средне- листная форма	Мелко- листная форма
Количество значений	10	10	10	10	10	10	10	10
Минимальное значение	0,002	0,001	0,002	0,006	0,001	0,001	0,013	0,003
Максимальное значение	0,108	0,071	0,087	0,053	0,109	0,042	0,104	0,092
Стандартное отклонение	0,03074	0,0231	0,02761	0,01725	0,03127	0,01623	0,03453	0,03446
Стандартная ошибка среднего значения	0,00972	0,007306	0,008731	0,005455	0,009888	0,005132	0,01092	0,0109
Коэффициент вариации, %	92,59	75,51	89,93	70,13	97,11	78,40	68,51	71,93

Т а б л и ц а 12

**Дисперсионный анализ ANOVA развития листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth)
по 5-му признаку (июнь — сентябрь 2022 г., промышленная зона)**

**ANOVA analysis of variance of birch (*Betula pendula* Roth) leaf development for the 5th trait
(June — September 2022, industrial zone)**

Вариация признака	Сумма квадратов SS	Число степеней свободы df	Среднеквадратичное значение MS	P-значение	F-значение	Доля общей дисперсии R ²	Разница между средними значениями (P < 0,05)
Среднелистная форма							
Между группами	0,002562	3	0,000854	0,4601	0,881	0,06839	Нет
Внутри групп	0,03489	36	0,000969	—	—	—	—
Итого	0,03746	39	—	—	—	—	—
Мелколистная форма							
Между группами	0,004328	3	0,001443	0,0726	2,529	0,1741	Нет
Внутри групп	0,02054	36	0,000571	—	—	—	—
Итого	0,02487	39	—	—	—	—	—

— мелколистная форма дерева: статистическое значение по тесту Бартлетта 1,522; *P*-значение 0,6772; по стандартному отклонению *SDs* (*P* < 0,05) достоверных различий нет.

2-й признак — длина жилки второго порядка от основания листа. Интегральный показатель стабильности развития листьев мелколистной формы березы в рекреационной зоне в июне — сентябре по 2-му признаку не превышает 0,050, однако для 2-го листа в сентябре интегральный показатель составляет около 0,250, что свидетельствует о неравномерности развития отдельных листьев (рис. 11). Коэффициент вариации более 100 % для мелколистной формы березы в сентябре свидетельствует о том, что в исследуемой

совокупности сильна вариация признаков по отношению к средней величине (табл. 15).

При проведении дисперсионного анализа (табл. 16) по 2-му признаку «доля объясненной изменчивости» *R*² у среднелистной формы дерева можно отнести к категории «маленький эффект», а у мелколистной формы дерева — к категории «средний эффект».

По тесту Бартлетта:

— среднелистная форма дерева: статистическое значение по тесту Бартлетта 7,311; *P*-значение 0,0626; по стандартному отклонению *SDs* (*P* < 0,05) достоверных различий нет;

— мелколистная форма дерева: статистическое значение по тесту Бартлетта 40,92; *P*-зна-

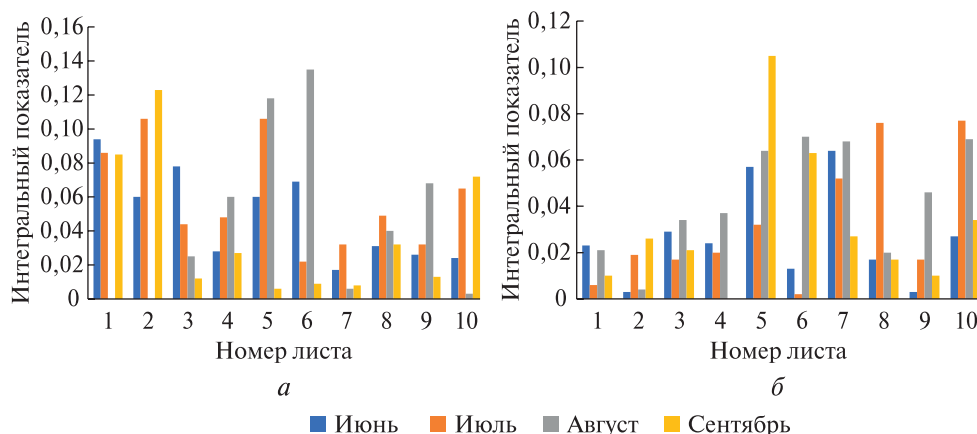


Рис. 10. Интегральный показатель стабильности развития листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) в селитебно-рекреационной зоне (за июнь — сентябрь 2022 г.) по 1-му признаку: *a* — среднелистная форма дерева; *б* — мелколистная форма дерева

Fig. 10. Integral index of sustainable leaf development of birch (*Betula pendula* Roth) in the residential and recreational zone (June — September 2022) for the 1st characteristic: *a* — medium-leaved tree form; *б* — small-leaved tree form

Т а б л и ц а 13

Описательная статистика развития листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) по 1-му признаку (июнь — сентябрь 2022 г., селитебно-рекреационная зона)

Descriptive statistics of birch (*Betula pendula* Roth) leaf development for 1 trait (June — September 2022, residential and recreational zone)

Показатель	Июнь		Июль		Август		Сентябрь	
	Средне-листная форма	Мелко-листная форма	Средне-листная форма	Мелко-листная форма	Средне-листная форма	Мелко-листная форма	Средне-листная форма	Мелко-листная форма
Количество значений	10	10	10	10	8	10	10	9
Минимальное значение	0,017	0,003	0,022	0,002	0,003	0,004	0,006	0,01
Максимальное значение	0,094	0,064	0,106	0,077	0,135	0,07	0,123	0,105
Стандартное отклонение	0,02677	0,02037	0,03065	0,02728	0,04894	0,02387	0,04056	0,03082
Стандартная ошибка среднего значения	0,008466	0,006443	0,009693	0,008628	0,0173	0,00755	0,01283	0,01027
Коэффициент вариации, %	54,97	78,36	51,95	85,80	86,05	55,14	104,8	88,62

чение $< 0,0001$; по стандартному отклонению SDs ($P < 0,05^{****}$) различия достоверны.

3-й признак — расстояние между основаниями первой и второй жилок второго порядка листа. Интегральный показатель стабильности развития листьев среднелистной формы и мелколистной формы березы в селитебно-рекреационной зоне в июне — сентябре по 3-му признаку свидетельствует о неравномерности развития отдельных листьев (рис. 12).

Коэффициент вариации менее 100 % свидетельствует о том, что в исследуемой совокупности слабая вариация признаков по отношению к средней величине (табл. 17).

При проведении дисперсионного анализа (табл. 18) по 3-му признаку «доля объясненной изменчивости» R^2 у среднелистной формы дерева и у мелколистной формы дерева можно отнести к категории «маленький эффект».

По тесту Бартлетта:

— среднелистная форма дерева: статистическое значение по тесту Бартлетта 0,439; P -значение 0,9321; по стандартному отклонению SDs ($P < 0,05$) достоверных различий нет;

— мелколистная форма дерева: статистическое значение по тесту Бартлетта 0,9895; P -значение 0,8038; по стандартному отклонению SDs ($P < 0,05$) достоверных различий нет.

Т а б л и ц а 14

Дисперсионный анализ ANOVA развития листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) по 1-му признаку (июнь — сентябрь 2022 г., селитебно-рекреационная зона)

ANOVA analysis of variance of birch (*Betula pendula* Roth) leaf development for the 1st trait (June — September 2022, residential and recreational zone)

Вариация признака	Сумма квадратов <i>SS</i>	Число степеней свободы <i>df</i>	Среднеквадратичное значение <i>MS</i>	<i>P</i> -значение	<i>F</i> -значение	Доля общей дисперсии <i>R</i> ²	Разница между средними значениями (<i>P</i> < 0,05)
Среднелистная форма							
Между группами	0,002472	3	0,0008241	0,6176	0,6029	0,05051	Нет
Внутри групп	0,04648	34	0,001367	—	—	—	—
Итого	0,04895	37	—	—	—	—	—
Мелколистная форма							
Между группами	0,001559	3	0,00052	0,5104	0,785	0,06304	Нет
Внутри групп	0,02317	35	0,000662	—	—	—	—
Итого	0,02472	38	—	—	—	—	—

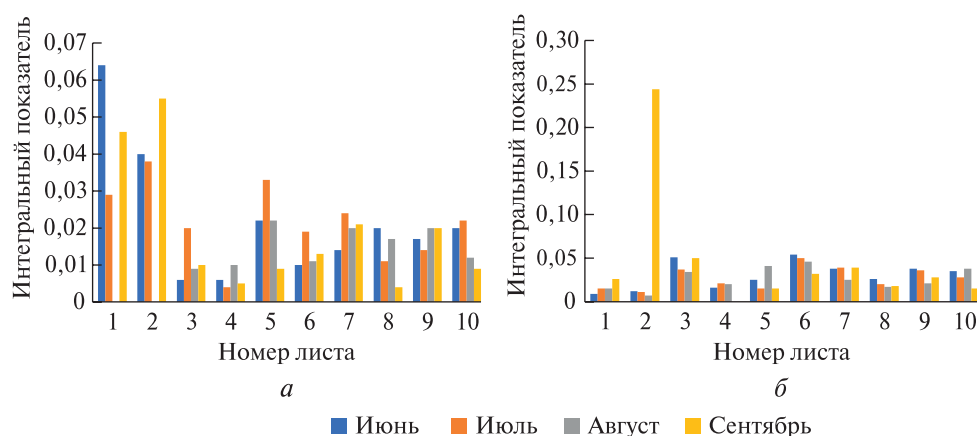


Рис. 11. Интегральный показатель стабильности развития листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) в селитебно-рекреационной зоне (за июнь — сентябрь 2022 г.) по 2-му признаку: *а* — среднелистная форма дерева; *б* — мелколистная форма дерева

Fig. 11. Integral index of leaf development stability of birch (*Betula pendula* Roth) in the residential and recreational zone (June — September 2022) for the 2nd characteristic: *a* — medium-leaved tree form; *b* — small-leaved tree form

4-й признак — расстояние между концами первой и второй жилки второго порядка листа.

Интегральный показатель стабильности развития листьев мелколистной формы березы в селитебно-рекреационной зоне в июне — сентябре по 4-му признаку свидетельствует о неравномерности развития отдельных листьев (рис. 13).

Коэффициент вариации более 100 % у среднелистной формы березы в сентябре свидетельствует о том, что в исследуемой совокупности сильна вариация признаков по отношению к средней величине (табл. 19).

При проведении дисперсионного анализа (табл. 20) по 4-му признаку «доля объяснен-

ной изменчивости» R^2 у среднелистной формы дерева можно отнести в большей степени к категории «средний эффект», а у мелколистной формы дерева — к категории «маленький эффект».

По тесту Бартлетта:

— среднелистная форма дерева: статистическое значение по тесту Бартлетта 33,98; *P*-значение < 0,0001; по стандартному отклонению *SDs* ($P < 0,05^{****}$) различия достоверны;

— мелколистная форма дерева: статистическое значение по тесту Бартлетта 0,3018; *P*-значение 0,9597; по стандартному отклонению *SDs* ($P < 0,05$) достоверных различий нет.

Т а б л и ц а 15

Описательная статистика развития листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) по 2-му признаку (июнь — сентябрь 2022 г., селитебно-рекреационная зона)

Descriptive statistics of birch (*Betula pendula* Roth) leaf development for 2 traits (June — September 2022, residential and recreational zone)

Показатель	Июнь		Июль		Август		Сентябрь	
	Средне-листная форма	Мелко-листная форма	Средне-листная форма	Мелко-листная форма	Средне-листная форма	Мелко-листная форма	Средне-листная форма	Мелко-листная форма
Количество значений	10	10	10	10	8	10	10	9
Минимальное значение	0,006	0,009	0,004	0,011	0,009	0,007	0,004	0,015
Максимальное значение	0,064	0,054	0,038	0,05	0,022	0,046	0,055	0,244
Стандартное отклонение	0,01777	0,01553	0,01027	0,01284	0,005194	0,01272	0,01754	0,07296
Стандартная ошибка среднего значения	0,005618	0,004911	0,003246	0,00406	0,001837	0,004023	0,005545	0,02432
Коэффициент вариации, %	81,13	51,08	47,97	47,20	34,34	48,19	91,33	140,6

Т а б л и ц а 16

Дисперсионный анализ ANOVA развития листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) по 2-му признаку (июнь — сентябрь 2022 г., селитебно-рекреационная зона)

ANOVA analysis of variance of birch (*Betula pendula* Roth) leaf development for the 2nd trait (June — September 2022, residential and recreational zone)

Вариация признака	Сумма квадратов <i>SS</i>	Число степеней свободы <i>df</i>	Среднеквадратичное значение <i>MS</i>	<i>P</i> -значение	<i>F</i> -значение	Доля общей дисперсии <i>R</i> ²	Разница между средними значениями (<i>P</i> < 0,05)
Среднелистная форма							
Между группами	0,000144	3	0,00004789	0,7686	0,3793	0,03541	Нет
Внутри групп	0,003914	31	0,0001263	—	—	—	—
Итого	0,004058	34	—	—	—	—	—
Мелколистная форма							
Между группами	0,00404	3	0,001347	0,4095	0,9884	0,0781	Нет
Внутри групп	0,04769	35	0,001363	—	—	—	—
Итого	0,05173	38	—	—	—	—	—

5-й признак — угол между главной жилкой и второй жилкой второго порядка от основания листа. Интегральный показатель стабильности развития листьев среднелистной формы и мелколистной формы березы в селитебно-рекреационной зоне в июне — сентябре по 5-му признаку свидетельствует о неравномерности развития отдельных листьев (рис. 14).

Коэффициент вариации менее 100 % свидетельствует о том, что в исследуемой совокупности среднелистных и мелколистных форм березы в июне-сентябре наблюдается слабая вариация признаков по отношению к средней величине (табл. 21).

При проведении дисперсионного анализа (табл. 22) по 5-му признаку «доля объясненной изменчивости» *R*² у среднелистной формы дерева можно отнести в большей степени к категории «маленький эффект», а у мелколистной формы дерева в большей степени к категории «средний эффект».

По тесту Бартлетта:

— среднелистная форма дерева: статистическое значение по тесту Бартлетта 2,035; *P*-значение 0,5652; по стандартному отклонению *SDs* (*P* < 0,05) достоверных различий нет;

— мелколистная форма дерева: статистическое значение по тесту Бартлетта 0,9713;

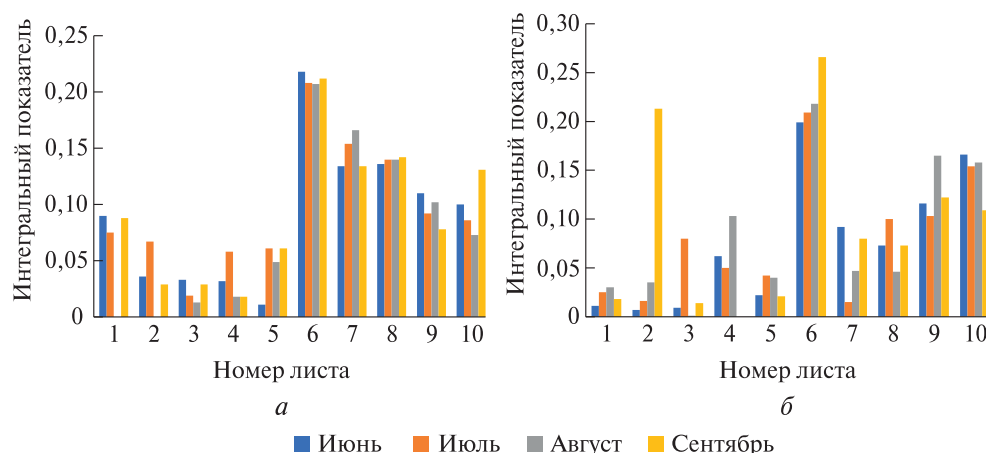


Рис. 12. Интегральный показатель стабильности развития листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) в селитебно-рекреационной зоне (за июнь — сентябрь 2022 г.) по 3-му признаку: *a* — среднелистная форма дерева; *б* — мелколистная форма дерева

Fig. 12. Integral index of sustainable leaf development of birch (*Betula pendula* Roth) in the residential and recreational zone (June — September 2022) for the 3rd characteristic: *a* — medium-leaved tree form; *б* — small-leaved tree form

Т а б л и ц а 17

Описательная статистика развития листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) по 3-му признаку (июнь — сентябрь 2022 г., селитебно-рекреационная зона)

Descriptive statistics of leaf development of birch (*Betula pendula* Roth) for the 3rd trait (June — September 2022, residential and recreational zone)

Показатель	Июнь		Июль		Август		Сентябрь	
	Средне-листная форма	Мелко-листная форма	Средне-листная форма	Мелко-листная форма	Средне-листная форма	Мелко-листная форма	Средне-листная форма	Мелко-листная форма
Количество значений	10	10	10	10	8	10	10	9
Минимальное значение	0,011	0,007	0,019	0,015	0,013	0,001	0,018	0,014
Максимальное значение	0,218	0,199	0,208	0,209	0,207	0,218	0,212	0,266
Стандартное отклонение	0,06386	0,06805	0,05562	0,06389	0,07061	0,0725	0,06216	0,08828
Стандартная ошибка среднего значения	0,0202	0,02152	0,01759	0,0202	0,02497	0,02293	0,01966	0,02943
Коэффициент вариации, %	70,96	89,90	57,94	80,46	73,56	86,00	67,42	86,74

P-значение 0,8082; по стандартному отклонению *SDs* ($P < 0,05$) достоверных различий нет.

Дисперсионный анализ ANOVA показал, что между средними значениями сравниваемых групп по пяти признакам различий нет.

В результате проведенных исследований в течение вегетационного периода в зоне загрязнения (ПП-1) и в селитебно-рекреационной зоне (ПП-11) на основании расчетов были получены интегральные показатели. По значению интегрального показателя стабильности развития насаждения (июнь — сентябрь) на ПП-1 насаждения березы повислой соответствует 5 баллам и показателю «критическое

значение», а на ПП-11 состояние насаждений соответствует 3 баллам, что обычно наблюдается в «загрязненных районах».

На ПП-1 у среднелистной формы дерева интегральный показатель стабильности развития насаждений в течение вегетационного периода составляет 5 баллов — «критическое значение», у мелколистной формы дерева 4 балла — «наблюдается в загрязненных районах».

На ПП-11 интегральный показатель стабильности развития насаждений в течение вегетационного периода как у среднелистной, так и у мелколистной формы дерева соответствует 4 баллам — «наблюдается в загрязненных районах».

Т а б л и ц а 18

Дисперсионный анализ ANOVA развития листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) по 3-му признаку (июнь — сентябрь 2022 г., селитебно-рекреационная зона)

ANOVA analysis of variance of birch (*Betula pendula* Roth) leaf development for the 3rd characteristic (June — September 2022, residential and recreational zone)

Вариация признака	Сумма квадратов <i>SS</i>	Число степеней свободы <i>df</i>	Среднеквадратичное значение <i>MS</i>	<i>P</i> -значение	<i>F</i> -значение	Доля общей дисперсии <i>R</i> ²	Разница между средними значениями (<i>P</i> < 0,05)
Среднелистная форма							
Между группами	0,000252	3	0,00008389	0,9957	0,02125	0,001871	Нет
Внутри групп	0,1342	34	0,003948	—	—	—	—
Итого	0,1345	37	—	—	—	—	—
Мелколистная форма							
Между группами	0,003716	3	0,001239	0,8745	0,2305	0,01938	Нет
Внутри групп	0,1881	35	0,005373	—	—	—	—
Итого	0,1918	38	—	—	—	—	—

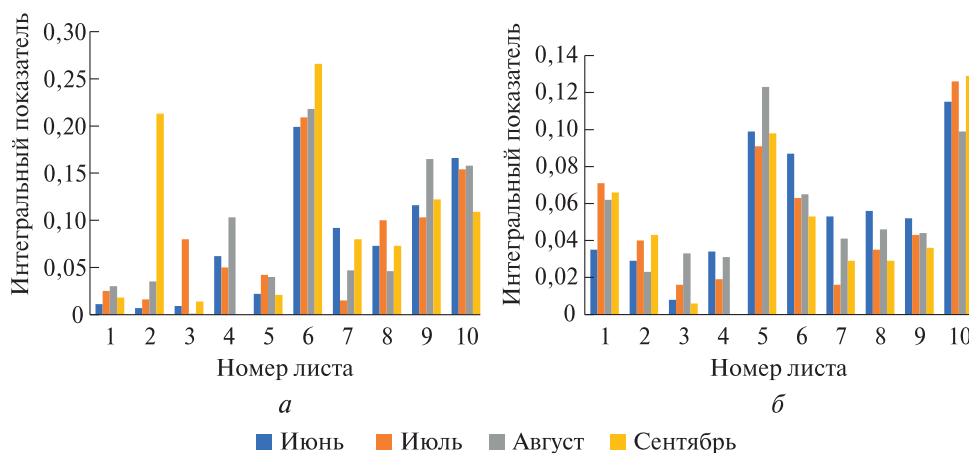


Рис. 13. Интегральный показатель стабильности развития листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) в селитебно-рекреационной зоне (за июнь — сентябрь 2022 г.) по 4-му признаку: *a* — среднелистная форма дерева; *б* — мелколистная форма дерева

Fig. 13. Integral index of sustainable leaf development of birch (*Betula pendula* Roth) in the residential and recreational zone (June — September 2022) according to the 4th characteristic: *a* — medium-leaved tree form; *б* — small-leaved tree form

По результатам описательной статистики по пяти признакам (июнь — сентябрь) можно сделать вывод о высоких значениях коэффициента вариации, что свидетельствует о высокой изменчивости характеристик по отношению к среднему показателю выборки. Совокупность неоднородная.

Дисперсионный анализ ANOVA показал, что нет различий между средними значениями сравниваемых групп по пяти признакам.

Применен тест Бартлетта, который позволяет проверить равенство дисперсий по пяти признакам:

— отклонения между листьями (среднелистная форма березы) на ПП-1 (по 1-му, 3-му, 5-му

признакам) существенных различий не имеют; по 2-му признаку (см. рис. 4) $P < 0,05^*$ эти отклонения различаются; по 4-му признаку $P < 0,05^{****}$ отклонения различаются;

— отклонения между листьями (среднелистная форма березы) на ПП-11 (по 1-му, 2-му, 3-му, 5-му признакам) существенных различий не имеют; по 4-му признаку (см. рис. 4) $P < 0,05^{****}$ эти отклонения различаются;

— отклонения у листьев (мелколистная форма березы) на ПП-1 (по 1-му, 3-му, 4-му и 5-му признакам) существенных различий не имеют. По 2-му признаку $P < 0,05^{****}$ эти отклонения различаются;

Т а б л и ц а 19

Описательная статистика развития листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) по 4-му признаку (июнь — сентябрь 2022 г., селитебно-рекреационная зона)

Descriptive statistics of leaf development of birch (*Betula pendula* Roth) according to the 4th trait (June — September 2022, residential and recreational zone)

Показатель	Июнь		Июль		Август		Сентябрь	
	Средне-листная форма	Мелко-листная форма	Средне-листная форма	Мелко-листная форма	Средне-листная форма	Мелко-листная форма	Средне-листная форма	Мелко-листная форма
Количество значений	10	10	10	10	7	10	9	9
Минимальное значение	0,022	0,008	0,005	0,016	0,002	0,023	0,0003	0,006
Максимальное значение	0,108	0,115	0,086	0,126	0,095	0,123	0,42	0,129
Стандартное отклонение	0,02333	0,03378	0,02876	0,03602	0,02915	0,0319	0,1308	0,03825
Стандартная ошибка среднего значения	0,007378	0,01068	0,009095	0,01139	0,01102	0,01009	0,0436	0,01275
Коэффициент вариации, %	41,29	59,47	64,92	69,26	62,97	56,27	158,4	70,40

Т а б л и ц а 20

Дисперсионный анализ ANOVA развития листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) по 4-му признаку (июнь — сентябрь 2022 г., селитебно-рекреационная зона)

ANOVA analysis of variance of birch (*Betula pendula* Roth) leaf development for the 4th trait (June — September 2022, residential and recreational zone)

Вариация признака	Сумма квадратов <i>SS</i>	Число степеней свободы <i>df</i>	Среднеквадратичное значение <i>MS</i>	<i>P</i> -значение	<i>F</i> -значение	Доля общей дисперсии <i>R</i> ²	Разница между средними значениями (<i>P</i> < 0,05)
Среднелистная форма							
Между группами	0,008297	3	0,002766	0,6368	0,5732	0,051	Нет
Внутри групп	0,1544	32	0,004825	—	—	—	—
Итого	0,1627	35	—	—	—	—	—
Мелколистная форма							
Между группами	0,000155	3	0,00005176	0,9882	0,04232	0,003614	Нет
Внутри групп	0,04281	35	0,001223	—	—	—	—
Итого	0,04296	38	—	—	—	—	—

— отклонения у листьев (мелколистная форма березы) на ПП-11 (по 1-му, 3-му, 4-му и 5-му признакам) существенных различий не имеют; по 2-му признаку $P < 0,05^{****}$ эти отклонения различаются.

У среднелистной формы деревьев при проверке равенства дисперсий по пяти признакам с помощью использования критерия Бартлетта как в промышленной, так и в селитебно-рекреационной зоне были выявлены отличия стандартного отклонения по 4-му признаку. По 2-му признаку отличия стандартного отклонения были выявлены у среднелистной формы дерева только в промышленной зоне (рис. 15, а, в).

У мелколистной формы деревьев при проверке равенства дисперсий по пяти признакам

с помощью использования критерия Бартлетта как в промышленной, так и в селитебно-рекреационной зоне были выявлены отличия стандартного отклонения по 2-му признаку (рис. 15, б, г).

Для проверки предположения о равенстве групповых дисперсий был использован статистический тест Брауна — Форсайта. Стандартное отклонение ($P < 0,05$) значительно отличается по 5-му признаку на ПП-1 для мелколистной формы дерева (см. рис. 15, б).

У листьев среднелистной формы деревьев выражен рост в длину (иллюстрируется изменением по 4-му признаку, см. рис. 15 а, 15 в) как в промышленной, так и в селитебно-рекреационной зоне. У мелколистной формы деревьев 2-й при-

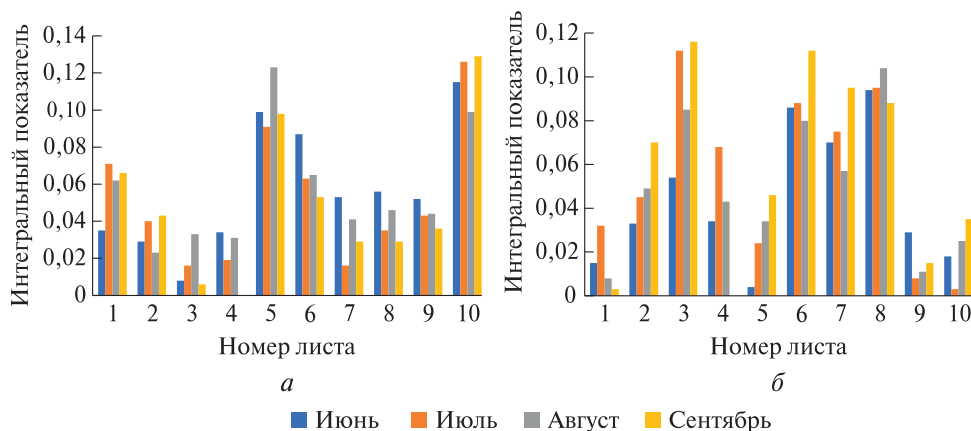


Рис. 14. Интегральный показатель стабильности развития листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) в селитебно-рекреационной зоне (за июнь — сентябрь 2022 г.) по 5-му признаку: *a* — среднелистная форма дерева; *б* — мелколистная форма дерева

Fig. 14. Integral index of sustainable leaf development of birch (*Betula pendula* Roth) in the residential and recreational zone (June — September 2022) according to the 5th characteristic: *a* — medium-leaved tree form; *б* — small-leaved tree form

Т а б л и ц а 21

Описательная статистика развития листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) по 5-му признаку (июнь — сентябрь 2022 г., селитебно-рекреационная зона)

Descriptive statistics of birch (*Betula pendula* Roth) leaf development for 5 traits (June — September 2022, residential and recreational zone)

Показатель	Июнь		Июль		Август		Сентябрь	
	Средне-листная форма	Мелко-листная форма	Средне-листная форма	Мелко-листная форма	Средне-листная форма	Мелко-листная форма	Средне-листная форма	Мелко-листная форма
Количество значений	10	10	10	10	8	10	10	9
Минимальное значение	0,001	0,004	0,002	0,003	0,002	0,008	0	0,003
Максимальное значение	0,102	0,094	0,089	0,112	0,076	0,104	0,07	0,116
Стандартное отклонение	0,03425	0,03092	0,032	0,03802	0,02552	0,03215	0,02192	0,04163
Стандартная ошибка среднего значения	0,01083	0,009776	0,01012	0,01202	0,009023	0,01017	0,006931	0,01388
Коэффициент вариации, %	84,35	70,75	82,70	69,13	84,71	64,82	69,15	64,60

знак наиболее информативный и свидетельствует о сбалансированном росте в длину и в ширину как в промышленной зоне, так и в селитебно-рекреационной зоне (см. рис. 15 *a*, 15 *б*, 15 *в*).

Мелколистность растений рассматривается как адаптивная особенность растений в рамках концепции ксероморфизма и ксерофитизации — адаптивная реакция на экстремальные условия произрастания, при которой обеспечивается успешное функционирование ассимиляционного аппарата [46, 47]. Морфологические особенности и физиологические функции в листе связаны неразрывно, однако на более крупных листьях адаптивные реакции проявляются в меньшей степени.

Выводы

Показано, что в условиях нефтехимического загрязнения в Уфимском промышленном центре на фоне снижения выбросов в окружающую среду в период с 2010 по 2022 гг. ОЖС деревьев березы изменилось со статуса «ослабленные» на статус «здоровые». Улучшение состояния деревьев происходило за счет видовой особенности — повышенных регенерационных способностей березы повислой.

Впервые выявлены морфологические отклонения в развитии листьев березы повислой в течение вегетационного периода в промышленной зоне, и в селитебно-рекреационной зоне

Т а б л и ц а 2 2

Дисперсионный анализ ANOVA развития листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) по 5-му признаку (июнь — сентябрь 2022 г., селитебно-рекреационная зона)

ANOVA analysis of variance of birch (*Betula pendula* Roth) leaf development for the 5th trait (June — September 2022, residential and recreational zone)

Вариация признака	Сумма квадратов SS	Число степеней свободы df	Среднеквадратичное значение MS	P -значение	F -значение	Доля общей дисперсии R^2	Разница между средними значениями ($P < 0,05$)
Среднелистная форма							
Между группами	0,000738	3	0,000246	0,831	0,2918	0,0251	Нет
Внутри групп	0,02866	34	0,000843	—	—	—	—
Итого	0,0294	37	—	—	—	—	—
Мелколистная форма							
Между группами	0,002199	3	0,000733	0,6367	0,5728	0,0468	Нет
Внутри групп	0,04478	35	0,00128	—	—	—	—
Итого	0,04698	38	—	—	—	—	—

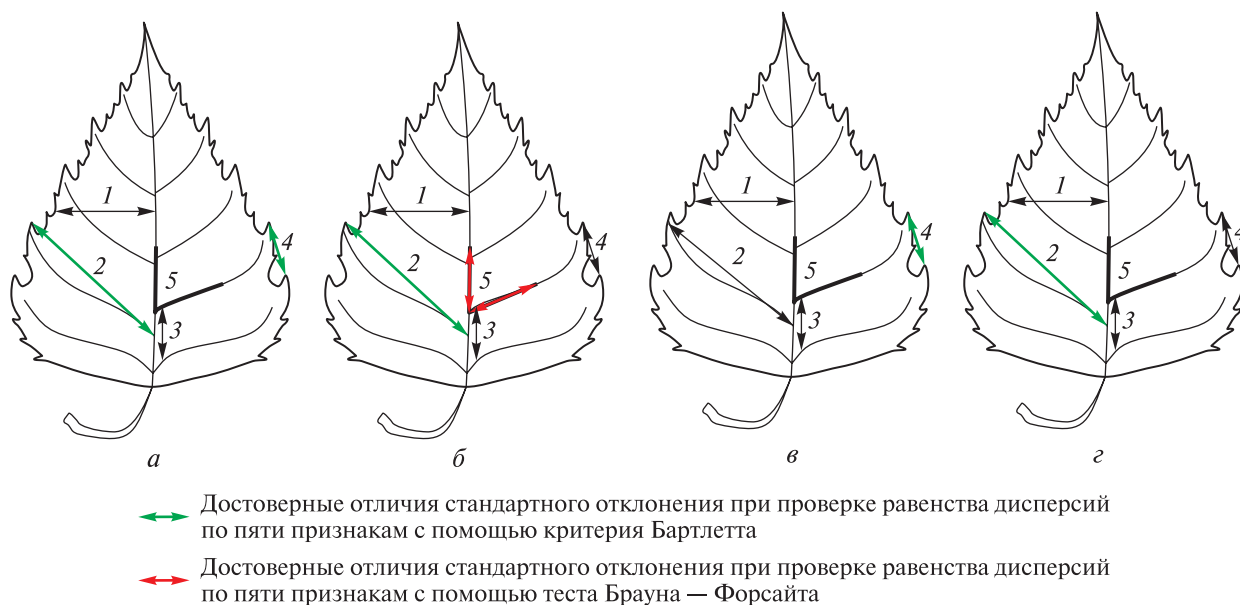


Рис. 15. Схема морфологических признаков листа березы повислой (*Betula pendula* Roth): а — ПП-1, среднелистная форма дерева; б — ПП-1, мелколистная форма дерева; в — ПП-11, среднелистная форма дерева; г — ПП-11, мелколистная форма дерева

Fig. 15. Schematic diagram of morphological characteristics of the leaf of birch (*Betula pendula* Roth): а — ПП-1, medium-leaved tree form; б — ПП-1, small-leaved tree form; в — ПП-11, medium-leaved tree form; г — ПП-11, small-leaved tree form

Уфимского промышленного центра. Анализ морфологических изменений листовых пластин березы в течение вегетационного сезона свидетельствует об индивидуальной траектории сезонного развития отдельных листьев как у среднелистной формы, так и у мелколистной формы. При этом изменения отдельных параметров листа в сезонной динамике согласуются с физиологической активностью и адаптивными реакциями листьев на загрязнение окружающей

среды — в наибольшей степени повреждаются вершина и периферийная часть листа.

При оценке состояния отдельных деревьев и насаждений березы повислой с целью обоснования проведения лесохозяйственных мероприятий в условиях города целесообразно рассматривать морфологические изменения листьев во взаимосвязи с физиологическими характеристиками ассимиляционного аппарата с учетом экологической видоспецифичности, изменчивости и устойчивости.

Работа выполнена на оборудовании центра коллективного пользования «Агидель» в рамках плановых исследований по бюджетной теме № 123020700152-5 FMRS-2023-0008 «Устойчивость лесообразующих древесных видов и эколого-биологические адаптации с учетом антропогенной трансформации ландшафтно-природных комплексов».

Список литературы

- [1] Шварц С.С. Внутривидовая изменчивость млекопитающих и методы ее изучения // Зоологический журнал, 1963. Т. 42. Вып. 3. С. 417–433.
- [2] Большаков В.Н. Изучение внутривидовой изменчивости красной полевки методом колориметрической оценки окраски меха // Экологические основы адаптации животных / под ред. С.С. Шварца. М.: Наука, 1967. С. 49–55.
- [3] Захаров В.М. Асимметрия животных (популяционно-феногенетический подход) / под ред. А.В. Яблокова. М.: Наука, 1987. 215 с.
- [4] Захаров В.М., Баранов А.С., Борисов В.И. Здоровье окружающей среды: методы оценки. М.: Изд-во Центра экологической политики России, 2000. 68 с.
- [5] Константинов Е.Л. Особенности флуктуирующей асимметрии листовой пластинки березы повислой (*Betula pendula* Roth.) как вида биоиндикатора: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.16. Калуга, 2001. 20 с.
- [6] Заренков Н.А. Биосимметрия. М.: URSS, 2009. 318 с.
- [7] Русанович И.И. Внутривидовая изменчивость и систематика белых берез Европейской части СССР в связи с интродукцией: дис. ... канд. биол. наук: 03.00.05. Москва, 1981. 231 с.
- [8] Данченко А.М. Популяционная изменчивость березы / под ред. В.Л. Черепнина. Новосибирск: Наука, 1990. 202 с.
- [9] Мамаев С.А. О закономерностях внутривидовой изменчивости древесных растений // Теоретические основы внутривидовой изменчивости и структура популяции хвойных пород. Свердловск: Изд-во Уральского научного центра АН СССР, 1974. С. 3–12.
- [10] Махнев А.К. Внутривидовая изменчивость и ценные для селекции формы березы Урала // Лесная генетика, селекция и семеноводство (по материалам совещания, состоявшегося 12–15 декабря 1967 г. в г. Петрозаводске) / под ред. В.И. Ермакова. Петрозаводск: Карелия, 1970. С. 266–270.
- [11] Махнев А.К. Внутривидовая изменчивость уральских берез по биологическим свойствам семян // Структура популяций и устойчивость растений на Урале. Сер. «Труды института экологии растений и животных Уральского научного центра АН СССР». Свердловск: Изд-во Уральского научного центра АН СССР, 1978. С. 11–62.
- [12] Махнев А.К. Внутривидовая изменчивость и структура популяций берез секции *Nanae* на Урале и Алтае // Исследование форм внутривидовой изменчивости растений. Свердловск: Изд-во Уральского научного центра АН СССР, 1981. С. 3–24.
- [13] Махнев А.К. О внутривидовой изменчивости и популяционной структуре белых берез на Урале // Экология и физиология основных лесообразующих видов Урала: сб. науч. трудов / под ред. Е.П. Смоленогова, Ю.А. Терешина. Свердловск: Изд-во Уральского научного центра АН СССР, 1986. С. 3–14.
- [14] Махнев А.К., Мамаев С.А. Внутривидовая изменчивость и структура популяций березы в горах Южного Урала в связи с высотной поясностью // Экология, 1972. № 1. С. 24–36.
- [15] Махнев А.К., Мамаев С.А. Внутривидовая изменчивость берез на Урале в связи с проблемами систематики рода // Закономерности внутривидовой изменчивости лиственных древесных пород (труды Института экологии растений и животных / АН СССР Уральск. науч. центр; вып. 91) / под ред. С.А. Мамаева, А. К. Махнева. Свердловск: [б. и.], 1975. С. 67–77.
- [16] Побирушко В.Ф. Эколого-биологические особенности и внутривидовая изменчивость некоторых видов рода *Betula* L. на границах ареалов (в условиях Беларуси): автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.05. Минск, 1992. 25 с.
- [17] Галеев Э.И., Коновалов В.Ф. Внутривидовая изменчивость вегетативных органов березы повислой на Южном Урале // Леса Башкортостана: современное состояние и перспективы: материалы науч.-практ. конф., Уфа, 12 марта 1997 г. Уфа: Изд-во Академии наук Республики Башкортостан, 1997. С. 137–138.
- [18] Мамаев С.А., Махнев А.К. Изучение внутривидовой изменчивости Уральских берез в географических культурах // Состояние и перспективы развития лесной генетики, селекции, семеноводства и интродукции: Методы селекции древесных пород (Сб. тезисов докл. конф., Рига, 13–15 авг. 1974 г.). Рига: [б. и.], 1974. С. 79–82.
- [19] Дерюжкин Р.И. Географическая и экологическая изменчивость лиственницы и сосны и ее значение для лесного семеноводства: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Воронеж, 1955. 20 с.
- [20] Стрельцов А.Б. Региональная система биологического мониторинга. Калуга: Изд-во Калуж. ЦНТИ, 2003. 150 с.
- [21] Захаров В.М. Асимметрия животных. М.: Наука, 1987. 215 с.
- [22] Кожара А.В. Структура показателя флуктуирующей асимметрии и его пригодность для популяционных исследований // Биологические науки, 1985. № 6. С. 100–104.
- [23] Чистякова Е.К. Анализ стабильности развития в природных популяциях растений на примере березы повислой (*Betula pendula* Roth.): автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.15. М., 1997. 20 с.
- [24] Захаров В.М., Баранов А.С., Борисов В.И., Валецкий А.В., Кряжева Н.Г., Чистякова Е.К., Чубинишвили А.Т. Здоровье среды: методика оценки. М.: Изд-во Центра экологической политики России, 2000. 68 с.
- [25] Захаров В.М., Шкиль Ф.Н., Кряжева Н.Г. Оценка стабильности развития березы в разных частях ареала // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия: Биология, 2005. № 1. С. 77–84.
- [26] Givnish T.J. Ecological aspects of plant morphology: leaf form in relation to environment // Acta Biotheoretica, 1978, v. 27, pp. 83–142.

- [27] Кулагин А.Ю., Тагирова О.В. Лесные насаждения Уфимского промышленного центра: современное состояние в условиях антропогенных воздействий. Уфа: Гилем, 2015. 196 с.
- [28] Klingenberg C.P., McIntyre G.S. Geometric morphometrics of developmental instability: Analyzing patterns of fluctuating asymmetry with procrustes methods // *Evolution*, 1998, v. 52, pp. 1363–1375.
- [29] Graham J.H., Shimizu K., Emlen J.M., Freeman D., Merkel J. Growth models and the expected distribution of fluctuating asymmetry // *Biol. J. Linn. Soc.* 2003, v. 80, pp. 57–65.
- [30] Шадрина Е.Г., Вольперт Я.Л. Нарушения стабильности развития организма как результат пессимизации среды при техногенной трансформации природных ландшафтов // *Онтогенез*, 2014. Т. 45. № 3. С. 151–161.
- [31] Van Valen L. A study of fluctuating asymmetry // *Evolution*, 1962, v. 16, pp. 125–142.
- [32] Тагирова О.В. Относительное жизненное состояние насаждений березы повислой (*Betula pendula* Roth) в условиях Уфимского промышленного центра: изменения за период 2010–2022 гг. // *Леса России и хозяйство в них*, 2024. № 1 (88). С. 83–92.
- [33] Тагирова О.В., Кулагин А.Ю. Характеристика состояния насаждений березы повислой (*Betula pendula* Roth) с использованием методов относительного жизненного состояния деревьев и интегрального показателя стабильности развития растений (Уфимский промышленный центр, Республика Башкортостан) // *Известия Уфимского научного центра РАН*, 2015. № 4(1). С. 160–167.
- [34] Щеплягин П.В., Громов А.М., Волков К.А., Булатова Н.В., Зубова С.С. Оценка влияния антропогенной нагрузки в лесопарке им. Лесоводов России г. Екатеринбург по флуктуирующей асимметрии листьев березы повислой // *Наукоосфера*, 2021. № 12–1. С. 167–170.
- [35] Атлас Республики Башкортостан / под ред. И.М. Япарова. Уфа: Китап, 2005. 420 с.
- [36] Картограмма. Уфы с размещением ПП1 и ПП11. URL: <https://maps.app.goo.gl/Q5aD3G9D7B4ThfTR6.html> (дата обращения 02.04.2024).
- [37] Температурный режим 2022 г. URL: <https://rp5.ru.html> (дата обращения 01.03.2024).
- [38] Сукачев В.Н., Раунер Ю.Л., Молчанов А.А. Программа и методика биогеоэкологических исследований. М.: Наука, 1966. 333 с.
- [39] Ярмишко В.Т., Лянгузова И.В. Методы изучения лесных сообществ. СПб.: Изд-во НИИХимии СПбГУ, 2002. 240 с.
- [40] Алексеев В.А. Некоторые вопросы диагностики и классификации поврежденных загрязнением лесных экосистем // *Лесные экосистемы и атмосферное загрязнение*. Л.: Наука, 1990. С. 38–54.
- [41] Cornelissen J.H. C., Lavorel S., Garnier E., Diaz S., Buchmann N., Gurvich D.E., Reich P.B., ter Steege H., Morgan H.D., van der Heijden M.G. A., Pausas J.G., Poorter H. A handbook of protocols for standardised and easy measurements of plant functional traits worldwide // *Australian J. of Botany*, 2003, v. 51, no. 4, pp. 335–380. DOI: 10.1071/bt02124
- [42] Graham J.H., Raz S., Hel-Or H., Nevo E. Fluctuating asymmetry: Methods, theory, and applications // *Symmetry*, 2010, v. 2, pp. 466–540. DOI: 10.3390/sym2020466
- [43] Graham J.H., Whitesell M.J., Fleming M., Hel-Or H., Nevo E., Raz Sh. Fluctuating asymmetry of plant leaves: batch processing with LAMINA and continuous symmetry measures // *Symmetry*, 2015, v. 7, pp. 255–268. DOI: 10.3390/sym7010255
- [44] Курченко Е.И., Шорина Н.И. О концепции симметрии в ботанике // *Вестник Тверского государственного университета. Серия: Биология и экология*, 2013. Вып. 32. № 31. С. 180–194.
- [45] Ивантер Э.В., Коросов А.В. Введение в количественную биологию. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2014. 298 с.
- [46] Тарабрин В.П., Кондратюк Е.Н., Башкатов В.Г., Гнатенко А.А., Коршиков И.И., Чернышова Л.В., Шацкая Р.М. Фитотоксичность органических и неорганических загрязнителей. Киев: Наук. думка, 1986. 216 с.
- [47] Николаевский В.С. Экологическая оценка загрязнения среды и состояния наземных экосистем методами фитоиндикации. М.: МГУЛ, 1998. 191 с.

Сведения об авторах

Тагирова Олеся Васильевна  — канд. биол. наук, ст. науч. сотр., Уфимский Институт биологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (УИБ УФИЦ РАН), olecyi@mail.ru

Кулагин Алексей Юрьевич — д-р биол. наук, зав. лабораторией лесоведения, Уфимский Институт биологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (УИБ УФИЦ РАН), coolagin@list.ru

Поступила в редакцию 22.08.2024.

Одобрено после рецензирования 27.12.2024.

Принята к публикации 17.03.2025.

SEASONAL VARIABILITY OF BIRCH LEAVES (*BETULA PENDULA* ROTH) UNDER CONDITIONS OF INDUSTRIAL ENVIRONMENT POLLUTION (UFA INDUSTRIAL CENTRE, REPUBLIC OF BASHKORTOSTAN)

O.V. Tagirova✉, A.Y. Kulagin

Ufa Institute of Biology — a separate structural unit of the Federal State Budgetary Scientific Institution Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 69, October Av., 450054, Ufa, Russia

olecyi@mail.ru

The study results of the birch plantations (*Betula pendula* Roth) state on the territory of the Ufa Industrial Center (UIC) are presented. The purpose of the study is to characterize the seasonal variability of birch leaves of medium-leaved and small-leaved forms growing in conditions of prevailing petrochemical pollution in the environment of the UIC. The relative living condition of the plantings in the industrial zone and in the residential and recreational zone is characterized as «healthy». An integral indicator of sustainable birch leaf development was used. A new methodological approach was applied, in which studies were conducted on marked birch trees on marked leaves in the period from June to September 2022. It was found that, according to the value of the integral indicator of the sustainable plantation development (June — September) in the industrial zone, birch plantations correspond to the 5th point of the scale and the «critical value» indicator, and in the residential and recreational zone, the state of plantations corresponds to the 3rd point, which is usually observed in «polluted areas». For the first time, morphological abnormalities in the development of birch leaves during the growing season were revealed in the industrial zone and in the residential and recreational zone of the UIC. The analysis of morphological changes in birch leaf plates during the growing season indicates an individual trajectory of seasonal development of individual leaves in both medium-leaved and small-leaved forms. At the same time, changes in individual leaf parameters in seasonal dynamics are consistent with the physiological activity and adaptive responses of leaves to environmental pollution — the tip and peripheral part of the leaf are most damaged. When justifying forestry measures in urban conditions, it is advisable to assess the condition of individual trees and plantings, considering the ecological species peculiarities, variability and sustainability of the birch.

Keywords: *Betula pendula* Roth, morphological variability of leaves, integral indicator, industrial pollution

Suggested citation: Tagirova O.V., Kulagin A.Yu. *Sezonnaya izmenchivost' list'ev berezy povisloy (Betula pendula Roth) v usloviyakh promyshlennogo zagryazneniya okruzhayushchey sredy (Ufimskiy promyshlennyy tsentr, Respublika Bashkortostan)* [Seasonal variability of birch leaves (*Betula pendula* Roth) under conditions of industrial environment pollution (Ufa industrial centre, Republic of Bashkortostan)]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 3, pp. 65–91. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-3-65-91

References

- [1] Shvarts S.S. *Vnutripopulyatsionnaya izmenchivost' mlekopitayushchikh i metody ee izucheniya* [Intrapopulation variability of mammals and methods of its study]. *Zoologicheskii zhurnal* [Zoological journal], 1963, v. 42, iss. 3, pp. 417–433.
- [2] Bol'shakov V.N. *Izuchenie vnutrividovoy izmenchivosti krasnoy polevki metodom kolorimetricheskoy otsenki okraski mekha* [Study of intraspecific variability of the red-backed vole by colorimetric assessment of fur color]. *Ekologicheskie osnovy adaptatsii zhivotnykh* [Ecological foundations of animal adaptation]. Ed. S.S. Schwartz. Moscow: Nauka, 1967, pp. 49–55.
- [3] Zakharov V.M. *Asimmetriya zhivotnykh (populyatsionno-fenogeneticheskiy podkhod)* [Asymmetry of animals (population-phenogenetic approach)]. Ed. A.V. Yablokov. Moscow: Nauka, 1987, 215 p.
- [4] Zakharov V.M., Baranov A.S., Borisov V.I. *Zdorov'e okruzhayushchey sredy: metody otsenki* [Environmental health: assessment methods]. Moscow: Tsentr ekologicheskoy politiki Rossii [Center for Environmental Policy of Russia], 2000, 68 p.
- [5] Konstantinov E.L. *Osobennosti fluktuiruyushchey asimmetrii listovoy plastinki berezy povisloy (Betula pendula Roth.) kak vida bioindikatora* [Features of fluctuating asymmetry of leaf blade of silver birch (*Betula pendula* Roth.) as a bioindicator species]. Diss. Cand. Sci. (Biol.), 03.00.16. Kaluga, 2001, 20 p.
- [6] Zarenkov N.A. *Biosimmetrika* [Biosymmetry]. Moscow: URSS, 2009, 318 p.
- [7] Rusanovich I.I. *Vnutrividovaya izmenchivost' i sistematika belykh berez Evropeyskoy chasti SSSR v svyazi s introduktsiyey* [Intraspecific variability and taxonomy of white birches of the European part of the USSR in connection with introduction]. Diss. Cand. Sci. (Biol.), 03.00.05. Moscow, 1981, 231 p.
- [8] Danchenko A.M. *Populyatsionnaya izmenchivost' berezy* [Population variability of birch]. Ed. V.L. Cherepnin. Novosibirsk: Nauka, 1990, 202 p.
- [9] Mamaev S.A. *O zakonornostyakh vnutrividovoy izmenchivosti drevesnykh rasteniy* [On the patterns of intraspecific variability of woody plants]. *Teoreticheskie osnovy vnutrividovoy izmenchivosti i struktura populyatsii khvoynykh porod* [Theoretical foundations of intraspecific variability and population structure of coniferous species]. Sverdlovsk: Ural'skiy nauchnyy tsentr AN SSSR [Ural Scientific Center of the USSR Academy of Sciences], 1974, pp. 3–12.
- [10] Makhnev A.K. *Vnutrividovaya izmenchivost' i tsennyye dlya selektsii formy berezy Urala* [Intraspecific variability and valuable forms of Ural birch for breeding]. *Lesnaya genetika, selektsiya i semenovodstvo (Po materialam soveshchaniya, sostoyavshegosya 12–15 dekabrya 1967 g. v g. Petrozavodsk)* [Forest genetics, breeding and seed production (Based on the materials of the meeting held on December 12–15, 1967 in Petrozavodsk)]. Ed. V.I. Ermakov. Petrozavodsk: Karelia, 1970, pp. 266–270.

- [11] Makhnev A.K. *Vnutrividovaya izmenchivost' ural'skikh berez po biologicheskim svoystvam semyan* [Intraspecific variability of Ural birches in biological properties of seeds]. *Struktura populyatsiy i ustoychivost' rasteniy na Urale*. Ser. Vypusk 116 «Trudy instituta ekologii rasteniy i zhivotnykh Ural'skogo nauchnogo tsentra AN SSSR» [Population structure and plant stability in the Urals. Series. Issue 116 «Proceedings of the Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Scientific Center, USSR Academy of Sciences». Sverdlovsk: Ural'skiy nauchnyy tsentr AN SSSR [Ural Scientific Center, USSR Academy of Sciences], 1978, pp. 11–62.
- [12] Makhnev A.K. *Vnutrividovaya izmenchivost' i struktura populyatsiy berez sekti Nanae na Urale i Altae* [Intraspecific variability and population structure of birches of the Nanae section in the Urals and Altai]. *Issledovanie form vnutrividovoy izmenchivosti rasteniy* [Study of forms of intraspecific variability of plants]. Sverdlovsk: UNTs AN SSSR [Ural Scientific Center, USSR Academy of Sciences], 1981, pp. 3–24.
- [13] Makhnev A.K. *O vnutrividovoy izmenchivosti i populyatsionnoy strukture belykh berez na Urale* [On intraspecific variability and population structure of white birches in the Urals]. *Ekologiya i fiziologiya osnovnykh lesoobrazuyushchikh vidov Urala: sbornik nauchnykh trudov* [Ecology and physiology of the main forest-forming species of the Urals: collection of scientific papers]. Ed. E.P. Smolonogov, Yu.A. Tereshin. Sverdlovsk: UNTs AN SSSR [Ural Scientific Center of the USSR Academy of Sciences], 1986, pp. 3–14.
- [14] Makhnev A.K., Mamaev S.A. *Vnutrividovaya izmenchivost' i struktura populyatsiy berezy v gorakh Yuzhnogo Urala v svyazi s vysoynoy poynasnost'yu* [Intraspecific variability and population structure of birch in the mountains of the Southern Urals in connection with altitudinal zonation]. *Ekologiya* [Ecology], 1972, no. 1, pp. 24–36.
- [15] Makhnev A.K., Mamaev S.A. *Vnutrividovaya izmenchivost' berez na Urale v svyazi s problemami sistematiki roda* [Intraspecific variability of birches in the Urals in connection with the problems of taxonomy of the genus]. *Zakonornosti vnutrividovoy izmenchivosti listvennykh drevesnykh porod* (Trudy Instituta ekologii rasteniy i zhivotnykh/ AN SSSR Ural'sk. nauch. tsentr; Vyp. 91) [Patterns of intraspecific variability of deciduous tree species (Proceedings of the Institute of Plant and Animal Ecology. USSR Academy of Sciences Ural Scientific Center; Issue 91). Ed. S.A. Mamaev, A.K. Makhnev. Sverdlovsk, 1975, pp. 67–77.
- [16] Pobirushko V.F. *Ekologo-biologicheskie osobennosti i vnutrividovaya izmenchivost' nekotorykh vidov roda Betula L. na graniitsakh arealov (v usloviyakh Belarusi)* [Ecological and biological characteristics and intraspecific variability of some species of the genus Betula L. at the boundaries of their ranges (in Belarus)]. *Diss. Cand. Sci. (Biol.)*, 03.00.05. Minsk, 1992, 25 p.
- [17] Galeev E.I., Kononov V.F. *Vnutrividovaya izmenchivost' vegetativnykh organov berezy povisloy na Yuzhnom Urale* [Intraspecific variability of vegetative organs of silver birch in the Southern Urals]. *Lesa Bashkortostana: sovremennoe sostoyanie i perspektivy: mater. nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Forests of Bashkortostan: current state and prospects: materials of the scientific and practical conference], Ufa, March 12, 1997. Ufa: Akademiya nauk Respubliki Bashkortostan [Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan], 1997, pp. 137–138.
- [18] Mamaev S.A., Makhnev A.K. *Izuchenie vnutrividovoy izmenchivosti Ural'skikh berez v geograficheskikh kul'turakh* [Study of intraspecific variability of Ural birches in geographical cultures]. *Sostoyanie i perspektivy razvitiya lesnoy genetiki, selektsii, semenovodstva i introduksii: Metody selektsii drevesnykh porod* (Sbornik tezisev dokl. soveshch. 13–15 avg. 1974 g.) [Status and prospects of development of forest genetics, selection, seed production and introduction: Methods of selection of tree species (Collection of abstracts of reports of the meeting of August 13–15, 1974)]. Riga, 1974, pp. 79–82.
- [19] Deryuzhkin R.I. *Geograficheskaya i ekologicheskaya izmenchivost' listvenitsy i sosny i ee znachenie dlya lesnogo semenovodstva* [Geographical and ecological variability of larch and pine and its importance for forest seed production]. *Diss. Cand. Sci. (Agric.)*. Voronezh, 1955, 20 p.
- [20] Strel'tsov A.B. *Regional'naya sistema biologicheskogo monitoringa* [Regional system of biological monitoring]. Kaluga: Izd-vo Kaluzh. TsNTI [Publishing house of Kaluga Central Scientific and Technical Information], 2003, 150 p.
- [21] Zakharov V.M. *Asimmetriya zhivotnykh* [Asymmetry of animals]. Moscow: Nauka, 1987, 215 p.
- [22] Kozhara A.V. *Struktura pokazatelya fluktuiruyushchey asimmetrii i ego prigodnost' dlya populyatsionnykh issledovaniy* [Structure of the fluctuating asymmetry index and its suitability for population studies]. *Biologicheskie nauki* [Biological sciences], 1985, no. 6, pp. 100–104.
- [23] Chistyakova E.K. *Analiz stabil'nosti razvitiya v prirodnykh populyatsiyakh rasteniy na primere berezy povisloy (Betula pendula Roth.)* [Analysis of developmental stability in natural plant populations using the example of silver birch (Betula pendula Roth.)]. *Diss. Cand. Sci. (Biol.)*, 03.00.15. Moscow, 1997, 20 p.
- [24] Zakharov V.M., Baranov A.S., Borisov V.I., Valetskiy A.V., Kryazheva N.G., Chistyakova E.K., Chubinishvili A.T. *Zdorov'e sredi: metodika otsenki* [Environmental health: assessment methods]. Moscow: Tsentr ekologicheskoy politiki Rossii [Center for Environmental Policy of Russia], 2000, 68 p.
- [25] Zakharov V.M., Shkil' F.N., Kryazheva N.G. *Otsenka stabil'nosti razvitiya berezy v raznykh chastyakh areala* [Assessment of the stability of birch development in different parts of the range]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo. Seriya: Biologiya* [Bulletin of the Nizhny Novgorod University named after N.I. Lobachevsky. Series: Biology], 2005, no. 1, pp. 77–84.
- [26] Givnish T.J. *Ecological aspects of plant morphology: leaf form in relation to environment*. *Acta Biotheoretica*, 1978, v. 27, pp. 83–142.
- [27] Kulagin A.Yu., Tagirova O.V. *Lesnye nasazhdeniya Ufimskogo promyshlennogo tsentra: sovremennoe sostoyanie v usloviyakh antropogennykh vozdeystviy* [Forest plantations of the Ufa industrial center: current state under anthropogenic impacts]. Ufa: Gilem, 2015, 196 p.
- [28] Klingenberg C.P., McIntyre G.S. *Geometric morphometrics of developmental instability: Analyzing patterns of fluctuating asymmetry with procrustes methods*. *Evolution*, 1998, v. 52, pp. 1363–1375.
- [29] Graham J.H., Shimizu K., Emlen J.M., Freeman D., Merkel J. *Growth models and the expected distribution of fluctuating asymmetry*. *Biol. J. Linn. Soc.* 2003, v. 80, pp. 57–65.
- [30] Shadrina E.G., Vol'pert Ya.L. *Narusheniya stabil'nosti razvitiya organizma kak rezul'tat pessimizatsii sredi pri tekhnogennoy transformatsii prirodnykh landshaftov* [Violations of the stability of organism development as a result of environmental pessimization during technogenic transformation of natural landscapes]. *Ontogenez* [Ontogenesis], 2014, v. 45, no. 3, p. 151–161.

- [31] Van Valen L. A study of fluctuating asymmetry. *Evolution*, 1962, v. 16, pp. 125–142.
- [32] Tagirova O.V. *Otnositel'noe zhiznennoe sostoyaniye nasazhdeniy berezy povisloy (Betula pendula Roth) v usloviyakh Ufimskogo promyshlennogo tsentra: izmeneniya za period 2010–2022 gg.* [Relative vitality of silver birch stands (Betula pendula Roth) in the Ufa industrial center: changes over the period 2010–2022]. *Lesa Rossii i khozyaystvo v nikh* [Forests of Russia and their management], 2024, no. 1 (88), pp. 83–92.
- [33] Tagirova O.V., Kulagin A.Yu. *Kharakteristika sostoyaniya nasazhdeniy berezy povisloy (Betula pendula Roth) s ispol'zovaniem metodov otnositel'nogo zhiznennogo sostoyaniya derev'ev i integral'nogo pokazatelya stabil'nosti razvitiya rasteniy (Ufimskiy promyshlennyy tsentr, Respublika Bashkortostan)* [Characteristics of the state of silver birch (Betula pendula Roth) stands using the methods of relative tree vitality and the integral indicator of plant development stability (Ufa Industrial Center, Republic of Bashkortostan)]. *Izvestiya Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN* [Bulletin of the Ufa Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2015, no. 4(1), pp. 160–167.
- [34] Shcheplyagin P.V., Gromov A.M., Volkov K.A., Bulatova N.V., Zubova S.S. *Otsenka vliyaniya antropogennoy nagruzki v lesoparke im. Lesovodov Rossii g. Ekaterinburga po fluktuiruyushchey asimmetrii list'ev berezy povisloy* [Morphological variability of leaves as an indicator of Betula pendula Roth adaptability to extreme forest growth conditions]. *Naukosfera* [Ecobiotech], 2020, v. 3, no. 4, pp. 680–689.
- [35] *Atlas Respubliki Bashkortostan* [Atlas of the Republic of Bashkortostan]. Ed. I.M. Yaparov. Ufa: Kitap, 2005, 420 p.
- [36] *Kartoskhema g. Ufy s razmeshcheniem PP1 i PP11* [Map of Ufa with the location of PP1 and PP11]. Available at: <https://maps.app.goo.gl/Q5aD3G9D7B4ThfTR6.html> (accessed 02.04.2024).
- [37] *Temperaturnyy rezhim 2022 g.* [Temperature regime in 2022]. Available at: <https://rp5.ru.html> (accessed 01.03.2024).
- [38] Sukachev V.N., Rauner Yu.L., Molchanov A.A. *Programma i metodika biogeotsenologicheskikh issledovaniy* [Program and methodology of biogeocenological studies]. Moscow: Nauka, 1966, 333 p.
- [39] Yarmishko V.T., Lyanguzova I.V. *Metody izucheniya lesnykh soobshchestv* [Methods for studying forest communities]. St. Petersburg: NIIKhimii SPbGU [Research Institute of Chemistry of St. Petersburg State University], 2002, 240 p.
- [40] Alekseev V.A. *Nekotorye voprosy diagnostiki i klassifikatsii povrezhdennykh zagryazneniem lesnykh ekosistem* [Some issues of diagnostics and classification of forest ecosystems damaged by pollution]. *Lesnye ekosistemy i atmosfernoye zagryaznenie* [Forest ecosystems and atmospheric pollution]. Leningrad: Nauka, 1990, pp. 38–54.
- [41] Cornelissen J.H. C., Lavorel S., Garnier E., Diaz S., Buchmann N., Gurvich D.E., Reich P.B., ter Steege H., Morgan H.D., van der Heijden M.G. A., Pausas J.G., Poorter H. A handbook of protocols for standardised and easy measurements of plant functional traits worldwide. *Australian J. of Botany*, 2003, v. 51, no. 4, pp. 335–380. DOI: 10.1071/bt02124
- [42] Graham J.H., Raz S., Hel-Or H., Nevo E. Fluctuating asymmetry: Methods, theory, and applications. *Symmetry*, 2010, v. 2, pp. 466–540. DOI: 10.3390/sym2020466
- [43] Graham J.H., Whitesell M.J., Fleming M., Hel-Or H., Nevo E., Raz Sh. Fluctuating asymmetry of plant leaves: batch processing with LAMINA and continuous symmetry measures. *Symmetry*, 2015, v. 7, pp. 255–268. DOI: 10.3390/sym7010255
- [44] Kurchenko E.I., Shorina N.I. *O kontseptsii simmetrii v botanike* [On the concept of symmetry in botany]. *Vestnik TvGU. Seriya: Biologiya i ekologiya* [Bulletin of TVSU. Series: Biology and Ecology], 2013, iss. 32, no. 31, pp. 180–194.
- [45] Ivanter E.V., Korosov A.V. *Vvedenie v kolichestvennyuyu biologiyu* [Introduction to quantitative biology]. Petrozavodsk: PetrSU Publishing House, 2014, 298 p.
- [46] Tarabrin V.P., Kondratyuk E.N., Bashkatov V.G., Gnatenko A.A., Korshikov I.I., Chernyshova L.V., Shatskaya R.M. *Fitotoksichnost' organicheskikh i neorganicheskikh zagryazniteley* [Phytotoxicity of organic and inorganic pollutants]. Kyiv: Naukova dumka, 1986, 216 p.
- [47] Nikolaevskiy V.S. *Ekologicheskaya otsenka zagryazneniya sredy i sostoyaniya nazemnykh ekosistem metodami fitoindikatsii* [Ecological assessment of environmental pollution and the state of terrestrial ecosystems using phytointication methods]. Moscow: MSFU, 1998, 191 p.

The work was carried out on the equipment of the centre of collective use «Agidel» within the framework of planned research under the budgetary theme № 123020700152-5 FMRS-2023-0008 «Sustainability of forest-forming tree species and ecological and biological adaptations considering anthropogenic transformation of landscape-natural complexes».

Authors' information

Tagirova Olesya Vasil'evna — Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher of the Ufa Institute of Biology — a separate structural subdivision of the Federal State Budgetary Scientific Institution Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (UIB UFIC RAS), olecyi@mail.ru

Kulagin Aleksey Yur'evich — Dr. Sci. (Biology), Head of the Laboratory of Forestry of the Ufa Institute of Biology — a separate structural subdivision of the Federal State Budgetary Scientific Institution Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (UIB UFIC RAS), coolagin@list.ru

Received 22.08.2024.

Approved after review 27.12.2024.

Accepted for publication 17.03.2025.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article

The authors declare that there is no conflict of interest