

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/7>

УДК 630*575.22:582.623.2



Феногенетический анализ стабильности развития вегетативных органов берёзы повислой и березы пушистой

Игорь Ю. Исаков¹✉, labgen@vglta.vrn.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-2927-3275>

Константин А. Шестибратов², schestibratov.k@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0002-1996-6433>

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 364087, Российская Федерация

²Филиал ГНЦ ИБХ РАН, Проспект Науки 6, г. Пущино, 142290, Российская Федерация

В статье приводятся данные экспериментов по определению стабильности развития (на примере листовых пластинок) у деревьев, полученных путем самоопыления и свободного опыления семей от материнских деревьев берёзы пушистой Б-11 и Б-14 (семенного происхождения). Проведен однофакторный дисперсионный анализ ANOVA признака длина листовой пластинки для двух видов – берёзы пушистой и повислой, различающихся по системам размножения, аллогамных и аутогамных форм. Материнские деревья этих видов были отобраны в Воронежском государственном природном биосферном заповеднике им. В.М. Пескова (ВГПБЗ), там же (кв. 298) созданы путем гибридизации и самоопыления испытательные культуры F₁. Получены данные о нарушении билатерального развития листовых пластинок березы, что характерно для экологически неблагоприятного местопроизрастания деревьев, хотя опытные растения находятся в экологически чистых условиях ВГПБЗ. В первом случае для всех деревьев берёзы пушистой (независимо от способа опыления) получены контрольные баллы, превышающие стандартный показатель, приведённый в нормативных документах по оценке состояния окружающей среды, превышения составили от 2,4 (Б-14 со) до 5,6 (Б-11 св) раз. Подтверждена фенотипическая нестабильность вегетативных органов у полиплоидного вида берёзы по сравнению с диплоидным, что может влиять на продуктивность берёзовых насаждений.

Ключевые слова: *стабильность развития, листовая пластинка, берёза повислая, берёза пушистая, аллогамия, аутогамия, фенотип, ANOVA - анализ*

Финансирование: Исследования проводились в рамках реализации гранта РНФ № 22-64-00036.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Исаков И.Ю., Шестибратов К.А. Феногенетический анализ стабильности развития вегетативных органов берёзы повислой и березы пушистой // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 109-124. – Библиогр.: с. 120-124 (32 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/7>.

Поступила 14.10.2025. Пересмотрена 10.11.2025. Принята 12.12.2025. Опубликовано онлайн 26.12.2025.

Article

Stability of development and phenogenetic analysis in silver birch and downy birch

Igor Yu. Isakov¹✉, labgen@vglta.vrn.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-2927-3275>

Konstantin A. Shestibratov², schestibratov.k@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0002-1996-6433>

¹Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8 Timirjazev Street, Voronezh, 364087, Russian Federation

²Branch of the Shemyakin-Ovchinnikov Institute of Bioorganic Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Pushchino, 142290, Russian Federation

Abstract

The article presents the data of experiments on determination of development stability (using leaf blades as an example) in trees obtained by self-pollination and open pollination of families from maternal trees of downy birch B-11 and B-14 (of seed origin). A one-way ANOVA analysis of variance was performed for the leaf blade length trait for two species – downy birch and silver birch, differing in reproduction systems, allogamous and autogamous forms. As a result, it was shown that the leaf blade length in highly self-fertile forms of downy birch significantly differs with different methods of pollination of maternal trees – self-pollination and open pollination. The maternal trees of these species were selected in the Voronezh State Nature Biosphere Reserve named after V.M. Peskov (VGPBZ), where test cultures F₁ were created by hybridization and self-pollination (sq. 298). The data on the violation of bilateral development of birch leaf blades, which is typical for ecologically unfavorable habitats of trees, were obtained, although the experimental plants are in ecologically clean conditions of the VGPBZ. In the first case, for all downy birch trees (regardless of the pollination method), control scores were obtained that exceeded the standard indicator given in the regulatory documents for assessing the state of the environment, the excesses amounted to 2.4 (B-14 sp) to 5.6 (B-11 op) times. Phenotypic instability of vegetative organs in the polyploid birch species compared to the diploid one was confirmed, which can affect the productivity of birch plantations.

Keywords: *developmental stability, leaf blade, silver birch, downy birch, allogamy, autogamy, phenotype, ANOVA analysis*

Funding: this study has been supported by the grants the Russian Science Foundation, RSF 22-64-00036, <https://rscf.ru/project/22-64-00036/>.

Acknowledgments: authors thanks the reviewers for their contribution to the peer review.

Conflict of interest: the authors declares no conflict of interest.

For citation: I.Yu. Isakov, K.A. Shestibratov (2025). Stability of development and phenogenetic analysis of development in silver birch and downy birch. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 4 (60), pp. 109-124 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/7>.

Received 14.10.2025.

Revised 10.11.2025.

Accepted 12.12.2025.

Published online 26.12.2025.

Введение
В контексте ускоренного лесовосстановления одним из приоритетных направлений является получение потомства с оптимизированными генетическими и селекционными характеристиками.

Для достижения этой цели используются семена, полученные от материнских деревьев,

прошедших строгий отбор по параметрам быстрого роста и высокой продуктивности. Разработка эффективных селекционных программ для древесных растений, в том числе березы, невозможна без детального изучения генетического разнообразия исходного материала – деревьев, произрастающих в естественных популяциях, в том числе, и по системам семенного размножения.

Естественная гибридизация является характерной для берез. Изучение механизмов как естественной, так и искусственной гибридизации имеет существенное значение для понимания в области эволюции, филогении, филогеографии, лесоводства этого рода [1,2,3].

Проблема естественной гибридизации у берез тесно связана с определением таксономического статуса возникающих гибридов и их идентификацией. В настоящее время не существует единого подхода к классификации гибридов берез. Чаще всего спонтанные гибриды видов берез описываются как самостоятельные виды или внутривидовые таксоны [4].

Для уточнения вопросов, связанных с систематической принадлежностью гибридов и понимания их гибридного потенциала в роде *Betula* sp. необходимы контролируемые скрещивания, которые позволят получить более объективное представление об этом явлении (Evolutionary Developmental Biology, Evo-Devo) [5,6].

Кроме того, значительный интерес представляет выведение, испытание на рост и развитие новых селекционных форм березы, полученных как методом семенного, так и вегетативного размножения.

Тот факт, что естественный отбор может изменять распределение фенотипического разнообразия, а распределение фенотипического разнообразия может изменять селективные давления на последующие эволюционные изменения, является примером 'взаимной причинности' в эволюции [7,8].

В процессе развития предрасположенность производить определенные фенотипы может повлиять на скорость и направление последующей эволюции. В частности, процесс развития настроен на производство определенных фенотипов, которые были отобраны в прошлом. А это, в свою очередь, может способствовать эволюции в популяции таких фенотипов (или схожих фенотипов), если они будут выбраны в будущем [9].

Большой вклад в понимание взаимодействия эволюции, фенотипа и генотипа организма внесли [10], которые сформировали новую теорию облегченной изменчивости (Facilitated Variation - FV), объединив в ней

открытия в области эволюции, генетики и биологии развития. Ключевое её положение заключается в том, что случайные генетические изменения в организмах преобразуются в фенотипические, которые потенциально полезны, а эволюция биологических систем усиливается в средах, которые время от времени изменяются систематическим образом [11]. Кроме того, наши знания геномной основы фенотипов лесных деревьев отстают от знаний таких основ других экономически важных организмов [12].

Таким образом, изучение вариабельности фенотипа является актуальной и необходимой задачей. Взаимовлияние фенотипа и генотипа организма может иметь разные функциональные зависимости, от прямых до опосредованных, непрямых. Эти функции выражаются в статистических показателях варьирования признака.

Листья берез разнообразны по форме и строению, поэтому их используют для характеристики форм и направлений изменчивости. Важной характеристикой морфологических признаков вегетативных органов растений является частота распределения симметричных и асимметричных листьев. Предполагается, что при её исследовании выявляется сила связи между симметрией строения и стабильностью развития. Прежде, чем использовать листья какого-либо вида растений в качестве тест-объекта для оценки состояния окружающей среды, необходимо предварительно определить, есть ли связь между «признаками билатерально-симметричного строения и стабильностью развития. Критерием наличия такой связи является полимодальная кривая распределения этих листьев ... в один ряд закономерно чередующихся симметричных и асимметричных форм» [13]. При сравнении типичных (берёза повислая) и абберрантных (далекарлийская берёза) листовых пластинок установлено, что структурная сложность листа может быть увеличена за счет изменения рахиса в эмбриогенезе для мест закладок жилок 1-го порядка.

В Европейской части России естественно произрастают два основных вида берёз из рода *Betula* - берёза повислая и б. пушистая [14].

Важность изучения функциональных особенностей растений на видовом уровне

подчеркивают Rodríguez-Castilla G. и др. [15]. Индекс формы листовых пластинок (LSI) и содержание углерода являются ключевыми характеристиками для оценки состояния экосистем. LSI чувствителен к структурным особенностям и легко измеряется, что делает его ценным для мониторинга. Другие характеристики листьев (например, LDMC (содержание сухого вещества), LD (плотность), азот, площадь листьев) проявляли влияние в зависимости от типа леса.

К функциональным признакам листа относят: индекс формы листа (LSI, длина/ширина листа), содержание углерода в листьях (C) и содержание сухого вещества в листьях (LDMC). Ключевые характеристики растений, такие как масса листьев на единицу площади (LMA), плотность листьев (LD) и содержание сухого вещества в листьях (LDMC), служат индикаторами реакции растений на стресс и повреждаемость насекомыми; ожидается, что аридизация, вызванная изменением климата, изменит динамику взаимоотношений растений и насекомых и функциональные стратегии растений [16].

Количественные характеристики листьев, их размеры являются важными факторами, определяющими продуктивность древесных растений. Для берез высота дерева и средний размер листьев могут независимо контролировать структуру и физиологию листьев, оказывая ещё большее влияние на распределение биомассы, изменение уровня освещенности внутри растения само по себе не объясняет наблюдаемые закономерности. Обнаружена тесная зависимость между биомассой ствола берез и размерами клеток мезофилла. В южной части трансекты характер этой связи был положительным, в то время как для северного участка трансекты найдены отрицательные корреляции между данными параметрами. Это свидетельствует о том, что аккумуляция биомассы в условиях низких температур и дефицита влаги обеспечивается разными механизмами структурной адаптации фотосинтеза [19].

Уменьшение размеров фотосинтетических клеток в лесостепных и степных популяциях берез обеспечивает высокую скорость внутрилистового поглощения CO_2 , поскольку мелкие клетки характеризуются большой поверхностью в расчете

на единицу объема, что увеличивает скорость диффузии CO_2 [20].

Генетическое разнообразие внутри популяций и между ними, а также фенотипическая пластичность ключевых фенологических событий, таких как появление листьев или цветков, играют решающую роль в адаптации и, следовательно, в выживании видов и их конкурентоспособности в контексте быстрого продолжающегося изменения климата [21].

Имеются и другие факторы, кроме генетики, которые следует учитывать при создании лесосеменных плантаций лесных деревьев [22].

Согласно классификации [23], род *Betula* (Берёза) включает пять подродов: *Betulenta*, *Betulaster*, *Neurobetula*, *Betula* и *Chamaebetula*. Число хромосом у видов в каждом подроде варьируется: от диплоидных ($2n=28$) до додекапloidных ($12n=168$).

Исследователи отмечают, что в зависимости от классификации количество видов березы колеблется от 30 до более 60.

С начала текущего столетия активно изучается интрогрессивная гибридизация у березы, как механизм, способный увеличить генетическое разнообразие и повысить адаптивность видов к стрессовым факторам окружающей среды. В частности, предполагается, что значительная вариативность как внешних признаков, так и генетического материала у тетраплоидной березы пушистой в Исландии является следствием переноса генов от диплоидной карликовой березы (*B. nana*) в результате интрогрессии. Эта гипотеза подкрепляется данными, полученными на разных уровнях анализа: морфологическом, хромосомном и молекулярном [24].

Тетраплоиды *Betula platyphylla* Sukaczew имеют значительно более крупные листья, плоды и устьица (гигантский фенотип), чем диплоиды того же вида; однако механизм этого различия остаётся неясным. Данные транскриптома тетраплоида *B. platyphylla* указывают на то, что экспрессия генов, связанных с биосинтезом индолил-3-уксусной кислоты (ИУК) и передачей сигнала, изменилась после дупликации генома [25].

Изучению феномена флуктуирующей асимметрии (ФА) посвящено много работ, в основном, русскоязычных авторов. Они подразделяются на прямой и косвенный мониторинг

(26). Скептицизм в отношении этого метода оценки состояния окружающей среды выражается с двух сторон: эмпирическими данными и методологическими. Известно также о критическом анализе к методологии, применяемой в этих исследованиях [27,28], заключающемся в аргументированных противоречиях сбора растительного материала и измерения ФА, таких как тот факт, что авторы практических рекомендаций [29] упустили из виду существенный объем исследований, не зафиксировавших увеличения функциональной активности (ФА) в деградированных местообитаниях. Определение ФА представляет собой элементарную процедуру, не требующую специальной подготовки или применения сложных инструментов. Существуют унифицированные шкалы для оценки значений ФА, что позволяет проводить сравнение полученных результатов с эталонными данными. Возможно, полиплоидия вносит свой вклад в эти противоречия [30].

Следует отметить, что береза, являясь популярным объектом изучения российских исследователей, часто образует межвидовые гибриды как в естественных, так и в искусственных условиях [31]. В связи с этим, значительная часть межпопуляционной вариабельности ФА у берез может быть обусловлена именно различным соотношением гибридных особей, а не воздействием факторов окружающей среды. Также, в связи с этим получение экстремальных результатов (менее 0,03 и свыше 0,069), должно служить основанием для проведения сверки и поиска причин получения аномальных значений [32].

Стабильность онтогенетического развития, то есть способность организма к нормальному росту и развитию без отклонений и ошибок, служит чувствительным индикатором состояния популяций в природной среде. Оценивая степень стабильности развития, можно судить о совокупном воздействии антропогенных факторов на экосистему.

Наиболее доступным и простым методом оценки стабильности развития является измерение степени флуктуирующей асимметрии билатерально расположенных морфологических признаков. Таким образом, у берёзы проводились

многочисленные исследования на предмет использования этого дерева в качестве тест-объекта для оценки состояния окружающей среды. Однако комплексных исследований, включающих морфологию, видовое разнообразие и биометрическую статистику на примере изучения вегетативных органов берёз, крайне мало. В этой работе мы постарались объединить указанные подходы применительно к полученным селекционным формам берёз.

Целью работы является оценка стабильности развития генотипов берёзы пушистой и берёзы повислой, относящихся к селекционной категории высокосамофертильных. К задачам относятся: 1. Проанализировать изменчивость листовых пластинок на предмет листовой асимметрии. 2. На указанном растительном материале семенного потомства F_1 провести однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) и выявить достоверность различий между селекционными формами. 3. Дать сравнительную оценку биометрических и морфологических показателей у селекционных форм двух видов берёз.

Материалы и методы

Семенное потомство берёзы пушистой и повислой произрастает на специально созданном объекте – биоресурсной коллекции селекционных форм и гибридов берёзы ВГЛТУ. Особенностью данного опыта было то, что все деревья первого поколения берёзы пушистой произрастают в квартале 298 Воронежского государственного природного биосферного заповедника, т.е. достаточно далеко от мест какого-либо загрязнения, в экологически чистой среде. Таким образом фактор внешнего загрязнения среды был сведён к минимуму.

Краткая характеристика материнских деревьев двух видов берёз. Ранее была определена типизация материнских деревьев этих видов по восприимчивости к самоопылению по признаку рост в высоту и введению индекса самофертильности при селекционной инвентаризации (Таблица 1).

Под системой размножения понимается отнесение конкретного дерева или к ауто-, или к аллогамной, или к переходной форме. Эта

классификация была присвоена деревьям в результате теста на инбридинг.

Методика сбора листьев. Листья были собраны на объекте ЕГСК – испытательных культурах берёзы первого поколения, семенного происхождения. Для унификации материала сбор листьев произведен с западной стороны средней

части крон деревьев известного генетического происхождения. Деревья берёзы пушистой, как и повислой были получены при самоопылении материнских деревьев, растущих в Воронежском Государственном Природном Биосферном заповеднике.

Таблица 1

Отнесение опытных деревьев берёзы повислой и пушистой к селекционной категории высокосамофертильных деревьев ($I_{sf} > 1$)

Table 1

Classification of experimental trees of silver and downy birch to the selection category of highly self-fertile trees ($I_{sf} > 1$)

Индекс материнского дерева Mother tree index	Количество деревьев в семье Number of trees in a family	Способ опыления Pollination method	Рост в высоту, $M \pm m_x$, м Height growth, $M \pm m_x$, m	Ср. квадрат. откл. σ , м Standard deviation σ , m	Коэффициент вариации, C_v , % Coefficient of variation C_v , %	Индекс самофертильности, I_{sf} , (H) Self-fertility index I_{sf} , (H)
Берёза повислая Silver birch						
С-36 S-36	6	Co Sp	$5,12 \pm 0,43$	1,0	20	1,31
	9	Св Op	$3,90 \pm 1,53$	2,7	68	
С-54 S-54	11	Co	$5,79 \pm 0,65$	2,1	54	2,56
	15	Св	$2,18 \pm 0,47$	1,2	53	
Берёза пушистая Downy birch						
Б-11 B-11	5	Co	$6,56 \pm 0,10$	0,2	13	1,52
	5	Св	$4,33 \pm 0,24$	0,5	11	
Б-14 B-14	11	Co	$4,95 \pm 0,48$	1,5	31	1,31
	12	Св	$3,78 \pm 0,35$	1,2	52	

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculation

В ходе исследования были использованы листья березы с укороченных побегов, так как они обладают большей генетической детерминированностью. Возраст деревьев составлял 21 год. Было проведено измерение следующих двусторонних характеристик листовых пластинок (л. пл.): 1. Ширина половины л.пл.; 2. Длина 2-й жилки л.пл.; 3. Расстояние между основаниями 1-й и 2-й жилок; 4. Расстояние между окончаниями 1-й и 2-й жилок. Рассчитывали величину асимметрии по каждому признаку для всех листьев по формуле $X =$

$|L-R| / |L+R|$, абсолютную разность левой и правой стороны делили на их сумму. Для каждого дерева составляли отдельную таблицу. Была рассчитана величина асимметрии у двух контрастных по уровню самофертильности деревьев берёзы пушистой семенного происхождения. Предварительно выборки листовых пластинок изучаемых генотипов были тестированы на нормальность распределения изучаемого признака (длина листовой пластинки).

Таблица 2

Подсчет интегрального показателя асимметрии листовой пластинки у дерева Б-11 св 39-28

Table 2

Calculation of the integral index of leaf blade asymmetry in tree B-11 op 39-28

Номер листа Leaf No.	Номер признака Feature number				Величина асимметрии листа The magnitude of leaf asymmetry
	1	2	3	4	
1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,15
2	0,2	0,2	0	0	0,1
3	0	0,3	0	0	0,075
4	0	0,1	0	0,2	0,075
5	0	0,2	0,2	0,1	0,125
6	0,2	0,2	0,1	0,4	0,225
7	0,2	0,1	0	0,1	0,1
8	0	0	0	0,2	0,05
9	0,2	0,4	0	0	0,15
10	0,3	0,2	0	0,5	0,25
11	0	0,2	0	0,3	0,125
12	0,3	0,5	0	0,1	0,225
13	0,2	0	0,1	0	0,075
14	0,1	0,3	0,1	0,3	0,2
15	0,1	0,1	0,1	0	0,075
Величина асимметрии в выборке The amount of asymmetry in the sample					X _{ср} = 0,133

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculation

Таблица 3

Подсчет интегрального показателя асимметрии листовой пластинки у дерева Б-14 со 37-9

Table 3

Calculation of the integral index of leaf blade asymmetry in tree B-14 sp with 37-9

Номер листа Leaf No.	Номер признака Feature number				Величина асимметрии листа The magnitude of leaf asymmetry
	1	2	3	4	
1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,175
2	0	0	0	0,7	0,175
3	0	0	0,3	0	0,075
4	0	0,1	0	0,3	0,1
5	0,3	0,1	0	0,1	0,125
6	0,1	0,2	0,2	0,1	0,15
7	0,2	0,3	0	0	0,125
8	0,1	0,3	0	0	0,1
9	0,2	0,2	0	0,8	0,3
10	0,2	0,2	0	0	0,1
11	0,2	0	0,1	0	0,075
12	0,3	0	0,1	0	0,1
13	0,1	0,2	0,2	0	0,125
14	0,1	0,1	0,2	0	0,1
15	0,1	0,1	0,3	0	0,125
Величина асимметрии в выборке The amount of asymmetry in the sample					X _{ср} = 0,13

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Таблица 4

Подсчет интегрального показателя асимметрии листовой пластинки у дерева Б-11 св 39-27

Table 4

Calculation of the integral index of leaf blade asymmetry in tree B-11 op 39-27

Номер листа Leaf No.	Номер признака Feature number				Величина асимметрии листа The magnitude of leaf asymmetry
	1	2	3	4	
1	0,2	0,2	0,2	0,4	0,25
2	0,3	0	0,1	0,2	0,15
3	0,2	0,1	0	0,3	0,15
4	0,3	0,4	0	0	0,175
5	0,2	0,1	0	0	0,75
6	0,2	0,1	0	0	0,75
7	0,1	0,2	0	0,3	0,15
8	0,1	0,1	0,1	0,2	0,125
9	0	0	0	0,3	0,75
10	0,1	0,1	0,1	0,3	0,15
11	0,1	0	0	0	0,025
12	0,1	0,2	0,3	0,2	0,2
13	0,1	0,1	0	0,1	0,75
14	0,1	0,2	0	0,3	0,15
15	0	0,2	0	0	0,05
Величина асимметрии в выборке The amount of asymmetry in the sample					X _{cp} = 0,305

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

Таблица 5

Подсчет интегрального показателя асимметрии листовой пластинки у дерева Б-14 со 37-8

Table 5

Calculation of the integral index of leaf blade asymmetry in tree B-14 sp 37-8

Номер листа Leaf No.	Номер признака Feature number				Величина асимметрии листа The magnitude of leaf asymmetry
	1	2	3	4	
1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,125
2	0,3	0,9	0,2	0,2	0,4
3	0,1	0,1	0	0,2	0,1
4	0,1	0,5	0	0,2	0,2
5	0,2	0	0	0	0,05
6	0,1	0,3	0,1	0	0,125
7	0,1	0,5	0,2	0	0,2
8	0,1	0,1	0	0	0,05
9	0,1	0,5	0	0,1	0,175
10	0,1	0,5	0,2	0	0,2
11	0	0,1	0,2	0	0,075
12	0,1	0	0	0	0,025
13	0	0,2	0,2	0	0,1
14	0,2	0	0	0,1	0,075
15	0,2	0	0	0,2	0,1
Величина асимметрии в выборке The amount of asymmetry in the sample					X _{cp} = 0,133

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculation

Ниже приводятся баллы и величины показателя стабильности развития длины листовой пластинки берёзы, определяемую для флуктуирующей асимметрии (Методические рекомендации ... 2003 [35]). I балл < 0,040; II балла - 0,040-0,044; III балла - 0,045-0,049; IV балла 0,050-0,054; V баллов > 0,054, где римская цифра (I - V) это стабильность развития в баллах, цифровые показатели – оценка качества среды (I – условно нормальное, II – начальные (незначительные) отклонения от нормы, III – средний уровень отклонения от нормы, IV – существенные (значительные) отклонения от нормы, V – критическое состояние.

Результаты и обсуждение

Показатель стабильности развития.

Показатель определялся у 4-х селекционных форм берёзы пушистой: у формы Б-11, 2 дерева от свободного опыления (39-27 и 39-28); у формы Б-14, 2 дерева от самоопыления; отобрали и проанализировали по 15 листьев с каждого дерева (таблицы 2-5).

На данном растительном материале проведён однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA), в котором группирующим фактором служил система размножения дерева, а откликом – длина листовой пластинки. Результат проведения показан на рисунке 1 и таблице 6.

Происхождение растительного материала. Сформированные листья с листовыми пластинками были собраны с деревьев следующего

Из рисунка 1 видно, что выборки листовых пластинок трех деревьев, полученных при разных способах опыления (Б-11 св 39-28, Б-11 св 39-27 и Б-14 со 37-8) показали типичный характер для графика box plot, с медианными значениями и данными, не выходящими за пределы диапазона. Однако выборка листьев самоопыленного дерева Б-14 со с индексом 37-9 показала отсутствие структуры распределения классического количественного признака. Это указывает на то, что при самоопылении проявляются процессы, увеличивающие нестабильность развития отдельных признаков вегетативных органов (листовой пластинки, а именно, её длины) берёзы пушистой. Это может быть связано с полиплоидным состоянием данного вида древесных растений. Тьюки HSD – тест используется после дисперсионного анализа для оценки достоверных различий средних значений признаков, в таблице – для признака «длина листовой пластинки». Красным выделены достоверные различия между селекционными формами при $p < 0,05$. Гистограмма распределения указанного признака среди всех форм пушистой берёзы показала нормальное распределение.

генетического происхождения. Самофертильные формы С-36 и С-54 – инбредного и аутбредного происхождения. Количество тестируемых листьев – 15.

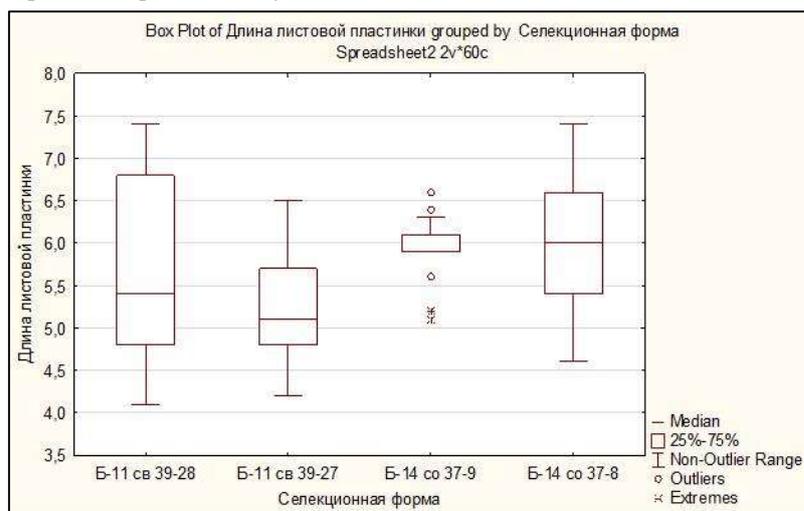


Рисунок 1. Вариабельность длины листовой пластинки у высокосамофертильных форм берёзы пушистой при алло- (Б-11) и аутогамии (Б-14)

Figure 1. Variability of leaf blade length in highly self-fertile forms of downy birch during allo- (B-11) and autogamy (B-14)

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Таблица 6

Тьюки HSD - тест по семьям берёзы пушистой высокосамофертильных форм при алло- (B-11) и аутогамии (B-14)

Table 6

Tukey HSD test on families of downy birch of highly self-fertile forms with allo- (B-11) and autogamy (B-14)

Селекционная форма Breeding forms	Tukey HSD test; Variable: Длина листовой пластинки (Spreadsheet2) Marked differences are significant at $p < ,05000$			
	{1} M=5,7000	{2} M=5,1867	{3} M=5,9800	{4} M=5,9800
Б-11 св 39-28 {1}		0,295818	0,767869	0,767869
Б-11 св 39-27 {2}	0,295818		0,039603	0,039603
Б-14 со 37-9 {3}	0,767869	0,039603		1,000000
Б-14 со 37-8 {4}	0,767869	0,039603	1,000000	

Источник: собственные вычисления авторов
Source: own calculations

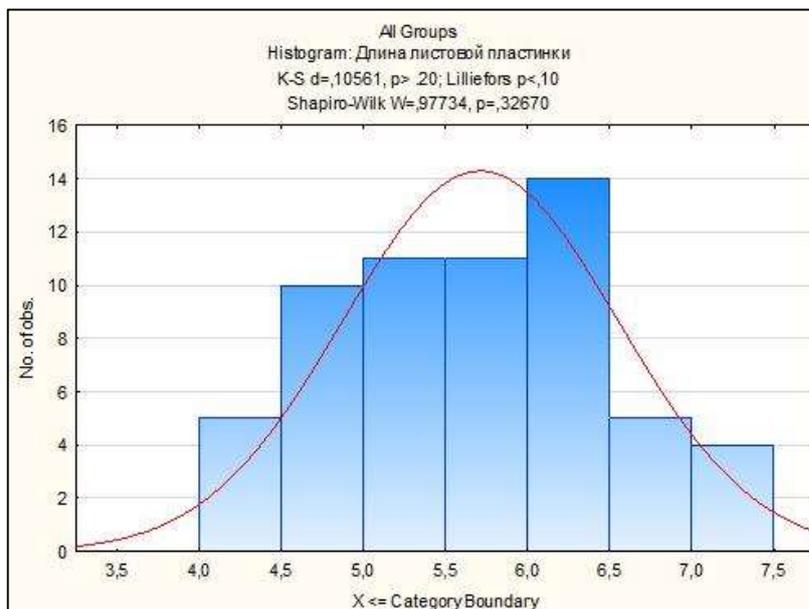


Рисунок 2. Гистограмма распределения нормальности признака между всеми формами берёзы пушистой

Figure 2. Histogram of the distribution of normality of the feature between all forms of downy birch

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

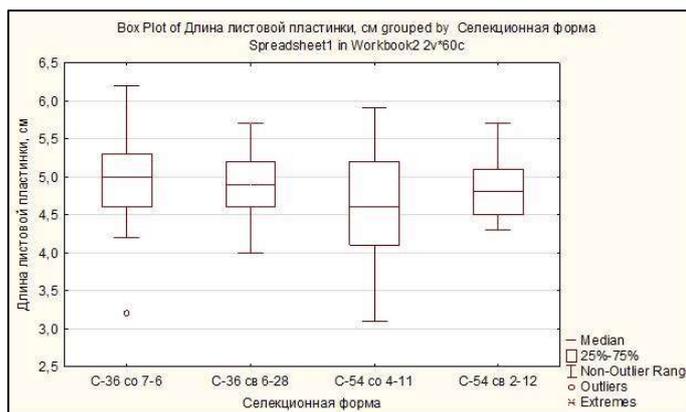


Рисунок 3. Вариабельность длины листовой пластинки у высокосамофертильных форм берёзы повислой при алло- (C-36 св, C-54 св) и аутогамии (C-36 со, C-54 со)

Figure 3. Variability of leaf blade length in highly self-fertile forms of silver birch in allo- (C-36 op, C-54 op) and autogamy (C-36 sp, C-54 sp)

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

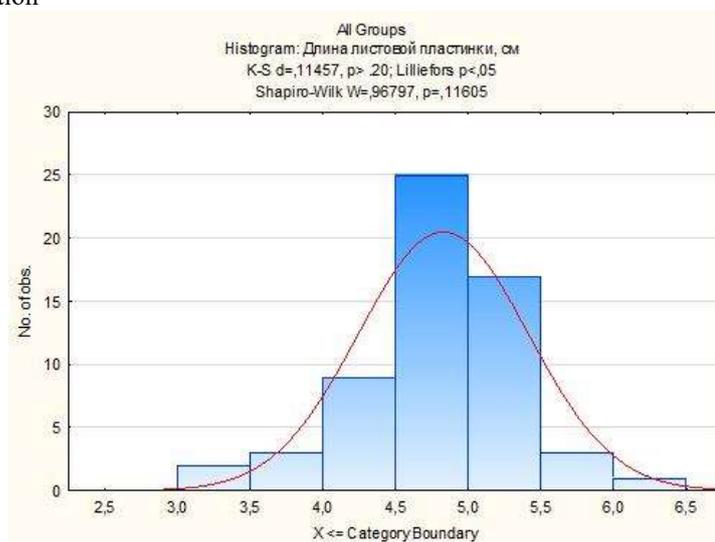


Рисунок 4. Гистограмма распределения нормальности признака между всеми формами берёзы повислой

Figure 4. Histogram of the distribution of the normality of the feature between all forms of silver birch

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Таблица 7

Тьюки HSD - тест по семьям берёзы повислой высокосамофертильных форм при алло- и аутогамии, C-36 и C-54

Table 7

Tukey HSD test on families of silver birch of highly self-fertile forms in allo- and autogamy, C-36 and C-54

	Tukey HSD test; Variable: Длина листовой пластинки, см (Spreadsheet1 in Workbook2) Marked differences are significant at $p < .05000$			
Селекционная форма Breeding forms	{1} M=4,9533	{2} M=4,8933	{3} M=4,6267	{4} M=4,8400

C-36 со 7-6 {1}		0,992280	0,428371	0,951525
C-36 св 6-28 {2}	0,992280		0,600204	0,994564
C-54 со 4-11 {3}	0,428371	0,600204		0,751524
C-54 св 2-12 {4}	0,951525	0,994564	0,751524	

Источник: собственные вычисления авторов

Source: own calculations

Иной характер показателей изменчивости листовой пластинки проявляется у берёзы повислой (рис. 5). Достоверных различий на общем графике у всех высокосамофертильных форм при аллогамии и аутогамии не обнаружено (Таблица 7). Обе изучаемые семьи (C-36 и C-54) имеют примерно равные средние значения признака при разных способах опыления (4,95; 4,89; 4,62 и 4,84, соответственно). Наблюдаем небольшое снижение по сравнению с остальными у инбредной семьи C-54. У неё же и наибольшая изменчивость признака (от 3,2 см до 5,9 см). Статистически достоверные отличия ($p < 0,05$) не выявлены между инбредными и аутбредными семьями.

Заключение

Результаты работы позволяют говорить о вариабельности критериев оценки состояния окружающей среды у двух произрастающих в Воронежской области видов берёз – берёзы повислой и берёзы пушистой. Стабильность развития у берёзы пушистой по морфологическим признакам, независимо от системы размножения вида, не укладывается в традиционные рамки представления как вида – идентификатора состояния окружающей среды. Это свидетельствует о большем влиянии генотипа растения в системе взаимодействия генотип-среда на изучаемый признак. Кроме того, полиплоидный вид берёзы (берёза пушистая, $2n=4x=56$) показывает превышение стандартного значения

(экспериментальное значение 0,305; V класс оценки (критическое состояние окружающей среды) - 0,054). Таким образом полиплоидные виды деревьев могут реагировать в нормальных условиях среды, без антропогенной нагрузки, высоким уровнем морфологической изменчивости. Это может быть связано с эволюционным фенотипическим разнообразием, которое позволяет полиплоидному (тетраплоидному) виду приспособиться новым экологическим нишам или суровым условиям произрастания, а также позволяет иметь более высокий адаптивный потенциал и селекционную значимость по сравнению с диплоидными видами. В свете полученных данных предлагается ограничить использование индекса ФА при оценке качества окружающей среды для гибридов, селекционных и мутантных форм в роде Берёза. Однофакторный дисперсионный анализ показал, что длина листовой пластинки у высокосамофертильных форм берёзы пушистой достоверно различается при разных способах опыления, это может говорить о разных общих площадях листовой поверхности у этих селекционных форм. Длина листовых пластинок у берёзы пушистой при разных способах опыления незначительно превышала таковую у берёзы повислой аналогичного происхождения. В целом статистически подтверждена фенотипическая нестабильность вегетативных органов (на примере листовой пластинки) у полиплоидного вида берёзы по сравнению с диплоидным.

Список литературы

1. Smith S. W., Cavers S., Diez E. et al. Species, genes and epigenetics: how dimensions of diversity interact for forest resilience. *Quarterly Journal of Forestry*. 2025; 119(4): 241-248.
2. Ananthawat-Jónsson K. Hybrid introgression: the outcomes of gene flow in birch. *ScienceAsia*. 2019; 45: 203-211. DOI: 10.2306/scienceasia.

3. Ashburner K., McAllister H. A. The Genus *Betula*: A Taxonomic Revision of Birches. London: Kew Publishing, 2016. 21 p.
4. Zhang H., Ding J., Holstein N. et al. *Betula mcallisteri* sp. nov. (sect. *Acuminatae*, *Betulaceae*), a new diploid species overlooked in the wild and in cultivation, and its relation to the widespread *B. luminifera*. *Front. Plant Sci.* 2023; 14: 1113274. DOI: 10.3389/fpls.2023.1113274.
5. Aihara T., Araki K., Tsumura Y. Cryptic diploid lineage of *Betula ermanii* at its southern boundary populations in Japan. *PLoS ONE.* 2024; 19(7): e0307023. DOI: 10.1371/journal.pone.0307023.
6. Brun Usan M., Nunes-da-Fonseca R., Kavanagh K.D. et al. Eco-evo-devo: an emergent integrative discipline of biology. *Front. Cell Dev. Biol.* 2025; 13: 1681036. DOI: 10.3389/fcell.2025.1681036.
7. Vanadzina K., Street S. E., Healy S.D. et al. Global drivers of variation in cup nest size in passerine birds. *Journal of Animal Ecology.* 2023; 92: 338-351. DOI: 10.1111/1365-2656.13815.
8. Nematı S., Singh A., Dhuey S.D. et al. Density fluctuations, homeostasis, and reproduction effects in bacteria. *Communications Biology.* 2022; 5(1): 397.
9. Steinberg S., Grinberg M., Beitelman M. et al. Two-way microscale interactions between immigrant bacteria and plant leaf microbiota as revealed by live imaging. *The ISME Journal.* 2020: 409-420. DOI: 10.1038/s41396-020-00767-z.
10. Szilágyi A., Szabó P., Santos M., Szathmáry E. Phenotypes to remember: Evolutionary developmental memory capacity and robustness. *PLoS Comput Biol.* 2020; 16(11): e1008425. DOI: 10.1371/journal.pcbi.1008425.
11. Kirschner M. W., Gerhart J. C. *The Plausibility of Life: Resolving Darwin's Dilemma.* Yale University Press, 2020. 336 p.
12. Carleial R., Charters M., Finzgar D., Swift P. et al. Genetic basis of traits and local adaptation in UK silver birch. *bioRxiv.* 2025: 38 p. DOI: 10.1101/2025.07.04.662749.
13. Корона В.В., Васильев А.Г. Строение и изменчивость листьев растений: Основы модульной теории. – 2-е изд., испр. и доп. – Екатеринбург: УрО РАН, 2007. – 280 с.
14. Сапельникова И.И. Оценка многолетних фенологических данных некоторых древесно-кустарниковых видов в Воронежском заповеднике // Труды Воронежского государственного заповедника. – 2023. – Вып. XXXI. – С. 174-228.
15. Rodríguez-Castilla G., Carpio A. J., Bastias C. C. et al. Leaf functional traits as browsing indicators in understory woody species of Mediterranean forests. *Forest Ecology and Management.* 2025; 598: 1-11. DOI: 10.1016/j.foreco.2025.123230.
16. Hamann E., Pauli C., Joly-Lopez Z. et al. Rapid evolutionary changes in gene expression in response to climate fluctuations. *Molecular Ecology.* 2020; 30(1): 193-206. DOI: 10.1111/mec.15583.
17. Seppälä J., Heinonen T., Pukkala T. et al. Effect of increased wood harvesting and utilization on required greenhouse gas displacement factors of wood-based products and fuels. *Journal of environmental management.* 2019. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.06.031.
18. Poorter H., Niinemets U., Ntagkas N. et al. A meta-analysis of plant responses to light intensity for 70 traits ranging from molecules to whole plant performance. *New Phytologist.* 2019; 223: 1073-1105. DOI: 10.1111/nph.15754.
19. Мигалина С. В., Калашникова И. В. Структура мезофилла листа и биомасса берез из разных природно-климатических зон Северной Евразии // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. – 2023. – Т. 22, № 1. – С. 221-224.
20. Юдина П. К., Иванов Л. А., Ронжина Д. А. и др. Влияние систематического положения на уровне семейства на функциональные черты листьев степных растений // Сибирский экологический журнал. – 2020. – № 5. – С. 647-661. – DOI: 10.15372/SEJ20200508.
21. Whiting J. R., Booker T. R., Rougeux C. et al. The genetic architecture of repeated local adaptation to climate in distantly related plants. *Nature Ecology & Evolution.* 2024; 8: 1933-1947. DOI: 10.1038/s41559-024-02514-5.
22. Ray D., Berlin M., Alia R. et al. Transformative changes in tree breeding for resilient forest restoration. *Front. For. Glob. Change.* 2022; 5: 1005761. DOI: 10.3389/ffgc.2022.1005761.
23. Huang Z., Fu C., Li C. et al. Distributional Responses of Five *Betula* (*Betulaceae*) Species to Future Climate Change in China. *Forests.* 2025; 16(3): 400. DOI: 10.3390/f16030400.
24. Ananthawat-Jónsson K., Karlsdóttir L., Þórsson Æ. et al. Microscopical palynology: Birch woodland expansion and species

- hybridisation coincide with periods of climate warming during the Holocene epoch in Iceland. *Journal of Microscopy*. 2023; 291(1): 128-141. DOI: 10.1111/jmi.13175.
25. Xu W., Chen S., Jiang J. et al. Expression profiling of the BpIAA gene family and the determination of IAA levels in *Betula platyphylla* tetraploids. *J. For. Res.* 2019; 30: 855-867. DOI: 10.1007/s11676-018-0670-1.
 26. Hou J., Liu M., Yang K. et al. Genetic variation for adaptive evolution in response to changed environments in plants. *J. Integr. Plant Biol.* 2025; 67: 2265-2293.
 27. Козлов М.В. Исследования флуктуирующей асимметрии растений в России: мифология и методология // *Экология*. – 2017. – № 1. – С. 3-12. – DOI: 10.7868/S0367059717010103.
 28. Опекунова М. Г. Сравнительный анализ эффективности методов биоиндикации при мониторинговых исследованиях состояния окружающей среды в Санкт-Петербурге // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*. – 2023. – Т. 68, № 2. – DOI: 10.21638/spbu07.2023.207.
 29. Методические рекомендации по выполнению оценки качества среды по состоянию живых существ (оценка стабильности развития живых организмов по уровню асимметрии морфологических структур). – М.: Мин-во природных ресурсов РФ, гос. служба охраны ООС (Росэкология), 2003. – 25 с.
 30. Leal J.L., Milesi P., Hodková E. et al. Complex Polyploids: Origins, Genomic Composition, and Role of Introgressed Alleles. *Syst Biol.* 2024; 73(2): 392-418. DOI: 10.1093/sysbio/syae012.
 31. Исаков И.Ю., Шестибратов К.А. Фенотипическая пластичность и селекционно-репродуктивные особенности биоресурсной коллекции рода *Betula L.* в Воронежской области // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2025; 252: 260-277. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.260-277.
 32. Шадрина Е.Г., Солдатова В.Ю. Оценка здоровья среды по величине флуктуирующей асимметрии древесных растений: анализ возможных причин искажения результатов // *Известия Российской академии наук. Серия биологическая*. 2023; 7: 29-38. DOI: 10.31857/S1026347023600243.

References

1. Smith S. W., Cavers S., Diez E. et al. Species, genes and epigenetics: how dimensions of diversity interact for forest resilience. *Quarterly Journal of Forestry*. 2025; 119(4):241-248.
2. Ananthawat-Jónsson K. Hybrid introgression: the outcomes of gene flow in birch. *ScienceAsia*. 2019;45:203-211. DOI: 10.2306/scienceasia1513-1874.2019.45.203.
3. Ashburner K., McAllister H. A. *The Genus Betula: A Taxonomic Revision of Birches*. London: Kew Publishing; 2016. 431 p.
4. Zhang H., Ding J., Holstein N. et al. *Betula mcallisteri* sp. nov. (sect. *Acuminatae*, *Betulaceae*), a new diploid species overlooked in the wild and in cultivation, and its relation to the widespread *B. luminifera*. *Frontiers in Plant Science*. 2023;14:1113274. DOI: 10.3389/fpls.2023.1113274.
5. Aihara T., Araki K., Tsumura Y. Cryptic diploid lineage of *Betula ermanii* at its southern boundary populations in Japan. *PLoS ONE*. 2024;19(7):e0307023. DOI: 10.1371/journal.pone.0307023.
6. Brun Usan M., Nunes-da-Fonseca R., Kavanagh K. D. et al. Eco-evo-devo: an emergent integrative discipline of biology. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*. 2025;13:1681036. DOI: 10.3389/fcell.2025.1681036.
7. Vanadzina K., Street S. E., Healy S. D. et al. Global drivers of variation in cup nest size in passerine birds. *Journal of Animal Ecology*. 2023;92:338-351. DOI: 10.1111/1365-2656.13815.
8. Nemati S., Singh A., Dhuey S. D. et al. Density fluctuations, homeostasis, and reproduction effects in bacteria. *Communications Biology*. 2022;5:397. DOI: 10.1038/s42003-022-03353-5.
9. Steinberg S., Grinberg M., Beitelman M. et al. Two-way microscale interactions between immigrant bacteria and plant leaf microbiota as revealed by live imaging. *The ISME Journal*. 2020;14:409-420. DOI: 10.1038/s41396-020-00767-z.
10. Szilágyi A., Szabó P., Santos M., Szathmáry E. Phenotypes to remember: Evolutionary developmental memory capacity and robustness. *PLoS Computational Biology*. 2020;16(11):e1008425. DOI: 10.1371/journal.pcbi.1008425.

11. Kirschner M. W., Gerhart J. C. *The Plausibility of Life: Resolving Darwin's Dilemma*. New Haven: Yale University Press; 2020. 336 p.
12. Carleial R., Charters M., Finzgar D., Swift P. et al. Genetic basis of traits and local adaptation in UK silver birch. *bioRxiv*. 2025;38 p. DOI: 10.1101/2025.07.04.662749.
13. Korona V. V., Vasil'ev A. G. *Stroenie i izmenchivost' list'ev rasteniy: Osnovy modul'noy teorii* [Structure and variability of plant leaves: Fundamentals of modular theory]. 2nd ed. Yekaterinburg: UrO RAN; 2007. 280 p. (In Russ.).
14. Sapel'nikova I. I. Otsenka mnogoletnikh fenologicheskikh dannykh nekotorykh drevesno-kustarnikovykh vidov v Voronezhskom zapovednike [Assessment of long-term phenological data of some tree and shrub species in the Voronezh Reserve]. *Trudy Voronezhskogo gosudarstvennogo zapovednika = Proceedings of the Voronezh State Reserve*. 2023;XXXI:174-228. (In Russ.).
15. Rodríguez-Castilla G., Carpio A. J., Bastias C. C. et al. Leaf functional traits as browsing indicators in understory woody species of Mediterranean forests. *Forest Ecology and Management*. 2025;598:1-11. DOI: 10.1016/j.foreco.2025.123230.
16. Hamann E., Pauli C., Joly-Lopez Z. et al. Rapid evolutionary changes in gene expression in response to climate fluctuations. *Molecular Ecology*. 2020;30(1):193-206. DOI: 10.1111/mec.15583.
17. Seppälä J., Heinonen T., Pukkala T. et al. Effect of increased wood harvesting and utilization on required greenhouse gas displacement factors of wood-based products and fuels. *Journal of Environmental Management*. 2019;241:587-597. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.06.031.
18. Poorter H., Niinemets Ü., Ntagkas N. et al. A meta-analysis of plant responses to light intensity for 70 traits ranging from molecules to whole plant performance. *New Phytologist*. 2019;223:1073-1105. DOI: 10.1111/nph.15754.
19. Migalina S. V., Kalashnikova I. V. *Struktura mezofilla lista i biomassa berez iz raznykh prirodno-klimaticheskikh zon Severnoy Evrazii* [Leaf mesophyll structure and biomass of birches from different natural and climatic zones of Northern Eurasia]. *Problemy botaniki Yuzhnoy Sibiri i Mongolii = Problems of Botany of South Siberia and Mongolia*. 2023;22(1):221-224. (In Russ.).
20. Yudina P. K., Ivanov L. A., Ronzhina D. A. i dr. *Vliyanie sistemnogo polozheniya na urovne semeystva na funktsional'nye cherty list'ev stepnykh rastenij* [Influence of systematic position at the family level on functional traits of steppe plant leaves]. *Sibirskiy ekologicheskij zhurnal = Siberian Ecological Journal*. 2020;5:647-661. (In Russ.). DOI: 10.15372/SEJ20200508.
21. Whiting J. R., Booker T. R., Rougeux C. et al. The genetic architecture of repeated local adaptation to climate in distantly related plants. *Nature Ecology & Evolution*. 2024;8:1933-1947. DOI: 10.1038/s41559-024-02514-5.
22. Ray D., Berlin M., Alia R. et al. Transformative changes in tree breeding for resilient forest restoration. *Frontiers in Forests and Global Change*. 2022;5:1005761. DOI: 10.3389/ffgc.2022.1005761.
23. Huang Z., Fu C., Li C., Yang X. et al. Distributional Responses of Five *Betula* (Betulaceae) Species to Future Climate Change in China. *Forests*. 2025;16:400. DOI: 10.3390/f16030400.
24. Ananthawat-Jónsson K., Karlsdóttir L., Thórsson Æ. et al. Microscopical palynology: Birch woodland expansion and species hybridisation coincide with periods of climate warming during the Holocene epoch in Iceland. *Journal of Microscopy*. 2023;291(1):128-141. DOI: 10.1111/jmi.13175.
25. Xu W., Chen S., Jiang J. et al. Expression profiling of the BpIAA gene family and the determination of IAA levels in *Betula platyphylla* tetraploids. *Journal of Forestry Research*. 2019;30:855-867. DOI: 10.1007/s11676-018-0670-1.
26. Hou J., Liu M., Yang K. et al. Genetic variation for adaptive evolution in response to changed environments in plants. *Journal of Integrative Plant Biology*. 2025;67:2265-2293.
27. Kozlov M. V. *Issledovaniya fluktuiruyushchej asimmetrii rastenij v Rossii: mifologiya i metodologiya* [Studies of fluctuating asymmetry of plants in Russia: mythology and methodology]. *Ekologiya = Russian Journal of Ecology*. 2017;1:3-12. (In Russ.). DOI: 10.7868/S0367059717010103.

28. Opekunova M. G. Sravnitel'nyj analiz effektivnosti metodov bioindikacii pri monitoringovyh issledovaniyah sostoyaniya okruzhayushchej sredy v Sankt-Peterburge [Comparative analysis of the effectiveness of bioindication methods in monitoring studies of the environmental condition in St. Petersburg]. Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle = Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences. 2023;68(2). (In Russ.). DOI: 10.21638/spbu07.2023.207.
29. Metodicheskie rekomendacii po vypolneniyu ocenki kachestva sredy po sostoyaniyu zhivyh sushchestv (ocenka stabil'nosti razvitiya zhivyh organizmov po urovnyu asimmetrii morfologicheskikh struktur) [Guidelines for environmental quality assessment based on the state of living beings (assessment of the developmental stability of living organisms by the level of morphological structure asymmetry)]. Moscow: Min-vo prirodnih resursov RF, gos. sluzhba ohrany OOS (Rosekologiya); 2003. 25 p. (In Russ.).
30. Leal J. L., Milesi P., Hodková E. et al. Complex Polyploids: Origins, Genomic Composition, and Role of Introgressed Alleles. Systematic Biology. 2024;73(2):392-418. DOI: 10.1093/sysbio/syae012.
31. Isakov I. Yu., Shestibratov K. A. Fenotipicheskaya plastichnost' i selekcionno-reproduktivnye osobennosti bioresursnoj kollekcii roda Betula L. v Voronezhskoj oblasti [Phenotypic plasticity and selection-reproductive features of the bioresource collection of the genus Betula L. in the Voronezh region]. Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii = Bulletin of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy. 2025;252:260-277. (In Russ.). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.260-277.
32. Shadrina E. G., Soldatova V. Yu. Ocenka zdorov'ya sredy po velichine fluktuiruyushchej asimmetrii drevesnyh rastenij: analiz vozmozhnyh prichin iskazheniya rezul'tatov [Assessment of environmental health by the value of fluctuating asymmetry of woody plants: analysis of possible causes of result distortion]. Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya biologicheskaya = Biology Bulletin. 2023;7:29-38. (In Russ.). DOI: 10.31857/S1026347023600243.

Сведения об авторах

✉ *Исаков Игорь Юрьевич* – доктор с.-х. наук, профессор кафедры лесной генетики, биотехнологии и физиологии растений, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф.Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2927-3275>, e-mail: labgen@vglta.vrn.ru

Шестибратов Константин Александрович – кандидат биологических наук, руководитель группы лесной биотехнологии Филиала ГНЦ ИБХ РАН, Проспект Науки 6, г. Пушкино, Российская Федерация., ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1996-6433>, e-mail: schestibratov.k@yandex.ru

Information about the authors

✉ *Igor Yu. Isakov* – Professor of the Department of Forest Genetics, Biotechnology and Physiology of Plants, Doctor of Agricultural Sciences, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 394087, Voronezh, Russian Federation

Konstantin A. Shestibratov – Head of forest biotechnology group, PhD, Branch of the Shemyakin-Ovchinnikov Institute of Bioorganic Chemistry of the Russian Academy of Sciences, 142290, Pushchino, Russian Federation

✉ Для контактов | Corresponding author