

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПИГМЕНТНОГО СОСТАВА ЛИСТЬЕВ БЕРЕЗЫ КАРЕЛЬСКОЙ (*BETULA PENDULA* VAR. *CARELICA* MERCKL.) И БЕРЕЗЫ ПОВИСЛОЙ (*BETULA PENDULA* ROTH)

Н.Н. Бессчетнова^{1✉}, В.П. Бессчетнов¹, Р.Н. Бабаев², А.Н. Бабаев³

¹ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный агротехнологический университет имени Л.Я. Флорентьева», Россия, 603107, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 97

²Союз лесовладельцев Нижегородской области, Россия, 603005, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, д. 9, оф. 203

³Министерство лесного хозяйства и охраны объектов животного мира Нижегородской области, Россия, 603134, г. Нижний Новгород, ул. Костина, д. 2

besschetnova1966@mail.ru

Представлены результаты исследования пигментного состава листьев представителей рода Береза (*Betula* L.): березы повислой (*Betula pendula* Roth) и березы карельской (*Betula pendula* var. *carelica* Merckl.). Установлены незначительные различия средних значений суммарного содержания пигментов каждого исследованного растения. Выявлено незначительное преимущество содержания пластидных пигментов у аборигенного вида по сравнению с интродуцированным. Определено преобладание хлорофилла *b* над хлорофиллом *a* у обоих растений. Зафиксированы различия изученных представителей рода Береза по содержанию и соотношению пластидных пигментов, подтверждена их существенность. Отмечено достоверное влияние различий в принадлежности сравниваемых образцов к типичной форме и разновидности березы с декоративной текстурой древесины на формирование фенотипической изменчивости. Доказаны обусловленность генотипическая фенотипических различий изученных представителей рода Береза по содержанию и соотношению пластидных пигментов и фактическая обособленность их близкого произрастания в однородных лесных условиях. Указано сильное влияние неорганизованных факторов, иногда имеющих преобладающий характер.

Ключевые слова: береза карельская, береза повислая, листовой аппарат, пигментный состав, хлорофилл *a*, хлорофилл *b*, каротиноиды

Ссылка для цитирования: Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П., Бабаев Р.Н., Бабаев А.Н. Сравнительная оценка пигментного состава листьев березы карельской (*Betula pendula* var. *carelica* Merckl.) и березы повислой (*Betula pendula* Roth) // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2025. Т. 29. № 3. С. 5–16. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-3-5-16

Последовательная реализация целей, указанных в распоряжении Правительства РФ от 11 февраля 2021 года № 312-р «Об утверждении Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года», предусматривает неуклонное расширение перечня товаров, производимых из древесного сырья, и повышение их качества. Наряду с совершенствованием и модернизацией технологий и инструментальной базы деревообработки немаловажное значение имеет обеспечение предприятий отрасли высокосортной древесиной, в том числе посредством приоритетной эксплуатации целевых промышленных плантаций. Их видовой состав на современном этапе можно существенно улучшить, вовлекая в хозяйственный оборот наиболее востребованные древесные породы, в частности многочислен-

ных представителей рода Береза (*Betula* L.) [1–6], выступающих как аборигенами, так и экзотами на обширной территории Российской Федерации. Эти породы широко распространены в условиях умеренного климата Северного полушария. Как обладатели хозяйственно важных признаков представители рода Береза исследуются по разным направлениям [1–15]. В Нижегородском Поволжье сформированы естественные насаждения березы повислой (*Betula pendula* Roth) и созданы искусственные посадки различного целевого назначения ее формы — березы карельской (*Betula pendula* var. *carelica* Merckl.), выступающей интродуцентом. Однако регионально ориентированных исследований биологических особенностей и экологических реакций березы карельской в условиях Нижегородской области крайне недостаточно и исследования весьма ограничены [1–3].

Цель работы

Цель работы — сравнительная оценка пигментного состава листьев березы карельской и березы повислой, формирующегося в лесорастительных условиях Правобережья Нижегородской области.

Материалы и методы

Объекты исследования: аборигенный вид — береза повислая и ее форма, являющаяся для Нижегородской области интродуцентом, — береза карельская. Обследованные объекты дислоцированы в Нижегородской области — городской округ Арзамас, Кирилловский сельсовет. Насаждение березы повислой естественное, имеет 5-й класс возраста, его координаты: 55.438365° с. ш., 43.918564° в. д. Участок с искусственными посадками березы карельской расположен вблизи аборигенного вида, создан в 1976 г. сеянцами, выращенными из семян, полученных из Архангельска, и имеет координаты 55.438074° с. ш., 43.917924° в. д. Близость произрастания объектов свидетельствует о выравниваемости условий их произрастания.

Предмет исследования: особенности сравниваемых разновидностей березы по содержанию и балансу пластидных пигментов, участвующих в фотосинтезе.

Методологическая платформа организации работ базировалась на принципе единственного логического различия и базовых требованиях к организации опыта. Реализация программы предусматривала привлечение полевых стационарных и лабораторных методов. Теоретической платформой построения рабочих методик служили фундаментальные и современные публикации по указанной тематике, касающиеся лиственных [16–18], хвойных [19–21] деревьев [22, 23] и кустарников [24, 25].

Содержание и соотношение различных форм хлорофилла и каротиноидов в листовом аппарате традиционно являются информативным признаком сравнительной оценки древесных видов [26, 27]. Достаточно результативным и весьма точным методом исследования пигментного состава листового аппарата признан спектрофотометрический анализ [22, 23, 28–38], позволяющий оценить концентрацию пигментов по оптической плотности вытяжки из измельченной листовой пластины в 96%-м этаноле.

Лабораторный анализ выполнен в аналитической лаборатории ФГБОУ ВО НГТУ им. Л.Я. Флорентьева. В первую очередь были выполнены нарезка и взвешивание листовых пластин массой 1 г на лабораторных электрон-

ных весах модели Acculab VICON VIC-300d3 (точность до 0,001 г) с последующим измельчением и перемалыванием навески до размера частиц 30...40 мкм. В ходе измельчения в фарфоровую ступку к листовой массе для лучшего растирания добавляли крошку стекла и для нейтрализации клеточного сока крошку карбоната кальция CaCO_3 . Получившуюся субстанцию через два слоя фильтровальной бумаги переносили в мерные стаканы объемом 50 мл. В целях недопущения разрушения хлорофилла работы проводились в затемненном помещении, а полученный экстракт помещался на отстой в темный шкаф на 1–2 ч. Когда субстанция отстаивалась, ее переносили в кварцевую кювету объемом 4 мл и длиной оптического пути 10 мм, после чего кювету с экстрактом и контрольную кювету с 96%-м этанолом помещали в спектрофотометр СФ-2000 с программным обеспечением GRASS GIS 7.6.1 / QGIS 3.4, позволяющим строить на мониторе компьютера спектры поглощения и фиксировать их максимумы. Оценку давали при длинах волн: 665 нм (хлорофилл *a*), 649 нм (хлорофилл *b*), 452,5 нм (каротиноиды). Концентрацию рассчитывали по уравнениям Ветштейна — Хольма для оптически чистого 96%-го этанола, примененного в опыте [22, 23, 28–38].

Проведение работ и формирование выборок осуществлено в соответствии с общепринятыми методическими рекомендациями [39–41]. Для перерасчета содержания анализируемых пигментов листового аппарата на единицу сухого вещества определяли его наличие в каждой навеске листовых пластин после высушивания до абсолютно сухого состояния в лабораторных сушижаровых шкафах HS 61 А. Обработка полученных данных осуществлялась в программе Excel [42]. Статистический и дисперсионный анализы выполнены с учетом существующих методических разработок [39–41, 43, 44].

Результаты и обсуждение

Выполненные экспериментальные работы показали заметные различия в пигментном составе исследованных видов березы (рис. 1–4).

По содержанию хлорофилла *a* в листовом аппарате наибольшее среднее значение наблюдается у дерева 4 березы карельской — $0,887 \pm 0,03$ мг/г, а наименьший — у дерева 9 этой же породы — $0,571 \pm 0,02$ мг/г. Береза повислая имеет более умеренное содержание хлорофилла *a* — в среднем $0,815 \pm 0,01$ мг/г, а диапазон значений составляет 0,447 мг/г, что практически в 2 раза меньше, чем у березы карельской — 0,827 мг/г (см. рис. 1).

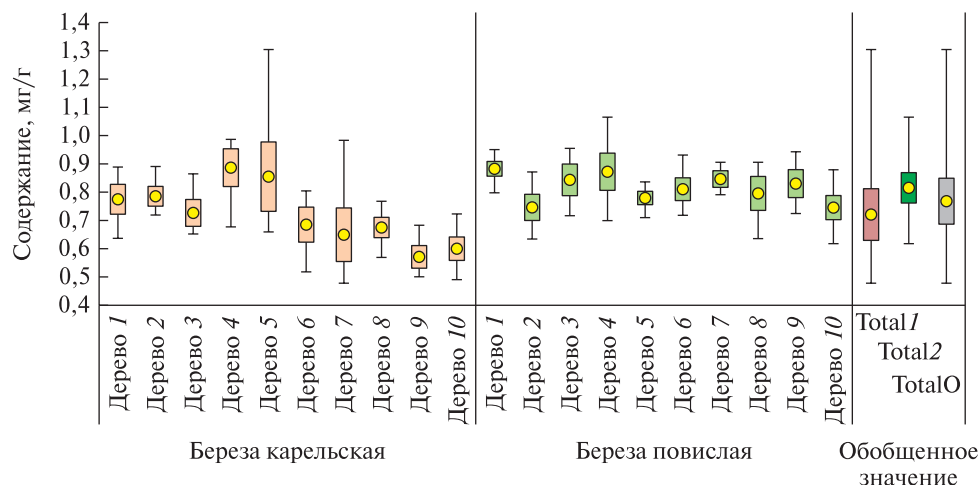


Рис. 1. Содержание хлорофилла *a* в листьях исследованных видов березы (норма $M \pm 2/3\sigma$); здесь и на рис. 2–4: 1–10 учетные растения

Fig. 1. Chlorophyll *a* content in the leaves of the studied birch species (the norm is $M \pm 2/3\sigma$); here and in fig. 2–4: 1–10 accounting plants

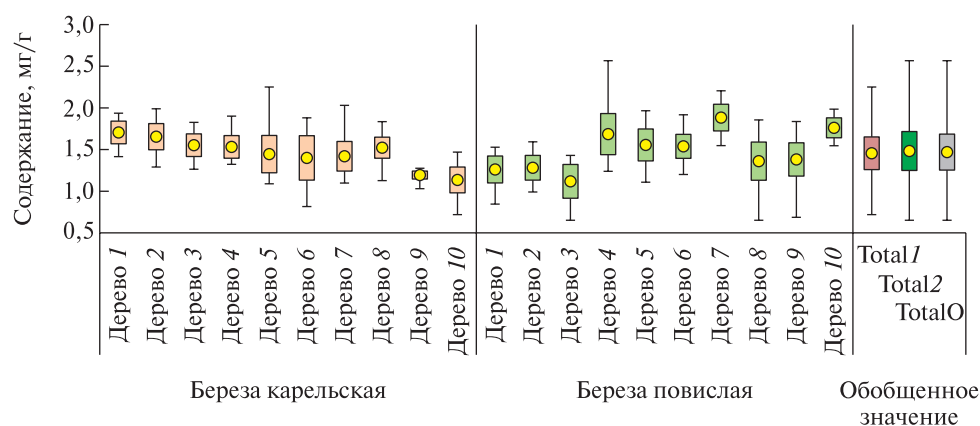


Рис. 2. Содержание хлорофилла *b* в листьях исследованных видов березы (норма $M \pm 2/3\sigma$)

Fig. 2. Chlorophyll *b* content in the leaves of the studied birch species (the norm is $M \pm 2/3\sigma$)

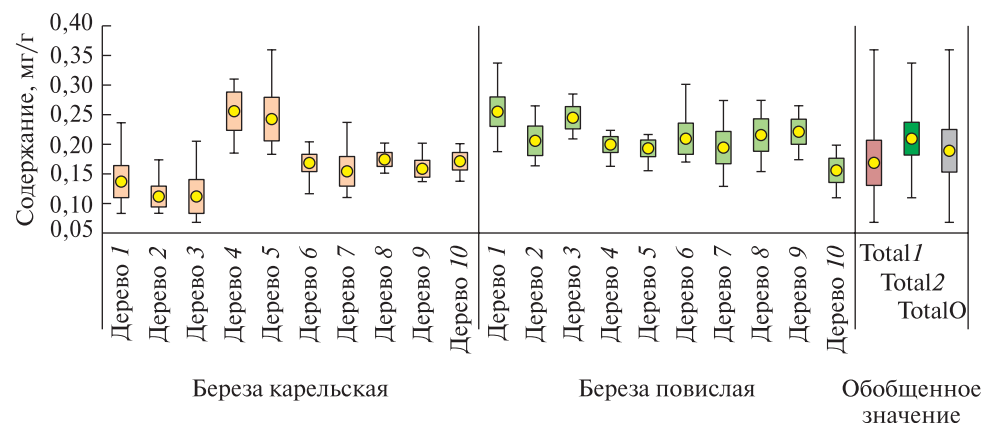


Рис. 3. Содержание каротиноидов в листьях исследованных видов березы (норма $M \pm 2/3\sigma$)

Fig. 3. Carotenoids content in the leaves of the studied birch species (the norm is $M \pm 2/3\sigma$)

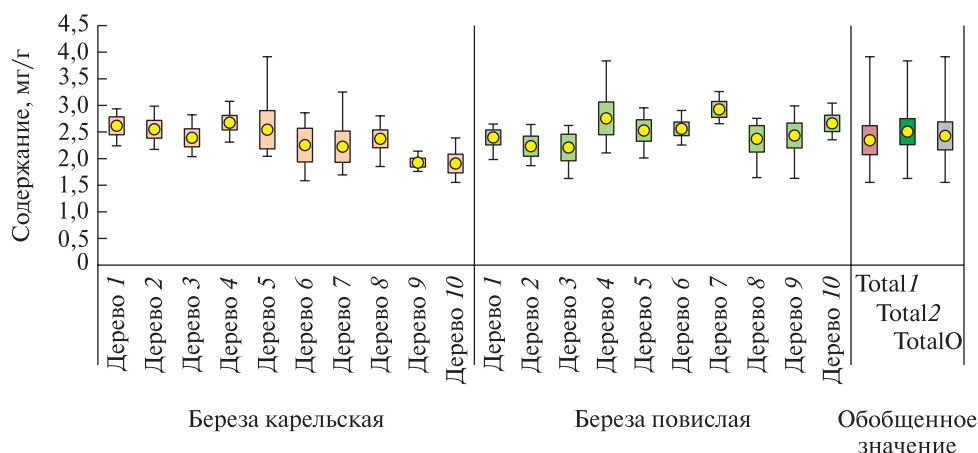


Рис. 4. Суммарное содержание пигментов в листьях исследованных видов березы (норма $M \pm 2/3\sigma$)

Fig. 4. The total content in the leaves of the studied birch species (the norm is $M \pm 2/3\sigma$)

По содержанию хлорофилла *b* ситуация обратная. Более умеренный средний разброс значений имеет береза карельская — 1,53 мг/г. Минимум ($1,119 \pm 0,1$ мг/г) и максимум ($1,883 \pm 0,08$ мг/г) содержания хлорофилла *b* наблюдается у березы повислой (деревья 3 и 7 соответственно). При этом следует отметить близость средних значений содержания этого пигмента в обоих случаях: у березы карельской — $1,456 \pm 0,03$ мг/г, у березы повислой — $1,483 \pm 0,04$ мг/г (см. рис. 2).

Содержание каротиноидов менее стабильно по сравнению с другими пигментами. В этом случае минимум средних значений ($0,112 \pm 0,01$ мг/г), отмеченный у деревьев 2 и 3 березы карельской, в 2,3 раза меньше максимального показателя ($0,256 \pm 0,02$ мг/г), который наблюдался у дерева 4 того же вида. При этом общий диапазон лимитов рассматриваемой характеристики листового аппарата составляет у березы карельской — 0,292 мг/г, а у березы повислой — 0,228 мг/г.

По суммарному содержанию пигментов средние значения каждого исследованного растения имеют незначительные различия: береза карельская — $2,346 \pm 0,04$ мг/г и береза повислая — $2,508 \pm 0,04$ мг/г. Рассмотренный выше разброс значений по каротиноидам нивелировался за счет относительной выравниваемости значений по другим пигментам. Общей тенденцией явилось то, что по сумме всех пигментов в листовом аппарате средние значения каждого из исследуемых деревьев так или иначе стремятся к общему среднему по опыту значению — $2,457 \pm 0,03$ мг/г. При этом итоговый максимум данного параметра листового аппарата отмечен у дерева 8 березы повислой

($2,924 \pm 0,07$ мг/г), а минимум — у дерева 10 березы карельской ($1,908 \pm 0,08$ мг/г).

Двухфакторный иерархический дисперсионный анализ, который вполне применим к многоуровневым комплексам, состоящим из разновидностей березы и представляющим их особей, позволил получить отдельные оценки эффективности влияния на формирование общего фона фенотипической изменчивости каждого из организованных факторов — в данном случае формовой принадлежности (А), индивидуальных различий исследуемых деревьев (повторности) (В), их взаимодействия (АВ), а также неорганизованного фактора (Z), вызывающего внутригрупповую или остаточную дисперсию, индуцированную пестротой фона не учитываемых в опыте внешних факторов (табл. 1).

Введенные в дисперсионный анализ сравнения разновидностей березы указывают на наличие существенных различий между ними (по фактору А) практически по всем исследуемым признакам от 7,44 (признак 3) до 69,4 (признак 4). По содержанию хлорофилла *b* (признак 2) влияние фактора А оказалось недостоверным (0,52 при $F_{A05/01} = 3,96/6,96$). Индивидуальные различия исследуемых деревьев (фактор В) оказались достоверными по всем исследуемым признакам. Опытные значения критерия Фишера, принимая значения от 3,40 (признак 2) до 11,91 (признак 6), превышают соответствующие минимально допустимые пределы на 5%-м и 1%-м уровне значимости. Влияние фактора В находится в диапазоне: от $10,16 \pm 4,49$ % (по Плохинскому) и $5,96 \pm 4,70$ % (по Снедекору) у признака 2 до $24,84 \pm 3,76$ % (по Плохинскому) и $18,32 \pm 4,08$ % (по Снедекору)

Т а б л и ц а 1

**Двухфакторный дисперсионный анализ содержания
пластидных пигментов и сухого вещества в листовой массе**
Two-factor dispersion analysis of the content of plastid pigments and dry matter in the leaf mass

Содержание	Источник дисперсии, факторы влияния	Опытный критерий Фишера $F_{оп}$	Доля влияния фактора			
			По Плохинскому		По Снедекору	
			сила влияния фактора	ошибка показателя силы влия- ния фактора	сила влияния фактора	ошибка показателя силы влия- ния фактора
Хлорофилл <i>a</i> (признак 1)	Формы березы (А)	61,36	0,1513	0,0047	0,2192	0,0043
	Особи (В)	10,51	0,2331	0,0383	0,1727	0,0414
	Взаимодействие (АВ)	7,75	0,1719	0,0414	0,2450	0,0377
	Остаток (Z)	—	0,4437	0,5563	0,3631	0,6369
Хлорофилл <i>b</i> (признак 2)	Формы березы (А)	0,52	0,0017	0,0055	–0,0024	0,0056
	Особи (В)	3,40	0,1016	0,0449	0,0596	0,0470
	Взаимодействие (АВ)	9,96	0,2980	0,0351	0,4455	0,0277
	Остаток (Z)	—	0,5986	0,4014	0,4973	0,5027
Сумма хлорофиллов <i>a</i> и <i>b</i> (признак 3)	Формы березы (А)	7,44	0,0243	0,0054	0,0320	0,0054
	Особи (В)	4,38	0,1288	0,0436	0,0839	0,0458
	Взаимодействие (АВ)	8,79	0,2585	0,0371	0,3871	0,0306
	Остаток (Z)	—	0,5883	0,4117	0,4970	0,5030
Каротиноиды (признак 4)	Формы березы (А)	69,40	0,1443	0,0048	0,1844	0,0045
	Особи (В)	7,94	0,1486	0,0426	0,0935	0,0453
	Взаимодействие (АВ)	17,78	0,3328	0,0334	0,4525	0,0274
	Остаток (Z)	—	0,3743	0,6257	0,2696	0,7304
Сумма пластидных пигментов (признак 5)	Формы березы (А)	12,74	0,0422	0,0053	0,0607	0,0052
	Особи (В)	4,88	0,1456	0,0427	0,1003	0,0450
	Взаимодействие (АВ)	7,23	0,2157	0,0392	0,3222	0,0339
	Остаток (Z)	—	0,5965	0,4035	0,5168	0,4832
Сухое вещество (признак 6)	Формы березы (А)	53,94	0,1251	0,0049	0,1778	0,0046
	Особи (В)	11,91	0,2484	0,0376	0,1832	0,0408
	Взаимодействие (АВ)	10,03	0,2092	0,0395	0,3032	0,0348
	Остаток (Z)	—	0,4173	0,5827	0,3358	0,6642

Примечание. Здесь и в табл. 2: F_{05}/F_{01} — табличные значения критерия Фишера на 5%-м и 1%-м уровнях значимости ($F_{A05/01} = 3,96/6,96$; $F_{B05/01} = 1,99/2,64$; $F_{AB05/01} = 1,99/2,64$).

у признака 6. Эффект взаимодействия организованных факторов (фактор АВ) по всем рассматриваемым признакам оказался статистически значимым и был способен вызывать формирование существенных различий. Наибольшая результативность данного эффекта достигается у признака 4: $33,28 \pm 3,34$ % (по Плохинскому) и $45,25 \pm 2,74$ % (по Снедекору). По исследуемым признакам (см. табл. 1) весьма отчетливо прослеживается доминирующее влияние фоновой пестроты неучитываемых в опыте внешних факторов, к которым справедливо можно отнести условия местопроизрастания исследуемых объектов (фактор Z). На его долю приходится соответственно от 37,43 % (признак 4) до 59,86 % (признак 2).

Результаты двухфакторного дисперсионного анализа по производным признакам содержания пигментов в листовом аппарате аналогичным способом представлены в табл. 2.

По содержанию как пластидных пигментов, так и сухого вещества в листьях разновидностей березы (см. табл. 1) их производные признаки проявились достаточно заметно (см. табл. 2). Разница в значениях исследуемых производных признаков содержания пластидных пигментов у березы повислой и березы карельской (фактор А) отчетливо выражена и уверенно выше табличных значений ($F_{A05/01} = 3,96/6,96$). Вместе с тем доля влияния фактора А незначительна и находится в диапазоне от $6,38 \pm 0,52$ % (по Плохинскому) и $7,78 \pm 0,51$ % (по Снедекору)

Т а б л и ц а 2

**Двухфакторный дисперсионный анализ соотношения показателей
содержания пластидных пигментов в листовой массе**

Two-way ANOVA of the ratio of indicators of the content of plastid pigments in the leaf mass

Содержание	Источник дисперсии, факторы влияния	Опытный критерий Фишера $F_{оп}$	Доля влияния фактора			
			По Плохинскому		По Снедекору	
			сила влияния фактора	ошибка показателя силы влия- ния фактора	сила влияния фактора	ошибка показателя силы влия- ния фактора
Отношение содержа- ния хлорофилла <i>a</i> к со- держанию хлорофилла <i>b</i> (признак 7)	Формы березы (А)	23,82	0,0749	0,0051	0,1059	0,0050
	Особи (В)	3,84	0,1086	0,0446	0,0659	0,0467
	Взаимодействие (АВ)	8,86	0,2506	0,0375	0,3644	0,0318
	Остаток (Z)	—	0,5659	0,4341	0,4639	0,5361
Отношение содержа- ния хлорофилла <i>a</i> к содержанию каротино- идов (признак 8)	Формы березы (А)	38,75	0,0638	0,0052	0,0778	0,0051
	Особи (В)	13,72	0,2035	0,0398	0,1311	0,0434
	Взаимодействие (АВ)	29,40	0,4360	0,0282	0,5851	0,0207
	Остаток (Z)	—	0,2966	0,7034	0,2060	0,7940
Отношение содержа- ния хлорофилла <i>b</i> к содержанию каротино- идов (признак 9)	Формы березы (А)	39,08	0,0820	0,0051	0,1004	0,0050
	Особи (В)	5,97	0,1127	0,0444	0,0655	0,0467
	Взаимодействие (АВ)	22,65	0,4276	0,0286	0,5706	0,0215
	Остаток (Z)	—	0,3777	0,6223	0,2636	0,7364
Доля содержания хло- рофилла <i>a</i> (признак 10)	Формы березы (А)	24,38	0,0739	0,0051	0,1051	0,0050
	Особи (В)	5,05	0,1379	0,0431	0,0911	0,0454
	Взаимодействие (АВ)	8,88	0,2423	0,0379	0,3542	0,0323
	Остаток (Z)	—	0,5459	0,4541	0,4496	0,5504
Доля содержания хло- рофилла <i>b</i> (признак 11)	Формы березы (А)	28,77	0,0799	0,0051	0,1061	0,0050
	Особи (В)	3,79	0,0948	0,0453	0,0533	0,0473
	Взаимодействие (АВ)	13,01	0,3252	0,0337	0,4586	0,0271
	Остаток (Z)	—	0,5000	0,5000	0,3820	0,6180
Доля содержания каро- тиноидов (признак 12)	Формы березы (А)	32,49	0,0716	0,0052	0,0861	0,0051
	Особи (В)	3,79	0,0752	0,0462	0,0382	0,0481
	Взаимодействие (АВ)	23,02	0,4565	0,0272	0,6022	0,0199
	Остаток (Z)	—	0,3967	0,6033	0,2735	0,7265
Отношение содержания каротиноидов к сум- марному содержанию хлорофилла <i>a</i> и хлоро- филла <i>b</i> (признак 13)	Формы березы (А)	31,34	0,0707	0,0052	0,0854	0,0051
	Особи (В)	3,57	0,0725	0,0464	0,0362	0,0482
	Взаимодействие (АВ)	22,20	0,4507	0,0275	0,5968	0,0202
	Остаток (Z)	—	0,4061	0,5939	0,2815	0,7185

у признака 8 до $8,20 \pm 0,51$ % (по Плохинскому) и $10,04 \pm 0,50$ % (по Снедекору) у признака 12.

Уровень дисперсии между исследуемыми деревьями (фактор В) заметно ниже, чем по разновидностям березы (фактор А). При этом табличные значения критерия Фишера ($F_{B05/01} = 1,99/2,64$) ниже полученных опытным путем. Влияния фактора В варьирует по Плохинскому от $7,25 \pm 4,64$ % (признак 13) до $20,35 \pm 3,98$ % (признак 8).

Взаимодействие организованных факторов (фактор АВ) оказалось также статистически значимым по всем исследуемым признакам. Все опытные значения критерия Фишера преодолели табличные значения как на 5%-м, так

и на 1%-м уровне значимости: при $F_{AB05/01} = 1,99/2,64$. Возможность нахождения оценок соответствующей дисперсии обеспечил следующий диапазон фактических значений: от 8,86 (признак 7) до 29,40 (признак 8). Ее наибольшее значение зафиксировано по доле содержания каротиноидов (признак 12) $45,65 \pm 2,72$ % (по Плохинскому) и $60,22 \pm 1,99$ % (по Снедекору), а наименьшее — по доле содержания хлорофилла *a* (признак 10) до $24,23 \pm 3,79$ % (по Плохинскому) и $35,42 \pm 3,23$ % (по Снедекору).

Влияние неорганизованного фактора (Z) иногда преобладало и достигало отметки 56,59 % (отношение содержания хлорофилла *a* к содержанию хлорофилла *b*). Данный

факт вполне логичен и объясняется тем, что пигментный состав и, соответственно, производные признаки от его наличия в листовых пластинках находятся в зависимости от внешних условий среды.

Выводы

Фенотипические различия изученных представителей рода березы по содержанию и соотношению пластидных пигментов обусловлены генотипически, что обосновано фактом их близкого произрастания на фоне однородных лесных условий. Двухфакторный дисперсионный анализ подтвердил факт различий между сравниваемыми формами и особями. Выявленный в процессе его реализации эффект влияния различных факторов на общую фенотипическую изменчивость позволил признать наличие генотипической обусловленности зарегистрированных видовых несходств по важнейшим характеристикам пигментного состава листовой массы исследованных видов. Однако наряду с межвидовыми различиями в эксперименте зафиксирована индивидуальная изменчивость особей, которую в определенной степени можно рассматривать как проявление внутривидового полиморфизма. Кроме того, в ряде случаев преобладает влияние неорганизованных факторов (до 59,86 %).

Список литературы

- [1] Бабаев Р.Н., Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П. Лигнификация ксилемы разных видов березы при интродукции в условиях Нижегородской области // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2021. № 235. С. 40–56.
- [2] Дерюгин А.А., Рыбакова Н.А., Глазунов Ю.Б. Модель формирования березово-еловых насаждений в условиях южной тайги Русской равнины // Изв. вузов. Лесной журнал, 2024. № 3. С. 23–45.
- [3] Егоров А.Б., Бубнов А.А., Постников А.М., Павлюченкова Л.Н. Биологическая, лесоводственная и экономическая эффективность ухода за березой с применением гербицида Магнум // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства, 2024. № 3. С. 86–97.
- [4] Tripepi R.R., Mitchell C.A. Metabolic response of river birch and European birch and European birch roots to hypoxia // Plant Physiology, 1984, v. 76, iss. 1, pp. 31–35. DOI 10.1104/pp.76.1.31
- [5] Pothier D., Margolis A. Analysis of growth and light interception of balsam fir and white birch saplings following precommercial thinning // Annals of Forest Science, 1991, v. 48, no. 2, pp. 123–132. DOI: 10.1051/forest:19910201
- [6] Zhao X.Y., Bian X.Y., Li Z.X., Wang X., Yang C.J., Liu G.F., Jiang J., Kentbayev Y., Kentbayeva B., Yang Ch.P. Genetic stability analysis of introduced *Betula pendula*, *B. kirghisorum* and *B. pubescens* families in saline-alkali soil of northeastern China // Scandinavian J. of Forest Research, 2014, no. 4, 26 p. DOI: 10.1080/02827581.2014.960892
- [7] Pedieu R., Riedl B., Pichette A. Properties of white birch (*Betula papyrifera*) outer bark particleboards with reinforcement of coarse wood particles in the core layer // Annals of Forest Science, 2008, v. 65, no. 7, pp. 1–9. DOI: 10.1051/forest:2008053
- [8] Kaitaniemi P., Lintunen A. Neighbor identity and competition influence tree growth in Scots pine, Siberian larch, and silver birch // Annals of Forest Science, 2010, v. 67, no. 6, pp. 1–7. DOI: 10.1051/forest/2010017
- [9] Behrend A.M., Pommerening A. Growing at the edge: Modelling sapling colonization, performance, and effective range of mountain birch (*Betula pubescens* ssp. *tortuosa*) // Ecological Modelling, 2025, v. 503, pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2025.111073
- [10] Грязькин А.В., Самсонова И.Д., Новикова М.А., Фан Т.Л., Ванджурак Г.В., Ву В.Х. Изменчивость биометрических показателей бересты в зависимости от характеристик древостоя // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2018. № 222. С. 94–109. DOI 10.21266/2079-4304.2018.222.94-109.
- [11] Грязькин А.В., Беляева Н.В., Данилов Д.А., Ванджурак Г.В., Хунг Ву Ван. Изменчивость толщины и массы коры березы по длине ствола // ИзВУЗ Лесной журнал, 2019. № 2(368). С. 32–39. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.2.32
- [12] Завьялов К.Е. Морфология и химический состав листьев опытных культур березы повислой (*Betula pendula* Roth) в условиях магнезитового загрязнения // Известия Оренбургского государственного аграрного университета, 2013. № 3(41). С. 230–232.
- [13] Коновалов В.Ф. Береза повислая на Южном Урале (Структура популяций, селекция и воспроизводство): дис. ... д-ра с.-х. наук, 06.03.01. Йошкар-Ола, 2003. 503 с.
- [14] Коновалов В.Ф., Ямбаев Ю.А., Галеев Э.И., Дуношкин Е.В. Плюсовая селекция березы повислой в республике Башкортостан: итоги и перспективы развития. Специальный выпуск. Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы дендрозоологии и адаптации растений» // Аграрная Россия, 2009. № 6-II. С. 140–141. DOI: 10.30906/1999-5636-2009-0-140-141
- [15] Ямбаев Ю.А., Коновалов В.Ф., Музафарова А.А., Галеев Э.И. Формирование генофонда популяций березы при колонизации новых местообитаний // Аграрная наука, 2009. № 4. С. 16–17.
- [16] Silla F., González-Gil A., González-Molina M.E., Mediavilla S., Escudero A. Estimation of chlorophyll in Quercus leaves using a portable chlorophyll meter: effects of species and leaf age // Annals of Forest Science, 2010, v. 67, no. 1, pp. 1–7. DOI 10.1051/forest/2009093
- [17] Daas C., Montpied P., Hanchi B., Dreyer E. Responses of photosynthesis to high temperatures in oak saplings assessed by chlorophyll-a fluorescence: inter-specific diversity and temperature-induced plasticity // Annals of Forest Science, 2008, v. 65, no. 3, pp. 1–7. DOI 10.1051/forest:2008002
- [18] Kraj W. Chlorophyll degradation and the activity of chlorophyllase and Mg-dechelataase during leaf senescence in *Fagus sylvatica* // Dendrobiology, 2015, v. 74, pp. 43–57. DOI 10.12657/denbio.074.005

- [19] Пахарькова Н.В., Масенцова И.В., Сорокина Г.А., Гетте И.Г., Калабина А.А. Позднякова Е.Е. Сезонные изменения пигментного комплекса хвои сосны сибирской в условиях высотной поясности Западного Саяна // Хвойные бореальной зоны, 2024. Т. XLII. № 2. С. 22–29.
- [20] Сунцова Л.Н., Иншаков Е.М., Лисотова Е.В., Суслина М.А. О состоянии пигментного аппарата хвойных в условиях урбанизированной среды города Красноярск // Хвойные бореальной зоны, 2023. Т. XLI. № 5. С. 399–405. С. 399–405.
- [21] Lichtenthaler H.K., Rinderle U., Haitz M. Seasonal variations in photosynthetic activity of spruces as determined by chlorophyll fluorescence // *Annals of Forest Science*, 1989, v. 46, pp. 483–489. DOI: 10.1051/forest:198905ART0108
- [22] Бабаев Р.Н., Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П. Пигментация листовых пластин представителей рода береза (*Betula* L.) // *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, 2022. Т. 26. № 3. С. 29–38. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-29-38
- [23] Бабаев Р.Н., Бессчетнова Н.Н., Бессчетнов В.П. Многопараметрический анализ пигментного состава листового аппарата представителей рода *Betula* L. // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование*. 2023. № 3(59). С. 42–54.
- [24] Зонтиков Д.Н., Зонтикова С.А., Малахова К.В. Сравнительный анализ некоторых морфометрических показателей устьичного аппарата и содержания хлорофилла у *Rubus chamaemorus* L. с различным уровнем плоидности // *Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства*, 2022. № 3. С. 59–69.
- [25] Zarek M. Seasonal fluctuations of photosynthetic pigments content in *Taxus baccata* needles // *Dendrobiology*, 2016, v. 76, pp. 13–24. DOI: 10.12657/denbio.076.002
- [26] Oksanen E., Freiwald V., Prozherina N., Matti Rousi M. Photosynthesis of birch (*Betula pendula*) is sensitive to springtime frost and ozone // *Canadian J. of Forest Research*, 2005, v. 35, no. 3, pp. 703–712. DOI 10.1139/x05-007
- [27] Reis L.A.C., de Oliveira J.A., Farnese F. dos S., Rosado A.M., Reis L.A.C. Chlorophyll fluorescence and water content parameters are good biomarkers for selecting drought tolerant eucalyptus clones // *Forest Ecology and Management*, 2021, v. 481, pp. 1–10. DOI 10.1016/j.foreco.2020.118682
- [28] Шлык А.А. О спектрофотометрическом определении хлорофиллов *a* и *b* // *Биохимия*, 1968. Т. 33. Вып. 2. С. 275–285.
- [29] Шлык А.А. Определение хлорофилла и каротиноидов в экстрактах зеленых листьев // *Биохимические методы в физиологии растений / под ред. О.А. Павлиновой. М.: Наука*, 1971. С. 154–170.
- [30] Houppis J.L.J., Surano K.A., Cowles S., Shinn J.H. Chlorophyll and carotenoid concentrations in two varieties of *Pinus ponderosa* seedlings subjected to long-term elevated carbon dioxide // *Tree Physiology*, 1988, v. 4, iss. 2, pp. 187–193. DOI 10.1093/treephys/4.2.187
- [31] Lichtenthaler H.K., Wellburn A.R. Determinations of total carotenoids and chlorophylls *a* and *b* of leaf extracts in different solvents // *Biochemical Society Transactions*, 1983, v. 11, no. 6, pp. 591–592.
- [32] Lichtenthaler H.K. Chlorophyll *a* and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes // *Methods in Enzymology: Plant Cell Membranes*, 1987, v. 148, pp. 350–382. DOI 10.1016/0076-6879(87)48036-1
- [33] Lidholm J., Gustafsson P. A functional promoter shift of a chloroplast gene: a transcriptional fusion between a novel *psbA* gene copy and the *trnK*(UUU) gene in *Pinus contorta* // *The Plant J.*, 1992, v. 2, iss. 6, pp. 875–886. DOI 10.1046/j.1365-3113x.1992.t01-4-00999.x
- [34] Porra R.G., Thomson W.A., Kriedemann P.E. Determination of accurate extinction coefficients and simultaneous equations for assaying chlorophylls *a* and *b* extracted with four different solvents: verification of the concentration of chlorophyll standards by atomic absorption spectroscopy // *Biochimica et Biophysica Acta*, 1989, v. 975, pp. 384–394. DOI 10.1016/S0005-2728(89)80347-0
- [35] Rosenthal S.I., Camm E.L. Photosynthetic decline and pigment loss during autumn foliar senescence in western larch (*Larix occidentalis*) // *Tree Physiology*, 1997, v. 17, no. 12, pp. 767–775. DOI 10.1093/treephys/17.12.767
- [36] Schoefs B., Franck F. Chlorophyll Synthesis in Dark-Grown Pine Primary Needles // *Plant Physiology*, 1998, v. 118, pp. 1159–1168. DOI <https://doi.org/10.1104/pp.118.4.1159>
- [37] Skuodiene L. Quantitative changes in amino acid proline and chlorophyll in the needles of *Picea abies* Karst. (L.) during stress and adaptation // *Biologija*, 2001, no. 2, pp. 54–56.
- [38] Wellburn A.R. The Spectral Determination of Chlorophylls *a* and *b*, as well as Total Carotenoids, Using Various Solvents with Spectrophotometers of Different Resolution // *J. of plant physiology*, 1994, v. 144, iss. 3, pp. 307–313. DOI 10.1016/S0176-1617(11)81192-2
- [39] Mason R.L., Gunst R.F., Hess J.L. Statistical Design and Analysis of Experiments: With Applications to Engineering and Science. Hoboken, New Jersey (Printed in the USA): Wiley-Interscience, Wiley Series in Probability and Statistics, 2003, 752 p.
- [40] Srinagesh K. The Principles of Experimental Research. Waltham, Massachusetts (United States): Butterworth-Heinemann, 2005, 432 p.
- [41] Dean A. Voss D., Draguljić D. Design and Analysis of Experiments (Springer Texts in Statistics). Heidelberg, Germany: Springer-Verlag GmbH, 2017, 865 p.
- [42] Хэлворсон М. Эффективная работа с Microsoft Office 2006. СПб.: Питер, 2000. С. 1234.
- [43] Mead R., Curnow R.N., Hasted A.M. Statistical Methods in Agriculture and Experimental Biology. New York: Chapman and Hall/CRC, 2003, 488 p.
- [44] Zar J.H. Biostatistical Analysis. Edinburg Gate: Pearson New International edition, 2014, 756 p.

Сведения об авторах

Бессчетнова Наталья Николаевна[✉] — д-р с.-х. наук, доцент, декан факультета лесного хозяйства, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный агротехнологический университет имени Л.Я. Флорентьева», besschetnova1966@mail.ru

Бессчетнов Владимир Петрович — д-р биол. наук, профессор, зав. кафедрой лесных культур, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный агротехнологический университет имени Л.Я. Флорентьева», lesfak@bk.ru

Бабаев Рамис Натигович — кандидат с.-х. наук, заместитель генерального директора Союза лесовладельцев Нижегородской области, lp-ram17@yandex.ru

Бабаев Артем Натигович — консультант сектора защиты леса, Министерство лесного хозяйства и охраны объектов животного мира Нижегородской области, beedoed@mail.ru

Поступила в редакцию 17.12.2024.

Одобрено после рецензирования 14.01.2025.

Принята к публикации 25.03.2025.

COMPARATIVE ASSESSMENT OF PIGMENT COMPOSITION IN KARELIAN BIRCH (*BETULA PENDULA* VAR. *CARELICA* MERCKL.) AND SILVER BIRCH (*BETULA PENDULA* ROTH) LEAVES

N.N. Besschetnova^{1✉}, V.P. Besschetnov¹, R.N. Babaev², A.N. Babaev³

¹Nizhny Novgorod State Agrotechnological University named after L.Y. Florentyev, 97, Gagarin av., 603107, Nizhny Novgorod, Russia

²Union of Forest Owners of the Nizhny Novgorod region, 9, Nesterova st., 603005, Nizhny Novgorod, Russia

³Ministry of Forestry and Protection of Wildlife of the Nizhny Novgorod region, 2, Kostina st., 603134, Nizhny Novgorod, Russia

besschetnova1966@mail.ru

The pigment composition in the leaves of two Birch (*Betula* L.) congeners, namely Silver birch (*Betula pendula* Roth) and Karelian birch (*Betula pendula* var. *carelica* Merckl.), have been studied. The principle of the only logical difference is observed, as well as the basic requirements for its formulation during experiments. Field full-scale methods of collecting the source material from the fixation of morphometric parameters of the leaf apparatus in the laboratory were applied. It was found that the average values of each studied plant have minor differences in the total pigment content, they are for Karelian birch $2,346 \pm 0,04$ mg/g and for Silver birch $2,508 \pm 0,04$ mg/g. A slight advantage of the content of plastid pigments in the native species relative to the introduced one was noted. The predominance of chlorophyll b over chlorophyll a was found in both plants, which in turn is explained by the high density of crown closure in plantations of natural and artificial origin. The differences between the studied representatives of the genus birch in the content and ratio of plastid pigments were recorded and their significance was confirmed by the results of two-factor dispersion analysis. There was a significant influence of differences in the affiliation of the compared samples to the typical form and variety of birch with decorative wood texture on the formation of phenotypic variability, which reached $15,33 \pm 0,47$ % (according to the Plokhinsky method) and $21,92 \pm 0,43$ % (according to the Snedekor algorithm). It is proved that the phenotypic differences of the studied genus birch in the content and ratio of plastid pigments are genotypically determined and justified by the fact of their close growth against the background of homogeneous forest conditions. At the same time, there is a strong influence of unorganized factors, which in some cases were predominant and reached 59,86 %.

Keywords: Karelian birch, Silver birch, leaf apparatus, pigment composition, chlorophyll a, chlorophyll b, carotenoids

Suggested citation: Besschetnova N.N., Besschetnov V.P., Babaev R.N., Babaev A.N. *Sravnitel'naya otsenka pigmentnogo sostava list'ev berezy karel'skoy (Betula pendula var. carelica Merckl.) i berezy povisloy (Betula pendula Roth)* [Comparative assessment of pigment composition in Karelian birch (*Betula pendula* var. *carelica* Merckl.) and Silver birch (*Betula pendula* Roth) leaves]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2025, vol. 29, no. 3, pp. 5–16. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-3-5-16

References

- [1] Babaev R.N., Besschetnova N.N., Besschetnov V.P. *Lignifikatsiya ksilemy raznykh vidov berezy pri introduktsii v usloviyakh Nizhegorodskoy oblasti* [Xylem lignification of different birch species during introduction in the Nizhny Novgorod region]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Bulletin of the St. Petersburg Forest Engineering Academy], 2021, no. 235, pp. 40–56.
- [2] Deryugin A.A., Rybakova N.A., Glazunov Yu.B. *Model' formirovaniya berezovo-elovykh nasazhdeniy v usloviyakh yuzhnoy taygi Russkoy ravniny* [Model of formation of birch-spruce plantations in the southern taiga of the Russian Plain]. *Forestry Journal*, 2024, no. 3, pp. 23–45.
- [3] Egorov A.B., Bubnov A.A., Postnikov A.M., Pavlyuchenkova L.N. *Biologicheskaya, lesovodstvennaya i ekonomicheskaya effektivnost' ukhoda za berezoy s primeneniem gerbitsida Magnum* [Biological, silvicultural and economic efficiency of birch care using the herbicide Magnum]. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva* [Proceedings of the St. Petersburg Research Institute of Forestry], 2024, no. 3, pp. 86–97.
- [4] Tripepi R.R., Mitchell C.A. Metabolic response of river birch and European birch and European birch roots to hypoxia. *Plant Physiology*, 1984, v. 76, iss. 1, pp. 31–35. DOI 10.1104/pp.76.1.31
- [5] Pothier D., Margolis A. Analysis of growth and light interception of balsam fir and white birch saplings following precommercial thinning. *Annals of Forest Science*, 1991, v. 48, no. 2, pp. 123–132. DOI: 10.1051/forest:19910201
- [6] Zhao X.Y., Bian X.Y., Li Z.X., Wang X., Yang C.J., Liu G.F., Jiang J., Kentbayev Y., Kentbayeva B., Yang Ch.P. Genetic stability analysis of introduced *Betula pendula*, *B. kirghisorum* and *B. pubescens* families in saline-alkali soil of northeastern China. *Scandinavian J. of Forest Research*, 2014, no. 4, 26 p. DOI: 10.1080/02827581.2014.960892
- [7] Pedieu R., Riedl B., Pichette A. Properties of white birch (*Betula papyrifera*) outer bark particleboards with reinforcement of coarse wood particles in the core layer. *Annals of Forest Science*, 2008, v. 65, no. 7, pp. 1–9. DOI: 10.1051/forest:2008053
- [8] Kaitaniemi P., Lintunen A. Neighbor identity and competition influence tree growth in Scots pine, Siberian larch, and silver birch. *Annals of Forest Science*, 2010, v. 67, no. 6, article no. 604, pp. 1–7. DOI: 10.1051/forest/2010017
- [9] Behrend A.M., Pommerening A. Growing at the edge: Modelling sapling colonization, performance, and effective range of mountain birch (*Betula pubescens* ssp. *tortuosa*) // *Ecological Modelling*, 2025, v. 503, pp.1–10. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2025.111073
- [10] Gryaz'kin A.V., Samsonova I.D., Novikova M.A., Fan T.L., Vandzhurak G.V., Vu V.Kh. *Izmenchivost' biometricheskikh pokazateley beresty v zavisimosti ot kharakteristik drevostoya* [Variability of birch bark biometric indicators depending on the characteristics of the stand]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii* [Bulletin of the St. Petersburg Forest Engineering Academy], 2018, no. 222, pp. 94–109.
- [11] Gryaz'kin A.V., Belyaeva N.V., Danilov D.A., Vandzhurak G.V., Khung V.V. *Izmenchivost' tolshchiny i massy kory berezy po dline stvola* [Variability of the thickness and weight of birch bark along the trunk length]. *Forestry Journal*, 2019, no. 2 (368), pp. 32–39.
- [12] Zav'yalov K.E. *Morfologiya i khimicheskiy sostav list'ev opytnykh kul'tur berezy povisloy (Betula pendula Roth) v usloviyakh magnezitovogo zagryazneniya* [Morphology and chemical composition of leaves of experimental crops of silver birch (*Betula pendula* Roth) under magnesite pollution]. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Orenburg State Agrarian University], 2013, no. 3 (41), pp. 230–232.
- [13] Konovalov V.F. *Bereza povislavaya na Yuzhnom Urale (Struktura populyatsiy, selektsiya i vosproizvodstvo)* [Silver birch in the Southern Urals (Population structure, selection and reproduction)]. *Dis. Dr. Sci. (Agric.)*, 06.03.01. Yoshkar-Ola, 2003, 503 p.
- [14] Konovalov V.F., Yanbaev Yu.A., Galeev E.I., Dunyushkin E.V. *Phyusovaya selektsiya berezy povisloy v respublike Bashkortostan: itogi i perspektivy razvitiya* [Plus selection of silver birch in the Republic of Bashkortostan: results and development prospects]. *Agrarnaya Rossiya* [Agrarnaya Rossiya], 2009, no. 6-II, special issue: materials of the international scientific-practical conf. «Actual problems of dendroecology and plant adaptation», pp. 140–141.
- [15] Yanbaev Yu.A., Konovalov V.F., Muzafarova A.A., Galeev E.I. *Formirovanie genofonda populyatsiy berezy pri kolonizatsii novykh mestoobitaniy* [Formation of the gene pool of birch populations during colonization of new habitats]. *Agrarnaya nauka* [Agrarian science], 2009, no. 4, pp. 16–17.
- [16] Silla F., González-Gil A., González-Molina M.E., Mediavilla S., Escudero A. Estimation of chlorophyll in *Quercus* leaves using a portable chlorophyll meter: effects of species and leaf age. *Annals of Forest Science*, 2010, v. 67, no. 1, pp. 1–7. DOI 10.1051/forest/2009093
- [17] Daas C., Montpied P., Hanchi B., Dreyer E. Responses of photosynthesis to high temperatures in oak saplings assessed by chlorophyll-a fluorescence: inter-specific diversity and temperature-induced plasticity. *Annals of Forest Science*, 2008, v. 65, no. 3, article no. 305, pp. 1–7. DOI 10.1051/forest:2008002
- [18] Kraj W. Chlorophyll degradation and the activity of chlorophyllase and Mg-dechelataase during leaf senescence in *Fagus sylvatica*. *Dendrobiology*, 2015, v. 74, pp. 43–57. DOI 10.12657/denbio.074.005
- [19] Pakhar'kova N.V., Masentsova I.V., Sorokina G.A., Gette I.G., Kalabina A.A. *Pozdnyakova E.E. Sezonnye izmeneniya pigmentnogo kompleksa khvoi sosny sibirskoy v usloviyakh vysotnoy poyasnosti Zapadnogo Sayana* [Seasonal changes in the pigment complex of Siberian pine needles in the conditions of altitudinal zonation of the Western Sayan]. *Khvoynye boreal'noy zony* [Conifers of the boreal zone], 2024, v. XLII, no. 2, pp. 22–29.
- [20] Suntsova L.N., Inshakov E.M., Lisotova E.V., Suslina M.A. *O sostoyanii pigmentnogo apparata khvoynykh v usloviyakh urbanizirovannoy sredy goroda Krasnoyarska* [On the state of the pigment apparatus of conifers in the urbanized environment of the city of Krasnoyarsk]. *Khvoynye boreal'noy zony* [Conifers of the boreal zone], 2023, v. XLI, no. 5, pp. 399–405.

- [21] Lichtenthaler H.K., Rinderle U., Haitz M. Seasonal variations in photosynthetic activity of spruces as determined by chlorophyll fluorescence // *Annals of Forest Science*, 1989, v. 46, pp. 483–489. DOI: 10.1051/forest:198905ART0108
- [22] Babaev R.N., Besschetnova N.N., Besschetnov V.P. *Pigmentatsiya listovykh plastin predstaviteley roda bereza (Betula L.)* [Genus birch (*Betula L.*) leaf plates pigmentation]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, no. 3, pp. 29–38. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-3-29-38
- [23] Babaev R.N., Besschetnova N.N., Besschetnov V.P. *Mnogoparametricheskii analiz pigmentnogo sostava listovogo apparata predstaviteley roda Betula L.* [Multiparameter analysis of the pigment composition of the leaf apparatus of representatives of the genus *Betula L.*]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* [Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Forest. Ecology. Nature Management], 2023, no. 3(59), pp. 42–54.
- [24] Zontikov D.N., Zontikova S.A., Malakhova K.V. *Sravnitel'nyy analiz nekotorykh morfometricheskikh pokazateley ust'ichnogo apparata i sodержaniya khlorofilla u Rubus chamaemorus L. s razlichnym urovnem ploidnosti* [Comparative analysis of some morphometric parameters of the stomatal apparatus and chlorophyll content in *Rubus chamaemorus L.* with different ploidy levels]. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva* [Proceedings of the St. Petersburg Forestry Research Institute], 2022, no. 3, pp. 59–69.
- [25] Zarek M. Seasonal fluctuations of photosynthetic pigments content in *Taxus baccata* needles. *Dendrobiology*, 2016, v. 76, pp. 13–24. DOI: 10.12657/denbio.076.002
- [26] Oksanen E., Freiwald V., Prozherina N., Matti Rousi M. Photosynthesis of birch (*Betula pendula*) is sensitive to spring-time frost and ozone. *Canadian J. of Forest Research*, 2005, v. 35, no. 3, pp. 703–712. DOI 10.1139/x05-007
- [27] Reis L.A.C., de Oliveira J.A., Farnese F. dos S., Rosado A.M., Reis L.A.C. Chlorophyll fluorescence and water content parameters are good biomarkers for selecting drought tolerant eucalyptus clones. *Forest Ecology and Management*, 2021, v. 481, pp. 1–10. DOI 10.1016/j.foreco.2020.118682
- [28] Shlyk A.A. *O spektrofotometricheskom opredelenii khlorofillov a i b* [On spectrophotometric determination of chlorophylls a and b]. *Biokhimiya* [Biochemistry], 1968, v. 33, iss. 2, pp. 275–285.
- [29] Shlyk A.A. *Opredelenie khlorofilla i karotinoidov v ekstraktakh zelenykh list'ev* [Determination of chlorophyll and carotenoids in green leaf extracts]. *Biokhimicheskie metody v fiziologii rasteniy* [Biochemical methods in plant physiology]. Ed. O.A. Pavlinova. Moscow: Nauka, 1971, pp. 154–170.
- [30] Houpis J.L.J., Surano K.A., Cowles S., Shinn J.H. Chlorophyll and carotenoid concentrations in two varieties of *Pinus ponderosa* seedlings subjected to long-term elevated carbon dioxide. *Tree Physiology*, 1988, v. 4, iss. 2, pp. 187–193. DOI 10.1093/treephys/4.2.187
- [31] Lichtenthaler H.K., Wellburn A.R. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transactions*, 1983, v. 11, no. 6, pp. 591–592.
- [32] Lichtenthaler H.K. Chlorophyll a and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods in Enzymology: Plant Cell Membranes*, 1987, v. 148, pp. 350–382. DOI 10.1016/0076-6879(87)48036-1
- [33] Lidholm J., Gustafsson P. A functional promoter shift of a chloroplast gene: a transcriptional fusion between a novel psbA gene copy and the trnK(UUU) gene in *Pinus contorta*. *The Plant J.*, 1992, v. 2, iss. 6, pp. 875–886. DOI 10.1046/j.1365-3113x.1992.t01-4-00999.x
- [34] Porra R.G., Thomson W.A., Kriedemann P.E. Determination of accurate extinction coefficients and simultaneous equations for assaying chlorophylls a and b extracted with four different solvents: verification of the concentration of chlorophyll standards by atomic absorption spectroscopy. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1989, v. 975, pp. 384–394. DOI 10.1016/S0005-2728(89)80347-0
- [35] Rosenthal S.I., Camm E.L. Photosynthetic decline and pigment loss during autumn foliar senescence in western larch (*Larix occidentalis*). *Tree Physiology*, 1997, v. 17, no.12, pp. 767–775. DOI 10.1093/treephys/17.12.767
- [36] Schoefs B., Franck F. Chlorophyll Synthesis in Dark-Grown Pine Primary Needles. *Plant Physiology*, 1998, v. 118, pp. 1159–1168. DOI <https://doi.org/10.1104/pp.118.4.1159>
- [37] Skuodiene L. Quantitative changes in aminoacid proline and chlorophyll in the needles of *Picea abies* Karst. (L.) during stress and adaptation. *Biologija*, 2001, no. 2, pp. 54–56.
- [38] Wellburn A.R. The Spectral Determination of Chlorophylls a and b, as well as Total Carotenoids, Using Various Solvents with Spectrophotometers of Different Resolution. *J. of plant physiology*, 1994, v. 144, iss. 3, pp. 307–313. DOI 10.1016/S0176-1617(11)81192-2
- [39] Mason R.L., Gunst R.F., Hess J.L. *Statistical Design and Analysis of Experiments: With Applications to Engineering and Science*. Hoboken, New Jersey (Printed in the USA): Wiley-Interscience, Wiley Series in Probability and Statistics, 2003, 752 p.
- [40] Srinagesh K. *The Principles of Experimental Research*. Waltham, Massachusetts (United States): Butterworth-Heinemann, 2005, 432 p.
- [41] Dean A. Voss D., Draguljić D. *Design and Analysis of Experiments* (Springer Texts in Statistics). Heidelberg, Germany: Springer-Verlag GmbH, 2017, 865 p.
- [42] Khelvorson M. *Effektivnaya rabota s Microsoft Office 2006* [Effective work with Microsoft Office 2006]. St. Petersburg: Piter, 2000, p. 1234.
- [43] Mead R., Curnow R.N., Hasted A.M. *Statistical Methods in Agriculture and Experimental Biology*. New York: Chapman and Hall/CRC, 2003, 488 p.
- [44] Zar J.H. *Biostatistical Analysis*. Edinburg Gate: Pearson New International edition, 2014, 756 p.

Authors' information

Besschetnova Natal'ya Nikolayevna✉ — Dr. Sci. (Agriculture), Associate Professor, Dean of the Faculty of Forestry of Nizhny Novgorod State Agrotechnological University, besschetnova1966@mail.ru

Besschetnov Vladimir Petrovich — Dr. Sci. (Biology), Professor, Head of the Department of Forest Crops of Nizhny Novgorod State Agrotechnological University, lesfak@bk.ru

Babayev Ramis Natigovich — Cand. Sci. (Agriculture), Deputy Director General of the Union of Forest Owners of the Nizhny Novgorod region, lp-ram17@yandex.ru

Babayev Artem Natigovich — Consultant of the Forest Protection Sector of the Ministry of Forestry and Wildlife Protection of the Nizhny Novgorod region, beedoed@mail.ru

Received 17.12.2024.

Approved after review 14.01.2025.

Accepted for publication 25.03.2025.

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