

Л.В. Ветчинникова, А.Ф. Титов, Е.Д. Сафронычева, А.В. Жигунов

**ОСОБЕННОСТИ РОСТА СЕЯНЦЕВ КАРЕЛЬСКОЙ БЕРЕЗЫ,
ПОЛУЧЕННЫХ В РЕЗУЛЬТАТЕ СВОБОДНОГО ОПЫЛЕНИЯ,
И ВЫЯВЛЕНИЕ СРЕДИ НИХ НОСИТЕЛЕЙ ПРИЗНАКА
«УЗОРЧАТАЯ ДРЕВЕСИНА»
С ПОМОЩЬЮ МОЛЕКУЛЯРНОГО МАРКЕРА WPCW1**

Введение. В настоящее время карельская береза (*Betula pendula* Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti) считается разновидностью березы повислой, хотя в вопросе о ее таксономическом статусе по-прежнему существуют разные точки зрения [Ветчинникова, Титов, 2020]. Главной ее отличительной особенностью является высокодекоративная и высокоценная узорчатая древесина, которая на протяжении многих лет неизменно привлекает к себе внимание. Одним из следствий этого явилось существенное сокращение численности популяций карельской березы в последнее столетие [Vetchinnikova, Titov, 2021]. В природных условиях она сохранилась лишь в отдельных районах Беларуси (преимущественно в Витебской, Минской и Могилевской областях) и России (в Республике Карелия). Дополнительно усугубляет ситуацию то обстоятельство, что естественное возобновление у карельской березы выражено крайне слабо.

При выявлении карельской березы (среди других видов березы) особую роль играет визуальная диагностика признаков, косвенно указывающих на формирование узорчатой древесины. Наиболее важными среди них являются выпуклости или утолщения, внешне различимые на стволе (иногда и на скелетных ветвях кроны) деревьев [Ветчинникова, Титов, 2021]. Однако визуально заметными они становятся в среднем только в возрасте 8 лет и позднее [Соколов, 1970; Ермаков, 1986; Евдокимов, 1989]. К тому же доля деревьев с такими признаками при свободном опылении составляет в потомстве всего 2–3% [Johnsson, 1951], реже до 25% (или даже 50%) [Любавская, 1978; Larsen, 1940; Heikinheimo, 1951]. Однако не исключено, что в природных условиях некоторые деревья, внешне очень похожие на березу повислую, могут иметь в «скрытом» виде узорчатую древесину с разной степенью насыщенности текстуры. В дальнейшем при скрещивании таких условно «безузорчатых» деревьев в следующих поколениях вполне можно ожидать появления с какой-то частотой «узорчатых» форм. Тем не

менее выявить их в природных условиях в раннем (и даже в более позднем) возрасте до сих пор не удавалось. Безошибочно к этому типу можно отнести только те растения, которые получены в результате контролируемого опыления деревьев карельской березы между собой. Прямые же методы прижизненной диагностики «узорчатости» у растений, особенно на ранних этапах онтогенеза, до сих пор отсутствовали.

Новые возможности в диагностике карельской березы открывает использование молекулярных маркеров. Так, совсем недавно на основе анализа более 37 тысяч SNP (Single Nucleotide Polymorphism), локализованных на 10-й хромосоме в интервале протяженностью 1,2 млн. п.н., обнаружены участки, связанные с фенотипом «узорчатости древесины» [Gubaev et al., 2024]. Детальный анализ этой части генома показал, что в непосредственной близости с SNP_3465040 на удалении 160 п.н. у 92% изученных деревьев с «узорчатым» фенотипом наблюдается генетический полиморфизм в виде делеции размером 54 п.н., которая может быть представлена как в гомо-, так и гетерозиготном состоянии. На основе этих данных был разработан и предложен для практического применения молекулярный маркер, получивший название **VpCW1 (Betula pendula Curly Wood 1)** [Жигунов и др., 2024]. Эти исследования были выполнены на примере близкородственного 15- и 35-летнего семенного потомства, полученного в результате контролируемого опыления [Ветчинникова и др., 2023]. Сеянцы карельской березы от свободного опыления в этом плане пока не изучались, поэтому целью данной работы стало исследование особенностей роста сеянцев карельской березы, полученных в результате свободного опыления, и выявление среди них носителей признака «узорчатая древесина» с применением ДНК-маркера VpCW1.

Объекты и методы исследований. Объектом исследований служило однолетнее семенное потомство карельской березы *Betula pendula* Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti. Семена собирали с деревьев, произрастающих на территории Гатчинского ПЛСУ (12 кв., выдел 4–5 Таицкого участкового лесничества, вблизи п. Терволово Ленинградской области), в учебно-производственном питомнике Лисинского лесного колледжа (96-й кв. Шапкинское участкового лесничества, Тосненский район Ленинградской области) (для удобства изложения в тексте данное семенное потомство условно обозначено «Шапки») и в дендропарке Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства («СПбНИИЛХ»).

Сбор семян от свободного опыления проводили в июле-августе 2022 и 2023 гг., а проращивание – весной на следующий после сбора год (2023 и 2024 гг.). Посев семян осуществляли рядами в пластиковые ящики в условиях теплицы, расположенной на территории Ботанического сада Санкт-

Петербургского государственного лесотехнического университета. Спустя две недели после появления всходов растения пикировали (пересаживали) в пластиковые контейнеры. В качестве субстрата использовали верховой слабо разложившийся торф, нейтрализованный доломитовой мукой до pH_{KCl} 5,0 и обогащенный комплексом макро- и микроэлементов. В течение вегетационного периода проводили стандартные для выращивания сеянцев подкормки и уходы.

Определение ростовых показателей (высота и диаметр у основания стебля на уровне корневой шейки) проводили 1 раз в неделю в июле и 1 раз в две недели в августе. Высоту растений измеряли с помощью линейки, а диаметр – штангенциркулем. Вариабельность показателей оценивали с помощью коэффициента вариации (С, %) [Мамаев, 1973].

Выделение ДНК из листьев проводили модифицированным СТАВ-методом [Rahimah et al., 2006]. Реакционная смесь для ПЦР (полимеразная цепная реакция) содержала 1 × Taq-буфер (2,5 мМ Mg²⁺); 200 мкМ дНТФ; ДНК-полимеразу Taq 2,5 ЕД («Евроген», Москва); 0,4 мкМ каждого из праймеров (5'-GGTTGGAAGAGCTCCATGAT и 5'-GGAAGAATAAATAAGTCTGAGA TGCC); около 20 нг матричной ДНК и стерильную дистиллированную воду в общем объеме 25 мкл. Программа амплификации включала начальную стадию денатурации при 95°C в течение 3 мин, затем 30 циклов: денатурация при 95°C в течение 30 с, отжиг матрицы с праймерами при 58°C – 30 с, элонгация при 72°C – 45 с и заключительный цикл элонгации при 72°C – 5 мин. Анализ ПЦР-продуктов проводили методом электрофореза в 1,0–1,5% агарозном геле в горизонтальных блоках при напряженности электрического поля 5–10 В/см. В качестве электролита использовали трис-ацетатный буфер (40 мМ трис-ацетат; pH 8,0; 0,02 М ацетат натрия; 0,002 М EDTA). О ходе электрофореза судили по миграции бромфенолового синего (Serva, Германия), предварительно добавленного в пробы. Визуализацию результатов осуществляли в ультрафиолетовом свете после экспозиции геля в растворе бромистого этидия (10 мкг/мл) с помощью установки видео документации гелей Gel-Doc (Bio-Rad, США).

Результаты исследований. Исследования показали, что, несмотря на большой объем собранных (несколько сотен штук) и высеянных семян карельской березы, количество выживших сеянцев оказалось незначительным. В частности, в 2023 г. из семян, собранных в дендропарке СПб-НИИЛХа, выращено 22 растения, а в 2024 г. – 51 растение из семян, собранных с 11 деревьев карельской березы, произрастающих на разных участках (Гатчинский ПЛСУ – 4 дерева, «Шапки» – 5 и «СПбНИИЛХ» –

2). По всей вероятности, это обусловлено низким качеством семян, которое у березы (независимо от вида) зависит не только от внешних факторов (температура, осадки и др.) в период опыления и дальнейшего эмбрионального развития, но и от морфофизиологических свойств пыльцы. Имеются сведения, что у карельской березы пыльца характеризовалась очень низкой жизнеспособностью и небольшой длиной пыльцевой трубки, что значительно снижает эффективность процессов опыления, оплодотворения и получения полноценных семян [Николаевская и др., 2008].

Анализ ростовых показателей сеянцев карельской березы, полученных в результате свободного опыления, показал наличие у них существенных различий в зависимости от года и места сбора семян. В частности, высота сеянцев, выращенных из семян, собранных в дендропарке СПбНИИЛХа (в 2022 г.), уже в июне 2023 г. составила в среднем 12,7 см (табл. 1), а к началу сентября – 51,4 см, варьируя от 15,9 до 99,0 см (рис. 1а). Диаметр стволика у корневой шейки также увеличился в среднем с 1,6 мм в июне до 3,9 мм в сентябре, колеблясь от 1,8 до 7,5 мм. У части растений наблюдали образование боковых побегов в нижней части стебля (рис. 1б), что свойственно карельской березе и косвенно свидетельствует о формировании в дальнейшем узорчатой древесины на ранних этапах ее развития [Соколов, 1950].

Таблица 1

Высота и диаметр сеянцев карельской березы, полученных в результате свободного опыления (место сбора семян – дендропарк СПбНИИЛХа, Ленинградская область, число растений – 22) (2023 г.)

Height and diameter of curly birch seedlings obtained as a result of open pollination (seed collection site – St. Petersburg Research Institute of Forestry, Leningrad Region, number of plants 22) (2023)

Показатель	Месяц			
	июнь	июль	август	сентябрь
	Высота			
Среднее значение, см	12,7±9,4	35,0±22,7	50,6±29,0	51,4±28,6
Размах изменчивости, см	1,9–26,5	8,0–81,5	15,0–99,0	15,9–99,0
Коэффициент вариации (C), %	70,6	62,1	55,6	54,2
	Диаметр (у корневой шейки)			
Среднее значение, мм	1,6±0,6	2,8±1,3	3,7±1,5	3,9±1,6
Размах изменчивости, мм	1,1–3,1	1,7–6,0	1,8–7,5	1,8–7,5
Коэффициент вариации (C), %	33,4	39,3	42,2	41,5

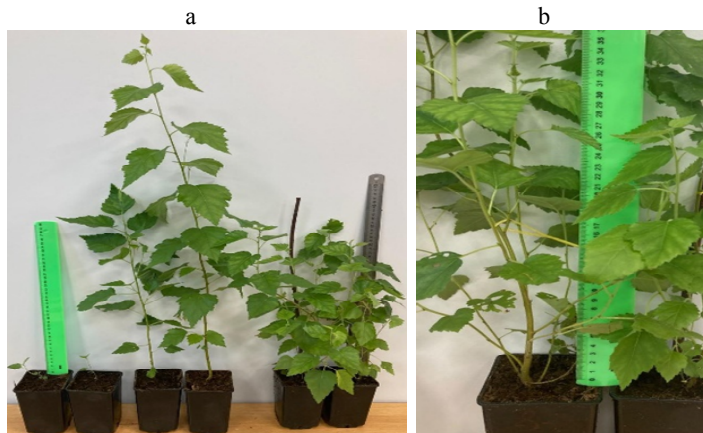


Рис. 1. Внешний вид однолетних растений карельской березы (а) и пример образования у сеянцев боковых побегов в нижней части стебля (б). Фото А.В. Жигунова
Fig. 1. The appearance of annual curly birch plants (a) and an example of the formation of lateral shoots in seedlings in the lower part of the stem (b). Photo by A.V. Zhigunov

Другую картину наблюдали в 2024 г., когда абсолютные значения ростовых показателей у сеянцев, выращенных из семян из дендропарка СПбНИИЛХа (собранных в 2023 г.), оказались значительно ниже (табл. 2), причем не только по сравнению с сеянцами, выращенными в 2023 г., но и относительно сеянцев, сбор семян которых проводился на территории Гатчинского ПЛСУ и в насаждении «Шапки» (в 2023 г.). Так, наиболее крупные сеянцы как по высоте, так и по диаметру были получены из семян Гатчинского ПЛСУ. Их высота составила в среднем 20,5 см, варьируя от 3,0 до 69,5 см (табл. 2). При этом 43% растений имели высоту менее 10 см, а 17%, наоборот, 48 см и выше. Диаметр у корневой шейки также был больше у сеянцев (в среднем 2,5 мм, варьируя от 1,0 до 8,0 мм), семена которых собраны на Гатчинском ПЛСУ. Сеянцы, выращенные из семян, собранных в насаждении «Шапки», по высоте были в 1,8 раза ниже, а по диаметру в 1,4 раза тоньше по сравнению с семенным потомством, семена которого собраны на Гатчинском ПЛСУ (табл. 2). Наименьшие значения по высоте, как отмечено выше, наблюдали у сеянцев из дендропарка СПбНИИЛХа. В среднем они были ниже на 12,3 и 3,2 см по высоте и тоньше на 0,9 и 0,2 мм по диаметру у корневой шейки по сравнению с сеянцами с Гатчинского ПЛСУ и насаждения «Шапки» соответственно. Однако по массе семени, собранные в дендропарке СПбНИИЛХа в 2023 г., были крупнее и в среднем в 1,3 раза тяжелее, чем из других насаждений в тот же год (табл. 2).

Таблица 2

Высота, диаметр и масса семян семенного потомства карельской березы, полученного в результате свободного опыления, в зависимости от места сбора семян (Ленинградская обл., 2024 г.)

Height, diameter and weight of seeds of curly birch seed progeny obtained as a result of open pollination depending on the place of seed collection (Leningrad region, 2024)

Показатель	Место сбора семян (год сбора – 2023)		
	«СПбНИИЛХ»	Гатчинский ПЛСУ	«Шапки»
	Высота		
Число деревьев, шт.	12	23	16
Среднее значение, см	8,2±4,0	20,5±20,3	11,4±13,3
Размах изменчивости, см	2,0–15,0	3,0–69,5	1,0–54,0
Коэффициент вариации (C), %	49,4	99,4	116,8
	Диаметр (у корневой шейки)		
Число деревьев, шт.	12	23	16
Среднее значение, мм	1,6±0,5	2,5±1,7	1,8±1,1
Размах изменчивости, мм	1,0–2,5	1,0–8,0	1,0–5,0
Коэффициент вариации (C), %	33,2	69,4	61,5
	Масса 500 шт. семян		
Среднее значение, мг	0,12±0,5	0,09±0,02	0,09±0,01
Размах изменчивости, мг	0,12	0,06–0,12	0,08–0,11
Коэффициент вариации (C), %	0	18,9	13,3

Существенные различия, отмеченные у сеянцев по ростовым показателям и их варьированию, нашли отражение в очень высоких значениях коэффициента вариации, особенно по высоте (99,4% – Гатчинский ПЛСУ и 116,8% – «Шапки»). Возможно, что это, хотя бы отчасти, является отражением полиморфизма жизненных форм, характерного для карельской березы (рис. 1). Неслучайно еще в 1970-е гг., на основании опытов по выращиванию карельской березы А.Я. Любавская [1966] предлагала проводить первичную сортировку сеянцев по скорости роста, разделяя быстро- и медленнорастущие растения на три группы до начала их посадки на постоянное место. Ранее, в 1930-е гг., в результате обследования природных популяций Н.О. Соколов [1950] предложил классифицировать карельскую березу по высоте как высокоствольную, короткоствольную и кустообразную.

Важным обстоятельством является тот факт, что при свободном опылении у карельской березы можно получить большое количество семян, но закрепить в потомстве ценные признаки материнских растений, обладающих узорчатой текстурой древесины, и выявить их довольно трудно.

В данной работе мы использовали молекулярный маркер ВрСW1, который весьма надежно зарекомендовал себя как метод диагностики «узорчатости» у карельской березы в возрасте 15 лет и старше [Gubaev et al., 2024]. В результате ПЦР-анализа однолетнего семенного потомства от свободного опыления у 18 из 42 сеянцев получены продукты амплификации длиной 530 п.н. и/или 476 п.н. При этом у трех растений (3.1, 15.1 и 23.1) аллели (476 п.н.) были гомозиготными, а у 15 – гетерозиготными (476/530 п.н.) (рис. 2). Ранее показано, что наличие разницы в длине фрагментов (54 п.н.) обусловлено делецией, которая в семенном потомстве карельской березы проявляется у носителей признака «узорчатая древесина», а ее отсутствие и гомозиготность по аллелю, соответствующему 530 п.н., наоборот, характеризуют растения как «безузорчатые».

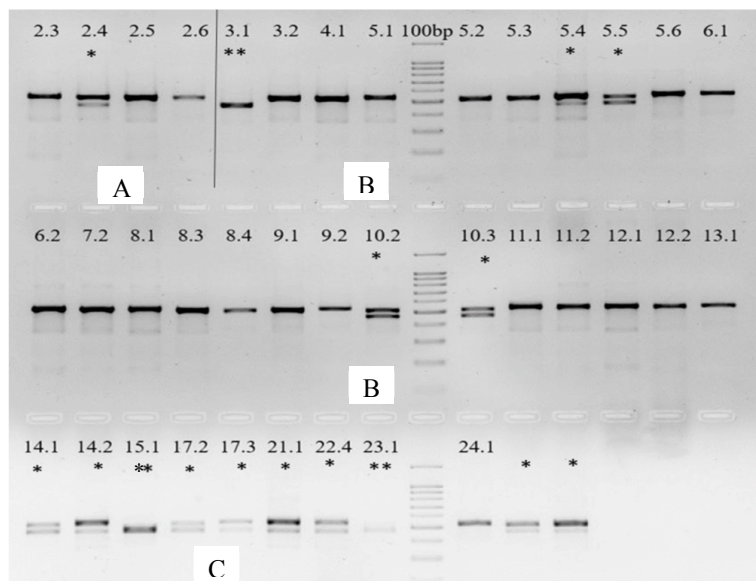


Рис. 2. Визуализация продуктов ПЦР-амплификации в гетеро- (*) или гомозиготном (**) состоянии, выявленных с использованием ДНК-маркера ВрСW1, сцепленного с признаком «узорчатости» у семенного потомства, семена которого собраны в дендропарке СПбНИИЛХА (А), на Гатчинском ПЛСУ (В), в насаждении «Шапки» (С). Цифрами обозначены номера сеянцев

Fig. 2. Visualization of PCR amplification products in a hetero- (*) or homozygous (**) state, identified using the ВрСW1 DNA marker linked to the “patterned” trait in seed progeny, the seeds of which were collected in the arboretum of the St. Petersburg Research Institute of Forestry (A), the Gatchina Plant Protection Plant (B), and the “Shapki” plantation (C). The numbers indicate the seedling numbers.

Соотношение «узорчатые»:«безузорчатые» среди сеянцев, семена которых собраны с деревьев, растущих в дендропарке СПбНИИЛХа, на Гатчинском ПЛСУ и в насаждении «Шапки», составило 6:6; 5:17 и 7:1 соответственно. Добавим также, что в семенном потомстве «Шапки» у 8 изученных растений не удалось получить качественное разделение полос на электрофореграмме, что связано с различными причинами.

Сравнительный анализ ростовых показателей также свидетельствует, что «безузорчатые» растения по абсолютным значениям превышали «узорчатые» независимо от места сбора семян (рис. 3а). Например, «безузорчатые» сеянцы, семена которых были собраны на Гатчинском ПЛСУ и в насаждении «Шапки», были больше «узорчатых» по высоте в 1,7 и 1,8 раза, а по диаметру – в 1,5 и 1,2 раза соответственно (рис. 3б). У сеянцев из дендропарка СПбНИИЛХа отмечена подобная тенденция, но абсолютные значения были ниже. Добавим также, что высокий размах изменчивости, выявленный по ростовым показателям у «узорчатых» особей (табл. 3), подтвердил целесообразность их разделения на группы по скорости роста до начала посадки.

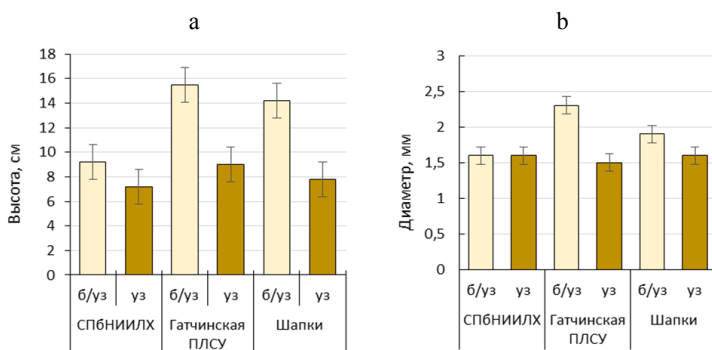


Рис. 3. Высота (а) и диаметр у корневой шейки (б) у разных форм карельской березы в зависимости от места сбора семян.

Здесь и на рис. 4: б/уз – «безузорчатые», уз. – «узорчатые» формы

Fig. 3. Height (a) and diameter at the root collar (b) of different forms of curly birch depending on the seed collection location.

Here and in Fig. 4: б/уз – “unpatterned” forms, уз. – “patterned” forms

Таблица 3

Ростовые показатели у «безузорчатых» и «узорчатых» форм карельской березы, выявленных с помощью молекулярного маркера ВpCW1

Growth parameters of «patternless» and «patterned» forms of curly birch identified using the molecular marker ВpCW1

Показатель	Месяц			
	июнь	июль	август	сентябрь
Карельская береза «безузорчатая» форма (n=19)				
	Высота			
Среднее значение, м	13,4±9,4	36,6±22,7	52,1±29,0	52,8±28,6
Размах изменчивости, м	1,9–26,5	8,0–81,5	15,0–99,0	15,9–99,0
Коэффициент вариации (C), %	70,6	62,1	55,6	54,2
	Диаметр (у корневой шейки)			
Среднее значение, мм	2,0±0,7	3,5±1,4	4,2±1,8	4,4±1,8
Размах изменчивости, мм	1,1–3,1	1,7–6,0	1,8–7,5	1,8–7,5
Коэффициент вариации (C), %	33,4	39,3	42,2	41,5
Карельская береза «узорчатая» форма (n=3)				
	Высота			
Среднее значение, см	–	26,0±7,9	41,5±12,7	42,8±12,9
Размах изменчивости, см	–	17,0–32,0	27,0–50,5	28,0–51,0
Коэффициент вариации (C), %	–	30,5	30,6	30,0
	Диаметр (у корневой шейки)			
Среднее значение, мм	1,2±0,2	2,1±0,8	3,2±1,1	3,4±1,2
Размах изменчивости, мм	1,0–1,3	1,3–2,8	2,2–4,3	2,3–4,7
Коэффициент вариации (C), %	13,1	35,8	32,5	35,7

Примечание. Прочерк означает отсутствие данных

Наиболее активный прирост в высоту у «безузорчатых» сеянцев наблюдали с июня по июль (рис. 4а), тогда как у «узорчатых» растений он был меньшим по величине, но более продолжительным и длился с июня по август. К началу сентября в обеих группах рост растений прекратился.

Радиальный прирост у сеянцев наиболее активно происходил до середины июля, затем его скорость уменьшилась, но ее снижение у «узорчатых» растений по сравнению с «безузорчатыми» было более плавным (рис. 4b).

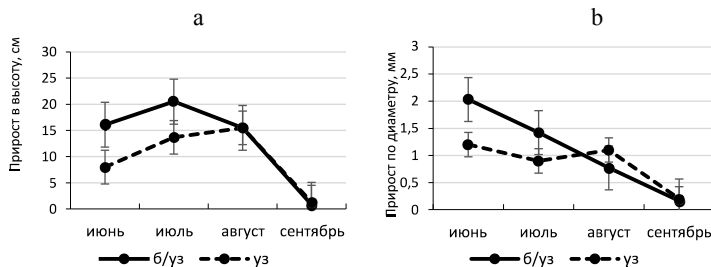


Рис. 4. Динамика прироста сеянцев разных форм карельской березы по высоте (а) и по диаметру у корневой шейки (b)

Fig. 4. Dynamics of growth of seedlings of different forms of Karelian birch by height (a) and by diameter at the root collar (b)

Выводы.

1. Семенное потомство карельской березы, полученное в результате свободного опыления, отличается по ростовым показателям значительной вариабельностью. По-видимому, в определенной степени это зависело от года (погодных условий), места сбора семян и формы роста деревьев, участвующих в опылении.

2. Использование молекулярного маркера ВpCW1 позволило выявить среди однолетних сеянцев карельской березы, полученных в результате свободного опыления, потенциально «узорчатые» и «безузорчатые» растения. В частности, у 18 из 42 сеянцев идентифицированы продукты амплификации, которые характерны для «узорчатых» растений. При этом у трех из них аллели (476 п.н.) были гомозиготными, а у 15 – гетерозиготными (476/530 п.н.). Эти данные говорят о том, что в семенном потомстве карельской березы, полученном в результате свободного опыления, обязательно присутствуют растения как с признаками «узорчатой» текстуры древесины, так и с обычной прямоволокнистой, т.е. «безузорчатые». Вероятно, это объясняется тем, что карельская береза может переопыляться с деревьями других близкородственных видов березы (например, с березой повислой и березой пушистой).

3. В целом по ростовым показателям «безузорчатые» сеянцы превышали «узорчатые» независимо от места сбора семян. В среднем они были больше по высоте почти вдвое, а по диаметру – в 1,5 раза. Однако очевидно, что только этого показателя недостаточно, чтобы провести их разделение на «узорчатые» и «безузорчатые», учитывая полиморфизм жизненных форм, характерный для карельской березы. Широкий размах изменчивости ростовых показателей у «узорчатых» форм карельской березы также подтвердил целесообразность разделения ее сеянцев на группы по скорости роста на ранних этапах их развития.

4. Использование молекулярного маркера ВрСW1 показало: несмотря на то, что при семенном размножении и свободном опылении карельской березы происходит расщепление признаков в потомстве, число растений с «узорчатой» древесиной может быть существенно выше, чем считалось ранее. Однако из-за низкой конкурентоспособности такие растения уступают в росте «безузорчатым» и, по всей вероятности, погибают уже на ранних этапах развития. Возможно этим, наряду с другими причинами, объясняется низкий уровень естественного возобновления карельской березы.

5. Результаты проведенной работы подтвердили вывод о возможности использования семян от свободного опыления для выращивания посадочного материала карельской березы при условии выявления у сеянцев наличия потенциальной «узорчатости» с помощью молекулярного маркера ВрСW1 уже на ранних этапах их развития, что невозможно сделать обычными методами, основанными на анализе только внешних (морфологических) признаков.

Вклад авторов. Жигунов А.В. – формирование задачи, организация исследований, руководство проектом; Сафронычева Е.Д. – ПЦР-анализ; Ветчинникова Л.В. – анализ данных, их визуализация, написание и редактирование текста статьи; Титов А.Ф. – написание и редактирование текста статьи. Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Сведения о финансировании исследования. Исследование выполнено за счет средств Российского научного фонда (проект № 22-16-00096-П «Выявление генетических факторов, контролирующих признак «узорчатость древесины» у карельской березы с использованием высокопроизводительного генотипирования»).

Благодарности. Авторы благодарят Е.К. Потокину, Д.С. Каржаева, В.А. Волкова, Р.Ф. Губаева, Е. Григорьеву, М.В. Тисс и всех других участников коллектива, проводящего разносторонние исследования в рамках проекта РНФ.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф. Карельская береза: разновидность или самостоятельный вид? // ИВУЗ. Лесной журнал. 2020. № 1. С. 26–48. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-26-48.

Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф. Карельская береза: важнейшие результаты и перспективы исследований: монография. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2021. 243 с.

Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф., Костина Е.Э., Жигунов А.В. Сибсовое потомство карельской березы на Заонежской лесосеменной плантации // ИВУЗ. Лесной журнал. 2023. № 5. С. 9–26. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-5-9-26.

Евдокимов А.П. Биология и культура карельской березы. Л.: Изд-во ЛГУ, 1989. 222 с.

Ермаков В.И. Механизмы адаптации березы к условиям Севера. Л.: Наука, 1986. 144 с.

Жигунов А.В., Ветчинникова Л.В., Губаев Р.Ф., Каржаев Д.С., Волков В.А., Потокينا Е.К. ВpCW1 – молекулярный маркер для выявления генотипов карельской березы на ранних стадиях развития. Патент на изобретение РФ № 2823809. 2024.

Любавская А.Я. Селекция и разведение карельской березы. М., 1966. 124 с.

Любавская А.Я. Карельская береза. М.: Лесн. пром-сть, 1978. 158 с.

Мамаев С.А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений. М., 1973. 284 с.

Николаевская Т.С., Ветчинникова Л.В., Лебедева О.Н., Кузнецова Т.Ю. Морфофизиологическая характеристика пыльцы различных видов березы в условиях Восточной Фенноскандии // Труды КарНЦ РАН. Сер. Биogeография. 2008. Вып. 14. С. 84–91.

Соколов Н.О. Карельская береза. Петрозаводск: Гос. изд. Карело-Финской ССР, 1950. 116 с.

Соколов Н.О. Отбор и выращивание березы карельской в Ленинградской области с использованием самосева // Лесная генетика, селекция и семеноводство. Петрозаводск, 1970. С. 277–281.

Gubaev R., Karzhaev D., Grigoreva E., Lytkin K., Safronycheva E., Volkov V., Nesterchuk V., Vetchinnikova L., Zhigunov A., Potokina E. Dissection of figured wood trait in curly birch (*Betula pendula* Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti) using high-throughput genotyping // Scientific Reports. 2024. Vol. 14. Art. no. 5058. DOI: 10.1038/s41598-024-55404-y.

Heikinheimo O. Kokemuksia visakoivun kasvatuksesta // Commun. Inst. Forest. Fenn. 1951. Vol. 39, no. 5. P. 4–26.

Johnsson H. Avkommor av masurbjork // Svenska Skogsvf. Tidskr. 1951. Bd. 49, no. 1. S. 34–45.

Larsen C.M. Masurbirk. Rejseberetning – Masurbirk i Finland // Materialet i arboretet. Dansk Skovforen. Tidsskr. 1940. Vol. 25. P. 33–72.

Rahimah A.R., Cheah S.C., Rajinder S. Freeze-drying of oil palm (*Elaeis guineensis*) leaf and its effect on the quality of extractable DNA // J. Oil Palm Res. 2006. Vol. 18. P. 296–304.

Vetchinnikova L.V., Titov A.F. Specific Characteristics of Karelian Birch Population Structure // Biology Bulletin Reviews. 2021. Vol. 11, no 4. P. 414–427. DOI: 10.1134/S2079086421040095.

References

Evdokimov A.P. Biology and culture of curly birch. Leningrad: LSU, 1989. 222 p. (In Russ.)

Ermakov V.I. Mechanisms of birch adaptation to the North conditions. Leningrad: Nauka, 1986. 144 p. (In Russ.)

Gubaev R., Karzhaev D., Grigoreva E., Lytkin K., Safronycheva E., Volkov V., Nesterchuk V., Vetchinnikova L., Zhigunov A., Potokina E. Dissection of figured wood trait in curly birch (*Betula pendula* Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti) using high-throughput genotyping. *Scientific Reports*, 2024, vol. 14, art. no. 5058. DOI: 10.1038/s41598-024-55404-y.

Heikinheimo O. Kokemuksia visakoivun kasvatuksesta. *Commun. Inst. Forest. Fenn.*, 1951, vol. 39, no. 5, pp. 4–26.

Johnsson H. Avkommor av masurbjork. *Svenska Skogsvf. Tidskr.*, 1951, bd. 49, no. 1, ss. 34–45.

Larsen C.M. Masurbirk. Rejseberetning – Masurbirk i Finland. *Materialet i arboretet. Dansk Skovforen. Tidsskr.*, 1940, vol. 25, pp. 33–72.

Lyubavskaya A.Ya. Selection and breeding of Karelian birch. Moscow, 1966. 124 p. (In Russ.)

Lyubavskaya A.Ya. Karelian birch. Moscow: Lesnaya promyshlennost, 1978. 158 p. (In Russ.)

Mamaev S.A. Forms of intraspecific variability of woody plants. Moscow, 1973. 284 p. (In Russ.)

Nikolaevskaya T.S., Vetchinnikova L.V., Lebedeva O.N., Kuznetsova T.Yu. Morphophysiological characteristics of pollen of different birch species in the conditions of Eastern Fennoscandia. *Transactions of Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences. Ser. Biogeography*, 2008, iss. 14, pp. 84–91. (In Russ.)

Rahimah A.R., Cheah S.C., Rajinder S. Freeze-drying of oil palm (*Elaeis guineensis*) leaf and its effect on the quality of extractable DNA. *J. Oil Palm Res.*, 2006, vol. 18, pp. 296–304.

Sokolov N.O. Curly birch. Petrozavodsk. 1950. 116 p. (In Russ.)

Sokolov N.O. Selection and cultivation of Karelian birch in the Leningrad region using self-seeding. *Forest genetics, selection and seed production*. Petrozavodsk, 1970, pp. 277–281. (In Russ.)

Vetchinnikova L.V., Titov A.F. Curly birch: a variety or a separate species? *IVUZ. Forestry journal*, 2020, no. 1, pp. 26–48. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-1-26-48. (In Russ.)

Vetchinnikova L.V., Titov A.F. Specific Characteristics of Curly Birch Population Structure. *Biology Bulletin Reviews*, 2021, vol. 11, no. 4, pp. 414–427. DOI: 10.1134/S2079086421040095.

Vetchinnikova L., Titov A. CURLY BIRCH: major research results and prospects for future research: monograph. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2021. 243 p. (In Russ.)

Vetchinnikova L.V., Titov A.F., Kostina E.E., Zhigunov A.V. Sibs progeny of curly birch on Zaonezhskaya forest seed plantation. *IVUZ. Forestry journal*, 2023, no. 5, pp. 9–26. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-5-9-26. (In Russ.)

Zhigunov A.V., Vetchinnikova L.V., Gubaev R.F., Karzhaev D.S., Volkov V.A., Potokina E.K. ВрСW1 – a molecular marker for identifying curly birch genotypes at early stages of development. Patent for invention of the Russian Federation No. 2823809. 2024. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 29.11.2024

Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф., Сафроничева Е.Д., Жигунов А.В. Особенности роста сеянцев карельской березы, полученных в результате свободного опыления, и выявление среди них носителей признака «узорчатая древесина» с помощью молекулярного маркера ВрСW1 // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 256. С. 397–413.* DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.397-413

Приводятся результаты изучения роста однолетних сеянцев карельской березы, полученных в результате свободного опыления деревьев, произрастающих в Ленинградской области на территории Гатчинского ПЛСУ, в учебно-производственном питомнике Лисинского лесного колледжа (насаждение «Шапки») и дендропарке Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства («СПбНИИЛХ»). Показано, что ростовые показатели сеянцев существенно различались в зависимости от года и места сбора семян. Так, высота сеянцев из дендропарка СПбНИИЛХа к осени 2023 г. составила в среднем 51,4 см, а диаметр у корневой шейки – 1,6 мм. В 2024 г. наибольшие средние значения этих показателей зафиксированы у сеянцев, выращенных из семян, собранных на Гатчинском ПЛСУ (соответственно, 20,5 см и 2,5 мм), а наименьшие – у сеянцев из дендропарка СПбНИИЛХа (соответственно, 8,2 см и 1,6 мм). Использование молекулярного маркера ВрСW1 позволило уже в первый год жизни сеянцев выявить среди них носителей признака «узорчатая древесина», что внешне проявляется, как правило, в возрасте 8 лет и даже позднее. В результате ПЦР-анализа у 43%

изученных сеянцев обнаружены продукты амплификации в гомо- или гетерозиготном (476 п.н. или 476/530 п.н.) состоянии, свойственные «узорчатым» растениям карельской березы, что существенно выше, чем считалось ранее для семенного потомства, полученного в результате свободного опыления. Из анализа ростовых показателей следует, что «безузорчатые» растения по средним значениям высоты и диаметра превышают «узорчатые» примерно в 1,5 раза независимо от места сбора семян. Однако только этого показателя недостаточно, чтобы провести их разделение на «узорчатые» и «безузорчатые» растения, учитывая полиморфизм жизненных форм, характерный для карельской березы. На основании проведенной работы сделан вывод о возможности использования семян от свободного опыления для выращивания посадочного материала карельской березы при условии выявления среди них носителей признака «узорчатая древесина» с помощью молекулярного маркера BpCW1, что в раннем возрасте практически невозможно сделать методами, основанными на анализе только внешних (морфологических) признаков.

Ключевые слова: карельская береза, *Betula pendula* Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti, семенное потомство, рост, узорчатая древесина.

Vetchinnikova L.V., Titov A.F., Safronicheva E.D., Zhigunov A.V. Growth patterns of curly birch seedlings produced through open pollination and identification of the individuals carrying the ‘figured grain’ trait using BpCW1 molecular marker. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoi Akademii*, 2025, iss. 256, pp. 397–413 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.256.397-413

The article reports the results of research on the growth of one-year-old curly birch seedlings produced through open pollination and growing in the Leningrad Region in the Gatchina permanent seed production stand (PSPS), training nursery of the Lisino Forest College (Shapki plantation), and arboretum of the St. Petersburg Forestry Research Institute (StPFRI). It is demonstrated that the seedlings’ parameters varied significantly depending on the seed collection year and method. Thus, the average height of seedlings in the StPFRI arboretum by the fall 2023 was 51.4 cm and their root collar diameter was 1.6 mm. In 2024, the average values of these parameters were the highest in seedlings grown from seeds collected in the Gatchina PSPS (20.5 cm and 2.5 mm, respectively) and the lowest in seedlings originating from the StPFRI arboretum (8.2 cm and 1.6 mm). Application of the BpCW1 molecular marker permitted detecting the seedlings with the ‘figured grain’ trait as early as in their first year, whereas this trait would normally have exterior manifestations only at 8 years of age or even later. PCR analysis revealed homo- or heterozygous (476 base pairs or 476/530 base pairs) amplification products

characteristic of figured-grain curly birch plants in 43% of the analyzed seedlings, which is notably higher than accepted previously for seed progeny from open pollination. Our analysis of the growth parameters shows that the ‘non-figured’ plants had approximately 1.5-fold higher average height and diameter than the ‘figured’ plants irrespective of the seed provenance. However, these parameters are insufficient for differentiating between ‘figured’ and ‘non-figured’ plants considering the life-form polymorphism of curly birch. It is concluded that seeds from open pollination can be used to produce curly birch planting stock provided that the ‘figured grain’ trait is identified in them by the BpCW1 molecular marker, which is nearly unidentifiable at an early age using conventional methods based on the analysis of exterior (morphological) traits.

Key words: curly birch, *Betula pendula* Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti, seed progeny, growth, patterned wood.

ВЕТЧИНИКОВА Лидия Васильевна – доцент, главный научный сотрудник лаборатории лесных биотехнологий Института леса ФИЦ «Карельский научный центр Российской академии наук», доктор биологических наук. SPIN-код: 7683-6378. ResearcherID: J-5665-2018. ORCID: 0000-0003-2091-905X.

185910, ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, Россия. E-mail: vetchin@krc.karelia.ru

VETCHINNIKOVA Lidya V. – DSc (Biology), Assistant Professor, Chief Researcher in the Laboratory for Forest Biotechnology, Forest Research Institute KarRC RAS. SPIN-code: 7683-6378. ResearcherID: J-5665-2018. ORCID: 0000-0003-2091-905X.

185910. Pushkinskaya str. 11. Petrozavodsk. Russia. E-mail: vetchin@krc.karelia.ru

ТИТОВ Александр Федорович – член-корреспондент РАН, профессор, главный научный сотрудник лаборатории экологической физиологии растений Института биологии ФИЦ «Карельский научный центр Российской академии наук», доктор биологических наук. SPIN-код: 2324-5060. ResearcherID: A-6705-2014. ORCID: 0000-0001-6880-2411.

185910, ул. Пушкинская, д. 11, г. Петрозаводск, Россия. E-mail: titov@krc.karelia.ru

TITOV Aleksandr F. – DSc (Biology), RAS Corr. Fellow, Professor, Chief Researcher in the Laboratory of Plant Ecophysiology, Institute of Biology KarRC RAS. SPIN-code: 2324-5060. ResearcherID: A-6705-2014. ORCID: 0000-0001-6880-2411.

185910. Pushkinskaya str. 11. Petrozavodsk. Russia. E-mail: titov@krc.karelia.ru

САФРОНЫЧЕВА Елизавета Дмитриевна – младший научный сотрудник Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. SPIN-код: 4971-2924. ResearcherID: JNT-0110-2023. ORCID: 0009-0001-7015-5230.

194021, Институтский пр., д. 21, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: esafronycheva@mail.ru

SAFRONYCHEVA Elizaveta D. – Junior Researcher in St. Petersburg Forestry Research Institute. SPIN-code: 4971-2924. ResearcherID: JNT-0110-2023. ORCID: 0009-0001-7015-5230.

194021. Institute av. 21. St. Petersburg. Russia. E-mail: esafronycheva@mail.ru

ЖИГУНОВ Анатолий Васильевич – профессор кафедры лесных культур Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 6704-5792. ResearcherID: ААК-8124-2020. ORCID: 0000-0001-8707-7526.

194024, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: a.zhigunov@bk.ru

ZHIGUNOV Anatolii V. – DSc (Agriculture), Professor, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 6704-5792. ResearcherID: ААК-8124-2020 ORCID: 0000-0001-8707-7526.

194024. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: a.zhigunov@bk.ru