

БИОЛОГИЯ РЕСУРСНЫХ ВИДОВ

УДК 582.632.1:57.017.3(1-751.1)

РЕИНТРОДУКЦИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОПУЛЯЦИИ *BETULA PENDULA* VAR. *CARELICA* (BETULACEAE) В ГОСУДАРСТВЕННОМ ПРИРОДНОМ ЗАКАЗНИКЕ «КИЖСКИЙ» (РЕСПУБЛИКА КАРЕЛИЯ)

© 2024 г. Л. В. Ветчинникова^{1,*}, А. Ф. Титов²

¹Институт леса Карельского научного центра РАН, г. Петрозаводск, Россия

²Институт биологии Карельского научного центра РАН, г. Петрозаводск, Россия

*e-mail: vetchin@krc.karelia.ru

Поступила в редакцию 30.04.2024 г.

После доработки 16.06.2024 г.

Принята к публикации 12.07.2024 г.

Статья посвящена результатам 15-летней работы по реинтродукции карельской березы *Betula pendula* Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti и восстановлению таким способом одной из наиболее крупных ее природных популяций, располагавшейся ранее в границах государственного природного заказника «Кижский» (на территории охранной зоны музея-заповедника «Кижский»). Заказник входит в Список всемирного культурного и природного наследия ЮНЕСКО. Названы основные причины, обусловившие резкое сокращение ее численности: незаконные рубки, значительный возраст деревьев, отсутствие жизнеспособного подростка, ставшие критическими для ее существования. В качестве исходного (посадочного) материала для осуществления данной работы использовали семенное (от свободного опыления) и вегетативное (путем клонального микроразмножения) потомство карельской березы, единичные деревья которой были обнаружены в естественных условиях на о. Киж. Дан сравнительный анализ выживаемости, роста и развития саженцев в разных условиях произрастания на материковой части заказника и на территории самого о. Киж. Получена молекулярно-генетическая характеристика ряда деревьев карельской березы, участвующих в реинтродукции. Сделан вывод, что для восстановления природных популяций карельской березы, а также создания новых целесообразно использовать потомство деревьев местного происхождения, даже если в естественных условиях сохранились лишь единичные из них. При этом семенное потомство позволяет расширить генетическое разнообразие восстанавливаемой (или создаваемой) популяции, а вегетативное — сохранить уникальные признаки, присущие исходным деревьям *in situ* (т. е. в исторически родной для них природной среде).

Ключевые слова: *Betula pendula* var. *carelica*, ресурсы, генофонд, выживаемость, размножение, рост, развитие

DOI: 10.31857/S0033994624040048, **EDN:** PRDASN

Betula pendula Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti (карельская береза) давно стала одним из главных символов Республики Карелия. Вместе с тем она хорошо известна во всем мире благодаря высокоценной узорчатой текстуре древесины. Исторически сложившееся название — карельская — у этой березы, очевидно, связано с названием местности, где она впервые была обнаружена и использовалась на протяжении многих десятилетий населением в качестве древесного сырья. Но только в 1920–1930-е годы 20-го века началось систематическое изучение биологических особенностей этого уникального представителя европейской лесной дендрофлоры [1]. Оказалось, что на

всем протяжении своего ареала карельская береза не образует лесов, а произрастает одиночно или небольшими группами, часто изолированными друг от друга. В 1939 г. Совет народных комиссаров Карельской АССР издал специальное постановление, в котором она была названа особо охраняемой породой. Были запрещены ее рубки, начаты работы по инвентаризации и воспроизводству. Однако проводимые в тот период мероприятия, так же как и осуществляемые в последующие годы, не смогли кардинально изменить сложившийся многолетний тренд сокращения ее численности, и, следовательно, уменьшения генетического разнообразия.

Как известно, важная роль в сохранении генетического разнообразия редких видов, находящихся под угрозой исчезновения, к числу которых относятся и карельская береза, принадлежит особо охраняемым природным территориям (ООПТ) [2–4]. Для охраны и воспроизводства карельской березы в 1984 г. в Карелии были организованы четыре (из 10 ныне существующих) государственных ботанических заказника (ГБЗк) регионального значения общей площадью 40,4 га [5, 6], которые до сих пор являются единственными в России. По своему местоположению они соответствуют ранее существовавшим природным популяциям карельской березы, описанным в 1950-е годы [7]. Сохранение генофонда карельской березы осуществляется также в ранее созданных ООПТ федерального значения, к которым относятся государственный природный заповедник (ГПЗп) «Кивач» и государственный природный заказник (ГПЗк) «Кижский», на территории которых обнаружены типичные для нее местообитания [8]. Карельская береза включена в Красные книги Республики Карелия [9–11] и Владимирской области [12].

ГПЗк «Кижский» создан в 1989 г. и находится в Медвежьегорском районе Республики Карелия, в шхерах северо-западной части Онежского озера (Заонежье) в окрестностях д. Сенная Губа и о. Кижы, в 56 км на северо-восток от г. Петрозаводска [13]. Он занимает часть территории лесничества «Кижы» Великогубского участкового лесничества Медвежьегорского лесничества, включая охранную зону музея-заповедника «Кижы», имеющую статус земель историко-культурного наследия. Сам Государственный историко-архитектурный музей-заповедник «Кижы», основанный в 1966 г., является одним из крупнейших в России музеев под открытым небом. Он представляет собой уникальный историко-культурный и природный комплекс и является особо ценным объектом культурного наследия народов России. Основа музейного собрания — ансамбль Кижского погоста — включен в 1990 г. в Список всемирного культурного и природного наследия ЮНЕСКО (англ. UNESCO; United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization).

По своему профилю ГПЗк «Кижский» является биологическим, созданным для защиты редких видов животных и растений, но его основной профиль — зоологический — направлен на сохранение водно-болотных птиц и других представителей

фауны. Вместе с тем еще в 1930-е годы территория Кижского сельсовета (волости) Заонежского района была известна наличием здесь карельской березы [7]. К примеру, в 1938 г. на материковой части в урочищах Березовая сельга и Сосновый бор, а также вдоль прилегавшей к ним дороги (протяженностью 2–3 километра) произрастало более 300 деревьев, притом что в 1937 г. здесь было заготовлено около 50 стволов карельской березы (в случае ее многоствольной формы роста, которая довольно часто встречалась в природной среде, регистрировали количество стволов, а не деревьев) [7]. Отсюда следует, что в первой половине 20-го века в Кижском шхерном районе, материковой части охранной зоны музея-заповедника «Кижы» (в настоящее время — составная часть ГПЗк «Кижский») на площади около 4 га — от мыса Кушнаволока к северу до бывшей тогда д. Жарниково, располагалась одна из четырех наиболее крупных природных популяций карельской березы, описанных на тот период в Карелии (после заонежской, каккоровской и спасогубской) [8].

Позднее, в 1991 г., на площади около 13 га (включая мыс Кушнаволока и окрестности д. Оятевщины) было зарегистрировано 243 дерева карельской березы, высота которых в среднем составляла около 20 м, а диаметр ствола отдельных особей достигал 48 см [14]. Согласно очевидцам, в 1960-е годы карельская береза единично произрастала и на самом о. Кижы. Однако к началу 21-го столетия численность этой природной популяции здесь существенно сократилась [15]. По-видимому, это произошло в результате длительной эксплуатации ее ресурсов, низкой конкурентоспособности карельской березы по сравнению с другими древесными растениями, а на рубеже 20 и 21-го веков — еще и вследствие незаконных рубок. Позднее утраченными оказались и оставшиеся единичные деревья карельской березы. Часть из них выпадала из насаждения по мере достижения критического возраста (90 лет и более), а другие — в результате сильного ветровала, наблюдавшегося в 2013 г. Жизнеспособный подрост и/или вегетативное возобновление, например, в виде корневой поросли, здесь не выявлены.

Целью наших исследований явилось изучение роста и развития саженцев семенного происхождения и растений, полученных путем клонального микроразмножения, карельской березы, в связи с реинтродукцией и восстановлением ее природ-

ной популяции на территории ГПЗк «Кижский» (на материковой части и на острове Кизи).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Объектами исследований стали растения карельской березы семенного и вегетативного происхождения, высаженные нами *in situ* на территории материковой части (участки «Кушнаволо-лок», 62°2'35.2" с.ш., 35°10'54.5" в.д., «Жарниково1» и «Жарниково 2», 62°3'11.2" с.ш., 35°10'13.5"

о. Кизи нами обнаружены три дерева карельской березы естественного происхождения с характерными для нее внешними признаками (рис. 2). С одного из них (рис. 2, а) были собраны семена от свободного опыления и выращено семенное потомство. Сбор семян осуществляли в 2008 г. и 2012 г.

Опытные участки для семенного потомства были организованы на материковой части заказника в условиях лесного («Кушнаволо-лок» и «Жарниково 1», 195 и 54 растения, соответ-

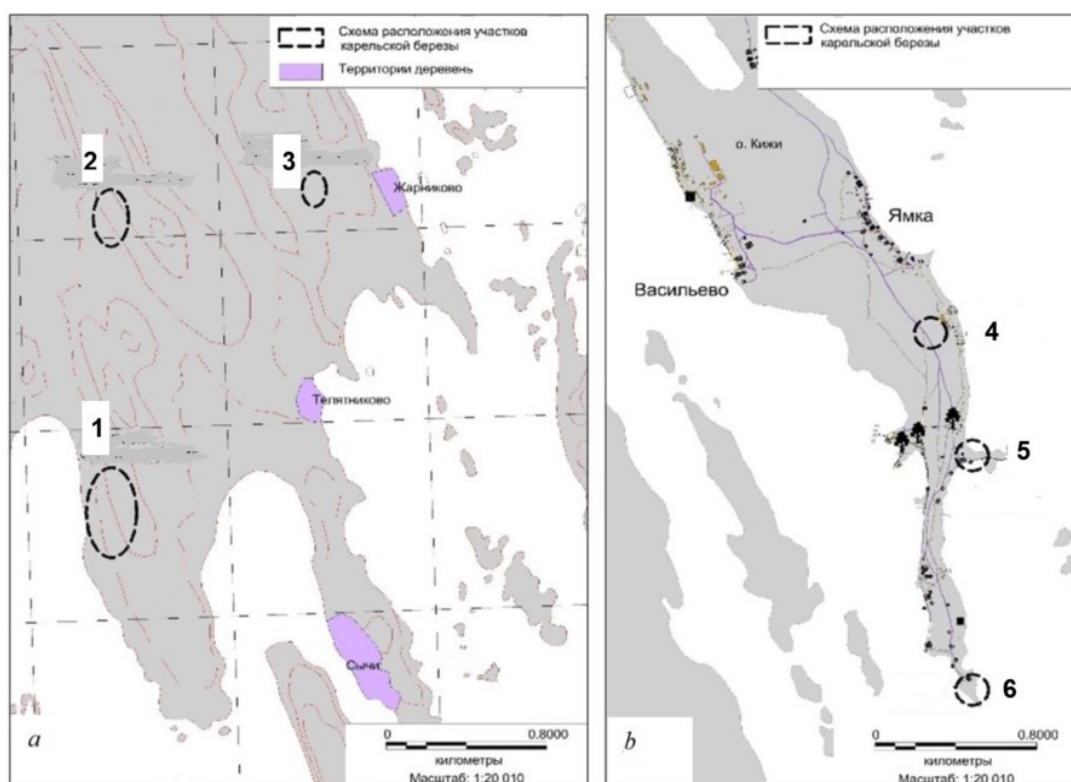


Рис. 1. Схемы расположения опытных участков *Betula pendula* var. *carelica* на территории ГПЗк «Кижский» на его материковой части (а) и на о. Кизи (б). Республика Карелия, где 1 – «Кушнавололок», 2 – «Жарниково 1», 3 – «Жарниково 2», 4 – «Центральный», 5 – «Восточный», 6 – «Южный».

Fig. 1. Locations of *Betula pendula* var. *carelica* experimental plots in mainland (а) and on Kizhi Island (б) parts of Kizhskii Sanctuary (Republic of Karelia), where 1 – “Kushnavolok”, 2 – “Zhamnikovo 1”, 3 – “Zhamnikovo 2”, 4 – “Tsentralnyj”, 5 – “Vostochnyj”, 6 – “Yuzhnyj”

в.д.) ГПЗк «Кижский» (рис. 1, а) и на одном из его островов (о. Кизи, участки «Южный», «Восточный» и «Центральный», 62°3'21.8" с.ш., 35°12'4.4" в.д.) (рис. 1, б).

Важным обстоятельством, способствовавшим проведению данных исследований, явилось то, что в 2005 и 2013 гг. в центральной части

ственно) и лугового («Жарниково 2», 76 растений) сообществ. Посадочным материалом служили 2-летние саженцы карельской березы, имеющие генетическое родство между собой по материнской линии. Опытные участки «Кушнавололок» и «Жарниково 1» созданы на территории лесного сообщества естественного происхождения. Первый из них (участок «Куш-

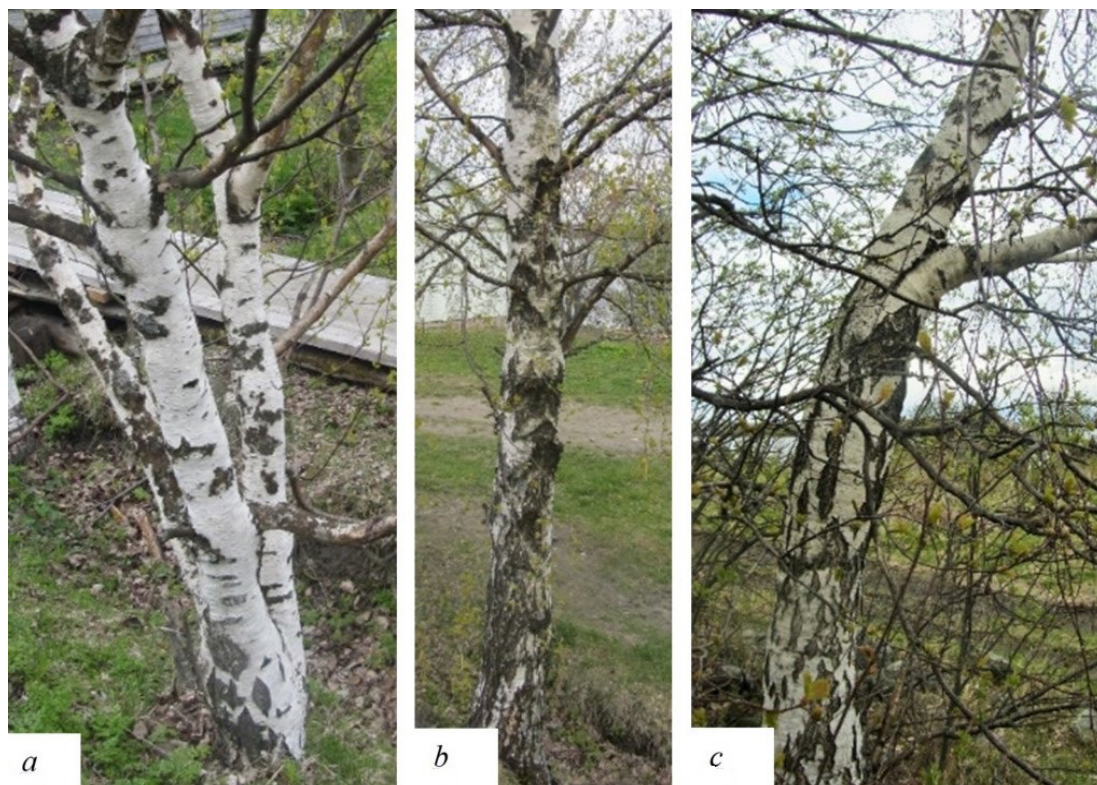


Рис. 2. Деревья *Betula pendula* var. *carelica*, произрастающие на о. Кизи в природной среде, от которых получено семенное (a) и вегетативное (b, c) потомства.

Fig. 2. *Betula pendula* var. *carelica* trees growing naturally on Kizhi Island, from which seed (a) and vegetative (b, c) progenies were obtained.

наволоок») находится вблизи акватории Кижских шхер, характеризуется каменистыми почвами и смешанным составом древостоя, состоящего из лиственных и хвойных пород. Другой участок («Жарниково 1») имеет более высокое расположение над ур. м. и отличается преобладанием в древостое *Pinus sylvestris* L. При посадке саженцев карельской березы предпочтение отдавали лесным опушкам, просветам в пологе древостоя («окнам возобновления») или другим открытым участкам. Опытный участок «Жарниково 2» ранее использовался для сенокоса, и в настоящее время на нем отсутствуют деревья, хотя по периметру он окружен смешанным лиственным насаждением из *Betula* spp., *Salix* spp., *Padus avium* Mill., *Alnus incana* (L.) Moench. Растительность о. Кизи представлена луговыми сообществами, возникшими на территории бывших поселений и прилегающих к ним сельскохозяйственных (пашен, пастбищ, сенокосов).

Для получения вегетативного потомства (путем клонального микроразмножения) исходными стали пять деревьев карельской березы, три

из которых произрастают на о. Кизи, а два — в природной популяции, расположенной на Заонежском п-ове (примерно в 50 км севернее от о. Кизи, с 1984 г. — ГБЗк «Анисимовщина»).

Вегетативное потомство (5 генотипов) получали на основе клонального микроразмножения (рис. 3) в течение 7 месяцев (с февраля по август) и в тот же год высаживали на о. Кизи: в 2015 г. на участках «Южный» и «Восточный» (8 и 15 растений соответственно), в 2019 г. — на участке «Центральный» (10 растений). Для создания стерильной культуры тканей использовали апикальную (верхушечную) меристему вегетативных почек ауксибластов (однолетние удлиненные побеги) (рис. 3, a). Посадочный материал, полученный на основе клонального микроразмножения (рис. 3, b–d), гарантированно сохраняет признаки, свойственные исходным деревьям [15]. Полученная культура тканей стала частью коллекции клонов *in vitro*, созданной нами в Институте леса Карельского научного центра РАН [16].

Для оценки роста карельской березы использовали показатель высоты растений.

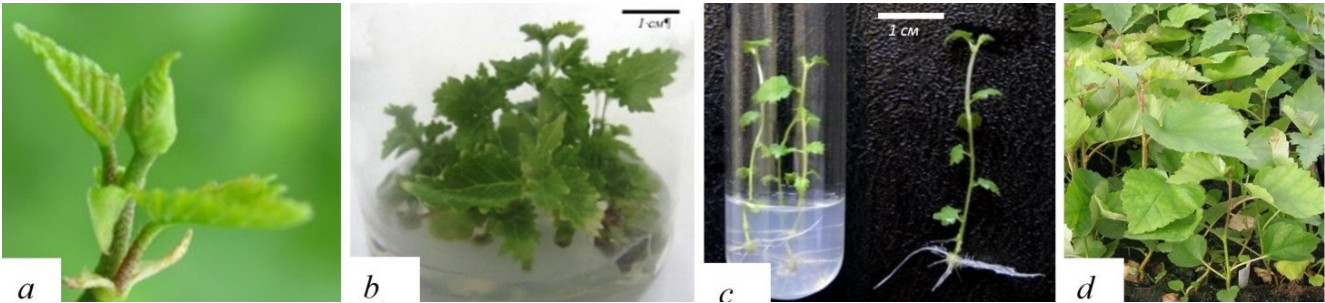


Рис. 3. Основные этапы получения вегетативного (клонового) потомства из вегетативной почки ауксибласта (а) на основе клонального микроразмножения: стерильная культура побегов (b) и их укоренение *in vitro* (c) и *ex vitro* (d).
Fig. 3. Main stages of obtaining vegetative (cloned) progeny from auxiblast vegetative bud (a) through clonal micropropagation: sterile shoot culture (b) and rooting *in vitro* (c) and *ex vitro* (d).

Высоту измеряли в первые два года развития с точностью ± 0.5 мм, а с пяти лет — ± 1.0 см. Наличие узорчатой текстуры в древесине определяли визуально по косвенным признакам, характерным для карельской березы, к которым относятся утолщения на поверхности ствола [17]. Для оценки изменчивости высоты растений использовали коэффициент вариации (C , %), оценка которого осуществлялась по шкале уровней изменчивости, предложенной ранее для древесных растений [18]: $C < 7\%$ — очень низкий уровень изменчивости; $C = 8–12\%$ — низкий; $C = 13–20\%$ — средний; $C = 21–30\%$ — повышенный; $C = 31–40\%$ — высокий и $C > 40\%$ — очень высокий. Наблюдения проводили в период с 2010 по 2023 гг.

Для генотипирования было отобрано вегетативное потомство (полученное *in vitro*) трех деревьев

карельской березы, одно из которых произрастает на о. Кизи (рис. 2, c), а два других — на территории, занимаемой природной популяцией, примерно в 50 км севернее от о. Кизи (ГБЗк «Анисимовщина»). Выделение ДНК проводили на основании СТАВ (Cetrimonium Bromide) протокола [19, 20]. В ходе исследований использовали SSR (simple sequence repeats), или микросателлитные маркеры (табл. 1), рекомендованные для видов рода *Betula* L. (локусы L1.10, L2.2, L3.1, L5.4, L7.1, L7.3, L022) [21–24].

Полимеразную цепную реакцию выполняли с использованием коммерческих наборов согласно протоколам фирм-производителей. Электрофоретический анализ SSR-маркеров проводили на генетическом анализаторе ABI Prism 310 (Applied Biosystems, США) в соответствии с программой, рекомендуемой фирмой-производителем. Нуклеотидная структура

Таблица 1. Характеристика микросателлитных локусов и праймеров, использованных для генотипирования клонов *Betula pendula* var. *carelica* (полученных *in vitro*), высаженных на о. Кизи
Table 1. Characteristics of microsatellite loci and primers used for genotyping *Betula pendula* var. *carelica* clones (produced *in vitro*) planted on Kizhi Island

Локус Locus	Нуклеотидная последовательность праймеров 5'–3' Nucleotide sequence of the primers 5'–3'	
	Прямой Forward	Обратный Reverse
L1.10	ACGCTTTCTTGATGTCAGCC	TCACCAAGTTCCTGGTGGAT
L2.2	AGACCATGCCTGGGCCTT	CGCAACAAAACACGATGAGA
L3.1	CTCCTTAGCTGGCACGGAC	CCTTCTTCATAAAACCCTCAA
L5.4	AAGGGCACCTGCAGATTAGA	AAAATTGCAACAAAACGTGC
L7.1	GTTTTGGGTTTCCACTTCCA	ACTGGTAATACCTTTACCAAGCC
L7.3	GGGGATCCAGTAAGCGGTAT	CACACGAGAGATAGAGTAACGGAA
L022	AACGGACAAATTCACGGGTA	GGAGTTCATGGATTGGAGGA

Таблица 2. Выживаемость и высота растений семенного происхождения на участках, созданных для восстановления природной популяции *Betula pendula* var. *carelica* на материковой части ГПЗк «Кижский»**Table 2.** Survival rate and height of plants grown from seeds in sites established to restore the natural population of *Betula pendula* var. *carelica* in the mainland part of the Kizhskii Sanctuary

Участок, год наблюдений Site, year of observation	Число растений, экз. Number of trees	Выживаемость, % от исходного числа растений Survival rate, % of initial number of plants	Высота, М ± m, м Height, M ± m, m	Размах изменчивости, м Variation range, m	Коэффициент вариации (C, %) Coefficient of variation (C, %)
«Кушнаволоок» Kushnavolok					
2010	195	—	0.71 ± 0.13	0.33–0.98	18.9
2011	67	34.36	0.72 ± 0.16	0.38–1.08	22.1
2012	27	13.78	0.78 ± 0.13	0.51–1.17	16.8
2013	13	6.67	0.80 ± 0.11	0.40–1.00	13.5
2015	7	3.58	0.72 ± 0.13	0.48–0.86	18.3
«Жарниково 1» Zharnikovo-1					
2010	54	—	0.67 ± 0.12	0.33–0.93	21.8
2011	53	98.14	0.82 ± 0.14	0.60–1.10	14.4
2012	47	87.03	0.84 ± 0.12	0.67–1.06	13.8
2013	39	72.22	0.81 ± 0.17	0.44–1.23	20.3
2015	31	57.41	0.76 ± 0.19	0.40–1.02	22.8
2017	20	37.03	0.89 ± 0.14	0.58–1.09	15.7
2021	7	12.96	0.77 ± 0.18	0.46–1.01	24.2
«Жарниково 2» Zharnikovo-2					
2015	76	—	1.26 ± 0.24	0.77–1.84	19.3
2017	50	65.79	1.38 ± 0.27	0.82–2.12	19.9
2019	45	59.21	1.67 ± 0.31	1.02–2.48	18.6
2021	42	55.26	1.99 ± 0.31	1.40–2.65	15.7
2023	42	55.26	2.45 ± 0.54	1.69–4.10	21.5

секвенированных ампликонов анализировалась с помощью сервиса BLAST в GenBank NCBI.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Рост и развитие растений карельской березы семенного происхождения

Первые опытные участки карельской березы *in situ* с целью восстановления ее природной популяции на территории ГПЗк «Кижский» были созданы нами в 2010 г. на двух лесных участках: «Кушнаволоок» — в прибрежной части на мысе Кушнаволоок (195 растений, 14 площадок) и «Жарниково 1» — вблизи заброшенной д. Жарниково (54 растения, две площадки). На момент посадки около 70% растений имели высоту более 60 см, хотя она варьировала в диапазоне от 33 до 98 см (табл. 2). При этом коэффициент вариации

(C, %) по признаку высоты растений на первом участке равнялся 18.9% и соответствовал среднему уровню, а на втором был немного выше — 21.8%. К осени следующего года на участке «Кушнаволоок» выживаемость растений в среднем составила 34.4%, варьируя от 9 до 78% в зависимости от места расположения площадки в лесном насаждении. Прирост в высоту отмечен лишь у отдельных растений, когда он доходил до 10 см. Эти изменения сопровождалось небольшим повышением коэффициента вариации (22.1%). Спустя два года количество растений резко сократилось, а еще через два года их осталось только 7.

Более высокую выживаемость карельской березы в первые два года после посадки (98 и 87%, соответственно) регистрировали на другом лесном участке — «Жарниково 1» (табл. 2). Здесь почти у 40% растений отмечали прирост в высоту

до 20 см, а у 10% он оказался выше — от 40 до 60 см. В результате у более, чем 60% растений высота варьировала от 67 до 106 см, а коэффициент вариации составил около 14%, что соответствует его среднему уровню. Еще у 30% растений верхушечные почки полностью сформировались, но прирост отсутствовал. В последующие годы на участке «Жарниково 1», расположенном, как и «Кушнаволоку», в условиях лесного сообщества, произошло снижение не только выживаемости растений, но и скорости их роста в высоту. У части из них зафиксированы также повреждения, нанесенные зайцами в виде характерного для них «среза» верхушечного побега. Спустя шесть лет после посадки отмечали лишь единичные растения, высота которых не превышала в среднем 80 см, а прирост отсутствовал или составлял не более 1–3 см.

На основании результатов пятилетних наблюдений за ростом и развитием семенного потомства был организован новый участок «Жарниково 2» (рис. 1, а), но уже не в условиях лесного сообщества, а на терри-

тории бывшего сенокоса. При посадке большинство (57%) саженцев имели компактную корневую систему и хорошо развитую крону. Их исходная высота в среднем была выше 1.2 м, и только у 4% — от 45 до 75 см. В последующие четыре года размах изменчивости по высоте увеличился в 1.2 раза (с 1.07 до 1.46 м), но коэффициент вариации оставался на среднем уровне (около 19%) (табл. 2). Спустя 8 лет из 76 деревьев сохранилось 42 (55.3%). Максимальные потери (26 экз. или 34%) здесь также произошли в первые два года после посадки растений на постоянное место. К настоящему времени их высота в среднем достигла 2.5 м, варьируя в диапазоне от 1.7 до 4.1 м (табл. 2). Среди них наибольшее число (45.2%) имеют высоту от 2.0 до 2.5 м, а 14.3% — более 3.0 м, что повлекло за собой небольшое повышение коэффициента вариации (до 21.5%). За последние два года вертикальный прирост составил в среднем 45 см, а максимальный — 1.9 м. Однако у части растений главный побег оказался сломанным, его замещение происходило за счет активного роста бокового побега. В лесном насаждении такие повреждения могли



Рис. 4. Проявление внешних признаков узорчатой древесины в виде выпуклостей на поверхности ствола у *Betula pendula* var. *carelica* семенного происхождения на участке «Жарниково 2».

Fig. 4. Signs of curled wood expressed as bulges on the trunk surface of *Betula pendula* var. *carelica* propagated from seeds in Zharnikovo-2 site.

Таблица 3. Выживаемость и высота растений вегетативного происхождения на участках, созданных для восстановления природной популяции *Betula pendula* var. *carelica* на о. Кизи, ГПЗк «Кижский»**Table 3.** Survival rate and height of plants obtained through vegetative propagation in sites established to restore the natural population of *Betula pendula* var. *carelica* on Kizhi Island, Kizhskii Sanctuary

Участок, год наблюдений Site, year of observation	Число растений, экз. Number of trees	Выживаемость, % от исходного числа растений Survival rate, % of initial number of plants	Высота, М ± m, Height, M ± m, m	Размах изменчивости, м Variation range, m	Коэффициент вариации (C, %) Coefficient of variation (C, %)
«Южный» Yuzhnyj					
2015	8	—	0.34 ± 0.02	0.32–0.37	5.0
2017	8	100	1.23 ± 0.13	1.00–1.38	10.4
2019	8	100	2.00 ± 0.16	1.83–2.28	8.1
2021	8	100	3.04 ± 0.38	2.50–3.70	12.4
2023	8	100	3.91 ± 0.54	3.10–4.50	13.7
«Восточный» Vostochnyj					
2015	15	—	0.34 ± 0.08	0.25–0.56	23.3
2017	10	66.67	1.23 ± 0.26	0.76–1.67	19.9
2019	9	60.0	1.76 ± 0.25	1.32–2.06	14.2
2021	9	60.0	3.02 ± 0.25	2.85–3.30	8.2
2023	9	60.0	4.6 ± 1.13	3.10–7.00	24.6
Центральный Tsentrallyj					
2019	10	—	1.10 ± 0.28	0.80–1.52	25.6
2021	6	60.0	1.37 ± 0.24	1.11–1.80	18.3
2023	2	20.0	1.88	0.80–1.88	—

нанести дикие животные, например, лоси. К 8-летнему возрасту у некоторых деревьев на поверхности ствола появились небольшие утолщения, которые свидетельствуют о начале формирования в древесине узорчатой текстуры, характерной для карельской березы (рис. 4).

Для сравнения добавим, что пять растений семенного происхождения карельской березы были посажены также на территории о. Кизи. В отличие от одновозрастных растений, произрастающих на материковой части ГПЗк «Кижский» («Жарниково 2»), их высота к настоящему времени составляет в среднем 5 м и выше. Кроме того, у них наблюдается активное формирование узорчатой древесины.

Рост и развитие растений карельской березы вегетативного происхождения

Целесообразность создания опытных участков на территории самого о. Кизи обусловлена тем, что именно здесь в природной среде острова

были обнаружены три дерева карельской березы с характерными для нее визуально заметными признаками, что говорит о том, что это местообитание является вполне подходящим для восстановления данной популяции. Вегетативное потомство от сохранившихся на острове деревьев нами получено путем клонального микроразмножения, часть из которого использована для создания трех опытных участков: в 2015 г. — «Южный» и «Восточный» (8 и 15 растений, соответственно), в 2019 г. — «Центральный» (10 растений) (рис. 1, б). Растения, высаженные на участках «Южный» и «Восточный» в 2015 г., имели высоту в среднем 34 см (табл. 3). При этом коэффициент вариации по данному признаку на первом участке соответствовал очень низкому уровню (5%), а на втором, наоборот, повышенному (23.3%).

К возрасту 8-ми лет 100% выживаемость деревьев зафиксирована только на участке «Южный» (рис. 5). Их высота в среднем составила

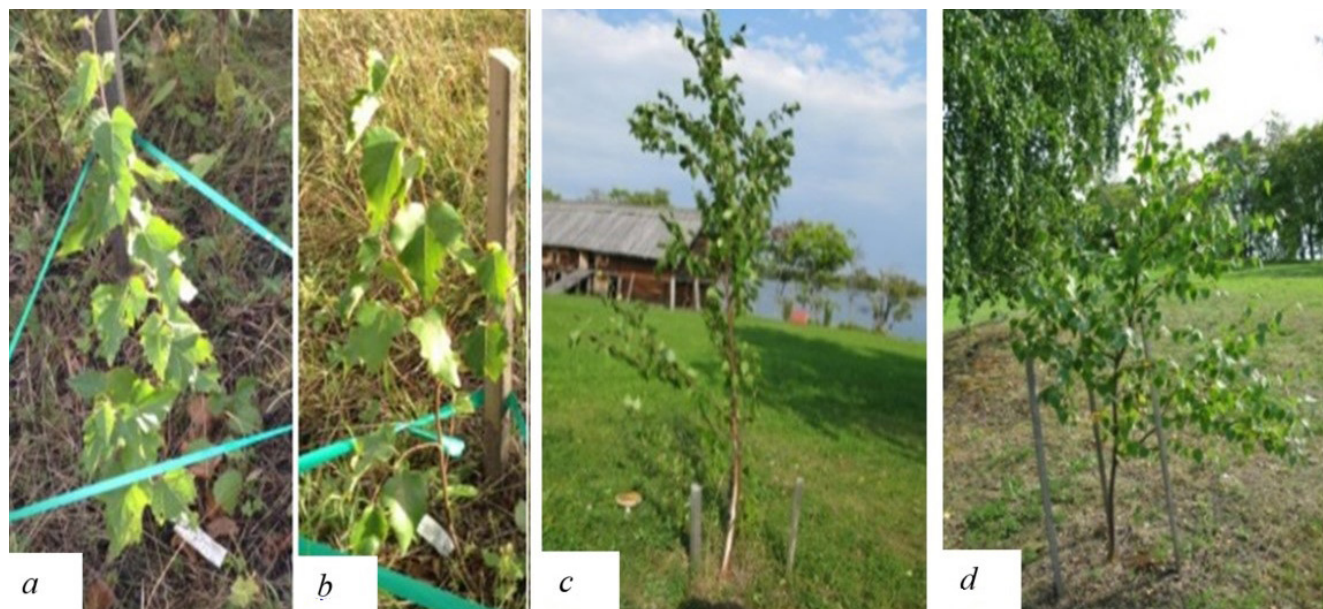


Рис. 5. Внешний вид вегетативного потомства *Betula pendula* var. *carelica* на участке «Южный» в год посадки (a, b) и спустя два года (c, d).

Fig. 5. The appearance of *Betula pendula* var. *carelica* vegetative progeny in Yuzhnyi site in the year of planting (a, b) and two years later (c, d).

3.9 м, а размах изменчивости — от 3.1 до 4.5 м (табл. 3), за исключением одного растения, которое восстанавливается за счет развития порослевого побега от корневой шейки (71 см). На участках «Восточный» и «Центральный» выживаемость саженцев составила 60 и 20%, соответственно (табл. 3). У части из них также наблюдали отмирание главного побега, который в дальнейшем замещался либо боковыми, либо — порослевыми (от корневой шейки) побегами. В результате уровень изменчивости растений по высоте увеличился: на участке «Южный» он достиг среднего уровня (13.7%), а на участке «Восточный» — повышенного (24.6%).

*Молекулярно-генетическая
характеристика клонов карельской березы,
высаженных на о. Киж*

В настоящее время в лесном хозяйстве все шире применяются методы молекулярно-генетического анализа, которые существенно изменили подходы к оценке состояния лесных ресурсов, их генетического разнообразия, идентификации отдельных генотипов [25, 26]. В нашем случае в результате проведения ПЦР-анализа (полимеразной цепной реакции) растительного материала клонов карельской березы, использованных нами для реинтродукции, по-

лучены электрофореграммы, содержащие аллельные варианты исследуемых локусов. По 7 изученным SSR-маркерам составлены мультилокусные паспорта, позволяющие с учетом наличия/отсутствия 29 аллелей идентифицировать генотипы, клоновое потомство которых представлено в настоящее время на о. Киж. Максимальные различия между генотипами выявлены по локусам L1.10 и L2.2 (табл. 4), в которых все аллели являются уникальными и позволяют идентифицировать конкретные клоны. Тестирование локуса L3.1 выявило наличие двух, причем одинаковых, пар аллелей у Кижского клона и одного из клонов, представляющих заонежскую популяцию (Заонежский 1), что свидетельствует об их близком генетическом родстве. Два аллеля, обнаруженные по локусу L7.3 у Кижского клона, присутствуют у каждого из заонежских клонов, но в гомозиготном состоянии. Определенное сходство между заонежскими клонами и Кижским наблюдается по локусу L7.1, где один из двух аллелей является для них одинаковым. Кижский клон также имеет определенное сходство с заонежскими по гетерозиготным локусам L022 (Заонежский 1) и L5.4 (Заонежский 2) и гомозиготному L3.1 (Заонежский 1).

Таблица 4. Молекулярно-генетическая характеристика клонов *Betula pendula* var. *carelica*
Table 4. Molecular genetic characteristics of *Betula pendula* var. *carelica* clones

Название клона Name of the clone	Локусы Loci						
	L1.10	L2.2	L3.1	L5.4	L7.1	L7.3	L022
Заонежский 1 Zaonezhskij 1	+	++	—	++	—	—	—
Заонежский 2 Zaonezhskij 2	++	+	++	—	—	—	++
Кижский Kizhskii	++	++	—	—	—	—	—

Примечание. Плюс — наличие уникальных аллелей в гомозиготном (+) или гетерозиготном (++) состоянии, минус — их отсутствие.

Note. Plus — the presence of unique alleles in a homozygous (+) or heterozygous (++) state, minus — their absence.

В целом Кижский клон отличается от заонежских уникальным аллельным составом по двум локусам L1.10 и L2.2, а также по одному аллелю в локусах L7.1, L5.4, L022. Заонежские клоны характеризуются более разнообразным аллельным составом почти по всем изученным локусам, за исключением L7.1, где один из аллелей для всех клонов является одинаковым, и L7.3, где гомозиготные локусы различаются между собой, но присутствуют в гетерозиготном локусе Кижского клона. Добавим также, что общее количество уникальных аллелей в семи изученных локусах у заонежских клонов по сравнению с Кижским почти в два раза выше.

ОБСУЖДЕНИЕ

Для изучения возможности реинтродукции и восстановления природной популяции карельской березы на территории ГПЗк «Кижский» было использовано 325 саженцев семенного происхождения и 33 растения, полученных путем клонального микроразмножения с исходной высотой около 70 см. Финские специалисты для посадки карельской березы рекомендуют использовать саженцы высотой 50–60 см [27]. Более мелкие растения считаются неспособными к конкуренции с травянистыми растениями.

Изучение роста и развития семенного потомства карельской березы кижского происхождения в условиях лесных сообществ выявило более высокую выживаемость растений на участке «Жарниково 1» по сравнению с участком «Кушнаволок», несмотря на небольшую удаленность их друг от друга. По всей вероятности, это обусловлено различиями их местоположения на

полуострове относительно береговой линии, рельефом местности, уровнем грунтовых вод, полнотой насаждения (включая уровень освещенности) и т.п. На обоих участках зафиксированы низкие значения прироста деревьев в высоту или даже его отсутствие. К настоящему времени здесь сохранились лишь единичные растения.

Иные результаты получены в опытах по реинтродукции карельской березы в условиях лугового сообщества, образовавшегося на месте бывшего сенокоса (участок «Жарниково 2»), где к возрасту 8 лет средняя высота деревьев достигла 2.5 м, а выживаемость составила около 55%. Основной причиной утраты части растений на данном участке явилась низкая конкурентоспособность карельской березы относительно высокой травянистой растительности [28], о чем свидетельствовали слабый прирост и низкие значения высоты растений на третий и особенно четвертый годы развития. Отставание в росте, в свою очередь, по-видимому, не позволило растениям в короткий срок выйти из-под травяного яруса. Исправить такую ситуацию могли бы регулярные агротехнические уходы [15, 29], которые однако не проводились. Следует отметить, что высота одновозрастных растений карельской березы, посаженных на о. Кизи, где регулярно ведутся агротехнические уходы, оказалась в среднем в 2 раза выше, и у части из них на поверхности ствола уже проявились явно выраженные косвенные признаки узорчатой текстуры в древесине.

Более высокой выживаемостью характеризуется вегетативное потомство карельской березы, полученное в результате клонального микроразмножения, однако со временем общее количество таких

растений на острове, к сожалению, сократилось. Основной причиной этого явились механические повреждения коры в нижней части стволов у растений в период проведения уходов и скашивания травянистой растительности. Хотя в ряде случаев при повреждении главного побега у березы происходило его замещение боковыми, один из которых в дальнейшем становился главным. В отдельных случаях отмечали восстановление растений за счет формирования порослевых побегов у корневой шейки. Это отразилось на показателях их роста в высоту, которые оказались с «отрицательным знаком» из-за сломанного главного побега. Дополнительным негативным фактором для выживания растений на о. Кизи (в частности, на участках «Центральный» и «Восточный») оказались экстремально жаркие дни ($+35^{\circ}\text{C}$ и выше), наблюдавшиеся в летний период 2021 г., когда из-за отсутствия дополнительного полива часть растений погибла.

Следует добавить, что на о. Кизи, так же как и на материковой части ГПЗк «Кижский», у нескольких растений зафиксированы повреждения, нанесенные зайцами. В условиях Карелии в зимний период, когда доступность кормов резко снижается, заяц-беляк в качестве корма использует древесно-кустарниковую растительность. Его основу составляют *Salix* spp. (41%), *Betula* spp., (21%) и *Populus tremula* L. (15%). На вырубках, где преобладает береза, она занимает основное место в питании зайца [29]. В зимний период обычно они «срезают» верхушки молодых растений, которые находятся над уровнем снежного покрова [15]. И хотя большого ущерба в целом зайцы не наносят, в результате их действий у карельской березы часто формируется короткоствольная форма роста с несколькими примерно одинаково развитыми стволами, при наличии которых в определенной степени снижается объем древесины, а иногда и ее качество. Не исключено также, что гибель саженцев могла произойти в результате повреждений, нанесенных другими дикими (лосями, медведями и кабанами) или домашними (коровами) животными.

Негативное влияние на рост и развитие растений, высаженных *in situ*, могла оказать и более низкая освещенность в условиях лесного сообщества, зафиксированная нами на участках «Кушнаволоку» и «Жарниково 1», по сравнению с луговыми сообществами на материковой части ГПЗк «Кижский» («Жарниково 2») и на трех участках островной части («Южный», «Восточный» и «Центральный»).

Сравнение показателей роста карельской березы на разных участках реинтродукции *in situ*, показало, что спустя 8 лет после их создания высота деревьев в среднем на территории материковой части ГПЗк «Кижский» (участок «Жарниково 2») составила 2.5 м, а на островной (участок «Южный») — 3.9 м (рис. 6). Заметим также, что исходные значения средней высоты растений при посадке на лесном участке (в 2015 г.) составляли 1.3 м или немного выше, а на острове — не более 40 см. Столь существенная разница в скорости роста растений обусловлена, по-видимому, не столько их происхождением (семенное — на первом участке, вегетативное — на втором), сколько условиями роста и прежде всего наличием или отсутствием агротехнических уходов. Не исключено, что из-за высокого травостоя указанные участки могли различаться по уровню освещенности. Так, на участке «Жарниково 2» в результате слабой конкурентоспособности относительно травянистой растительности и других сопутствующих быстрорастущих лиственных древесных пород у карельской березы, как правило, снижалась скорость роста, растения ослабевали и даже выпадали из насаждения.

Следует отметить, что на материковой части ГПЗк «Кижский» в разные годы коэффициент вариации растений по высоте варьировал от 13.5 до 24.5%. Однако в среднем на участках «Кушнаволоку», «Жарниково 1», «Жарниково 2», он оказался практически одинаковым и составил соответственно 18, 19 и 19% (что отвечает среднему уровню изменчивости), несмотря на значительные различия опытных участков по освещенности, году сбора семян (2007 или 2012 г.) и году посадки саженцев (2010 или 2015 г.). По нашему мнению, это обусловлено тем, что семенное потомство имеет значительное генетическое родство по материнской линии. Вместе с тем показатели амплитуды изменчивости свидетельствуют о заметном влиянии на рост и развитие растений условий внешней среды.

Низкая величина коэффициента вариации (от 5 до 10.3%) для такого признака как высота растений, отмеченная преимущественно в вегетативном потомстве карельской березы, очевидно, обусловлена генетической однородностью клонов и лишь небольшими различиями, свойственными исходным генотипам, которые стали объектами клонирования.

Изучение полиморфизма микросателлитных маркеров у вегетативного потомства карельской

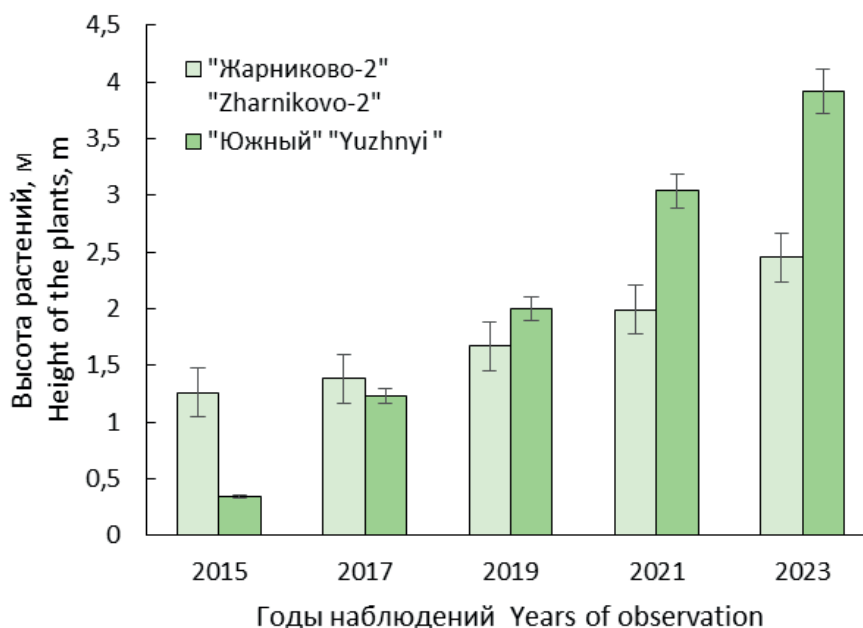


Рис. 6. Динамика роста растений *Betula pendula* var. *carelica* семенного происхождения (участок «Жарниково 2») и вегетативного (участок «Южный») на территории ГПЗк «Кижский».

Fig. 6. Growth dynamics of *Betula pendula* var. *carelica* plants grown from seeds (Zharnikovo-2 site) and through vegetative propagation (Yuzhnyi site) in Kizhskii Sanctuary.

березы показало, что заонежские клоны отличаются разнообразием по 15 аллелям, расположенным в шести локусах (L1.10, L3.1, L5.4, L7.1, L7.3 и L022), а кижский клон — по 7 аллелям в пяти локусах (L1.10, L2.2, L5.4, L7.1 и L022). По всей вероятности, это связано с происхождением деревьев: заонежская популяция (ГБЗк «Анисимовщина») характеризуется довольно высокой численностью карельской березы (более 1 тыс. деревьев) и, соответственно большим генетическим разнообразием [30], а на о. Киж в природных условиях произрастают сейчас и произрастали ранее лишь единичные деревья, вследствие чего генетическое разнообразие здесь гораздо ниже. В то же время значительные различия между клонами выявлены по локусам L1.10 и L2.2, в которых все аллели являются уникальными и некоторые из них находятся в гомозиготном состоянии. Ранее эти локусы наряду с другими были рекомендованы для генетической идентификации различных видов рода *Betula* L. [31].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Карельская береза *Betula pendula* Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti (Betulaceae) является важным компонентом природно-культурного на-

следия Заонежья, представленного на территории ГПЗк «Кижский», где во второй половине 20-го века на его материковой части произрастало более 200 деревьев разного возраста. Однако к настоящему времени здесь, как и на всей территории Республики Карелия (а, следовательно, и в России) она по сути оказалась на грани исчезновения. Очевидно, незаконные рубки, совершенные в 90-е годы, явились главной причиной резкого сокращения численности и ухудшения возрастной структуры популяции карельской березы, которая в первой половине 20-го века считалась одной из наиболее крупных среди известных тогда в Карелии. Добавим, что особое опасение вызывает тот факт, что в настоящее время у карельской березы отсутствует жизнеспособный подрост.

Проведенные исследования позволили выявить основные причины, которые привели к низкой сохранности карельской березы на трех из пяти вновь созданных опытных участках. Среди ведущих факторов, оказавших негативное влияние на выживаемость растений и показатели их роста и развития, следует, прежде всего, назвать недостаток освещенности на участках в лесных сообществах (участки «Кушнаволок» и «Жарниково 1»). В условиях лугового сообщества, особенно на материковой части

ГПЗк «Кижский» («Жарниково 2»), из-за отсутствия своевременных и регулярных уходов наблюдалось активное зарастание опытных участков травянистой растительностью, которая конкурировала с карельской березой за свет и питательные вещества. На островной территории (участки «Южный», «Восточный» и «Центральный»), наоборот, неправильное использование триммера при выполнении покосов привело к серьезным повреждениям коры в нижней части стволов растений и стало критичным для их выживания. Отрицательной для выживания растений на острове стала также высокая температура (+35 °C и выше), не характерная для данного региона. В качестве дополнительного негативного фактора следует назвать отсутствие должного внимания к проведению защитных мероприятий против диких и домашних животных. Однако, несмотря на то, что в силу разных причин на территории ГПЗк «Кижский» сохранилось только 15% посаженных растений карельской березы семенного происхождения и 58% — вегетативного (в целом 70 деревьев), они в совокупности представляют собой ценный генофонд для проведения дальнейших работ, направленных на воспроизводство этого уникального представителя европейской лесной дендрофлоры.

Из полученных данных также следует, что при реинтродукции карельской березы желательно по возможности осуществлять обогащение ее генофонда. Например, результаты генотипирования показали, что заонежские клоны, полученные от деревьев, произрастающих в ГБЗк «Анисимовщина», характеризуются более широким набором индивидуальных аллелей и, соответственно, обладают большим генетическим разнообразием по сравнению с деревом, имеющим кижское происхождение. Из семи изученных микросателлитных маркеров наибольшие различия между клонами установлены по двум локусам (L1.10 и L2.2), в которых все аллели оказались уникальными и некоторые из них находятся в гомозиготном состоянии. Генотипирование позволило также составить индивидуальные паспорта клонов, использованных для восстановления природной популяции на территории ГПЗк «Кижский», которые могут применяться, в том числе, и для их идентификации в случае незаконной рубки.

В целом к настоящему времени в результате реинтродукции карельской березы *in situ*, осуществленной нами на территории ГПЗк «Кижский», сохранились и находятся в хорошем состоянии, как указано выше, 70 деревьев, из них 3 являются местными, которые произрастают здесь исторически; 48 (возраст 10

и 15 лет) — это семенное потомство одного из них, а 19 (возраст 4 и 8 лет) — это вегетативное потомство, полученное путем клонального микроразмножения.

Таким образом, проведенное в течение более чем 15 лет изучение выживаемости, роста и развития карельской березы с целью ее реинтродукции на территории ГПЗк «Кижский» показало целесообразность и перспективность использования посадочного (исходного) материала как семенного происхождения (в том числе от свободного опыления), так и вегетативного, полученного с привлечением современных биотехнологий. При этом семенное потомство позволяет расширить генетическое разнообразие восстанавливаемой (или вновь создаваемой) популяции карельской березы, а вегетативное — сохранить ее отдельные уникальные генотипы как *in situ* (т.е. в исторически родной для нее природной среде), так и в составе коллекции клонов *in vitro*, обеспечивая в дальнейшем воспроизводство растений с гарантированными признаками исходных деревьев. Кроме того, накопленный к настоящему времени опыт реинтродукции карельской березы, в том числе на территории музея-заповедника «Киж», убеждает, что при соответствующих мерах ухода она вполне способна расти и развиваться, давая хороший прирост и высокоценную узорчатую древесину в достаточно широком диапазоне местобитаний. А применение новых подходов, таких как клональное микроразмножение *in vitro* и генотипирование, может обеспечить существенное расширение реализации этих возможностей, сохраняя при этом уникальные генотипы карельской березы, составляющие важную часть природного наследия не только Карелии, но и России в целом.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю признательность Р.С. Мартыанову за организацию и проведение исследований на территории музея-заповедника «Киж», а также Н.Е. Петровой, О.С. Серебряковой, А.И. Степановой и Е.Э. Костиной, которые в разные годы принимали участие в проведении лабораторных и/или полевых работ. Особая благодарность П.С. Кирьянову (Институт леса Национальной академии наук Беларуси), который провел молекулярно-генетическую оценку клонов карельской березы, использованных в данном исследовании.

Финансирование исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания ФИЦ «Карельский научный центр Российской академии наук» (Институт леса КарНЦ РАН — № FMEN-2021-0018 и Институт биологии КарНЦ РАН — № FMEN-2022-0004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vetchinnikova L. V., Titov A. F. 2020. The Karelian Birch: a Unique Biological Object. — Biol. Bull. Rev. 10(2): 102–114. <https://doi.org/10.1134/S2079086420020085>
2. Реймерс Н. Ф., Штильмарк Ф. Р. 1978. Особо охраняемые природные территории. М. 296 с.
3. Красилов В. А. 1992. Охрана природы: принципы, проблемы, приоритеты. М. 174 с.
4. Иванов А. Н., Чижова В. П. 2010. Охраняемые природные территории. М. 184 с.
5. Белоусова Н. А. 1992. Лесные и ботанические заказники Карелии — Охраняемые природные территории и памятники природы Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН. С. 71–81.
6. Хохлова Т. Ю., Антипин В. К., Токарев П. Н. 2000. Особо охраняемые природные территории Карелии. Петрозаводск. 312 с.
7. Соколов Н. О. 1950. Карельская береза. Петрозаводск. 116 с.
8. Ветчинникова Л. В., Титов А. Ф. 2018. Роль особо охраняемых природных территорий в сохранении генофонда карельской березы. — Труды КарНЦ РАН, сер. Экологические исследования. 10: 3–11. <https://doi.org/10.17076/eco912>
9. Красная книга Карелии: редкие и нуждающиеся в охране растения и животные. 1985. Петрозаводск. 180 с.
10. Красная книга Республики Карелия. 2007. Петрозаводск. 368 с.
11. Красная книга Республики Карелия. 2020. Белгород. 448 с.
12. Красная книга Владимирской области. 2010. Владимир. 400 с.
13. Особо охраняемые природные территории Республики Карелия. 2017. Петрозаводск. 432 с.
14. Отчет по инвентаризации деревьев березы карельской в Заонежском спецлесхозе Республики Карелии. 81-ЛХ. 1992. Т. II. Пояснительная записка. Москва. С. 188–189.
15. Ветчинникова Л. В., Титов А. Ф., Кузнецова Т. Ю. 2013. Карельская береза: биологические особенности, динамика ресурсов и воспроизводство. Петрозаводск. 312 с. <http://elibrary.krc.karelia.ru/235/>
16. Коллекция *in vitro* клонов редких видов сем. Betulaceae. <http://www.ckp-rf.ru/usu/465691/>
17. Vetchinnikova L. V., Titov A. F. 2023. Curly Birch: Some Secrets Remain. — Biol. Bull. Rev. 13(2): 162–174. <https://doi.org/10.1134/S207908642302010X>
18. Мамаев С. А. 1973. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений (на примере семейства Pinaceae на Урале). М. 284 с.
19. Падутов В. Е., Баранов О. Ю., Воронаев Е. В. 2007. Методы молекулярно-генетического анализа. Минск. 176 с.
20. Кирьянов П. С., Баранов О. Ю., Маслов А. А., Падутов А. В. 2019. Молекулярно-генетические подходы к идентификации межвидовых и внутривидовых гибридов берез Восточно-Европейского региона. — Молекулярная и прикладная генетика. 26: 45–55.
21. Kulju K. K. M., Pekkinen M., Varvio S. 2004. Twenty-three microsatellite primer pairs for *Betula pendula* (Betulaceae). — Mol. Ecol. Notes. 4(3): 471–473. <https://doi.org/10.1111/j.1471-8286.2004.00704.x>
22. Gürçan K., Mehlenbacher S. A. 2010. Transferability of microsatellite markers in the Betulaceae. — J. Amer. Soc. Hort. Sci. 135(2): 159–173. <https://doi.org/10.21273/JASHS.135.2.159>
23. Федулова Т. П., Исаков Ю. Н., Корчагин О. М., Исаков И. Ю., Кондратьева А. М., Ржевский С. Г. 2017. Молекулярно-генетическая дифференциация генотипов березы на основе полиморфизма SSR-маркеров. — Лесотехнический журнал. 7(4): 6–16. https://doi.org/10.12737/article_5a3cef5a94cab2.12952001
24. de Dato G. D., Teani A., Mattioni C., Aravanopoulos F., Avramidou E. V., Stojnc S., Ganopoulos I., Belletti P., Ducci F. 2020. Genetic analysis by nuSSR markers of silver birch (*Betula pendula* Roth) populations in their Southern European distribution range. — Front. Plant Sci. 11: 310. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00310>
25. Падутов В. Е., Баранов О. Ю., Казан Д. И., Ковалевич О. А., Острикова М. Я., Пантелеев С. В., Ивановская С. И., Кулагин Д. В. 2014. Применение молекулярно-генетических методов в лесном хозяйстве Беларуси. — Сиб. лесн. журн. 4: 16–20. <https://www.elibrary.ru/syqtij>

26. Шейкина О. В. 2022. Применение молекулярных маркеров в лесном селекционном семеноводстве в России: опыт и перспективы. — Вестник ПГТУ. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2(54): 64–79. <https://www.elibrary.ru/whwxli>
27. Hagqvist R., Mikkola A. 2008. Visakoivun kasvatus ja käyttö. [Выращивание и использование карельской березы]. Hämeenlinna. 168 lk. (На финском языке)
28. Vetchinnikova L. V., Titov A. F. 2021. Specific characteristics of Karelian birch population structure. — Biol. Bull. Rev. 11(4): 414–427.
<https://doi.org/10.1134/S2079086421040095>
29. Соколов А. И. 2016. Повышение ресурсного потенциала таежных лесов лесокультурным методом. Петрозаводск. 178 с.
30. Ветчинникова Л. В., Титов А. Ф., Топчиева Л. В., Рендаков Н. Л. 2012. Оценка генетического разнообразия популяций карельской березы в Карелии с помощью микросателлитных маркеров. — Экол. генетика. 10(1): 34–37.
<https://doi.org/10.17816/ecogen10134-37>
31. Гродецкая Т. А., Ржевский С. Г., Баранов О. Ю., Федулова Т. П., Табацкая Т. М., Машикина О. С. 2020. Исследование генетической структуры размноженных *in vitro* клонов *Betula L.* методом микросателлитного анализа. — Вестник ВГУ, Сер. Химия. Биология. Фармация. 4: 57–63. <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/chembio/2020/04/2020-04-08.pdf>

Reintroduction and Restoration of *Betula pendula* var. *carelica* (Betulaceae) Population in Kizhskii State Nature Sanctuary (Karelia Republic)

© 2024. L. V. Vetchinnikova¹, *, A. F. Titov²

¹Forest Research Institute of the Karelian Research Centre
of Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia

²Institute of Biology of the Karelian Research Centre
of Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russia

*e-mail: vetchin@krc.karelia.ru

Abstract — The article presents the results of 15 years of reintroduction of curly birch, *Betula pendula* Roth var. *carelica* (Mercklin) Hämet-Ahti, which has resulted in a restoration of one of its largest natural populations, formerly found within the State Nature Sanctuary Kizhskii (in the buffer zone of the Kizhi Open-air Museum, which is included in the UNESCO World Heritage List). Our studies revealed the main reasons for its decline (illegal harvesting, critical age of trees, lack of viable advance regeneration), which has become critical for its survival. Seed (derived from free pollination) and vegetative (from clonal micropropagation) progenies of curly birch, single trees of which were found growing naturally on Kizhi Island were used as the source material (planting stock) for this work. A comparative analysis of the survival rates, growth and development of saplings is given for different habitats in the mainland part of the sanctuary and on Kizhi Island itself. A molecular genetic profile of a number the curly birch trees involved in the reintroduction was determined. A conclusion drawn from our study is that when restoring natural populations of curly birch and creating new ones, it is advisable to use progenies of trees of local origin, even if only few of them have survived in their natural habitats. In doing so, seed progeny will help expand the genetic diversity of the population to be restored (or created), while vegetative progeny — to preserve the unique features of the source trees *in situ* (i.e. in their historically native natural environment).

Keywords: curly birch, *Betula pendula* var. *carelica*, figured timber, resources, Gene pool, survival rate, propagation, growth, development

ACKNOWLEDGMENTS

The authors are deeply grateful to R. S. Martyanov for organising and conducting the research on the territory of the Kizhi Museum-Reserve, as well as to N. E. Petrova, O. S. Serebryakova, A. I. Stepanova and E. E. Kostina, who participated in laboratory and/or field work in different years. Special thanks to P. S. Kiryanov, who carried out molecular genetic analysis of the curly birch clones used in this study.

The research was funded from the federal budget under state assignment to the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences (Forest Research Institute KarRC RAS — #FMEN-2021-0018, Institute of Biology KarRC RAS — #FMEN-2022-0004).

REFERENCES

1. Vetchinnikova L. V., Titov A. F. 2020. The Karelian Birch: a Unique Biological Object. – Biol. Bull. Rev. 10(2): 102–114. <https://doi.org/10.1134/S2079086420020085>
2. Reimers N. F., Stilmark F. R. 1978. [Specially protected natural areas]. Moscow. 296 p. (In Russian)
3. Krasilov V. A. 1992. [Nature protection: principles, problems, priorities]. Moscow. 174 p. (In Russian)
4. Ivanov A. N., Chizhova V. P. 2010. [Protected natural areas]. Moscow. 184 p. (In Russian)
5. Belousova N. A. 1992. [Forest and botanical sanctuaries of Karelia]. – In: [Protected areas and monuments of nature in Karelia]. Petrozavodsk. P. 71–81. (In Russian)
6. Khokhlova T. Yu., Antipin V. K., Tokarev P. N. 2000. [Specially protected natural areas of Karelia]. Petrozavodsk. 312 p. (In Russian)
7. Sokolov N. O. 1950. [Curly birch]. Petrozavodsk. 116 p. (In Russian)
8. Vetchinnikova L. V., Titov A. F. 2018. The role of protected areas in the conservation of the curly birch gene pool. – Transactions of the Karelian Research Centre of RAS. Ecological Studies Series. 10: 3–11. <https://doi.org/10.17076/eco912> (In Russian)
9. [Red Data Book of Karelia: rare plants and animals that need protection.]. 1985. Petrozavodsk. 180 p. (In Russian)
10. [Red data book of Republic Karelia]. 2007. Petrozavodsk. 369 p. (In Russian)
11. [Red Data Book of the Republic of Karelia]. 2020. Belgorod. 448 p. (In Russian)
12. [Red Book of the Vladimir region]. 2010. Vladimir. 400 p. (In Russian)
13. [Specially protected natural areas of the Republic of Karelia]. 2017. Petrozavodsk. 432 p. (In Russian)
14. [Report on the inventory of curly birch trees in the Zaonezhsky special agricultural enterprise of the Republic of Karelia. 81-LH.] 1992. Vol. II. Explanatory note. Moscow. pp. 188–189. (In Russian)
15. Vetchinnikova L. V., Titov A. F., Kuznetsova T. Yu. 2013. [Curly birch: biological characteristics, resource dynamics, and reproduction]. Petrozavodsk. 312 p. (In Russian) <http://elibrary.krc.karelia.ru/235/>
16. [Collection of in vitro clones of rare species of the family Betulaceae]. <http://www.ckp-rf.ru/usu/465691>
17. Vetchinnikova L. V., Titov A. F. 2023. Curly birch: some secrets remain. – Biol. Bull. Rev. 13(2): 162–174. <https://doi.org/10.1134/S207908642302010X>
18. Mamaev S. A. 1973. [Forms of intraspecific variability of woody plants (by the example of the Pinaceae family in the Urals)]. Moscow. 284 p. (In Russian)
19. Padutov V. E., Baranov O. Yu., Voropaev E. V. 2007. [Methods of molecular genetic analysis]. Minsk. 176 c. (In Russian)
20. Kiryanov P. S., Baranov O. Yu., Maslov A. A., Padutov A. V. 2019. [Molecular-genetic approaches to the identification of inter- and intraspecies birch hybrids of the Eastern European region]. – Molecular and Applied Genetics. 26: 45–55. (In Russian)
21. Kulju K. K. M., Pekkinen M., Varvio S. 2004. Twenty-three microsatellite primer pairs for *Betula pendula* (Betulaceae). – Mol. Ecol. Notes. 4(3): 471–473. <https://doi.org/10.1111/j.1471-8286.2004.00704.x>
22. Gürcan K., Mehlenbacher S. A. 2010. Transferability of microsatellite markers in the Betulaceae. – J. Amer. Soc. Hort. Sci. 135(2): 159–173. <https://doi.org/10.21273/JASHS.135.2.159>
23. Fedulova T. P., Isakov Yu. N., Korchagin O. M., Isakov I. Y., Kondratieva A. M., Rzhovsky S. G. 2017. Molecular-genetic differentiation of genotypes of birch on the basis of SSR-markers polymorphism. – Lesotekhnicheskii Zhurnal. 7(4(28)): 6–16. https://doi.org/10.12737/article_5a3cef5a94cab2.12952001 (In Russian)
24. de Dato G. D., Teani A., Mattioni C., Aravanopoulos F., Avramidou E. V., Stojnc S., Ganopoulos I., Belletti P., Ducci F. 2020. Genetic analysis by nuSSR markers of silver birch (*Betula pendula* Roth) populations in their Southern European distribution range. – Front. Plant Sci. 11: 310. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00310>
25. Padutov V. E., Baranov O. Yu., Kagan D. I., Kovalevich O. A., Ostrikova M. Ya., Pantelev S. V., Ivanovskaya S. I., Kulagin D. V. 2014. Application of molecular genetic methods for forestry in Belarus. – Siberian Journal of Forest Science. 4: 16–20. <https://www.elibrary.ru/syqtij> (In Russian)

26. *Sheikina O. V.* 2022. Application of molecular markers in forest breeding and seed production in Russia: Experience and prospects (review). – Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management. 2(54): 64–79. <https://www.elibrary.ru/whwxli> (In Russian)
27. *Hagqvist R., Mikkola A.* 2008. Visakoivun kasvatus ja käyttö. [Growing and using curly birch]. Hameenlinna. 168 lk. (In Finnish)
28. *Vetchinnikova L. V., Titov A. F.* 2021. Specific characteristics of Karelian birch population structure. – Biol. Bull. Rev. 11(4): 414–427. <https://doi.org/10.1134/S2079086421040095>
29. *Sokolov A. I.* 2016. [Increasing the resource potential of taiga forests by silvicultural method]. Petrozavodsk. 178 p. (In Russian)
30. *Vetchinnikova L. V., Titov A. F., Topchieva L. V., Rendakov N. L.* 2012. Estimation of genetic diversity of Karelian birch populations in Karelia using microsatellite markers. – Ecological genetics. 10(1): 34–37. <https://doi.org/10.17816/ecogen10134-37> (In Russian)
31. *Grodetskaya T. A., Rzhovsky S. G., Baranov O. Yu., Fedulova T. P., Tabatskaya T. M., Mashkina O. S.* 2020. Research of the genetic structure of breeding *in vitro* *Betula* L. clones by microsatellite analysis. – Proceedings of Voronezh State University. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy. 4: 57–63. <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/chembio/2020/04/2020-04-08.pdf> (In Russian)