

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/1>

УДК 630*385+631.529



Теоретические предпосылки создания и некоторые практические результаты изучения генофонда берёзы в Воронежской области

Игорь Ю. Исаков ✉, labgen@vglta.vrn.ru  0000-0003-2927-3275

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

В соответствии с Национальной целью «Экологическое благополучие» сформулированы и обоснованы 17 направлений, по которым проводятся и планируется проводить исследования на объектах *ex situ* берёзы F₁ и F₂. Изучалась изменчивость роста в высоту семенного потомства и самоопыления на продуктивность (рост в высоту) и приживаемость на ранних стадиях онтогенеза у интродуцированных видов берёз, берёзы маньчжурской (*Betula mandshurica* (Regel) Nakai) – диплоид, 2n=2x=28, берёзы тополелистной (*Betula populifolia* Marshall) – диплоид, 2n=2x=28 и берёзы ильмолистной (*Betula ulmifolia* Cham.) – гексаплоид, 2n=6x=84. Интерес к этим видам вызван тем, что они являются разноплоидными, берёза ильмолистная имеет 6 гаплоидных хромосомных наборов. Поскольку приживаемость саженцев является одной из главных характеристик при создании лесных культур, был проведён анализ сохранности деревьев берёзы ильмолистной: 50 % при самоопылении и 81,25 % – при свободном опылении. Даны краткая история терминологии этих видов, вариабельность их признаков продуктивности на примере роста в двух-, трёх-, четырёх-, пяти- и шестилетнем возрасте, а также сохранности некоторых из них. Обнаружено явление «обратной» инбридинговой депрессии для полиплоидного интродуцированного вида берёзы – берёзы ильмолистной. Выявленная изменчивость по лидирующему типу роста системы размножения у этих интродуцированных видов берёз показывает перспективность селекционной работы с полиплоидным видом – берёзой ильмолистной.

Ключевые слова: интродукция, онтогенез, рост в высоту, берёза маньчжурская (*Betula mandshurica* (Regel) Nakai), берёза тополелистная (*Betula populifolia* Marshall), берёза ильмолистная (*Betula ulmifolia* Cham.)

Финансирование: исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-64-00036, <https://rscf.ru/project/22-64-00036/>.

Благодарности: автор благодарит рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Исаков, И. Ю. Теоретические предпосылки создания и некоторые практические результаты изучения генофонда берёзы в Воронежской области // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 2 (54). – С. 5–19. – Библиогр.: с. 15–19 (32 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/1>.

Поступила 16.05.2024. Пересмотрена 06.06.2024. Принята 07.06.2024. Опубликована онлайн 17.06.2024.

Article

Theoretical prerequisites for the creation and some practical results of studying the birch gene pool in the Voronezh region

Igor Yu. Isakov¹ ✉, labgen@vglta.vrn.ru  0000-0003-2927-3275

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation

Abstract

In accordance with the National Goal "Environmental Well-being", 17 directions have been formulated and justified in which research is being conducted and is planned to be conducted at ex situ birch F1 and F2 facilities. The variability of height growth of seed progeny and self-pollination on productivity (height growth) and survival in the early stages of ontogenesis in introduced birch species, Manchurian birch (*Betula mandshurica* (Regel) Nakai) – diploid, $2n=2x=28$, poplar-leaved birch (*Betula populifolia* Marshall) – diploid, $2n=2x=28$ and elm-leaved birch (*Betula ulmifolia* Cham.) - hexaploid, $2n=6x=84$ were studied. The interest in these species is caused by the fact that they are diverse, the elm-leaved birch has 6 haploid chromosome sets. Since the survival rate of seedlings is one of the main characteristics in the creation of forest crops, an analysis of the preservation of elm-leaved birch (*Betula ulmifolia* Cham.) trees was carried out, 50% with self-pollination and 81.25% with open pollination. A brief history of the terminology of these species, the variability of their productivity signs are given on the example of growth at two, three, four, five and six years of age, as well as the preservation of some of them. The phenomenon of "reverse" inbreeding depression has been revealed for a polyploid introduced species of *B. ulmifolia*. The revealed variability in the leading type of growth of the reproduction system in these introduced birch species shows the prospects of breeding work with polyploid species – *B. ulmifolia*.

Keywords: introduction, ontogenesis, growth in height, self-pollination, open-pollination, B. manchurian (*Betula mandshurica* (Regel) Nakai), B. poplar-leaved (*Betula populifolia* Marshall), B. elm-leaved (*Betula ulmifolia* Cham.)

Funding: the study was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 22-64-00036, <https://rscf.ru/project/22-64-00036>.

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

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

For citation: Isakov I. Yu. (2024). Theoretical prerequisites for the creation and some practical results of studying the birch gene pool in the Voronezh region. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 2 (54), pp. 5-19 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.2/1>.

Received 16.05.2024. **Revised** 06.06.2024. **Accepted** 07.06.2024. **Published online** 17.06.2024.

Введение

Сохранение лесов и биологического разнообразия относится к задачам, выполнение которых характеризует достижение национальной цели «Экологическое благополучие» [Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2024 № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года»].

В «Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года» подчеркивается, что к числу наиболее перспективных направлений научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по лесной тематике, релевантных для России, в настоящий момент относится селекция, направленная на ускорение роста лесов, а также прочие технологии ухода и ускорения роста лесов.

В свою очередь, селекция, являющаяся практической ветвью лесной генетики, опирается на выявление и практическое использование формового, онтогенетического и внутривидового полиморфизма естественных и искусственных популяций древесных пород, их фенотипического разнообразия, обусловленного биотическими и абиотическими факторами. Длительные циклы размножения, разная фенология цветения, всхожесть семян, слабые корреляции между ювенильной и репродуктивной стадиями развития, изменения климата, требования рынка и возникающее давление вредителей и болезней создают для селекционеров серьезные проблемы. Таким образом, реализация и конечный результат программ селекции деревьев в значительной степени зависят от продолжительности цикла селекции. Чтобы максимизировать генетический выигрыш в единицу времени, D. Grattapaglia и др. (2018) [1] отмечают, что усилия в селекции деревьев должны быть направлены на два основных средства, с помощью которых можно сократить продолжительность селекционного цикла, а именно, ранний отбор и ускоренное размножение.

Теоретические предпосылки создания генофонда берёзы на объектах *ex situ* в Воронежской области.

1. Формирование банка данных ДНК генотипов видов, гибридов и селекционных форм берёз;

2. Формирование банка данных семян видов, гибридов и селекционных форм берёз;

3. Формирование банка данных пыльцы видов, гибридов и селекционных форм берёз;

4. Формирование банка данных коллекционного гербария видов, гибридов и селекционных форм берёз;

5. Апробация сортовыведения на примере использования теста на самофертильность/самостерильность у материнских деревьев местных и интродуцированных видов берёз.

6. Возможность получения неограниченного количества эксплантов для введения в культуру *in vitro* ограниченного количества фенотипически тестируемых перспективных генотипов;

7. Создание коллекции *in vitro* перспективных генотипов из биоресурсной коллекции *ex situ*;

8. Определение ОКС (общей комбинационной способности) и СКС (специфической комбинационной способности) у полученных генотипов, получение сибсов и полусибсов перспективных генотипов берёз;

9. Изучение взаимодействия «генотип-среда» деревьев (семей), имеющих одинаковое генетическое происхождение, произрастающих в разных эдафических условиях (F_2);

10. Изучение наследования количественных (рост в высоту, диаметр ствола, параметры волокон либриформа и т.д.) и качественных признаков (карельская берёза – наследование признака «карелистости») при вертикальном переносе генов (система «родители – потомки») у видов и гибридов берёзы;

11. Установление механизмов полиплоидизации на примере получения искусственных гибридов при скрещивании диплоидных и полиплоидных видов в этом таксономическом роде;

12. Изучение изменчивости количественных и качественных признаков при искусственном горизонтальном переносе генов (при инокуляции деревьев штаммами *Agrobacterium tumefaciens*);

13. Выявление засухоустойчивых деревьев (семей), полученных при семенной репродукции;

14. Определение морфометрических, цитологических, молекулярных характеристик и особенностей выращивания в культуре *in vitro* диплоидных, тетраплоидных и гибридных деревьев берёзы;

15. Проведение молекулярно-генетической паспортизации с помощью разных систем маркирования (разных видов молекулярных маркеров – индивидуально (онтогенетическом), семейственном, гибридном уровнях);

16. Изучение полученного пула как местных, так и интродуцированных видов берёз (берёза бузая, б. белокитайская, б. железная, б. лжеэрмана, б. маньчжурская, б. далекарлийская, б. вишнёвая, б. карельская, б. тополелистная, б. ильмолистная), а также их гибридов и создание на их основе географических культур;

17. Обоснование выбора лучших способов репродукции ценных генотипов берёз: i) – при семенном размножении; ii) – при клонировании привив-

кой (морфогенез); iii) при клонировании *in vitro* (ин-витрогенез); iv) – при клонировании корнями (ризо-генез).

Климатические условия, в которых существуют растительные и животные сообщества, подвержены глобальным вызовам, в том числе и таким, как медленное и неуклонное повышение температуры на нашей планете. Так, по данным [Всемирной Метеорологической Организации (WMO), 2024] глобальная средняя приземная температура в 2023 году была примерно на 1,45 ($\pm 0,12$) °C выше среднего значения за годы наблюдений, а 2023 год стал самым теплым за все 174 года наблюдений. Был побит рекорд предыдущих самых теплых лет: 2016 года и 2020 года, и динамика повышения температуры продолжает быть устойчивой. С другой стороны, к потеплению климата на планете чувствительны такие признаки деревьев берёзы, как рост в высоту и фенология [2]. Глобальное потепление сказывается на развитии репродуктивных и вегетативных органов берёзы в Воронежской области. Так, И. Сапельникова (2023) [3] отмечает, что для древесно-кустарниковых видов Воронежского заповедника, в том числе и для берёзы, есть смещение современного наступления сроков начала цветения и зеленения на более ранние даты по сравнению с 40-ми годами прошлого века; также начало осенней окраски стало регистрироваться раньше у черёмухи, липы, берёзы и рябины.

Этот род образует полиплоидный ряд, представители которого могут быть идентифицированы с помощью молекулярных маркеров [4, 5], цитологическими и биотехнологическими методами [6]. Вместе с тем селекция с использованием маркеров может ускорить размножение, однако она неэффективна для отбора сложных количественных признаков у лесных деревьев [7].

Несмотря на то что береза имеет широкое распространение, определенные условия делают некоторые участки поверхности почвы более подходящими для её естественного возобновления. В дополнение к условиям влажности почвы решающее значение имеет наличие семян [8, 9].

С начала 80-х годов XX века произошло заметное усиление внимания к вопросам сохранения

генофондов и биологического разнообразия травянистых и древесных растений (включая редкие и исчезающие виды), которые также могут решаться с помощью интродукции [10]. Кроме того, сейчас происходит переоценка использования разных древесных видов в лесовосстановлении [11]. Род *Betula* L. включает приблизительно 60 видов [12], состоит из 4 подродов и 8 секций: подр. *Acuminata* (секц. *Acuminatae*), *Aspera* (секц. *Asperae* и *Lentae*), *Betula* (секц. *Apterocaryon*, *Betula*, *Costatae* и *Dahuricae*) и *Nipponobetula* (секц. *Nipponobetula*) [13]. Является лекарственным и медоносным растением [14]. Деревья этого рода широко исследуются на оценку запасов фитомассы и углерода для построения обобщенных моделей, в т.ч. мета-анализа [15].

В нашей стране широко представлены березы секции *Betula* (белые березы) и *Apterocaryon* (карликовые березы). Они исследуются на разных уровнях, в т.ч. и молекулярных. Молекулярные маркеры, используемые для изучения берёзы, могут дифференцировать виды по их адаптивности. Так, регион ITS 1–2 ядерной рДНК позволяет дифференцировать близкородственные виды берез *B. humilis* и *B. nana*, произрастающие на территории Среднего Урала. Популяции *B. nana* характеризуются большей изменчивостью данного региона в сравнении с *B. humilis*, что может свидетельствовать о более высокой адаптивности *B. nana* [16]. Также показано, что берёза чувствительна к бактериальной трансформации *Agrobacterium tumefaciens*, а высокий процент трансгенных растений березы, полученных при инфицировании, содержит базовые последовательности при использовании бинарных векторов [17]. Кроме того, при трансформации тем же способом с устойчивым к насекомым геном (*bgt*), количество трансгенных деревьев берёзы варьировало от одного до четырех, при общем количестве линий 26 [18, 19, 20].

У интродуцированных пород в качестве плюсовых отбирают плодоносящие деревья, отличающиеся высокой устойчивостью к новым климатическим условиям, лучшими показателями по росту, качеству ствола и другим селективируемым признакам [21]. Также ассортимент промышленно и экологиче-

ски ценных берез может быть обогащен за счет результатов селекционных работ по меж- и внутривидовой гибридизации [22].

При создании лесных культур сеянцы [23] берёзы повислой должны удовлетворять следующим требованиям ОСТ 56-98-93 (для лесостепной зоны), по возрасту – 1-2 года; по высоте – не менее 20 см.

Исследование, проведённое в старовозрастных лесах Чанбая (Китай), в котором плотность углерода изучалась дифференцированно: наземная часть деревьев, подземная (корни) и почва, показало следующее. В смешанном лесу (сосна-берёза) плотность углерода в каждом лесном компоненте увеличилась, и общая плотность углерода увеличилась с 233 до 317 т С га⁻¹; в хвойном лесу содержание углерода в деревьях снизилось, но общая плотность углерода в лесу все равно увеличилась с 298 до 327 т С га⁻¹; чистый березовый лес накопил много углерода в деревьях, но запас углерода в почве оставался относительно стабильным, а общая плотность углерода в нем увеличилась с 226 до 281 т/га⁻¹ [24].

В Воронежской области естественно произрастают два вида берёзы, диплоидная (2n=28) берёза повислая и полиплоидная (4n=56) берёза пушистая. Имеются сведения [25] о произрастании ещё одного вида, берёзы Литвинова. При создании лесных культур используется принцип биоразнообразия, заключающийся в избегании создания монокультур и в смешении двух или нескольких древесных пород, в основном, голосеменных и лиственных. Ранее [11] нами уже проводились работы по интродукции этих видов и в другом регионе Центрального Черноземья – в Орловской области. В опыте изучается рост в динамике трёх интродуцированных в Воронежскую область видов берёз – берёзы ильмолистной (*Betula ulmifolia*), берёзы тополелистной (*B. populifolia*) и б. маньчжурской (*B. mandshurica*).

Эти виды имеют разное применение. Так, из коры берёзы ильмолистной, 2n=84 (*Betula ulmifolia* Siebold et Zucc. In: Abb. Bayr. Acad. Wissensch. 4, 1846, 3: 228; Schneider C.K. In: Plantae Wilsonianae, 2:477-478; Васильев В.Н., 1942, Ботан. журн., 27, № 1-2 : 10; Замятин, 1951, В кн.: Дер. и куст. СССР, 2 : 292; Воробьев, 1968, Дикорастущ. дер. и куст. Дальн. Вост. : 75; Воробьев и др., 1974, Опред. высш. раст. Сахал. и Кур. о-ов : 145. *Betula grossa* var.

ulmifolia) выделяют салицилат, а экстракт коры этой берёзы значительно подавляет рост корней некоторых растений при выращивании на искусственной питательной среде с агаром. Результаты показали, что кора *B. grossa* может быть важна при аллелопатии, а салицилат может играть аллелохимическую роль [26].

Исследования, проведённые на берёзе тополелистной, имеющей диплоидный набор хромосом, 2n=2x=28 [27], (*Betula populifolia* Marshall, Arbust. Amer. 19. 1785) как индикаторе загрязнения городской среды [28], показали следующее. Распределение ресурсов между ростом и развитием в неоднородных городских эдафических условиях приводит к значительным различиям в темпах роста и плотности древесины для этой берёзы, что может оказать существенное влияние на С (углеродное) – моделирование для городских условий. Показана важность изучения потоков углерода вдоль таких эдафических градиентов, для лучшего определения баланса между процессами фотосинтеза и дыхания в урбанизированных районах.

Берёза маньчжурская, имеющая двойной набор хромосом, 2n=2x=28, (*Betula alba* subsp. *mandshurica* Regel in Bull. Soc. Imp. Naturalistes Moscou 38(II): 399 (1865); *Betula alba* var. *mandshurica* (Regel) Franch. in Nouv. Arch. Mus. Hist. Nat., sér. 2, 7: 91 (1884); *Betula japonica* var. *mandshurica* (Regel) H.J.P. Winkl. in H.G.A. Engler (ed.), Pflanzenr., IV, 61: 78 (1904); *Betula latifolia* var. *mandshurica* (Regel) Nakai in Rep. Veg. Kamik.: 38 (1928); *Betula mandshurica* (Regel) Nakai in Bot. Mag. (Tokyo) 29: 42 (1915); *Betula platyphylla* var. *mandshurica* (Regel) H. Nara in J. Jap. Bot. 13: 385 (1937); *Betula platyphylla* subsp. *mandshurica* (Regel) Kitag. in Lin. Fl. Manshur.: 165 (1939); современная классификация (*Betula manshurica* (Regel.) Nakai), (*Betula pendula* subsp. *mandshurica* (Regel) Ashburner & McAll., 2013) является лесообразующей древесной породой на Дальнем Востоке, где она может замещаться очень сходной по фенотипу и биоэкологии берёзой плосколистной. Причем первая, несмотря на значительную протяженность ареала, считается гибридом. В настоящее время она отмечена в южной части Сихотэ-Алиня [29].

В ближайшей перспективе – отбор ценных форм у берёзы более точным и быстрым способом можно будет проводить с помощью генетических маркеров, необходимым шагом в создании которых является выявление мутаций посредством GBS (Генотипирования на основе Секвенирования) [30]. В фармацевтике синтезированные кумараты из берёзовых почек показали противомикробную активность в отношении *Staphylococcus epidermidis* при использовании большей, по сравнению с природными соединениями, концентрации [31].

Целью исследования является изучение роста на ранних этапах онтогенеза и выявление перспективных видов (семей) берёзы для интродукции в Воронежскую область на основе их динамики роста в живых коллекциях. При постановке цели решались следующие задачи: 1. Определить приживаемость при посадке на лесокультурную площадь интродуцированных видов берёз; 2. Охарактеризовать внутрисемейную изменчивость по росту в высоту изучаемых видов берёзы 3. Оценить видоспецифичные показатели высаженных саженцев берёзы.

Материалы и методы

Объект и предмет исследований

В 1983 году был создан путём гибридизации и самоопыления был создан первый объект Биоресурсной коллекции селекционных форм, видов и гибридов берёзы - объект F1 в Воронежском государственном природном биосферном заповеднике им. В.М. Пескова, на котором испытывается рост и развитие 1570 деревьев разного генетического происхождения.

Сбор данных

В 1992 и 1995 г. на этом объекте по апробированной нами методике [32] также были проведены генетико-селекционные мероприятия и получено семенное потомство второго поколения, F2, которое в рендомизированных повторностях высажено в разных экологических условиях для изучения взаимодействия семья-генотип-среда. Географические координаты объекта F2: 52°03'50.97" с.ш., 39°12'59.24" в.д.; северная часть Воронежской области, Рамонский район, окрестности с. Князево. Методика получения растительного материала включает предварительный отбор деревьев, постановку пергаментных

изоляторов для предотвращения попадания чужеродной пыльцы с одновременным удалением мужских серёжек, этикетированием побегов, контролем прохождения цветения у рядом стоящих деревьев и сбор инбредных и гибридных семян. Семена от свободного опыления собирали одновременно.

Анализ данных

Семена интродуцированных берёз были собраны с материнских деревьев в дендрарии Семилукского лесопитомника ВНИИЛГИСбиотех в августе 1992 года. Посадка двухлетних саженцев производилась под меч Колесова на лесокультурную площадь в борозды. Замеры высот проводили мерным шестом и эклиметром.

Результаты

По росту в ювенильном возрасте у интродуцированных в Воронежскую область трёх видов берёз – маньчжурской, тополелистной и ильмолистной. В табл. 1 представлена динамика роста интродуцированных берёз в Гремяченском лесничестве Воронежской области.

По этому количественному признаку при разных способах опыления (самоопыление, свободное опыление) испытывались 3 семьи берёзы маньчжурской (№ 2, № 12 и № 13), 3 семьи берёзы тополелистной (№ 1, № 7 и № 9) и 3 семьи берёзы ильмолистной (№ 11, № 12 и № 15), табл. 1. На основании этой таблицы у этих видов были отобраны наиболее контрастные значения по данному признаку самоопыление/свободное опыление и построены диаграммы, рис. 1 – б. маньчжурская № 13, рис. 2 – б. тополелистная № 1, рис. 3 – б. ильмолистная № 12.

Из рис. 1, 2 и 3 видно, что способ опыления материнского дерева дифференцированно влияет на рост диплоидных (берёза маньчжурская и б. тополелистная) и полиплоидных (б. ильмолистная) видов берёзы и в возрасте 6 лет у соответствующих видов были следующие показатели роста в высоту, со и св: 2,91 м и 1,89 м; 220,5 м и 172,3 м; 85,4 м и 192 м, соответственно.

Диплоидные интродуцированные виды берёз показывают лучший рост, и лучшую динамику роста на ранних стадиях онтогенеза (2-6 лет) при однократном самоопылении.

Средние высоты семей, полученные при самоопылении и свободном опылении у трех интродуцированных видов берез в 2-6 - летнем возрасте в Гремяченском лесничестве Воронежской области

Average family heights obtained by self-pollination and open pollination in 3 introduced birch species at 2-6 years of age in the Gremyachensk forestry of the Voronezh region

Номер дерева, происхождение Tree number, origin	Количество потомков Number of offsprings	2 года 2 years	3 года 3 years	4 года 4 years	5 лет 5 years	6 лет 6 years
Береза маньчжурская №2, со	16	39,4 ± 3,7	72,9 ± 6,5	111,4 ± 10,6	136,1 ± 12,9	155,4 ± 19,4
Береза маньчжурская №2, св	7	57,1 ± 12,7	93,6 ± 12,3	147,4 ± 12,1	182,1 ± 14,2	160,4 ± 32,7
Береза маньчжурская №12, со	13	71,7 ± 8,2	122,7 ± 8,8*	183,7 ± 8,9*	215,6 ± 12,2*	249,1 ± 22,5*
Береза маньчжурская №12, св	12	73,2 ± 10,1	70,7 ± 9,9	88,2 ± 9,9	101,1 ± 13,5	119,7 ± 13,9
Береза маньчжурская №13, со	32	67,5 ± 5,9	106,0 ± 6,3	150,2 ± 8,2	200,0 ± 10,7	291,0 ± 10,9*
Береза маньчжурская №13, св	21	69,2 ± 6,0	105,4 ± 8,2	147,1 ± 10,2	185,3 ± 11,6	189,6 ± 13,9
Б. тополелистная № 1, со	50	41,9 ± 2,7	95,1 ± 5,6	158,6 ± 7,7	195,2 ± 10,4	220,5 ± 10,9*
Б. тополелистная № 1, св	19	32,6 ± 2,7	83,0 ± 8,0	119,7 ± 9,6	161,6 ± 12,0	172,3 ± 16,2
Б. тополелистная № 4, со	42	45,6 ± 5,6	94,6 ± 4,4	136,6 ± 6,6	173,5 ± 9,3	194,5 ± 9,6
Б. тополелистная № 7, со	32	36,6 ± 3,9	84,8 ± 7,1	139,0 ± 10,1	183,4 ± 13,8	202,2 ± 15,3
Б. тополелистная № 7, св	12	37,9 ± 3,0	83,4 ± 7,0	122,2 ± 9,2	157,3 ± 9,2	168,5 ± 12,3
Б. тополелистная № 9, со	26	41,4 ± 2,9	102,5 ± 7,6	159,4 ± 10,9	208,1 ± 13,8	221,5 ± 13,7
Б. тополелистная № 9, св	22	42,7 ± 4,0	113,8 ± 9,5	172,7 ± 11,5	216,6 ± 14,5	235,6 ± 14,9
Б. ильмолистная № 11, со	5	33,0 ± 4,8	27,4 ± 7,0	51,2 ± 9,0	63,5 ± 7,8	65,8 ± 7,8
Б. ильмолистная № 11, св	4	49,0 ± 9,7	65,4 ± 11,4*	126,8 ± 28,1*	144,7 ± 28,3 *	129,5 ± 23,9*
Б. ильмолистная № 12, со	7	34,0 ± 4,9	40,7 ± 3,3	63,0 ± 7,0	83,1 ± 6,6	85,4 ± 11,3
Б. ильмолистная № 12, св	11	73,5 ± 9,7*	118,4 ± 10,0*	160,2 ± 13,4*	198,9 ± 19,5 *	192,0 ± 21,3*
Б. ильмолистная № 15, со	17	47,9 ± 6,0	51,9 ± 6,4	95,5 ± 10,4	115,2 ± 11,6	128,2 ± 11,1
Б. ильмолистная № 15, св	10	61,8 ± 5,2	81,9 ± 9,5	122,2 ± 12,9	156,3 ± 17,0	159,6 ± 18,2

Примечание: * - различия между способами опыления статистически достоверны при P < 0,05.

Note: * - differences between pollination methods are statistically significant at P < 0.05.

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

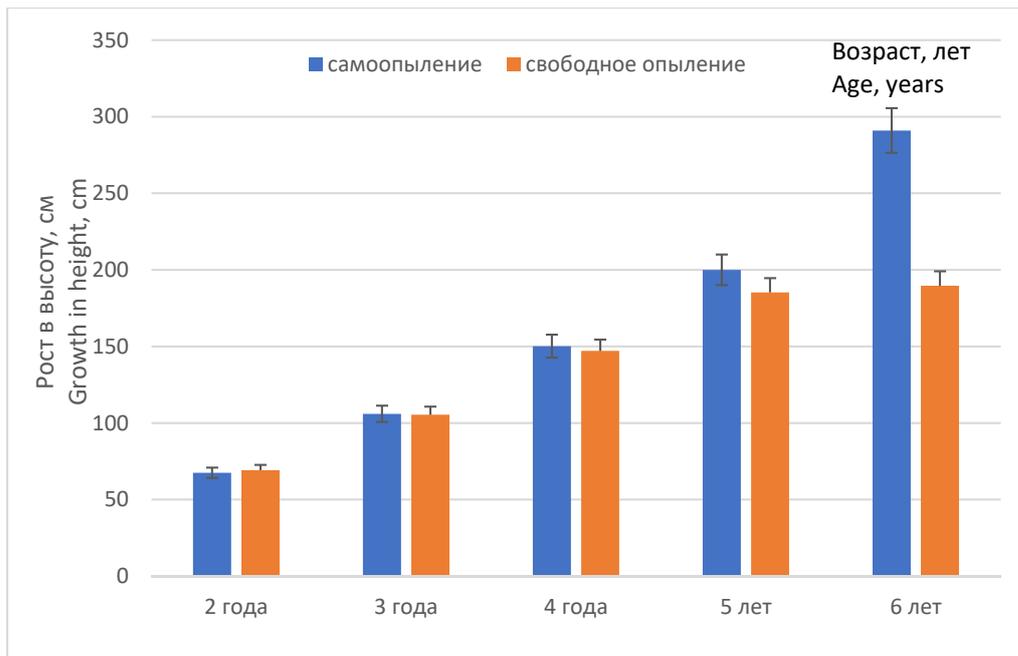


Рисунок 1. Динамика роста в высоту на ранних стадиях онтогенеза деревьев берёзы маньчжурской № 13 при разных способах опыления

Figure 1. The dynamics of height growth in the early stages of ontogenesis of Manchurian birch trees No. 13 with different pollination methods

Источник: собственная композиция автора

Source: the author's composition

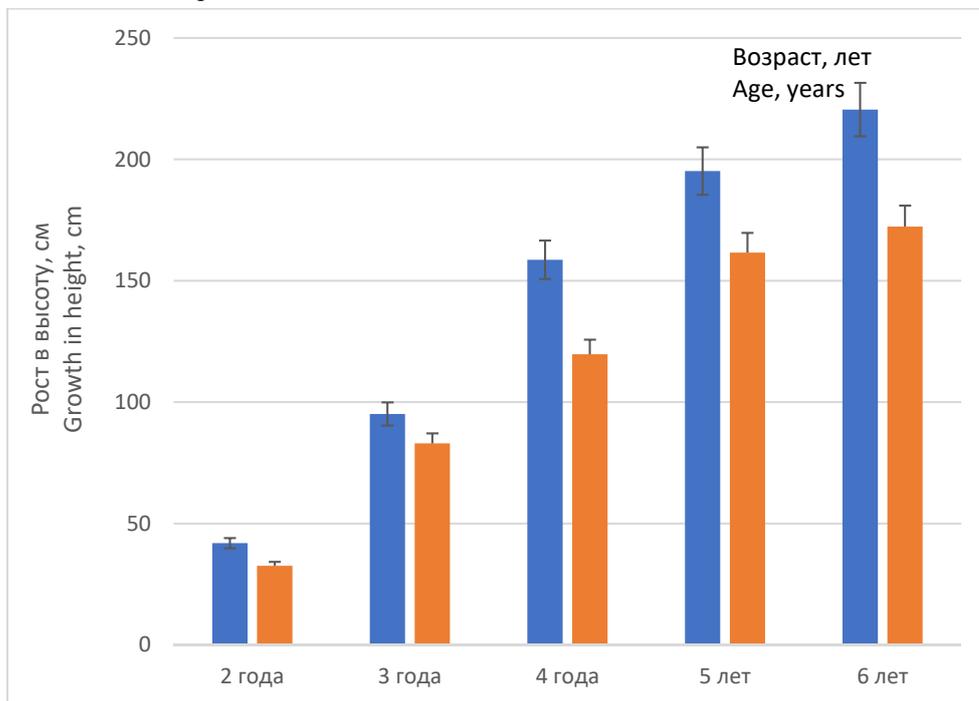


Рисунок 2. Динамика роста в высоту на ранних стадиях онтогенеза деревьев берёзы тополелистной № 1 при разных способах опыления

Figure 2. The dynamics of height growth in the early stages of ontogenesis of birch poplar trees No. 1 with different pollination methods

Источник: собственная композиция автора

Source: the author's composition

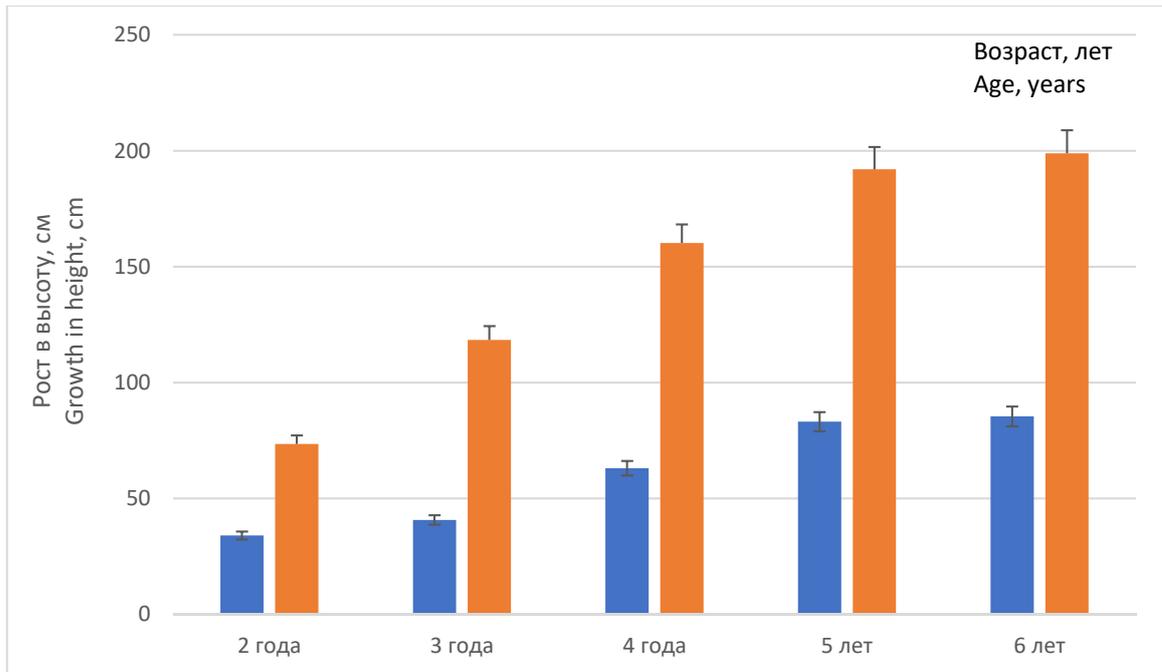


Рисунок 3. Динамика роста в высоту на ранних стадиях онтогенеза деревьев берёзы ильмолистной № 12 при разных способах опыления

Figure 3. The dynamics of height growth in the early stages of ontogenesis of birch elm-leaved trees No. 12 with different pollination methods

Источник: собственная композиция автора
Source: the author's composition

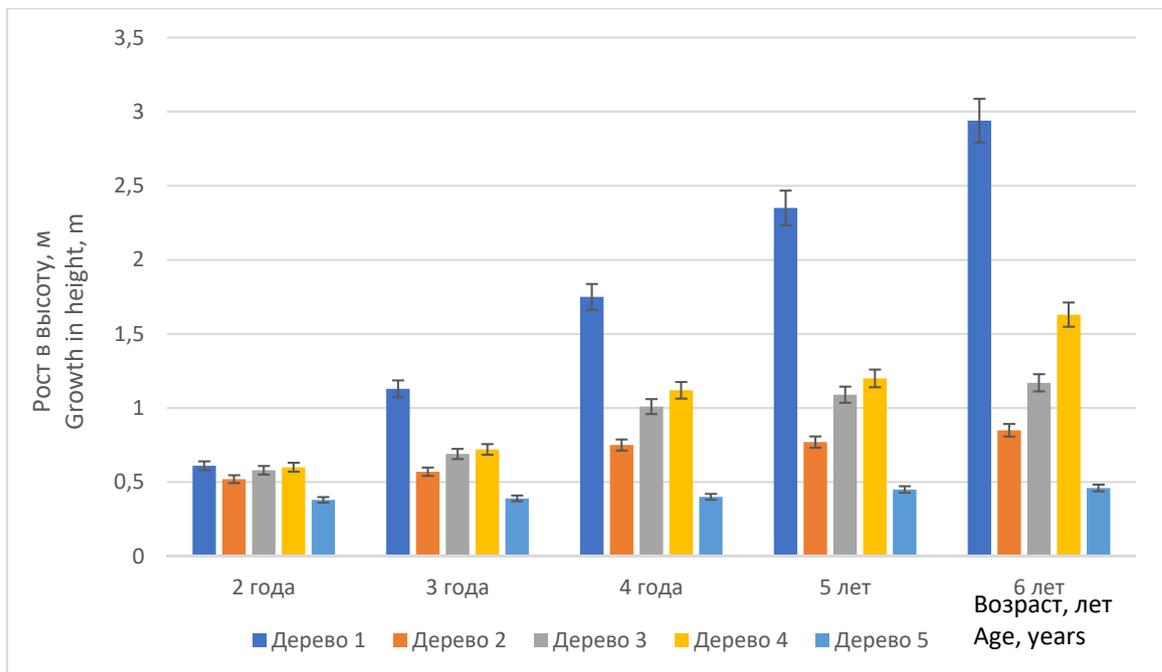


Рисунок 4. Динамика роста деревьев берёзы ильмолистной, полученных при разных способах опыления

Figure 4. Dynamics of growth of birch elm-leaved trees obtained by different pollination methods

Источник: собственная композиция автора
Source: the author's composition

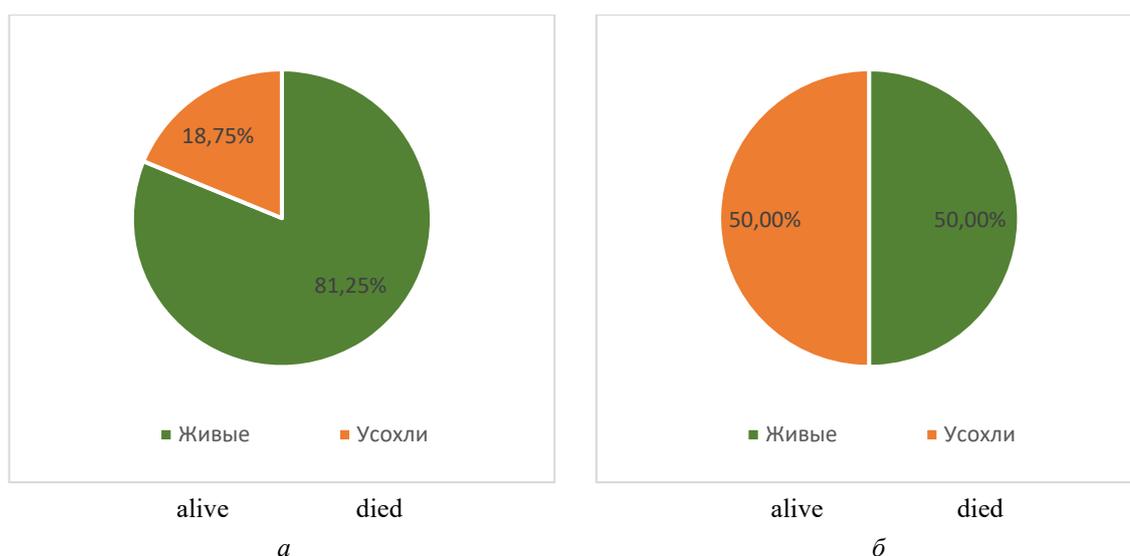


Рисунок 5. Сохранность семенного потомства деревьев б. ильмолистной: а) при свободном опылении; б) при самоопылении

Figure 5. Preservation of seed progeny of b. ulm-leaves trees: a) with open pollination; b) with self-pollination

Источник: собственная композиция автора

Source: the author's composition

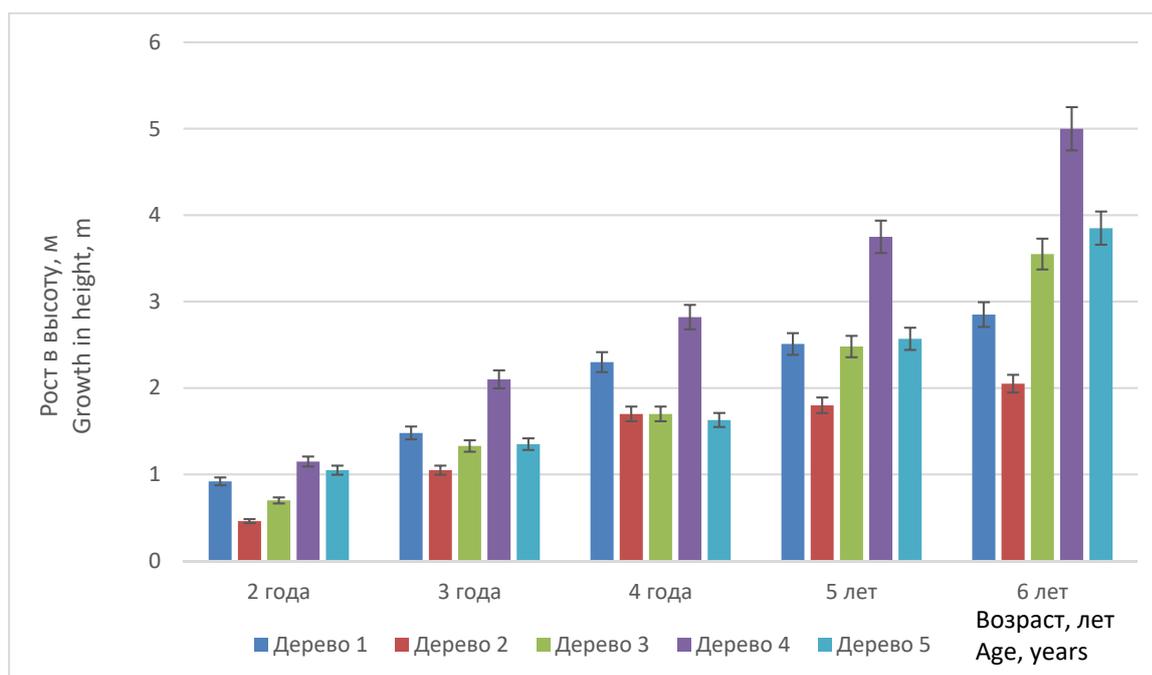


Рисунок 6. Динамика роста берёзы маньчжурской на ранних стадиях онтогенеза

Figure 6. Growth dynamics of the Manchurian birch in the early stages of ontogenesis

Источник: собственная композиция автора

Source: the author's composition

Обсуждение

Из полученных данных видна видовая специфика по реакции интродуцентов на инбридинг в Воронежской области. Для семей берёзы маньчжурской и тополелистной просматривается положительное влияние однократного самоопыления на рост семенного потомства, в то время как для б. ильмолистной выявлена обратная зависимость: высота свободноопыленных деревьев значительно (более, чем в два раза) превосходит высоту самоопыленных деревьев.

На объекте F2, урочище Князево всего получен 21 сеянец берёзы ильмолистной следующего происхождения: от дерева № 8 – 1 шт., № 2 – 3 шт., на дереве № 5 было проведено самоопыление и получены сеянцы – 8 шт., от свободного опыления того же дерева получено 12 растений. До репродуктивного возраста сохранились 5 деревьев, 4 – от самоопыления. Их динамика роста показана на рис. 4. Обозначения: дерево 1 – семенное потомство дерева № 8; деревья 2,3,4,5 – семенное потомство дерева № 5, самоопыление.

Высота деревьев б. ильмолистной в возрасте 10 лет варьировала от 8,3 м до 1,4 м в урочище Князево и от 1,92 м до 1,3 м в 6 лет в Гремяченском лесничестве. Б. маньчжурская в возрасте 10 лет - от 9,3 м до 3,5 м в первом месте произрастания и от 2,91 м до 1,20 м - во втором. Берёза тополелистная испытывалась только в Гремяченском лесничестве и показала следующие результаты: от 2,35 м до 1,68 м в шестилетнем возрасте.

Заключение

Таким образом, по результатам замеров среднесемейных значений роста среди трёх интродуцированных видов берёз лучшими показателями отличается рост б. маньчжурской, д. 13, полученных от самоопыления 2,91 м для Гремяченского лесничества и среди отдельных деревьев (ур. Князево) – д. 13, полученных от свободного опыления – 9,3 м (10 лет). Указанная семья дерева № 13 является перспективной для дальнейшей селекционной работы и получения высокопродуктивных насаждений этого интродуцированного вида. Лучшей продуктивностью, и плотностью углерода в штамбах, соответственно, среди испытанных интродуцентов – берёза маньчжурская. Полиплоидный вид – берёза ильмолистная показала хорошую сохранность деревьев, полученных при свободном опылении, 81,25% и гораздо меньшую, 50% - самоопыленных потомков (явление инбридинговой депрессии). Выявлена «обратная» инбридинговая депрессия по росту в высоту для интродуцированных берёз, заключающаяся в том, что семенное потомство (семьи) диплоидных интродуцированных видов берёз при самоопылении показывает статистически достоверно превышающий рост в высоту по сравнению со свободноопыленными семьями, в то время как семьи гексаплоидной берёзы ильмолистной характеризуются, наоборот, угнетённым ростом.

Список литературы

1. Grattapaglia D., Silva-Junior O. B., Resende R. T., Cappa E. P., Müller B. S. F., Tan B., Isik F., Ratcliffe B., El-Kassaby Y. A. Quantitative Genetics and Genomics Converge to Accelerate Forest Tree Breeding. *Front. Plant Sci.* 2018; 9:1693. <http://doi.org/10.3389/fpls.2018.01693>.
2. Possen B. J. H. M., Rousi M., Keski-Saari S., Silfver T., Kontunen-Soppela S., Oksanen E., Mikola J. New evidence for the importance of soil nitrogen on the survival and adaptation of silver birch to climate warming 2021. *Ecosphere*, 12(5). <http://doi:10.1002/ecs2.3520>.
3. Сапельникова И. И. Оценка многолетних фенологических данных некоторых древесно-кустарниковых видов в Воронежском заповеднике // Труды Воронежского государственного заповедника. Вып. XXXI ; ФГБУ «Воронежский государственный заповедник». Воронеж : ООО «Цифровая полиграфия», 2023. С. 174–228. http://doi:10.57007/9785907669321_2023_31_174.
4. Belton S., Cubry P., Fox E., Kelleher C. T. Novel Post-Glacial Haplotype Evolution in Birch – A Case for Conserving Local Adaptation. *Forests*. 2021;12, 1246. <https://doi.org/10.3390/f120912>.

5. Anamthawat-Jónsson K. Hybrid introgression: the outcomes of gene flow in birch. *Science Asia*. 2019; 45: 203–211. <http://doi.org/10.2306/scienceasia1513-1874>.
6. Исаков И. Ю., Табацкая Т. М., Внукова Н. И., Машкина О. С., Михин В. И., Говедар З. Фенотипическая и генетико-селекционная оценка березы повислой (*Betula pendula* Roth) и березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh.) ex situ и in vitro // *Лесотехнический журнал*. 2023. Т. 13. № 2 (50). С. 25–42. <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/2>.
7. Sharma U., Sankhyan H. P., Kumari A. *et al.* Genomic selection: a revolutionary approach for forest tree improvement in the wake of climate change. *Euphytica* 220, 9 2024. <https://doi.org/10.1007/s10681-023-03263-5>.
8. Anamthawat-Jónsson K., Karlsdóttir L., Þórsson Æ.T., Jóhannsson M. H. Naturally occurring triploid birch hybrids from woodlands in Iceland are partially fertile. *New Forests*. 2021; 52: 659–678. <https://doi.org/10.1007/s11056-020-09816-z>.
9. Holmström E., Karlsson M., Nilsson U. (2017) Modeling birch seed supply and seedling establishment during forest regeneration. *Ecol Model* 352: 31–39. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.02.027>.
10. Ветчинникова Л. В., Титов А. Ф. Интродукция карельской берёзы: история, опыт и оценка перспектив // *Hortus Botanicus : международный электронный журнал ботанических садов*. 2023; 18: 310–331. URL: <http://elibrary.petrus.ru/books/68267>.
11. Миленная Л. А., Исаков И. Ю. Испытание потомств четырёх видов берёз в Орловской области // *Опытная база в лесной селекции : сб. науч. тр. Воронеж : НИИЛГиС, «Квадрат», 1995. С. 89–93. URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25370733*.
12. Wang N., Mcallister H. A., Bartlett P. R., Buggs R. J. Molecular phylogeny and genome size evolution of the genus *Betula* (Betulaceae). 2016 *Ann. Bot.* 117, 1023–1035. <http://doi.org/10.1093/aob/mcw048>.
13. Touchette L., Godbout J., Lamothe M., Porth I. M., Isabel N. A cryptic syngameon within *Betula* shrubs revealed: Implications for conservation in changing subarctic environments. *Evolutionary Applications*, 2024. 17. <http://doi.org/10.1111/eva.13689>.
14. Таксационный справочник по лесным ресурсам России (за исключением древесины) / Л. Е. Курлович, В. Н. Косицын. Пушкино : ВНИИЛМ, 2018. 282 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38169205>.
15. Усольцев В. А., Цепордей И. С., Часовских В. П. Всеобщие аллометрические модели фитомассы берёз (род *Betula* L.): мета-анализ // *Труды Санкт-Петербургского НИИ лесного хозяйства*. 2023; 4: 4–15. <http://doi.org/10.21178/2079-6080.2023.4.4>
16. Медведева С. О., Черепанова О. Е., Филиппов Е. Г., Копориков А. Р. Использование ITS маркеров для определения видовой принадлежности берез секции *Arterocaryon* / *Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии*, 2023. Т. 22, № 2. С. 187–190. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=55079904>.
17. Zhan Y., Su T., Han M., Sun D. A multiplex polymerase chain reaction method for rapid detection of foreign genes in transgenic birch (*Betula platyphylla*). *Sun Bulletin of botanical research*, 26 (4) 2006, p. 480–485. <http://doi.org/10.7525/j.issn.1673-5102.2006.04.003>
18. Zeng F. S., Zhan Y. G., Zhao H. C. *et al.* Molecular characterization of T-DNA integration sites in transgenic birch. *Trees* 24, 2010, p. 753–762. <https://doi.org/10.1007/s00468-010-0445-6>.
19. Li Y., Yuan Y., Hu Z., Liu S., Zhang X. Genetic Transformation of Forest Trees and Its Research Advances in Stress Tolerance. *Forests* 2024, 15, 441. <https://doi.org/10.3390/f15030441>.
20. Chu X., Wang M., Fan Z., Li J., Yin H. Molecular Mechanisms of Seasonal Gene Expression in Trees. *Int. J. Mol. Sci.* 2024, 25, 1666. <https://doi.org/10.3390/ijms25031666>.
21. Исаков И. Ю., Сиволапов А. И. Лесная генетика и селекция : учебное пособие / под ред. А. И. Сиволапова. Воронеж, 2020. 225 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43973151>.
22. Медведева С. О., Черепанова О. Е. Таксономические вопросы рода *Betula* // *Сибирский лесной журнал*. 2023. № 2. С. 65–75. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=lmswtw&ysclid=lwjmsavji2191651463>.

23. Ivetić V. et al. The role of forest reproductive material quality in forest restoration // *Forestry Engineering Journal*. 2019; 9 (2): 56-65. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.2/7>.
24. Zhou L., Dai L., Wang S. *et al.* Changes in carbon density for three old-growth forests on Changbai Mountain, Northeast China: 1981–2010. *Annals of Forest Science* 2011; 68, 953–958. <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0101-3>.
25. Попов В. К. Березовые леса Центральной лесостепи России. Воронеж : Изд-во Воронеж. гос. лесотехн. академии, 2003. 424 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19505353>.
26. Araya H., Otaka J., Nishihara E., Fujii Y. First isolation and identification of salicylate from *Betula grossa* var. *ulmifolia* - a potent root growth inhibitor. *Allelopathy J.* 2012; 30: 153–158.
27. Wang N., McAllister H. A., Bartlett P. R., Buggs R. J. A. Molecular phylogeny and genome size evolution of the genus *Betula* (Betulaceae). 2016; *Annals of Botany*, 117(6), 1023–1035. <https://doi.org/10.1093/AOB/MCW048>.
28. Dahle G. A., Gallagher F. J., Gershenson D., Schäfer K. V. R., Grabosky J. C. Allometric and mass relationships of *Betula populifolia* in a naturally assembled urban brownfield: implications for carbon modeling. *Urban Ecosyst.* 2014; 17: 1147–1160. <http://doi10.1007/s11252-014-0377-9>.
29. Усенко Н. В. Деревья, кустарники и лианы Дальнего Востока : справочная книга / под общ. ред. С. Д. Шлотгауэр. 3-е изд., перераб. и доп. Хабаровск : Приамурские ведомости, 2009. 271 с.
30. Сафронычева Е. Д., Лыткин К. Ф., Каржаев Д. С., Волков В. А. Создание ДНК-библиотек для высокопроизводительного генотипирования березы карельской и анализ их качества. *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2023; (246): 206-220. <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2023.246.206-220>.
31. Ведерников Д. Н., Рысева Е. А. Синтез сложных эфиров сесквитерпеновых спиртов почек берёзы и кумаровой кислоты. *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2022; 238: 160-169. <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2022.238.160-169>.
32. Исаков, И. Ю. Влияние способа опыления на селекционные особенности семенного потомства *Betula pendula* Roth. и *B. pubescens* Ehrh : дис. ... канд. с.-х. наук : 06.03.01 / Исаков Игорь Юрьевич. – Воронеж, 2001. – 218 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19166593>.

References

1. Grattapaglia D., Silva-Junior O. B., Resende R. T., Cappa E. P., Müller B. S. F., Tan B., Isik F., Ratcliffe B., El-Kassaby Y. A. Quantitative Genetics and Genomics Converge to Accelerate Forest Tree Breeding. *Front. Plant Sci.* 2018; 9:1693. <http://doi.org/10.3389/fpls.2018.01693>.
2. Possen B. J. H. M., Rousi M., Keski-Saari S., Silfver T., Kontunen-Soppela S., Oksanen E., Mikola J. New evidence for the importance of soil nitrogen on the survival and adaptation of silver birch to climate warming 2021. *Ecosphere*, 12(5). <http://doi:10.1002/ecs2.3520>.
3. Sapelnikova I. I. Ozenka mnogoletnih fenologicheskikh dannyh nekotoryh drevesno-kustarnikovykh vidov v Voronezhskom zapovednike / Trudy Voronezhskogo gosudarstvennogo zapovednika. Vyp. XXXI ; FGBU «Voronezhskiy gosudarstvenny zapovednik». Voronezh: Zifrovaya poligrafiya, 2023; p. 174-228 (in Russian). http://doi:10.57007/9785907669321_2023_31_174.
4. Belton S., Cubry P., Fox E., Kelleher C. T. Novel Post-Glacial Haplotype Evolution in Birch – A Case for Conserving Local Adaptation. *Forests*. 2021;12, 1246. <https://doi.org/10.3390/f120912>.
5. Anamthawat-Jónsson K. Hybrid introgression: the outcomes of gene flow in birch. *Science Asia*. 2019; 45: 203–211. <http://doi:10.2306/scienceasia1513-1874>.
6. Isakov I. Yu., Tabatskaya T. M., Vnukova N. I., Mashkina O. S., Mikhin V. I., Govedar Z. (2023). Phenotypical and genetic breeding evaluation silver birch and downy birch ex situ and in vitro. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, № 50-2, pp. 25-42 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.2/2>.

7. Sharma U., Sankhyan H. P., Kumari A. *et al.* Genomic selection: a revolutionary approach for forest tree improvement in the wake of climate change. *Euphytica* 220, 9 2024. <https://doi.org/10.1007/s10681-023-03263-5>.
8. Anamthawat-Jónsson K., Karlsdóttir L., Thórsson Æ.T., Jóhannsson M. H. Naturally occurring triploid birch hybrids from woodlands in Iceland are partially fertile. *New Forests*. 2021; 52: 659–678. <https://doi.org/10.1007/s11056-020-09816-z>.
9. Holmström E., Karlsson M., Nilsson U. (2017) Modeling birch seed supply and seedling establishment during forest regeneration. *Ecol Model* 352: 31–39. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2017.02.027>.
10. Vetchinnikova L. V., Titov A. F. Introdukciya karelskoy berezy: istoriya, opyt i ozenka perspektiv. *Hortus Botanicus : mezhdunarodny elektronny zurnal botanicheskikh sadov*. 2023; T. 18. C. 310–331 (in Russian). URL: <http://elibrary.petsru.ru/books/68267>.
11. Milennaya L. A., Isakov I. Yu. Ispytaniye potomstv chetyreh vidov berez v Orlovskoy oblasti / Opytnaya baza v lesnoy selekzii: sb. nauch. tr. Voronezh : NIILGiS, «Kvadrat», 1995, p. 89-93 (in Russian). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25370733>.
12. Wang N., Mcallister H. A., Bartlett P. R., Buggs R. J. Molecular phylogeny and genome size evolution of the genus *Betula* (Betulaceae). 2016 *Ann. Bot.* 117, 1023–1035. <http://doi:10.1093/aob/mcw048>.
13. Touchette L., Godbout J., Lamothe M., Porth I. M., Isabel N. A cryptic syngameon within *Betula* shrubs revealed: Implications for conservation in changing subarctic environments. *Evolutionary Applications*, 2024. 17. <http://doi/10.1111/eva.13689>.
14. Kurlovich L. E., Kositsyn V. N. Taksatsionny spravochnik po lesnym resursam Rossii (za isklucheniem drevesiny). – Pushkino : VNIILM, 2018. – 282 s. (in Russian). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38169205>.
15. Usoltsev V. A., Tsepordey I. S., Chasovskih V. P. Vseobshnie allometricheskie modeli fitomassy berez (rod *Betula* L.): meta-analiz / *Trudy Sankt-Peterburgskogo NII lesnogo hozaystva*. 2023 (4). p. 4-15 (in Russian). <http://doi:10.21178/2079-6080.2023.4.4>.
16. Medvedeva S. O., Cherepanova O. E., Filippov E. G., Koporikov A. R. Ispolzovaniye ITS markerov dlya opredeleniya vidovoy prinadlezhnosti berez sekkii Apterocaryon / *Problemy botaniki Yuzhnoy Sibiri i Mongolii*, 2023. T. 22, № 2, p. 187-190 (in Russian). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=55079904>.
17. Zhan Y., Su T., Han M., Sun D. A multiplex polymerase chain reaction method for rapid detection of foreign genes in transgenic birch (*Betula platyphylla*). *Sun Bulletin of botanical research*, 26(4) 2006, p. 480-485. <http://doi:10.7525/j.issn.1673-5102.2006.04.003>.
18. Zeng F. S., Zhan Y. G., Zhao H. C. *et al.* Molecular characterization of T-DNA integration sites in transgenic birch. *Trees* 24, 2010, p. 753–762. <https://doi.org/10.1007/s00468-010-0445-6>.
19. Li Y., Yuan Y., Hu Z., Liu S., Zhang X. Genetic Transformation of Forest Trees and Its Research Advances in Stress Tolerance. *Forests* 2024, 15, 441. <https://doi.org/10.3390/f15030441>.
20. Chu X., Wang M., Fan Z., Li J., Yin H. Molecular Mechanisms of Seasonal Gene Expression in Trees. *Int. J. Mol. Sci.* 2024, 25, 1666. <https://doi.org/10.3390/ijms25031666>.
21. Isakov I. Yu., Sivolapov A. I. Lesnaya genetika i selektsiya: uchebnoye posobiye [Forest Genetics and Breeding] / ed. by A. I. Sivolapov. Voronezh, 2020. 225 p. (in Russian). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43973151>.
22. Medvedeva S. O., Cherepanova O. E. Taksonomicheskiye voprosy roda *Betula* / *Sibirsky lesnoy zhurnal*. 2023. № 2. p. 65–75 (in Russian). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?edn=lmswtw&ysclid=lwjmsavji2191651463>.
23. Ivetić V. *et al.* The role of forest reproductive material quality in forest restoration. *Forestry Engineering Journal*. 2019; 2 (9): 56-65. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2019.2/7>.
24. Zhou L., Dai L., Wang S. *et al.* Changes in carbon density for three old-growth forests on Changbai Mountain, Northeast China: 1981–2010. *Annals of Forest Science* 2011; 68, 953–958. <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0101-3>.
25. Popov V. K. Berezovye lesa Tsentralnoy lesostepi Rossii [Birch forests of the Central Forest-Steppe of Russia]. Voronezh, 2003; 424 p. (in Russian). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19505353>.

26. Araya H., Otaka J., Nishihara E., Fujii Y. First isolation and identification of salicylate from *Betula grossa* var. *ulmifolia* - a potent root growth inhibitor. *Allelopathy J.* 2012; 30: 153–158.
27. Wang N., McAllister H. A., Bartlett P. R., Buggs R. J. A. Molecular phylogeny and genome size evolution of the genus *Betula* (Betulaceae). 2016; *Annals of Botany*, 117(6), 1023–1035. <https://doi.org/10.1093/AOB/MCW048>.
28. Dahle G. A., Gallagher F. J., Gershenson D., Schäfer K. V. R., Grabosky J. C. Allometric and mass relationships of *Betula populifolia* in a naturally assembled urban brownfield: implications for carbon modeling. *Urban Ecosyst.* 2014; 17: 1147–1160. <http://doi10.1007/s11252-014-0377-9>.
29. Usenko N. V. *Derev'а, kustarniki i liany Dalnego Vostoka : spravocnaya kniga / ed. by S. D. Shlotgauer. 3rd ed. Khabarovsk : Priamurskiye vedomosti, 2009. 271 s. (in Russian).*
30. Safronycheva E. D., Lytkin K. F., Karzhaev D. S., Volkov V. A. Creation of DNA libraries for high-throughput genotyping of Karelian birch and analysis of their quality. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhniceskoj akademii.* 2023; (246): 206–220. (In Russian). <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2023.246.206-220>.
31. Vedernikov D. N., Ryseva E. A. Synthesis of esters of birch bud sesquiterpene alcohols and cinnamic acid derivatives. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhniceskoj akademii.* 2022; (238): 160–169. (In Russian). <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2022.238.160-169>.
32. Isakov I. Yu. *Vliyaniye sposoba opyleniya na selekzionnye osobennosti semennogo potomstva Betula pendula Roth. i B. pubescens Ehrh : dis. ... kandi. s.-h. nauk : 06.03.01 / Isakov Igor Yuryevich. Voronezh, 2001. 218 s. (in Russian). URL: https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19166593.*

Сведения об авторе

Исаков Игорь Юрьевич – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесных культур, селекции и лесомелиорации ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», г. Воронеж, 394087, Российская Федерация; e-mail: labgen@vglta.vrn.ru.

Information about the author

Igor Yu. Isakov – Cand.Sci. (Agric.), Associate Professor of the Department of Forest Crops, Breeding and Land Reclamation, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazev str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation; e-mail: labgen@vglta.vrn.ru.

✉ – Для контактов | Corresponding author