

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

УДК 630.53

DOI: 10.64430/1993-0135-2026-1-89-94

Хвойные бореальной зоны. 2026. Т. XLIV, № 1. С. 89–94

СТРАТЕГИЯ СОЗДАНИЯ МНОГОЦЕЛЕВЫХ ПЛАНТАЦИЙ ХВОЙНЫХ ДЕРЕВЬЕВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИОТЕХНОЛОГИИ СОМАТИЧЕСКОГО ЭМБРИОГЕНЕЗА (НА ПРИМЕРЕ *Pinus sibirica*)*

И. Н. Третьякова, А. В. Лукина

Институт леса им. В. Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук –
обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50/28
E-mail: culture@ksc.krasn.ru

Аннотация. Постоянно возрастающий спрос на древесину и другую продукцию лесного комплекса может быть удовлетворен путем создания высокопродуктивных многоцелевых плантаций. Использование технологии соматического эмбриогенеза находит все более широкое применение в производстве посадочного материала для плантаций древесных растений во всем мире. Экологическое и экономическое значение *P. sibirica*, а также особенности его биологии являются факторами, обуславливающими необходимость разработки программ искусственной репродукции. Применение технологии соматического эмбриогенеза для *P. sibirica* позволит максимально раскрыть генетический потенциал вида, обеспечит получение и размножение сортов и клонов с заданными характеристиками.

Ключевые слова: плантационное лесовыращивание, соматический эмбриогенез, клеточная культура *in vitro*, *P. sibirica*, сосна сибирская кедровая.

Conifers of the boreal area. 2026, Vol. XLIV, No. 1, P. 89–94

STRATEGY FOR CREATING MULTIPURPOSE CONIFEROUS PLANTATIONS USING SOMATIC EMBRYOGENESIS BIOTECHNOLOGY (CASE STUDY OF *Pinus sibirica*)

I. N. Tretyakova, A. V. Lukina

Sukachev Forest Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences –
a separate division of the FITC KNC SB RAS
50/28, Akademgorodok str., 660036, Krasnoyarsk, Russian Federation
E-mail: culture@ksc.krasn.ru

Abstract. The ever-increasing demand for timber and other forest products can be met by creating highly productive multivariatal plantations. Somatic embryogenesis technology is increasingly being used in the production of planting material for tree plantations worldwide. The ecological and economic importance of *P. sibirica*, as well as its biology, are factors that necessitate the development of artificial reproduction programs. Application of somatic embryogenesis technology for *P. sibirica* will maximize the genetic potential of the species; ensure the production and reproduction of varieties and clones with specified characteristics.

Keywords: Forest plantation, somatic embryogenesis, cell culture *in vitro*, *P. sibirica*, Siberian stone pine.

ВВЕДЕНИЕ

К 2050 году ожидается значительное увеличение спроса на древесину и недревесную продукцию леса [17]. Удовлетворение этой глобальной потребности человечества невозможно осуществить без создания

высокопродуктивных многоцелевых плантаций, в связи с чем лесные плантации становятся одним из основных направлений развития лесного комплекса во всем мире. Ежегодно в мире создается более 1 млн га плантационных культур [16; 19; 21]. На таких планта-

* Исследования проведены в рамках базового проекта ФИЦ КНЦ СО РАН FWES-2024-0028, № 124012900557-0.

циях заготавливается более трети мирового потребления древесины. Лидерами в данной области являются США и Китай. В последние годы плантационное лесовыращивание получает все более широкое развитие в латиноамериканских странах [23]. Плантационное лесовыращивание позволяет сохранить естественные лесные экосистемы в качестве генетических резерватов, чем способствует сохранению биологического разнообразия [19].

Основное требование при создании плантационных насаждений – использование видов, форм (клонов), сортов, соответствующих целевым качествам (продуктивность, качество древесины и др.) и устойчивых к неблагоприятным факторам среды, климатическим изменениям, вредителям и болезням. Неэффективность традиционных методов селекции для получения сортов лесных древесных растений объясняется их длительным ювенильным периодом, что определяет необходимость разработки и внедрения принципиально новых подходов. В начале XXI века в коммерческом лесоразведении за рубежом было создано новое перспективное направление – сортовое плантационное лесовыращивание на основе Программы Multi-Varietal Forestry, MVF [20], основанной на применении биотехнологии соматического эмбриогенеза в культуре *in vitro*.

Соматический эмбриогенез – это процесс, при котором зародыш образуется из соматических клеток, в отличие от зиготического – когда зародыш образуется в результате сингамии половых клеток. Соматический эмбриогенез является удобной моделью для проведения фундаментальных биологических работ по изучению процессов раннего онтогенеза растений: механизмов гормональной регуляции, влияния внешних факторов на протекание эмбриологических процессов и т. д. [16]. В последнее время практическая значимость соматического эмбриогенеза становится все более актуальной, о чем свидетельствует стремительное увеличение научных публикаций, посвященных этой теме [13; 21; 23].

Применение геномной селекции и геномного редактирования позволяет значительно ускорить процесс получения посадочного материала с заданными сортовыми признаками [14], что нашло отражение в поручении президента РФ В. В. Путина по итогам совещания с членами Правительства Российской Федерации, прошедшего 14 апреля 2025 года «О целесообразности проведения при участии заинтересованных организаций научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по выведению генномодифицированных пород деревьев с заданными морфологическими свойствами и скоростью роста древесины в целях оценки возможности создания лесных плантаций для коммерческого выращивания и использования такой древесины».

Поскольку в настоящее время только соматический эмбриогенез является единственной реальной способом тиражирования (размножения в экономически целесообразных промышленных объемах) генномодифицированных деревьев, достижения в геномном редактировании могут быть реализованы на практике только при условии возможности управления эмбрио-

генезом и индукции его из недифференцированных соматических клеток [18].

Pinus sibirica сосна кедровая сибирская, кедр сибирский – принадлежит к секции *Quinquefoliae* (пятихвойные), подрода *Strobus* рода *Pinus*. На территории России произрастают 3 вида пятихвойных сосен: *P. sibirica*, *P. koraensis* (кедр корейский) и *P. pumila* (кедровый стланник). Все они являются орехоплодными, что определяет их важнейшую функцию в экологии и экономике регионов произрастания [9]. Постановлением Правительства Российской Федерации от 01.08.2023 № 1248 кедровые орехи признаны стратегически важным товаром. При этом, как и другие представители кедровых сосен, *P. sibirica* не только источник орехов, но и ценной древесины, кедрового масла, живицы и пр. Полифенолы кедровых сосен обладают противомикробной, противовирусной и другими проявлениями фитонцидной активности, что делает их привлекательным сырьем для пищевой, фармацевтической и косметологической промышленности [3].

Селекционно-генетические и интродукционные работы с кедром проводятся давно – первые посадки кедра вне естественного ареала произрастания были сделаны еще в начале 17 века [10], а в настоящее время плодоносящие посадки есть на Украине, в Воронежской, Мурманской, Ленинградской, Московской областях и других регионах России [2; 4; 5; 9; 12]. В результате анализа перспективности выращивания *P. sibirica* в условиях Крайнего Севера высказано предположение о возможности успешной интродукции севернее границ естественного ареала при использовании селекционных методов и инновационных технологий [1].

В пределах естественного ареала (на Алтае, в Красноярском крае, Новосибирской и Томской области) созданы обширные коллекции хозяйственно-ценных форм *P. sibirica*. Проведены и продолжаются работы по селекционной оценке и проведению отбора *P. sibirica* по целевым назначениям: показателям разных аспектов урожайности, ускорения репродуктивного развития, смолопродуктивности и декоративных свойств [5; 6; 7; 9; 24].

Разрабатываются и совершенствуются методики ранней диагностики на основе связи селекционно-значимых признаков плюсовых деревьев, семей и клонов с их характеристиками на стадии всходов и сеянцев [6; 7].

Необходимым в современных условиях логическим продолжением селекционных работ с созданным ценным генофондом *P. sibirica* являются молекулярно-генетические исследования для проведения генетической паспортизации клонового, а в будущем и сортового потомства, для чего были подобраны и протестированы генетические маркеры *P. sibirica* [11].

В тоже время для достижения максимального эффекта от результатов селекционной работы с *P. sibirica* необходимо развитие инновационных подходов. Традиционные методы вегетативного размножения – черенкование и прививки позволяя проводить научные исследования малоэффективны и экономически нецелесообразны для производства посадочного

материала хвойных в объемах достаточных для лесовосстановления и закладки промышленных плантаций [8; 13; 19]. В связи с чем разработка технологии соматического эмбриогенеза является важным фактором сохранения, мобилизации и применения генетического разнообразия этого вида для обеспечения устойчивого технологического и научного развития Российской Федерации.

Цель настоящей работы – на примере сосны кедровой сибирской показать перспективы использования соматического эмбриогенеза в производстве посадочного материала для создания высокопродуктивных многоцелевых лесных плантаций.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В течение ряда лет в лаборатории лесной генетики и селекции института Леса проводятся эксперименты по инициации соматического эмбриогенеза у *P. sibirica*. В качестве источников эксплантов для исследования служили деревья из естественного древостоя, а также искусственных насаждений клонового архива Западно-Саянского опытного лесного хозяйства, расположенного на территории Даурского лесничества вблизи пос. Ермаковское (53°16' с. ш., 92°23' в. д., высота над уровнем моря 300–320 м) (Ермаковский район, Красноярский край). Всего было исследовано 20 деревьев. Для исследования влияния сроков отбора эксплантов растительные образцы собирали начиная с первой декады июня до окончания второй декады июля с интервалом 3–7 дней. В качестве эксплантов использовали мегагаметофиты с интактными зародышами, которые после стерилизации (10 % H₂O₂ в течение 8 мин) в асептических условиях ламинарного бокса помещали на среду DCR. В ходе экспериментов было протестировано несколько вариантов сред для инициации, различающихся гормональным составом и источником углеводов (табл. 1), установлено значение даты сбора эксплантов (стадии развития зародыша), а также влияние стратификации эксплантов (обработки низкими положительными температурами) на инициацию соматического эмбриогенеза у *P. sibirica*.

Статистическую обработку полученных данных проводили по стандартным методикам, с помощью программы Microsoft Excel 2003. Обобщались данные, полученные в ходе исследований, проведенных в 2011–2014, 2022–2025 гг.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Первые отклики на введение в условия *in vitro* наблюдали на 3–4 неделе культивирования. Инициация соматического эмбриогенеза начинается с экструзии – выдавливания наружу внутреннего содержимого мегагаметофитов (рис. 1, а).

К эмбриогенным клеточным культурам относили пролиферирующие клеточные массы, состоящие из двух типов клеток: окрашенных глобул и прозрачных вытянутых суспензоров (рис. 1, б). Данные структуры являются цитологическими индикаторами эмбриогенной компетентности полученных клеточных линий, которая может быть реализована при дальнейших манипуляциях [16; 22].

В культуре *in vitro* проявляются особенности эмбриогенеза видов рода *Pinus*: для данного рода характерно наличие кливажа в раннем эмбриогенезе. Кливаж представляет собой продольное расщепление первичного проэмбрио, в результате которого образуется несколько генетически идентичных зародышей. По-видимому, именно кливаж является механизмом пролиферации эмбриогенных клеточных линий (рис. 1 в, г). Таким образом, инициация соматического эмбриогенеза у *P. sibirica* связана с активацией и поддержанием активности кливажных процессов.

Результаты наших исследований показывают, что стадия развития экспланта является важнейшим фактором, определяющим успешность инициации. Максимальные значения были получены при использовании в качестве эксплантов мегагаметофитов с интактными зародышами, находящихся на предсемядольной стадии развития. Период вступления в компетентную фазу в значительной степени определяется текущими погодными условиями, (возможно суммой эффективных температур), при этом продолжительность компетентной фазы составляет не более 2–3 суток. По данным наших наблюдений, максимальные значения уровня инициации были получены при введении в культуру мегагаметофитов на 12–15 сутки после оплодотворения.

Установлено, что на успешность инициации оказывают влияние генотип дерева-донора эксплантов (рис. 2, а), гормональный и углеводный состав питательной среды (рис. 2, б), обработка низкими положительными температурами.

Наблюдаемые различия в уровне инициации соматического эмбриогенеза между отдельными особями могут объясняться наличием в популяции индивидуальной изменчивости в отношении времени наступления и продолжительности определенных фаз развития.

Увеличение уровня инициации будет способствовать возможности включения в программу размножения более широкого спектра генотипов и снижению стоимости технологии, что является необходимым условием для промышленного применения технологии.

В настоящее время ведутся работы над следующим этапом технологии соматического эмбриогенеза – пролиферацией клеточных культур. В данный период важно обеспечить быстрый рост биомассы без потери эмбриогенной компетентности.

Таблица 1

Среды, протестированные в ходе эксперимента по инициации соматического эмбриогенеза в культуре *in vitro*

	Макро-микроэлементы	Источник углеводов	Концентрация эндогенных регуляторов роста
Среда 1	DCR	Сахароза 30 г/л	2,4 Д 2 мг/л, 6-БАП 1 мг/л
Среда 2	DCR	Глюкоза 30 г/л	2,4 Д 2 мг/л, 6-БАП 1 мг/л
Среда 3	DCR	Сахароза 30 г/л	2,4 Д 1 мг/л, 6-БАП 0,5 мг/л

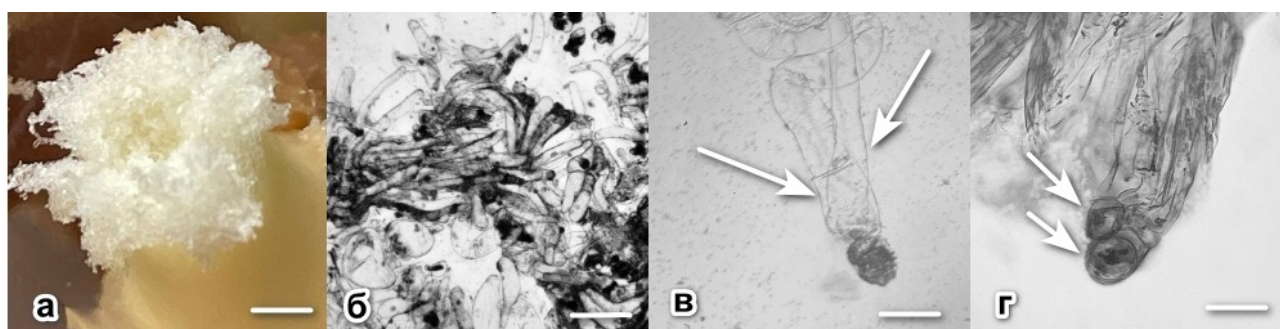
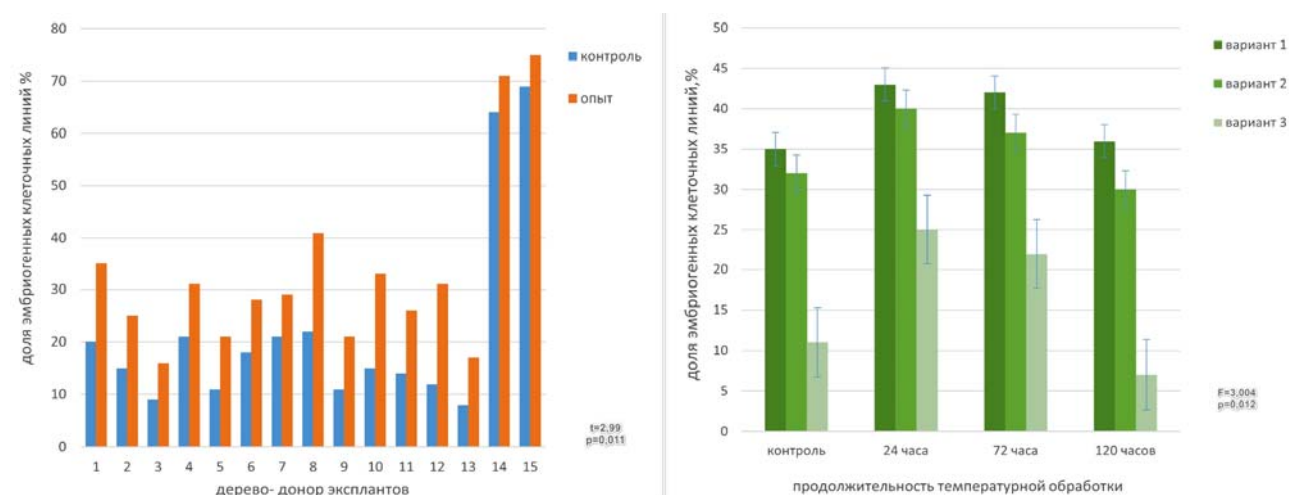


Рис. 1. Инициация соматического эмбриогенеза у *P. sibirica*:

а – экструзия эмбрионально-суспензорной массы из мегагаметофита; б – эмбрионально-суспензорная масса х 40; в, з – кливажные процессы в эмбрионально-суспензорной массе



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, стратегия создания высокопродуктивных многоцелевых плантаций *P. sibirica* может включать следующие этапы.

1. Отбор родительских особей с желаемыми целевыми признаками (быстрый рост, высокая урожайность, устойчивость к экологическим факторам).
2. Проведение искусственного контролируемого опыления (для увеличения вероятности захвата генов, кодирующих необходимые признаки).
3. Инициация соматического эмбриогенеза
4. Отбор полученных клеточных линий на основе данных ранней генетической диагностики (маркер-ориентированная селекция).
5. Геномное редактирование.
6. Криоконсервация эмбриогенных клеточных линий до получения результатов нативных испытаний.
7. Получение проростков, адаптация к условиям *ex vitro* и проведение полевых испытаний.
8. Разморозка и наращивание эмбрионально-суспензорной массы (тиражирование подтвержденных элитных генотипов) в биореакторах.
9. Получение массового генетически идентичного сортового посадочного материала.

Разработка и последующее внедрение в практическое применение технологии соматического эмбрио-

генеза для *P. sibirica* требует консолидации усилий исследователей разных областей биологических наук (лесоводов, селекционеров, молекулярных генетиков, биотехнологов), а также представителей бизнеса и производителей посадочного материала.

В дальнейшем совершенствование и оптимизация методов соматического эмбриогенеза для сосны кедровой сибирской позволит использовать передовые конкурентоспособные технологии в отечественном лесоводстве и лесовосстановлении и будет содействовать развитию биоэкономики в Российской Федерации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Братилова Н. П., Щерба Ю. Е., Мантулина А. В., Коновалова Д. А. Перспективы выращивания сосны кедровой сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour.) в условиях Крайнего Севера // Хвойные бореальной зоны. 2024. № 2. С. 38–45.
2. Брынцев В. А. Рост и семеношение сосны кедровой сибирской в интродукционных культурах плантационного типа. // Хвойные бореальной зоны. 2025. № 3. С. 44–50.
3. Иванов В. А., Лис Е. В., Фибих Е. В. и др. Исследование химического состава шишек и семян хвойных пород Сибири // Хвойные бореальной зоны. 2023. № 1. С. 95–100.

4. Ившина В. О. Селекция кедров сибирского как орехоплодной породы // Вавиловские чтения. Наследие Н. И. Вавилова в современной науке. 2019. С. 32–35.
5. Ирошников А. И., Твеленёв М. В. Изучение генотипа, интродукции и селекции кедровых сосен // Лесоведение, 2001. № 4. С. 62–68.
6. Матвеева Р. Н., Буторова О. Ф. Исследования по выращиванию сосны кедровой сибирской за многолетний период // Хвойные бореальной зоны. 2022. № 5. С. 374–380.
7. Матвеева Р. Н., Комаров И. В., Гришлова М. В. Отсементированные 20-летние деревья сосны кедровой сибирской по интенсивности роста и раннему репродуктивному развитию // Хвойные бореальной зоны. 2025. Т. 43, № 2. С. 35–40.
8. Лесная селекция в России: достижения, проблемы, приоритеты (обзор) / В. В. Тараканов, М. М. Паленова, О. В. Паркина и др. // Лесохозяйственная информация. 2021. № 1. С. 100–143.
9. Титов Е. В. Плантационное лесовыращивание кедровых сосен. Воронеж : ВГЛУ, 2004. 165 с.
10. Титов Е. В. История выращивания и перспективы плантационного ореховодства кедровых сосен в восточной Европе // Хвойные бореальной зоны. 2022. Т. XL, № 5. С. 404–409.
11. Щерба Ю. Е., Ибе А. А., Сухих Т. В. Воспроизводство сосны кедровой сибирской на генетико-селекционной основе // Хвойные бореальной зоны. 2021. Т. XXXIX, № 5. С. 401–407.
12. Хамитов Р. С., Хамитова С. М. Динамика урожайности интродукционных культур сосны кедровой сибирской в Вологодской области // Хвойные бореальной зоны. 2025. Т. XXXIX, № 1. С. 62–68.
13. Aronen T., Sota V., Cvjetković B. et al. From lab to forest: overcoming barriers to in vitro propagation of forest trees. // J. For. Res. 2025. №36, 120. <https://doi.org/10.1007/s11676-025-01914-y>
14. Chang S., Mahon E. L., MacKay H. A. et al. Genetic engineering of trees: progress and new horizons. // In Vitro Cell. Dev. Biol.-Plant. 2018. № 54, p. 341–376 <https://doi.org/10.1007/s11627-018-9914-1>.
15. Egertsdotter U., Ahmad I., Clapham D. Automation and scale up of somatic embryogenesis for commercial plant production, with emphasis on conifers. // Front. Plant. Sci. 2019. № 10:109. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00109>
16. Egertsdotter U. Plant physiological and genetical aspects of the somatic embryogenesis process in conifers. // Scandinavian Journal of Forest Research. 2019. № 34:5, p. 360–369.
17. FAO (2022) The State of the World's Forests Forest pathways for green recovery and building inclusive, resilient and sustainable economies. 2022. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cb9360en>
18. Method for genetic transformation using embryonic callus of *Pinus koraiensis* / H. Hou, Y. Wu, L. Yang et al. // Forests. 2024, 15: 2058. <https://doi.org/10.3390/f15122058>
19. Conventional versus non-conventional methods of propagation of forest tree species: applications and limitations / K. A. Manohar, G. Shukla, N. N. Shahina et al. // Thomas T. D., Razdan M. K., Kumar A. (eds). Biotechnological Approaches for sustaining forest trees and their products. Springer, Singapore. 2024. https://doi.org/10.1007/978-981-97-4363-6_18/
20. Park Y. S. Conifer Somatic Embryogenesis and Multi-Varietal Forestry. In: Fenning, T. (eds) Challenges and opportunities for the World's forests in the 21st century. forestry sciences. 2014. Vol. 81. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7076-8_17
21. Patel J., Chaudhari A. Biotechnology tools for the improvement of forestry: A review European journal of biotechnology and bioscience 2021. Vol. 9, Iss. 3. P. 35–40.
22. Peng C., Gao F., Wang H. et al. Morphological and physiological indicators for screening cell lines with high potential for somatic embryo maturation at an early stage of somatic embryogenesis in *Pinus koraiensis* // Plants. 2022. Vol. 11, 1867. <https://doi.org/10.3390/plants11141867>
23. Rodríguez S. M., Ordás R. J., Alvarez J. M. Conifer biotechnology: an overview // Forests. 2022. Vol. 13. A. 1061. <https://doi.org/10.3390/f13071061>

REFERENCES

1. Bratilova N. P., Shcherba Yu. E., Mantulina A. V., Konovalova D. A. Perspektivy vyrashchivaniya sosny kedrovoy sibirskoy (*Pinus sibirica* Du Tour.) v usloviyah Krajnego Severa // Hvojnye boreal'noj zony. 2024. № 2. S. 38–45.
2. Bryncev V. A. Rost i semenoshenie sosny kedrovoy sibirskoy v introdukcionnyh kul'turah plantacionnogo tipa // Hvojnye boreal'noj zony. 2025. № 3. S. 44–50.
3. Ivanov V. A., Lis E. V., Fibih E. V. i dr. Issledovanie himicheskogo sostava shishek i semyan hvoynyh porod Sibiri // Hvojnye boreal'noj zony. 2023. Т. 1. S95–100.
4. Ivshina V. O. Seleksiya kedra sibirskogo kak orekhoplodnoy porody // Vavilovskie chteniya. Nasledie N. I. Vavilova v sovremennoy nauke. 2019. S. 32–35.
5. Iroshnikov A. I., Tvelenyov M. V. Izuchenie genofonda, introdukcii i selekcii kedrovyyh sosen // Lesovedenie, 2001. № 4. S. 62–68.
6. Matveeva R. N., Butorova O. F. Issledovaniya po vyrashchivaniyu sosny kedrovoy sibirskoy za mnogoletnij period // Hvojnye boreal'noj zony. 2022. № 5. S. 374–380.
7. Matveeva R. N., Komarov I. V., Grishlova M. V. Otselektirovannye 20-letnie derev'ya sosny kedrovoy sibirskoy po intensivnosti rosta i rannemu reproductivnomu razvitiyu // Hvojnye boreal'noj zony. 2025. Т. 43, № 2. S. 35–40.
8. Tarakanov V. V., Palenova M. M., Parkina O. V. Lesnaya seleksiya v Rossii: dostizheniya, problemy, prioritety (obzor) // Lesokhozyaystvennaya informatsiya. 2021. № 1. S. 100–143.
9. Titov E. V. Plantacionnoe lesovyrashchivanie kedrovyyh sosen. Voronezh : VGLTU, 2004. 165 s.
10. Titov E. V. Istoriya vyrashchivaniya i perspektivy plantacionnogo orekhovodstva kedrovyyh sosen v vostochnoj Evrope Hvojnye boreal'noj zony. 2022. Т. XL, № 5. S. 404–409

11. Shcherba Y. E., Ibe A. A., Suhli T. V. *Vosproizvodstvo sosny kedrovoj sibirskoj na genetiko-selekcionnoj osnove Hvojnye boreal'noj zony*. 2021. T. XXXIX, № 5. S. 401–407.
12. Hamitov R. S., Hamitova S. M. *Dinamika urozha-jnosti introdukcionnyh kul'tur sosny kedrovoj sibirskoj v Vologodskoj oblasti // Hvojnye boreal'noj zony*. 2025. T. № 1. S. 62–68.
13. Aronen, T., Sota, V., Cvjetković, B. et al. From lab to forest: overcoming barriers to in vitro propagation of forest trees. *J. For. Res.* 2025. № 36, 120. <https://doi.org/10.1007/s11676-025-01914-y>
14. Chang, S., Mahon, E.L., MacKay, H.A. et al. Genetic engineering of trees: progress and new horizons. In *Vitro Cell.Dev.Biol.-Plant*. 2018. № 54, p. 341–376. <https://doi.org/10.1007/s11627-018-9914-1>
15. Egertsdotter U., Ahmad I., Clapham D. Automation and scale up of somatic embryogenesis for commercial plant production, with emphasis on conifers. *Front Plant Sci.* 2019. № 10:109. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00109>
16. Egertsdotter U. Plant physiological and genetical aspects of the somatic embryogenesis process in conifers, *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2019. № 34:5, p. 360–369.
17. FAO (2022) *The State of the World's Forests Forest pathways for green recovery and building inclusive, resilient and sustainable economies*. 2022. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cb9360en>
18. Hou H., Wu Y., Yang L. et al. Method for genetic transformation using embryonic callus of *Pinus koraiensis*. *Forests*. 2024, 15: 2058. <https://doi.org/10.3390/f15122058>
19. Manohar K. A., Shukla G., Shahina N. N. et al. Conventional Versus Non-Conventional Methods of Propagation of Forest Tree Species: Applications and Limitations. In: Thomas T. D., Razdan M. K., Kumar A. (eds) *Biotechnological Approaches for Sustaining Forest Trees and Their Products*. Springer, Singapore 2024. https://doi.org/10.1007/978-981-97-4363-6_18
20. Park Y. S. Conifer Somatic Embryogenesis and Multi-Varietal Forestry. In: Fenning, T. (eds) *Challenges and Opportunities for the World's Forests in the 21st Century*. Forestry Sciences. 2014. Vol 81. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7076-8_17
21. Patel Chaudhari A. Biotechnology tools for the improvement of forestry: A review *European Journal of Biotechnology and Bioscience* 2021. Vol. 9, Iss. 3. P. 35–40.
22. Peng C., Gao F., Wang H. et al. Morphological and Physiological Indicators for Screening Cell Lines with High Potential for Somatic Embryo Maturation at an Early Stage of Somatic Embryogenesis in *Pinus koraiensis*. *Plants* 2022, 11, 1867. <https://doi.org/10.3390/plants11141867>
23. Rodríguez S. M., Ordás R. J., Alvarez J. M. Conifer Biotechnology: An Overview // *Forests*. 2022. Vol. 13. A. 1061. <https://doi.org/10.3390/f13071061>

© Третьякова И. Н., Лукина А. В., 2026

Поступила в редакцию 04.12.2025
Принята к печати 20.02.2026