



Современное состояние и перспективы генной инженерии эвкалипта *Eucalyptus* spp. в контексте промышленного лесного хозяйства

О. В. Битюкова¹, Т. В. Матвеева^{1,2}, Л. А. Лутова¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

² Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, Санкт-Петербург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Татьяна Валерьевна Матвеева, radishlet@gmail.com, t.v.matveeva@spbu.ru

Эвкалипт *Eucalyptus* L'Hér. spp. является одной из наиболее важных плантационных древесных культур в мире. Настоящая работа представляет собой обзор современных биотехнологических подходов к его улучшению. Ключевые преимущества эвкалипта включают высокую продуктивность, быстрый рост и широкое хозяйственное применение – от производства целлюлозы и пиломатериалов до получения эфирных масел и секвестрации углерода, а также способность адаптироваться к разнообразным почвенно-климатическим условиям и интенсивно накапливать биомассу. Однако традиционная селекция древесных пород ограничена длительными циклами размножения, высокой гетерозиготностью и сложностью прогнозирования хозяйственно ценных признаков, что делает молекулярно-генетические подходы стратегически важным инструментом ускоренной селекции эвкалипта. Коммерческое внедрение генетически модифицированного эвкалипта наиболее активно развивается в Бразилии – на сегодняшний день это единственная страна, где такие линии разрешены для промышленного выращивания. Созданы растения с повышенной продуктивностью древесины (H421), растения с устойчивостью к гербициду глифосату благодаря введению гена *cp4 epsps*, а также линии, экспрессирующие гены инсектицидных Vt-белков, нарушающих функционирование кишечного эпителия насекомых и тем самым обеспечивающие защиту от чешуекрылых вредителей. Использование таких генетических модификаций повышает стабильность плантаций, снижает потери биомассы и способствует увеличению экономической эффективности лесного производства. Дополнительные возможности открывают методы молекулярной селекции, микрклонального размножения и редактирования генома с применением технологий CRISPR/Cas, обеспечивающие более точечное изменение генетического материала. В обзоре также рассматриваются перспективы использования «метаболической инженерии» для повышения фармакологической ценности эфирных масел. Развитие этих подходов требует совершенствования протоколов трансформации и регенерации эвкалипта, а также комплексной оценки экологических рисков и нормативно-правовых аспектов использования генетически модифицированных деревьев. Совокупность биотехнологических методов формирует основу для создания высокопродуктивных, устойчивых и адаптированных форм эвкалипта, отвечающих современным требованиям устойчивого лесного хозяйства и рационального природопользования. Таким образом, генная инженерия представляет собой стратегический инструмент для создания следующего поколения высокопродуктивных и устойчивых эвкалиптовых плантаций, однако ее развитие требует сбалансированного подхода, учитывающего научные, экологические, юридические и общественные аспекты.

Ключевые слова: трансгенные растения, генетически модифицированные деревья, лесное хозяйство, продуктивность древесины, экологические риски

Благодарности: Обзор подготовлен по материалам курса «Генная инженерия сельскохозяйственных растений» программы подготовки магистров «Молекулярно-генетические основы агробиотехнологии», в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 126011615714-3)

Для цитирования: Битюкова О.В., Матвеева Т.В., Лутова Л.А. Современное состояние и перспективы генной инженерии эвкалипта *Eucalyptus* spp. в контексте промышленного лесного хозяйства. *Биотехнология и селекция растений*. 2026;9(3):. DOI: 10.30901/2658-6266-2026-3-06

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

Review article

DOI: 10.30901/2658-6266-2026-3-o6

Genetic engineering of *Eucalyptus* spp.: current status and prospects for industrial forestry

Olga V. Bityukova¹, Tatiana V. Matveeva^{1,2}, Ludmila A. Lutova¹¹ St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia² All Russian Research Institute of Plant Protection, St. Petersburg, Russia**Corresponding author:** Tatiana V. Matveeva, radishlet@gmail.com, t.v.matveeva@spbu.ru

Eucalyptus L'Hér. spp. is one of the most important plantation tree crops worldwide. The present study reviews contemporary biotechnological approaches to its improvement. Key advantages of eucalyptus include high productivity, rapid growth, broad economic applications – ranging from pulp and timber production to essential oil extraction and carbon sequestration, as well as its ability to adapt to diverse soil and climatic conditions and accumulate biomass intensively. However, conventional tree breeding is constrained by long reproductive cycles, high heterozygosity, and the difficulty of predicting economically valuable traits. This makes molecular genetic approaches a strategically important tool for accelerating crop improvement. The commercial adoption of genetically modified eucalyptus is advancing most rapidly in Brazil, the only country where such lines are permitted for industrial cultivation. Among the developed varieties, H421 is distinguished by its increased wood productivity. Other lines are resistant to the herbicide glyphosate due to the *cp4 epsps* gene; and/or express genes of insecticidal Bt proteins that disrupt the functioning of the insect intestinal epithelium, providing protection against lepidopteran pests. These genetic modifications enhance plantation stability, reduce biomass loss, and contribute to the economic efficiency of forest production. Additional opportunities arise from molecular marker assisted selection, micropropagation, and genome editing using CRISPR/Cas technologies, which enable more targeted modifications of genetic material. This review also explores the potential of metabolic engineering to enhance the medicinal properties of essential oils. Developing these approaches necessitates improved protocols for the transformation and regeneration of eucalyptus, alongside a thorough assessment of environmental risks and regulatory aspects associated with genetically modified trees. A combination of biotechnological methods underpins the development of highly productive, resilient, and well-adapted eucalyptus varieties that align with modern requirements for sustainable forestry and environmental management. Consequently, genetic engineering represents a strategic tool for developing the next generation of high-yielding and stress-resistant eucalyptus plantations. However, its advancement requires a balanced approach that considers scientific, environmental, legal and societal factors.

Keywords: plant genetic engineering, transgenic plants, genetically modified trees, forestry, wood productivity, environmental risks

Acknowledgements: This review has been prepared using materials from the course “Genetic Engineering of Agricultural Plants” of the Master’s program “Molecular Genetic Foundations of Agrobiotechnology”, within the framework of the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Theme No. 126011615714-3

For citation: Bityukova O.V., Matveeva T.V., Lutova L.A. Genetic engineering of *Eucalyptus* spp.: current status and prospects for industrial forestry. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2026;9(3):. (In Russ.). DOI: 10.30901/2658-6266-2026-3-o6

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work. The journal’s opinion is neutral to the presented materials, the authors, and their employers.

© Bityukova O.V., Matveeva T.V., Lutova L.A., 2026

Введение

Эвкалипт *Eucalyptus* L'Hér. spp. относится к числу наиболее распространенных плантационных древесных культур мира и активно выращивается за пределами естественного ареала. Эта культура, занимающая около 25 млн гектаров от Бразилии до Китая, представляет собой уникальный объект на стыке экономики, экологии и высоких технологий (Zhang, Wang, 2021; Mao et al., 2024). Однако интенсивное монокультурное выращивание эвкалипта в новых регионах сопряжено с серьезными фитосанитарными рисками, включая поражение насекомыми-вредителями, с необходимостью химического контроля сорной растительности. Кроме того, длительные циклы традиционной селекции затрудняют оперативную адаптацию к возникающим угрозам. Именно эти проблемы становятся главным драйвером развития генной инженерии эвкалипта, позволяющей целенаправленно создавать деревья, устойчивые к насекомым и гербицидам, а также с улучшенными хозяйственными свойствами.

Опыт применения передовых технологий для улучшения древесных растений представляет многогранный интерес и для России, которая, с одной стороны, с ее обширными территориями и стратегическими целями по снижению выбросов парниковых газов в соответствии с национальными климатическими стратегиями¹ может рассматривать опыт выращивания быстрорастущих пород для целлюлозно-бумажной промышленности и связывания углерода (Shvarts et al., 2023). С другой – глобальные тренды в селекции, включая генную инженерию, напрямую касаются вопросов биобезопасности, международной торговли и стратегий адаптации к изменению климата (Wang et al., 2024). Однако сейчас в России эвкалипт изучается преимущественно в интродукционных исследованиях на Черноморском побережье Кавказа, главным образом в районе Сочи. Работы показывают, что он используется в декоративном озеленении и входит в состав интродуцированной дендрофлоры, но не формирует устойчивых насаждений и остаётся объектом экспериментального выращивания (Petrovskaya, 2012; Markova et al., 2024).

Таким образом, распространение эвкалипта и его генетическая модификация – это не абстрактный мировой тренд, а наглядный пример трансформации подходов к защите растений и управлению лесными ресурсами в XXI веке. Изучению этого опыта, его успехов и противоречий посвящен данный обзор.

Распространение эвкалипта

Род эвкалипт насчитывает 822 вида, эти деревья встречаются преимущественно в Австралии, Новой

Зеландии, Южной Африке, Папуа-Новой Гвинее, Бразилии, Китае, Индонезии и на Филиппинах. Этот род является эндемиком Австралии и соседних тихоокеанских островов, но выращивается как экзотический вид во многих тропических и субтропических регионах (Lee et al., 2024).

Эвкалипт является одним из наиболее распространенных видов широколиственных древесных растений и занимает крупнейшую площадь среди лесных плантаций в мире – около 25 млн гектаров в 95 странах, что составляет примерно 0,5% общей площади лесов мира (Zhang, Wang, 2021; Mao et al., 2024). Бразилия, Китай и Индия занимают первые три места по площади эвкалиптовых плантаций. На эти три страны приходится более половины мировых эвкалиптовых плантаций (Lee et al., 2024).

Распространение эвкалипта имеет не только пространственный, но и временной динамизм. Современные исследования с использованием моделирования экологических ниш показывают, что ареалы ключевых коммерческих видов, таких как *Eucalyptus grandis* W. Hill, *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake и *Eucalyptus tereticornis* Sm., будут расширяться в условиях изменения климата, особенно в Китае (Mao et al., 2024). Аналогичные тенденции прогнозируются и для других регионов, например, для Эфиопии, где повышение температуры может создать новые подходящие местообитания для *Eucalyptus globulus* Labill. (Mosisa et al., 2024). Это расширение, с одной стороны, открывает новые возможности для лесного хозяйства, а с другой – требует осторожного управления из-за потенциального воздействия на водные ресурсы и местные экосистемы.

Таким образом, глобальное распространение эвкалипта и прогнозируемое расширение его ареала в условиях изменения климата свидетельствуют о значительных перспективах дальнейшего использования этой быстрорастущей породы в лесном хозяйстве и плантационном выращивании.

Использование эвкалипта

Эвкалипт исторически использовался человеком в медицинских целях. В настоящее время он применяется в фармацевтической и косметической промышленности как источник эфирных масел, получаемых из листьев, коры и стеблей (Vuong et al., 2015). Масла содержат полифенолы, флавоноиды, терпеновые соединения и дубильные вещества, что определяет их антибактериальную, противовирусную и инсектицидную активность (Wang et al., 2024). На их основе производятся средства для симптоматического лечения респираторных заболеваний, а также косметическая и парфюмерная продукция (Vecchio et al., 2016; El Shiekh et al., 2025).

¹ Об утверждении Климатической доктрины Российской Федерации: Указ Президента РФ от 26.10.2023 № 812. *Президент России: официальный сайт*. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/49910> [дата обращения: 15.05.2026]

Эвкалипт также используется как источник древесины, которая характеризуется средней и высокой плотностью и относительно короткими волокнами по сравнению с хвойными породами (Dhakad et al., 2018), что обеспечивает высокую гладкость и однородность бумажной продукции. Прямые стволы подходят для производства пиломатериалов, фанеры, древесностружечных плит, строительных материалов и мебели (Girijashankar, 2011).

Широкое применение эвкалипта обусловлено его соответствием требованиям плантационных культур с коротким циклом выращивания, включая быстрый рост, прямой ствол с ограниченным ветвлением и приемлемое качество древесины. Многие виды адаптированы к различным почвенно-климатическим условиям и обладают относительной устойчивостью к вредителям и болезням (Lee et al., 2024). Наиболее широко в субтропических и средиземноморских регионах используется *Eucalyptus globulus* (Vecchio et al., 2016).

Эвкалипты играют важную роль в секвестрации углерода благодаря быстрому росту и высокой продуктивности. Короткоцикловые плантации могут связывать углерод в 2,7-4,6 раза эффективнее по сравнению с хвойными породами (Chilton et al., 2025). Такие виды, как *E. grandis* и *E. globulus*, обладают высоким потенциалом накопления углерода в агролесомелиоративных системах, а также с быстрым восстановлением биомассы в порослевых насаждениях *E. urophylla*. Важно понимать, что эффективность накопления углерода зависит от условий окружающей среды и методов ведения хозяйства (Sadono et al., 2021). Древесина эвкалипта используется для получения биоугля, твердого продукта пиролиза биомассы, который вносится в почву для улучшения её свойств и длительного связывания углерода (Nogueira et al., 2025; Oliveira et al., 2025).

Таким образом, масштабное выращивание и устойчивое управление эвкалиптовыми плантациями обеспечивают возобновляемое сырье и способствуют снижению углеродных выбросов за счёт накопления углерода.

Необходимость генной инженерии эвкалипта и возникающие проблемы

Генная инженерия является одним из ключевых инструментов современной биотехнологии и используется для создания организмов с новыми хозяйственно ценными признаками. Получаемые линии и штаммы применяются в научных исследованиях, производстве рекомбинантных белков, сельском хозяйстве и промышленности. Так, объём мирового рынка технологий экспрессии генов, кодирующих разные белки, в 2022 году оценивался в 3,18 млрд долларов США и продолжает расти со среднегодовым темпом около 9% (Sun et al., 2023).

В сельском хозяйстве генетически модифицированные растения используются для повышения устойчивости культур к вредителям, сорнякам и другим факторам,

ограничивающим сельскохозяйственное производство. По данным на 2024 год ГМ-культуры выращивались в 28 странах на площади 209,8 млн га, что на 1,7% больше по сравнению с 2023 годом. При этом 99,19% мировых посевов ГМ-культур приходится на четыре основные культуры: кукуруза, соя, хлопчатник и рапс (Li et al., 2026).

Несмотря на столь впечатляющее распространение в агросекторе, лесное древесное хозяйство, и в частности генная инженерия эвкалипта, значительно отстает в освоении этих технологий. Однако необходимость применения генной инженерии к эвкалипту продиктована фундаментальными ограничениями традиционной селекции и уникальными биологическими особенностями этой культуры (Girijashankar, 2011). Селекция эвкалипта осложняется длительным жизненным циклом древесных пород: оценка продуктивности и качества древесины может занимать десятилетия, тогда как у однолетних культур смена поколений происходит значительно быстрее (van Nocker, Gardiner, 2014; Wang et al., 2024). Ведутся исследования по ускорению селекции эвкалипта. Например, показано, что применение верхушечной прививки молодых сеянцев в сочетании с физиологически зрелыми подвоями и обработкой регуляторами роста позволяет значительно ускорить переход к цветению и плодоношению, что в перспективе сокращает селекционный цикл с нескольких лет до нескольких месяцев (Castro et al., 2021). Дополнительные трудности связаны с высокой гетерозиготностью, сложной генетической структурой и межвидовыми репродуктивными барьерами, затрудняющими получение стабильных комбинаций хозяйственно ценных признаков традиционными методами (Sharma et al., 2023). В связи с этим для эвкалипта активно развиваются биотехнологические подходы, включая молекулярную селекцию, микроклональное размножение и генетическую трансформацию, позволяющие ускорить селекционный процесс и повысить точность отбора (Sumathi, Yasodha, 2014; Kendurkar, Rangaswamy, 2018).

Исторически молекулярно-генетические и генно-инженерные технологии были ориентированы преимущественно на сельскохозяйственные культуры (соя, кукуруза, рис), тогда как древесные породы, включая эвкалипт, оставались менее изученными из-за технических ограничений и длительных циклов селекции. Современные обзоры показывают, что генетическая трансформация эвкалипта по-прежнему характеризуется низкой эффективностью и сложностью регенерации трансформированных растений, что сдерживает её широкое применение даже в исследовательских целях (Wang et al., 2024; Zhan, 2024).

В протоколах регенерации и генетической трансформации эвкалипта в качестве эксплантов используют гипокотили, семядоли, листья, сегменты стебля и пазушные почки, при этом на эффективность регенерации существенное влияние оказывает генотип (Sharma et al., 2023; Wang et al., 2024). Регенерация эвкалипта проис-

ходит через органогенез или соматический эмбриогенез. У *E. globulus* эмбриогенная способность выше у молодых тканей и у зрелых зиготических эмбрионов, тогда как у взрослых деревьев она значительно ниже (Pinto et al., 2002; Corredoira et al., 2015). Эффективность соматического эмбриогенеза остаётся генотип-зависимой и требует оптимизации состава среды и фитогормонов для конкретных видов и клонов (Pinto et al., 2008).

При агробактериальной трансформации важны не только интеграция Т-ДНК, но и сохранение регенерационного потенциала эксплантов в период культивирования, что существенно влияет на эффективность получения трансгенных растений (Zhou et al., 2022). Низкая эффективность процесса обусловлена ограниченной каллусообразующей способностью древесных эксплантов, замедленным органогенезом, зависимостью от состава питательных сред, длительными циклами *in vitro* и чувствительностью к антибиотикам и стрессовым факторам (Zhou et al., 2022; Wang et al., 2024). Дополнительным ограничением является высокое содержание фенольных соединений у эвкалипта, вызывающее окислительное потемнение тканей и подавление регенерации, что снижает выход трансгенных растений (Li et al., 2010; Maharjan et al., 2025). Показано, что различия в регенерации каллуса у *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. и гибридов *E. grandis* × *E. urophylla* связаны также с эпигенетическими механизмами, включая метилирование ДНК и регуляцию гормональных и МАРК-сигнальных путей (Chen et al., 2026). В частности, для гибрида *E. urophylla* × *E. grandis* оптимизация параметров инфекции, ко-культивирования и гормональной среды позволила достичь частоты трансформации более 60% (Wang et al., 2023). Эффективность процесса также зависит от индукции *vir*-генов ацетосирингоном и снижения окислительного стресса за счет антиоксидантов (Alcantara et al., 2011; Liu et al., 2025). В целом, частота трансформации варьирует от единичных значений до ~40%, что свидетельствует о важности оптимизации протоколов с учетом генотипических особенностей растений (Sharma et al., 2023; Wang et al., 2024).

Ряд авторов отмечают, что при создании трансгенных сортов эвкалипта сохраняются риски утечки трансгенов в природные популяции через пыльцу, и как следствие потенциального воздействия на биоразнообразие в регионах интродукции. Для коммерчески одобренного эвкалипта Н421 в Бразилии долгосрочные наблюдения не выявили значимых неблагоприятных эффектов, однако вопросы экологической безопасности продолжают обсуждаться (Pinheiro et al., 2023).

Использование ГМ-деревьев, особенно лесных культур, сопряжено с более жёстким регулированием и общественным сопротивлением по сравнению с введением в культуру сельскохозяйственных ГМ-растений, что замедляет полевые испытания и коммерциализацию, особенно в Европе (Matola et al., 2025). В результате коммерческое выращивание ГМ-эвкалипта ограничено исполь-

зованием отдельных линий в Бразилии (Pinheiro et al., 2023).

Несмотря на это, генная инженерия рассматривается как важный инструмент ускоренного улучшения эвкалипта, позволяющий целенаправленно вводить гены, связанные с устойчивостью к вредителям, гербицидам, изменением состава древесины и скоростью роста, минуя длительные циклы традиционной селекции. Кроме того, трансгенез и CRISPR используются для функционального анализа генов, связанных с развитием древесины и устойчивостью к стрессам у древесных растений (Wang et al., 2021; Wang et al., 2024). Однако внедрение таких технологий по-прежнему ограничивается сочетанием технических, экологических и регуляторных факторов.

Коммерческие направления генной инженерии эвкалипта

История генной инженерии эвкалипта началась в 1990-х годах, когда были предприняты первые попытки трансформации с использованием природного генетического инженера – почвенной бактерии *Agrobacterium tumefaciens* Smith, Townsend, Conn (Bevan et al., 1983; Herrera-Estrella et al., 1983). Этот биологический метод, основанный на естественном процессе переноса ДНК от бактерии к растению, остаётся наиболее распространённым и эффективным для эвкалипта благодаря относительно высокой эффективности и стабильности встраивания чужеродных генов. В дополнение к нему для трудно преобразуемых генотипов или в исследовательских целях применяются физические методы, такие как биолистика и электропорация (Wang et al., 2024). Ключевым технологическим барьером долгое время являлся этап регенерации целого растения из единичной трансформированной клетки, что требовало разработки сложных протоколов *in vitro* для каждого целевого вида или гибрида. Однако развитие этих технологий сделало возможным практическое применение генетически модифицированного эвкалипта в коммерческом лесоводстве. В настоящее время коммерческие посадки ГМ-эвкалипта существуют только в Бразилии, где эвкалиптовые насаждения занимают около 7,5 млн га, или примерно 75% площади культивируемых лесных насаждений страны (Pinheiro et al., 2023).

Тремя наиболее проработанными направлениями генной инженерии эвкалипта являются увеличение объема древесины, устойчивость к насекомым-вредителям и устойчивость к гербицидам:

1. Увеличенный объем древесины. Повышение продуктивности – ключевая задача селекции. Хотя классические генетические исследования выявили множество локусов количественных признаков (QTL), влияющих на рост и плотность древесины у гибридов *E. grandis* и *E. urophylla* (Kullan et al., 2012), генная инженерия позволяет напрямую влиять на физиологические механизмы.

Первой линией генно-модифицированного эвкалип-

та, одобренной для коммерческого использования, стала линия H421. Растения этой линии содержат ген, отвечающий за регулирование синтеза эндоглюканаз – семейства гликозидгидролаз, участвующих в развитии и ремоделировании клеточной стенки во время роста (Pinheiro et al., 2023). Данная линия была создана в 2000 году компанией FuturaGene (Бразилия) с помощью введения гена *cell*, кодирующего 1,4-β-эндоглюканазу *Arabidopsis thaliana*, в гибрид *E. grandis* × *E. urophylla* методом агробактериальной трансформации. Продуктом трансгена является фермент, участвующий в ремоделировании клеточной стенки. Этот фермент способствует «разрыхлению» клеточных стенок во время роста, что облегчает их растяжение и, как следствие, приводит к увеличению скорости роста и итогового объема биомассы. Полевые испытания показали, что линия H421 демонстрирует увеличение объема древесины на 20-30% по сравнению с обычными коммерческими клонами (Pinheiro et al., 2023).

2. Устойчивость к гербицидам. Контроль сорняков критически важен на ранних стадиях роста эвкалипта, так как конкуренция за ресурсы может снизить продуктивность древостоя на 55-91% (Mota Porto et al., 2024). Глифосат – наиболее широко применяемый для этого гербицид, но природная чувствительность эвкалипта к нему делает любые отклонения от необходимой дозы опасными (Cerveira Jr. et al., 2020; Mota Porto et al., 2024). Генно-инженерное решение этой проблемы основано на введении в геном эвкалипта бактериального гена *cp4 epsps* из *Agrobacterium tumefaciens*.

Компания FuturaGene/Suzano S.A. в Бразилии разработала и получила одобрение на коммерческое использование ГМ-эвкалипта с глифосат-толерантностью. Глифосат блокирует ключевой фермент шикиматного пути – 5-енолпирувилшикимат-3-фосфат синтазу (EPSPS) эвкалипта, что приводит к остановке синтеза ароматических аминокислот и гибели растения. Продукт бактериального гена *cp4 epsps* – это альтернативная версия фермента EPSPS, которая сохраняет высокое сродство к естественному субстрату, но имеет низкое сродство к глифосату. Таким образом, в присутствии гербицида бактериальный фермент выполняет свою функцию, позволяя растению нормально развиваться (Mota Porto et al., 2024).

В процессе получения эвкалипта устойчивого к глифосату были созданы линии 751K022, 955S019 и 955S024 на основе *E. urophylla*. Проведенные исследования показали, что обработка этих линий глифосатом в дозе до 3,6 кг кислотного эквивалента на гектар, не приводит к снижению биомассы или фотосинтетической активности по сравнению с необработанными растениями. Это позволяет проводить гербицидную обработку непосредственно плантаций, упрощая борьбу с сорняками и снижая издержки производства, возникающие при выращивании растений (Avisar et al., 2023; Mota Porto et al., 2024).

3. Устойчивость к чешуекрылым насекомым. Главным чешуекрылым (*Lepidoptera*) вредителем эвкалиптовых плантаций в Бразилии является коричневая пяденица *Thyrineina arnobia* Stoll in Cramer, вспышки численности которой могут снижать объем древесины на 9-19% за цикл роста и ухудшать ее качество (Avisar et al., 2024). Для защиты растений используется стратегия, аналогичная Bt-кукурузе и Bt-хлопку. В геном эвкалипта вводят один или несколько генов *Cry* из почвенной бактерии *Bacillus thuringiensis* Berliner (Bt). Эти гены кодируют белки-протоксины (δ-эндотоксины). В кишечнике чувствительных насекомых-вредителей, таких как *T. arnobia*, проглоченный белок Cry подвергается частичному протеолизу и тем самым активируется, а затем, связывается со специфичными рецепторами и образует поры в клеточных мембранах, что приводит к гибели насекомого. Для человека, животных и большинства нецелевых организмов эти белки безопасны (Avisar et al., 2024).

Компанией FuturaGene/Suzano S.A. (Бразилия) была создана и одобрена для коммерческого использования в Бразилии линия эвкалипта 1521K059, экспрессирующая гены трёх различных Bt-токсина: Cry1Ab, Cry2Aa и Cry1Bb. Эти белки различаются по аминокислотным последовательностям, спектру связываемых кишечных рецепторов и механизму взаимодействия с мембранами клеток насекомых. Cry1Ab и Cry1Bb относятся к семейству Cry1 и в первую очередь активны против чешуекрылых, однако отличаются по сайтам связывания и чувствительности для отдельных видов вредителей, тогда как Cry2Aa характеризуется более широкой активностью и иным рецепторным профилем. Совмещение токсинов с различными мишенями в одной генетической конструкции приводит к пирамидированию генов, что повышает эффективность контроля за численностью *T. arnobia* и существенно снижает риск формирования устойчивости у популяций вредителя (Avisar et al., 2024). Совмещение всех *Cry*-генов в одном сайте вставки Т-ДНК дополнительно упрощает селекцию, размножение и поддержание стабильности трансгенной линии.

Таким образом, генная инженерия предоставила конкретные инструменты для решения актуальных агротехнических задач, и некоторые из разработанных линий эвкалипта уже прошли полный цикл испытаний и вышли на стадию коммерческого использования.

Тенденции в генной инженерии эвкалипта

Современный этап развития генной инженерии эвкалипта характеризуется переходом от единичных демонстрационных трансгенных линий к формированию целевых программ по созданию древесных культур с заданными хозяйственно ценными признаками (Wang et al., 2024). Если первая коммерческая линия H421 была ориентирована на ускорение роста и увеличение выхода древесины (Pinheiro et al., 2023), то в последние годы спектр разрабатываемых признаков значительно рас-

ширился. Направлениями современных исследований в области генной инженерии эвкалипта являются: оптимизация уже существующих протоколов, изменение структуры клеточной стенки, состава эфирных масел, достижение различных типов устойчивости (Matola et al., 2025).

Применение технологии CRISPR/Cas в исследовании эвкалипта позволило перейти к точечному редактированию генов. Получение целевых нокаутов и направленных мутаций существенно ускоряет функциональную верификацию генов по сравнению с традиционной трансформацией. Важным методологическим шагом в развитии генной инженерии эвкалипта стала работа, в которой продемонстрирована возможность эффективного применения системы CRISPR/Cas на модели «бородатых» корней эвкалипта. Авторы использовали трансформацию, опосредованную *Rhizobium rhizogenes* (Young et al., 2001) для получения композитных растений, что позволило обойти ограничения низкой эффективности трансформации древесных видов. В качестве целевых объектов были выбраны гены, связанные с формированием древесины, включая гены, кодирующие CCR1 – ключевой фермент биосинтеза лигнина, и IAA9A, регулятор ауксин-зависимых процессов в камбии и ксилеме. Редактирование с использованием двух направляющих РНК обеспечивало высокую частоту мутаций: все трансформированные корни несли мутации как минимум в одной аллели гена, кодирующего CCR1, а большинство линий по гену, кодирующему IAA9A, были гетероаллельными. Гистохимический анализ показал снижение содержания лигнина и изменение структуры сосудистых элементов, подтверждая роль CCR1 в формировании клеточной стенки. Данная работа демонстрирует, что «бородатые» корни могут служить эффективной системой для быстрой валидации активности генов эвкалипта и предварительной оценки результатов геномного редактирования в процессе получения стабильных трансгенных линий (Dai et al., 2020).

Генетические подходы к улучшению эвкалипта в большой степени ориентированы на изучение и модификацию пути биосинтеза лигнина, определяющего механические свойства и технологическую пригодность древесины. Комплексные геномные исследования выявили полный набор генов, участвующих в образовании лигнина у *E. grandis*, включая ферменты CCR (cinnamoyl-CoA reductase), CCoAOMT (caffeoyl-CoA O-methyltransferase) и CAD (cinnamyl alcohol dehydrogenase), что делает кодирующие их гены потенциальными мишенями для генетического редактирования с целью улучшения качества древесины для целлюлозно-бумажной промышленности. Редактирование этих и других генов биосинтеза лигнина проводилось на другом древесном растении – *Populus trichocarpa* Torr. & A. Gray ex Hook. (Carocha et al., 2015). Авторы выбрали 21 ген биосинтеза и вывели семь стратегий редактирования генома, направленных на одновременное изменение до шести генов, получив 174 отредактированных варианта тополя. Редактирова-

ние с использованием технологии CRISPR/Cas увеличило соотношение углеводов к лигнину в древесине до 228% по сравнению с диким типом, что привело к более эффективному производству целлюлозы. Полученные результаты позволяют допустить, что тополь волосистоплодный может служить моделью для дальнейшей работы по генно-инженерному изменению эвкалипта.

Изучение биосинтетических путей терпенов и эфирных масел в эвкалипте, фундаментальные исследования их генетического контроля создают основу для разработки конкретных стратегий «метаболической инженерии», то есть изменения генов, отвечающих за метаболические процессы. Основным интерес для коммерческой селекции представляют увеличение выхода и модификация химического профиля эвкалиптового масла, богатого такими ценными компонентами, как 1,8-цинеол (эвкалиптол), α -пинен и лимонен, которые определяют его антимикробные, противовоспалительные и ароматические свойства. Полногеномный анализ семейства генов терпенсинтаз (TPS) в *E. grandis* выявил кластеры генов, ответственных за синтез моно- и сесквитерпенов, с четкой тканеспецифической экспрессией (Kullan et al., 2012). Это указывает на тесную связь между локализацией экспрессии конкретных TPS-генов и накоплением определенных терпенов в листьях или коре.

Дополнительным шагом к практической реализации таких подходов стали исследования ассоциативной генетики эфирномасличных признаков у эвкалипта. Так, в одной из работ на примере *Eucalyptus loxophleba* Benth. были выявлены конкретные аллельные варианты генов терпенового пути, статистически связанные с вариацией выхода эфирного масла и концентрацией ключевых компонентов, включая 1,8-цинеол и α -пинен (Padovan et al., 2017). Авторы показали, что наибольший вклад в формирование химического профиля масла вносят гены последних этапов MEP-пути (от англ. methyl-erythritol-phosphate), контролирующие этапы образования предшественников монотерпенов в хлоропластах у растений. Идентификация функционально значимых генетических вариантов соответствующих ферментов формирует основу для целевого геномного редактирования или для трансгенной сверхэкспрессии генов и разработки линий эвкалипта с повышенным выходом эфирных масел и заданным их составом.

Исследования ведутся и в области повышения устойчивости эвкалиптовых деревьев к насекомым-вредителям. В одной из работ с использованием полногеномного анализа ассоциаций (GWAS, от англ. Genome-Wide Association Studies) исследована устойчивость *E. grandis* к галловой озе *Leptocybe invasa* Fisher et La Salle – одному из наиболее опасных вредителей эвкалиптовых плантаций (Mhoswa et al., 2020). На основе анализа SNP-маркеров у нескольких сотен генотипов были выявлены районы генома, статистически связанные с уровнем повреждения растений, а также гены-кандидаты защитного ответа, включая представителей семейств NBS-

LRR и регуляторы сигнальных путей иммунитета. Полученные результаты демонстрируют полигенную природу устойчивости к вредителю и создают основу для маркер-опосредованной селекции и последующих генно-инженерных подходов к повышению резистентности эвкалипта.

Современные тенденции в генетической инженерии эвкалипта и его выращивании включают не только разработку устойчивых к вредителям трансгенных линий, но и интеграцию биотехнологий в системы лесного хозяйства и устойчивого управления лесами. В условиях России потенциальный интерес представляет создание адаптированных к умеренному и субтропическому климату форм эвкалипта с использованием методов генетической трансформации, микроклонального размножения и молекулярной селекции. Особое значение при этом имеет повышение морозостойкости, поскольку большинство коммерчески значимых видов и гибридов эвкалипта чувствительны к низким температурам. Показано, что *Eucalyptus benthamii* Maiden & Cabbage обладает более высокой способностью к холодовой акклимации по сравнению с *E. grandis*, а *Eucalyptus gunnii*. Hook. F. способен переносить температуры до -14°C после закаливания, что делает эти виды перспективными донорами признаков холодоустойчивости для селекционных и генно-инженерных программ (Scarascia-Mugnozza et al., 1989; Oberschelp et al., 2022). Реализация таких подходов может способствовать формированию научно обоснованной модели внедрения биотехнологических древесных культур в российскую лесную отрасль (Shvarts et al., 2023).

Таким образом, современная геновая инженерия эвкалипта развивается по нескольким взаимосвязанным направлениям: совершенствование технологий трансформации и регенерации, функциональная геномика и геномное редактирование, модификация состава древесины и вторичного метаболизма, а также повышение устойчивости к биотическим факторам. Общей тенденцией является переход от отдельных трансгенных конструкций к комплексному использованию геномных, транскриптомных и биотехнологических подходов для направленного управления хозяйственно ценными признаками древесных растений.

Заключение

Эвкалипт, являющийся одной из наиболее распространенных плантационных древесных культур мира, в настоящее время выступает важным объектом генетических и биотехнологических исследований. Традиционное лесное хозяйство, сталкиваясь с многолетними циклами селекции, генетической сложностью рода и растущими экологическими вызовами, заинтересовано в точных и быстрых решениях. Геновая инженерия является одним из подходов к решению этих задач, что наглядно демонстрирует опыт Бразилии – единственной страны, где ГМ-эвкалипт – линии с увеличенной биомассой, устойчи-

востью к гербицидам и насекомым – одобрен для коммерческого использования.

За последние десятилетия достигнут существенный прогресс в развитии технологий трансформации и редактирования генома эвкалипта: от первых успехов трансформации в 1990-х годах до создания комплексных «пирамид» генов ценных признаков и перспектив редактирования генома CRISPR/Cas для направленной модификации свойств древесины и метаболических процессов. Эти разработки направлены не только на повышение экономической эффективности: урожайность, защита от потерь, но и на решение экологических задач, таких как оптимизация использования земель и усиление роли эвкалиптовых плантаций как поглотителей углерода.

References/Литература

- Alcantara G.B., Bernal J.C.F., Quoirin M. Organogenesis and transient genetic transformation of the hybrid *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla*. *Scientia Agricola*. 2011;68(2):246-251. DOI: 10.1590/S0103-90162011000200016
- Avisar D., Dias T.B., dos Santos A.A., Galan M.P., Gonsalves J.M.W., Graça R.N., Livne S., Manoeli A., Dreza T.R., Porto A.C.M., Rocha C.S., Pinheiro A.C. Safety of genetically modified glyphosate-tolerant eucalyptus designed for integrated weed management. *Advances in Weed Science*. 2023;41:e020230032. DOI: 10.51694/AdvWeedSci/2023;41:00019
- Avisar D., Manoeli A., Dos Santos A.A., Porto A.C.D.M., Rocha C.S., Zauza E., Gonzalez E.R., Soliman E., Gonsalves J.M.W., Bombonato L., Galan M.P., Domingues M.M., Candelaria M.C., Mafia R., Graça R.N., Azulay S., Livne S., Dias T.B., Dreza T.R., Silva W.J., Pinheiro A.C. Genetically engineered eucalyptus expressing pesticidal proteins from *Bacillus thuringiensis* for insect resistance: a risk assessment evaluation perspective. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2024;12:1322985. DOI: 10.3389/fbioe.2024.1322985
- Bevan M.W., Flavell R.B., Chilton M.D. A chimaeric antibiotic resistance gene as a selectable marker for plant cell transformation. *Nature*. 1983;304(5922):184-187. DOI: 10.1038/304184a0
- Carocha V., Soler M., Hefer C., Cassan-Wang H., Feveireiro P., Myburg A.A., Paiva J.A.P., Grima-Pettenati J. Genome-wide analysis of the lignin toolbox of *Eucalyptus grandis*. *New Phytologist*. 2015;206(4):1297-1313. DOI: 10.1111/nph.13313
- Castro C.A.O., Santos G.A., Takahashi E.K., Nunes A.C.P., Souza G.A., Resende M.D.V. Accelerating *Eucalyptus* breeding strategies through top grafting applied to young seedlings. *Industrial Crops and Products*. 2021;171:113906. DOI: 10.1016/j.indcrop.2021.113906
- Cerveira Jr. W.R., Santos da Costa Y.K., Carbonari C.A., Duke S.O., Aguiar Alves P.L., Bianco De Carvalho L. Growth, morphological, metabolic and photosynthetic responses of clones of eucalyptus to glyphosate. *Forest Ecology and Management*. 2020;470-471:118218. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.118218
- Chen Y., Li X., Wang H., Zhang L., Liu J., Zhao M., Chen H. Methylome and transcriptome analysis reveals differences in callus development and plantlet regeneration capacity between two *Eucalyptus* species. *Plants*. 2026;15(5):783. DOI: 10.3390/plants15050783
- Chilton K., Campoe O., Allan N., Hinkle H. Increasing carbon sequestration, land-use efficiency, and building decarbonization with short rotation *Eucalyptus*. *Sustainability*. 2025;17(3):1281. DOI: 10.3390/su17031281
- Corredoira E., Ballester A., Ibarra M., Vieitez A.M. Induction of somatic embryogenesis in explants of shoot cultures established from adult *Eucalyptus globulus* and *E. saligna* × *E. maidenii* trees. *Tree Physiology*. 2015;35(6):678-690. DOI: 10.1093/treephys/tpv028
- Dai Y., Hu G., Dupas A., Medina L., Blandels N., San Clemente H., Ladouce N., Badawi M., Hernandez-Raquet G., Mounet F., Grima-Pettenati J., Cassan-Wang H. Implementing the CRISPR/

- Cas9 technology in *Eucalyptus* hairy roots using wood-related genes. *International Journal of Molecular Sciences*. 2020;21(10):3408. DOI: 10.3390/ijms21103408
- Dhakad A.K., Pandey V.V., Beg S., Rawat J.M., Singh A. Biological, medicinal and toxicological significance of *Eucalyptus* leaf essential oil: a review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2018;98(3):833-848. DOI: 10.1002/jsfa.8600
- El Shiekh R.A., Atwa A.M., Elgindy A.M., Mustafa A.M., Senna M.M., Alkabbani M.A., Ibrahim K.M. Therapeutic applications of eucalyptus essential oils. *Inflammopharmacology*. 2025;33(1):163-182. DOI: 10.1007/s10787-024-01588-8
- Girijashankar V. Genetic transformation of eucalyptus. *Physiology and Molecular Biology of Plants*. 2011;17(1):9-23. DOI: 10.1007/s12298-010-0048-0
- Herrera-Estrella L., Depicker A., Van Montagu M., Schell J. Expression of chimaeric genes transferred into plant cells using a Ti-plasmid-derived vector. *Nature*. 1983;303(5914):209-213. DOI: 10.1038/303209a0
- Kendurkar S.V., Rangaswamy M. Genetic transformation in eucalyptus. In: S.S. Gosal, S.H. Wani (eds). *Biotechnologies of Crop Improvement, Volume 2: Transgenic Approaches*. Cham (Switzerland): Springer International Publishing AG; 2018. p.335-366. DOI: 10.1007/978-3-319-90650-8_13
- Kullan A.R.K., van Dyk M.M., Hefer C.A., Jones N., Kanzler A., Myburg A.A. Genetic dissection of growth, wood basic density and gene expression in interspecific backcrosses of *Eucalyptus grandis* and *E. urophylla*. *BMC Genetics*. 2012;13:60. DOI: 10.1186/1471-2156-13-60
- Lee S.H., Dahali R., Nik Hashim N.H., Kusin M., Mahmud S.Z., Kamarudin N., Abdul Jalil A.M., Lubis M.A.R. Eucalyptus plantation worldwide, its hybridization and cloning development. In: S.H. Lee, W.C. Lum, P. Antov, L. Kristák, M.A.R. Lubis, W. Fatriasari (eds). *Eucalyptus: engineered wood products and other applications*. Singapore: Springer Nature Singapore; 2024. p.1-15. DOI: 10.1007/978-981-99-7919-6_1
- Li H., Cheng X., Wang L., Xie P., Zhang H., Yang Y., Liu T., Wang Y. Global trends in the commercialization of genetically modified crops in 2024. *Journal of Integrative Agriculture*. 2026;25(4):1307-1315. DOI: 10.1016/j.jia.2025.11.037
- Li Z.-H., Wang Q., Ruan X., Pan C.-D., Jiang D.-A. Phenolics and plant allelopathy. *Molecules*. 2010;15(12):8933-8952. DOI: 10.3390/molecules15128933
- Liu Y., Wang C., Ouyang L., Li L., Su M. Analysis of transcriptome and differential expression of different types of calli of *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*. *PLoS ONE*. 2025;20(5):e0322224. DOI: 10.1371/journal.pone.0322224
- Maharjan B.K., Islam M.T., Muzaffar A., Tschaplinski T.J., Tuskan G.A., Chen J.-G., Yang X. Woody Plant transformation: current status, challenges, and future perspectives. *Plants*. 2025;14(22):3420. DOI: 10.3390/plants14223420
- Mao X., Zheng H., Luo G., Liao S., Wang R., Tang M., Chen H. Climate change favors expansion of three *Eucalyptus* species in China. *Frontiers in Plant Science*. 2024;15:1443134. DOI: 10.3389/fpls.2024.1443134
- Markova Ye.N., Yevlash A.Ya., Klemeshova K.V. Introduction of *Eucalyptus* sp. in the conditions of Sochi Black Sea region. *Subtropical and ornamental horticulture*. 2024;91:130-147. [in Russian] (Маркова Е.Н., Евлаш А.Я., Клемешова К.В. Интродукция *Eucalyptus* sp. в условиях Черноморского побережья Сочи. *Субтропическое и декоративное садоводство*. 2024;91:130-147). DOI: 10.31360/2225-3068-2024-91-130-147
- Matola S.H., Li J., Sun M., Yang L., Zhuang W., Yang J. Advances in genetic engineering techniques for improved forest trees: applications in biomass, stress resilience and carbon sequestration. *International Journal of Molecular Sciences*. 2025;26(20):10192. DOI: 10.3390/ijms262010192
- Mhoswa L., O'Neill M.M., Mphahlele M.M., Oates C.N., Payn K.G., Slippers B., Myburg A.A., Naidoo S. A genome-wide association study for resistance to the insect pest *Leptocybe invasa* in *Eucalyptus grandis* reveals genomic regions and positional candidate defense genes. *Plant and Cell Physiology*. 2020;61(7):1285-1296. DOI: 10.1093/pcp/pcaa057
- Mosisa G.B., Tassie N., Adula M. Current and future distribution of *Eucalyptus globulus* under changing climate in Ethiopia: implications for forest management. *Environmental Systems Research*. 2024;13:4. DOI: 10.1186/s40068-024-00332-z
- Mota Porto A.C., Gonsalves J.M.W., Vieira P.A., Perek M., Lima D.C., Nagayschi M., Drezza T.R., Pinheiro A.C., de Mello E.J., Avisar D., Graça R.N. Characterization of glyphosate-tolerant genetically modified eucalyptus. *GM Crops & Food*. 2024;15(1):361-373. DOI: 10.1080/21645698.2024.2429200
- Nogueira C.O.S., Pereira V.A., Latorre F.L., Paula R.J., Dutra Junior A.T., Almeida I.A., Ferreira O.E., Lima E.N., Bezerra A.C.S., Machado A.R.T. Pilot-scale production of biochar from eucalyptus wood chips for carbon sequestration. *Carbon Neutral Systems*. 2025;1(1):15. DOI: 10.1007/s44438-025-00015-x
- Oberschelp G.P.J., Morales L.O., Montecchiarini M.L., Castagnaro A.P., Lara M.V. Harder, better, faster, stronger: Frost tolerance of *Eucalyptus benthamii* under cold acclimation. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2022;186:64-75. DOI: 10.1016/j.plaphy.2022.06.022
- Oliveira G.G., Queiroz T.B., Bullock B.P., Coelho J.C., Hakamada R.E., Guerrini I.A. Full-tree biomass, root carbon stock, and nutrient use efficiency across ages in *Eucalyptus* stands under seedling and coppice systems. *Plants*. 2025;14(9):1382. DOI: 10.3390/plants14091382
- Padovan A., Webb H., Mazanec R., Grayling P., Bartle J., Foley W.J., K  lheim C. Association genetics of essential oil traits in *Eucalyptus loxophleba*: explaining variation in oil yield. *Molecular Breeding*. 2017;37(6):73. DOI: 10.1007/s11032-017-0667-z
- Petrovskaya P.A. The planting of tress in the bushes on the Black sea coast of Krasnodar territory (by the example of Sochi). *RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries*. 2012;(S5):85-91. [in Russian] (Петровская П.А. Посадки древесных растений на Черноморском побережье Краснодарского края (на примере г. Сочи). *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство*, 2012;(S5):85-91).
- Pinheiro A.C., dos Santos A.A., Avisar D., Gonsalves J.M., Galan M.P., Abramson M., Barimboim N., Abrah  o O., Graça R.N., Drezza T.R., Silva W. Five-years post commercial approval monitoring of eucalyptus H421. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2023;11:1257576. DOI: 10.3389/fbioe.2023.1257576
- Pinto G., Park Y.-S., Neves L., Araújo C., Santos C. Genetic control of somatic embryogenesis induction in *Eucalyptus globulus* Labill. *Plant Cell Reports*. 2008;27(6):1093-1101. DOI: 10.1007/s00299-008-0532-y
- Pinto G., Santos C., Neves L., Araújo C. Somatic embryogenesis and plant regeneration in *Eucalyptus globulus* Labill. *Plant Cell Reports*. 2002;21:208-213. DOI: 10.1007/s00299-002-0505-5
- Sadono R., Wardhana W., Idris F., Wirabuana P.Y.A.P. Carbon storage and energy production of *Eucalyptus urophylla* developed in dryland ecosystems at East Nusa Tenggara. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*. 2021;9(1):3107-3114. DOI: 10.15243/jdmlm.2021.091.3107
- Scarascia-Mugnozza G., Valentiny R., Kuzminsky E., Giordano E. Freezing mechanisms, acclimation processes and cold injury in *Eucalyptus* species planted in the Mediterranean region. *Forest Ecology and Management*. 1989;29(1-2):81-94. DOI: 10.1016/0378-1127(89)90057-1
- Sharma V., Ankita, Karnwal A., Sharma S., Kamal B., Jadon V.S., Gupta S., Sivanasen I. A comprehensive review uncovering the challenges and advancements in the in vitro propagation of *Eucalyptus* plantations. *Plants*. 2023;12(17):3018. DOI: 10.3390/plants12173018
- Shvarts E.A., Karpachevskiy M.L., Shmatkov N.M., Baybar A.S. Reforming forest policies and management in Russia: problems and challenges. *Forests*. 2023;14(8):1524. DOI: 10.3390/f14081524
- Sumathi M., Yasodha R. Microsatellite resources of *Eucalyptus*: current status and future perspectives. *Botanical Studies*. 2014;55:73. DOI: 10.1186/s40529-014-0073-3
- Sun Y., Guo D., Zhang L., Zhao X., Liu Y. Recent advances in microbial protein expression systems and industrial applications. *Microbial*

- Cell Factories*. 2023;22:184. DOI: 10.1186/s12934-023-02184-1
- van Nocker S., Gardiner S.E. Breeding better cultivars, faster: applications of new technologies for the rapid deployment of superior horticultural tree crops. *Horticulture Research*. 2014;1:14022. DOI: 10.1038/hortres.2014.22
- Vecchio M.G., Logan C., Minto C. Beneficial and healthy properties of eucalyptus plants: a great potential use. *The Open Agriculture Journal*. 2016;10:52-57. DOI: 10.2174/1874331501610010052
- Vuong Q.V., Chalmers A.C., Bhuyan D.J., Bowyer M.C., Scarlett C.J. Botanical, phytochemical, and anticancer properties of the *Eucalyptus* species. *Chemistry & Biodiversity*. 2015;12(6):907-924. DOI: 10.1002/cbdv.201400327
- Wang W.F. Genome editing improvement study of *Eucalyptus* wood quality traits. *Molecular Plant Breeding*. 2024;15(5):317-327. DOI: 10.5376/mpb.2024.15.0030
- Wang X., Chen S., Zhang H., Luo P., Zhou F., Zeng B., Xu J., Fan C. *Agrobacterium*-mediated genetic transformation of the most widely cultivated superior clone *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* DH32-29 in Southern China. *Frontiers in Plant Science*. 2023;13:1011245. DOI: 10.3389/fpls.2022.1011245
- Wang Y., Wu Z., Li X., Shang X. Regeneration and genetic transformation in *Eucalyptus* species: Current research and future perspectives. *Plants*. 2024;13(20):2843. DOI: 10.3390/plants13202843
- Wang Z., Li L., Ouyang L. Efficient genetic transformation method for *Eucalyptus* genome editing. *PLoS One*. 2021;16(5):e0252011. DOI: 10.1371/journal.pone.0252011
- Young J.M., Kuykendall L.D., Martinez-Romero E., Kerr A., Sawada H. A revision of *Rhizobium* Frank 1889, with an emended description of the genus, and the inclusion of all species of *Agrobacterium* Conn 1942 and *Allorhizobium undicola* de Lajudie *et al.* 1998 as new combinations: *Rhizobium radiobacter*, *R. rhizogenes*, *R. rubi*, *R. undicola*, and *R. vitis*. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*. 2001;51(Pt. 1):89-103. DOI: 10.1099/00207713-51-1-89
- Zhan C.Y. Genome editing and functional verification of eucalyptus disease resistance genes. *Tree Genetics and Molecular Breeding*. 2024;14(2):81-94. DOI: 10.5376/tgmb.2024.14.0009
- Zhang Y., Wang X. Geographical spatial distribution and productivity dynamic change of eucalyptus plantations in China. *Scientific Reports*. 2021;11:19764. DOI: 10.1038/s41598-021-97089-7
- Zhou T., Lin Y., Lin Y., Luo J., Ding J. Regeneration and *Agrobacterium*-mediated genetic transformation of twelve *Eucalyptus* species. *Forest Research (Fayetteville)*. 2022;2:15. DOI: 10.48130/FR-2022-0015

Информация об авторах

Ольга Вячеславовна Битюкова, магистрант, Санкт-Петербургский государственный университет, 199034 Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9, 79292693255o@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-9124-4356>

Матвеева Татьяна Валерьевна, доктор биологических наук, профессор кафедры генетики, Санкт-Петербургский государственный университет, 199034 Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9; Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, 196608 Россия, Санкт-Петербург, Пушкин, шоссе Подбельского, 3, t.v.matveeva@spbu.ru, radishlet@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0001-8569-6665>

Людмила Алексеевна Лутова, доктор биологических наук, профессор, кафедра генетики и биотехнологии, биологический факультет, Санкт-Петербургский государственный университет, 199034 Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9, Россия, l.lutova@spbu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6125-0757>

Information about the authors

Olga V. Bitjukova, Master's student, St. Petersburg State University, 7/9, Universitetskaya Embankment, St. Petersburg, 199034 Russia, 79292693255o@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-9124-4356>

Tatiana V. Matveeva, Dr. Sci. (Biology), Professor, Department of Genetics and Biotechnology, Faculty of Biology, St. Petersburg State University, 7/9, Universitetskaya Embankment, St. Petersburg, 199034 Russia; All-Russian Research Institute of Plant Protection, 3, Podbelskogo Highway, Pushkin, St. Petersburg, 196608 Russia, t.v.matveeva@spbu.ru, radishlet@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8569-6665>

Ludmila A. Lutova, Dr. Sci. (Biology), Professor, Department of Genetics and Biotechnology, Faculty of Biology, St. Petersburg State University, 7/9, Universitetskaya Embankment, St. Petersburg, 199034 Russia, l.lutova@spbu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6125-0757>

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interests.

Статья поступила в редакцию 27.05.2026; одобрена после рецензирования 25.06.2026; принята к публикации 14.09.2026.

The article was submitted on 27.05.2026; approved after reviewing on 25.06.2026; accepted for publication on 14.09.2026.