

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИСКУССТВЕННОГО ЛЕСОВОССТАНОВЛЕНИЯ: ОТ МИКРОКЛОНАЛЬНОГО РАЗМНОЖЕНИЯ ДО ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА

О.Е. Коченгина

студент, *Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет
имени С.М. Кирова, Россия*

Аннотация. В статье рассматриваются перспективные технологии искусственного лесовосстановления, направленные на повышение эффективности и устойчивости лесных насаждений. Особое внимание уделяется микроклональному размножению как способу получения генетически однородного посадочного материала, технологиям точной посадки, оптимизирующим условия для приживаемости саженцев, и дистанционному мониторингу, обеспечивающему оперативный контроль за состоянием лесов. Анализируются преимущества и ограничения каждой технологии, а также перспективы их интеграции для создания комплексных систем лесовосстановления. Подчеркивается важность разработки экономически эффективных и адаптированных к местным условиям решений для успешного внедрения инноваций в лесное хозяйство.

Ключевые слова: Искусственное лесовосстановление, микроклональное размножение, точная посадка, дистанционный мониторинг, лесные технологии, устойчивое лесоводство.

PROMISING ARTIFICIAL REFORESTATION TECHNOLOGIES: FROM MICROPROPAGATION TO REMOTE MONITORING

O.E. Kochengina

Student, *St. Petersburg State Forestry Engineering University named after S.M. Kirov, Russia*

Abstract. The article examines promising artificial reforestation technologies aimed at increasing the efficiency and sustainability of forest plantations. Particular attention is paid to micropropagation as a method for obtaining genetically uniform planting stock, precision planting technologies optimizing conditions for seedling survival, and remote monitoring providing operational control over the state of forests. The advantages and limitations of each technology are analyzed, as well as the prospects for their integration to create comprehensive reforestation systems. The importance of developing cost-effective and locally adapted solutions for the successful implementation of innovations in forestry is emphasized.

Keywords: Artificial reforestation, micropropagation, precision planting, remote monitoring, forest technologies, sustainable forestry.

Леса играют ключевую роль в поддержании экологического равновесия планеты, оказывая существенное влияние на климат, сохранение биоразнообразия и обеспечение стабильности гидрологического режима. Помимо экологических функций, леса обладают значительным экономическим потенциалом, являясь источником древесины и других лесных ресурсов, а также способствуя развитию рекреации и туризма. Социальная значимость лесов проявляется в их роли в сохранении культурного наследия, обеспечении занятости населения и поддержании традиционного образа жизни коренных народов. Однако естественное возобновление лесов все чаще сталкивается с серьезными

проблемами, обусловленными антропогенным воздействием и изменением климата. Незаконные и неконтролируемые вырубки, масштабные лесные пожары, вызванные повышением температуры и засухливостью, деградация почв вследствие интенсивного землепользования и распространение инвазивных видов растений и животных – все эти факторы существенно затрудняют естественное восстановление лесных экосистем. В связи с этим, искусственное лесовосстановление приобретает все большее значение как инструмент восполнения потерь лесных площадей, повышения продуктивности лесных насаждений и адаптации лесов к изменяющимся климатическим условиям. Целью данного обзора является рассмотрение перспективных технологий, способных существенно повысить эффективность искусственного лесовосстановления, обеспечив более быстрое и устойчивое восстановление лесных экосистем. В частности, в статье будут рассмотрены методы микрклонального размножения, позволяющие получать генетически однородный и высококачественный посадочный материал, технологии точной посадки, оптимизирующие процесс высадки саженцев с учетом конкретных условий участка, и методы дистанционного мониторинга, обеспечивающие оперативный контроль за состоянием лесных насаждений и своевременное выявление возникающих проблем [1].

Микрклональное размножение (рисунок 1), также известное как *in vitro* размножение или микропропагация, представляет собой комплекс биотехнологических методов, позволяющих получать генетически идентичные копии растений в искусственной среде, свободной от микроорганизмов. Сущность метода заключается в использовании небольших частей растения, таких как почки, побеги, или даже отдельные клетки, которые помещаются в питательную среду, содержащую необходимые гормоны и питательные вещества. Под воздействием этих факторов происходит дедифференциация клеток, то есть возвращение их к эмбриональному состоянию, после чего они начинают активно делиться и формировать так называемый каллус – недифференцированную массу клеток. Затем, путем изменения состава питательной среды, стимулируется органогенез – формирование побегов и корней из каллуса, что приводит к образованию полноценных растений-клонов.

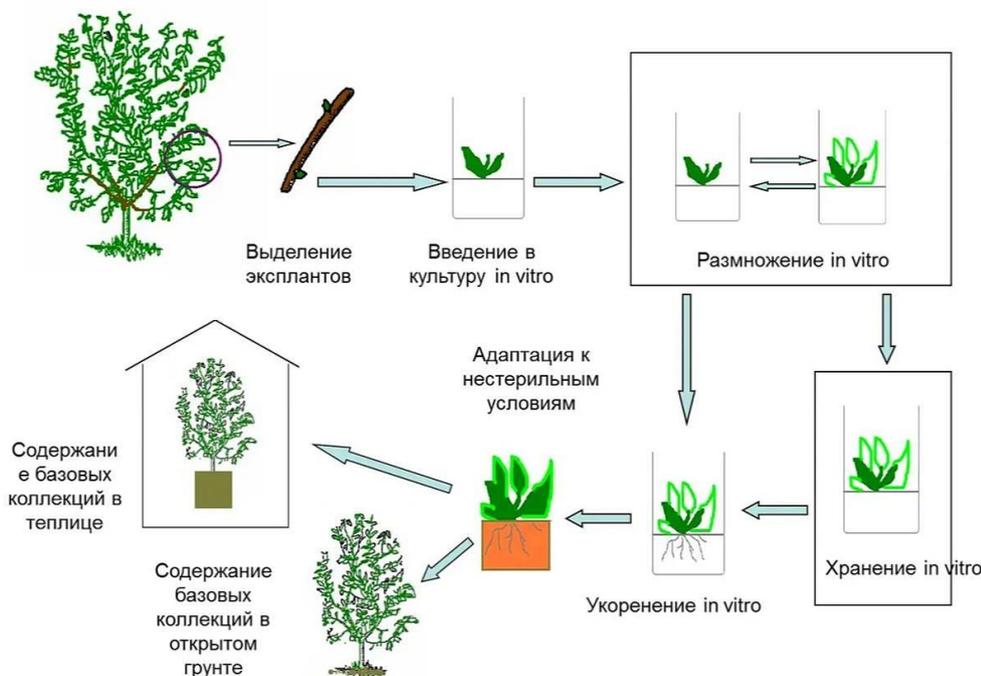


Рисунок 1

Процесс микрклонального размножения состоит из нескольких последовательных этапов, включающих выбор и подготовку исходного растительного материала (экспланта), стерилизацию, инициацию каллуса или побегов, размножение, укоренение и адаптацию

растений к нестерильным условиям [2]. Основными преимуществами метода являются возможность получения большого количества генетически однородного посадочного материала в короткие сроки, оздоровление растений от вирусных и бактериальных инфекций, а также возможность размножения видов, которые плохо размножаются традиционными способами, например, трудноукореняемых или образующих мало семян. В контексте лесовосстановления микрклональное размножение открывает новые возможности для быстрого и эффективного воспроизводства ценных лесобразующих пород. Генетическая однородность посадочного материала обеспечивает предсказуемость роста и развития лесных насаждений, что особенно важно при создании плантаций с заданными характеристиками. Ускоренное размножение позволяет быстро увеличить количество посадочного материала, необходимого для масштабных лесовосстановительных работ. Оздоровление посадочного материала повышает его устойчивость к болезням и вредителям, снижая затраты на защиту леса. Возможность размножения трудноукореняемых видов позволяет восстанавливать редкие и ценные породы, которые играют важную роль в поддержании биоразнообразия. Примером успешного применения микрклонального размножения для лесобразующих пород может служить работа по размножению сосны сибирской (*Pinus sibirica*) с использованием метода соматического эмбриогенеза. Исследования показали, что микрклонально размноженные саженцы сосны сибирской обладают более высокой приживаемостью и интенсивностью роста по сравнению с саженцами, выращенными из семян. Аналогичные результаты были получены при размножении дуба черешчатого (*Quercus robur*), ели европейской (*Picea abies*) и лиственницы сибирской (*Larix sibirica*). Несмотря на значительные преимущества, микрклональное размножение имеет и ряд ограничений. Высокая стоимость, обусловленная необходимостью использования дорогостоящего оборудования и высококвалифицированных кадров, является одним из основных факторов, сдерживающих широкое распространение метода. Кроме того, существует риск генетической нестабильности растений, полученных методом микрклонального размножения, что может приводить к появлению нежелательных признаков. Перспективы развития микрклонального размножения связаны с автоматизацией процессов, что позволит снизить стоимость производства, а также с разработкой экономических протоколов, адаптированных к конкретным видам растений.

Технологии точной посадки представляют собой инновационный подход к лесовосстановлению, основанный на оптимизации процесса высадки саженцев с учетом характеристик конкретного участка. Концепция точной посадки заключается в применении современных технологий, таких как геоинформационные системы, дистанционное зондирование и автоматизированные системы посадки, для создания детальных карт рельефа, почв, увлажнения и других параметров, влияющих на рост и развитие растений [3]. На основе полученных данных разрабатываются оптимальные схемы и технологии посадки, обеспечивающие наилучшие условия для приживаемости и роста саженцев.

Одним из ключевых этапов точной посадки является предварительная оценка участка. Использование геоинформационных систем и дистанционного зондирования позволяет получить подробную информацию о пространственном распределении различных факторов, таких как тип почвы, содержание питательных веществ, уровень увлажнения, экспозиция склона и освещенность. Данные дистанционного зондирования, полученные с помощью спутников, самолетов или беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), позволяют создавать карты растительности, оценивать состояние лесных насаждений и выявлять участки, нуждающиеся в восстановлении. С помощью геоинформационных систем данные дистанционного зондирования интегрируются с информацией о почвах, рельефе и других параметрах, создавая комплексную картину, необходимую для принятия обоснованных решений о выборе пород, схем посадки и технологий ухода.

Автоматизированные системы посадки представляют собой роботизированные комплексы, способные выполнять посадку саженцев с высокой точностью и производительностью. Эти системы могут быть установлены на тракторах или других транспортных средствах и оснащены датчиками, которые определяют оптимальное место для посадки каждого саженца. Другим перспективным направлением являются дроны для посева семян. Дроны могут быть использованы для посева семян на больших площадях, в труднодоступных местах или после пожаров. Преимуществами автоматизированных систем посадки являются повышение производительности труда, снижение затрат на посадку, обеспечение равномерности посадки и снижение риска повреждения саженцев. Однако, автоматизированные системы посадки требуют значительных инвестиций и могут быть неэффективны на участках с сложным рельефом или каменистыми почвами. Дроны, в свою очередь, имеют ограничения по полезной нагрузке и дальности полета, а также требуют квалифицированного управления.

Оптимизация густоты и схемы посадки является важным элементом точной посадки. Густота посадки должна быть подобрана с учетом типа почвы, доступности воды и питательных веществ, а также биологических особенностей высаживаемых пород. На плодородных почвах с достаточным увлажнением можно высаживать саженцы с большей густотой, чтобы обеспечить быстрое формирование сомкнутого полога и подавление сорняков. На бедных почвах или в засушливых условиях следует высаживать саженцы с меньшей густотой, чтобы снизить конкуренцию за ресурсы. Схема посадки также должна быть выбрана с учетом конкретных условий участка и целей лесовосстановления. Например, на склонах рекомендуется высаживать саженцы рядами поперек склона, чтобы предотвратить эрозию по

Преимущества точной посадки очевидны: повышение приживаемости саженцев, ускорение роста, снижение затрат на уход и улучшение качества лесных насаждений. Благодаря точному учету характеристик участка и оптимизации процесса посадки, точная посадка позволяет создавать более устойчивые и продуктивные леса, способные эффективно выполнять свои экологические и экономические функции.

Дистанционный мониторинг играет ключевую роль в обеспечении эффективного управления лесовосстановительными мероприятиями, предоставляя своевременную и объективную информацию о состоянии лесных насаждений на больших территориях. Сущность дистанционного мониторинга заключается в использовании различных методов дистанционного зондирования, включая спутниковые снимки, аэрофотосъемку и данные LiDAR (Light Detection and Ranging), для получения информации о лесных ресурсах без непосредственного контакта с объектом исследования. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки и может быть использован для решения различных задач мониторинга [4].

Спутниковые снимки, получаемые с помощью различных спутниковых платформ, таких как Landsat, Sentinel и MODIS, обеспечивают широкий охват территории и регулярное получение данных (рисунок 2).



Рисунок 2

Они могут быть использованы для мониторинга динамики лесных площадей, оценки вегетационного состояния лесных насаждений, выявления изменений в землепользовании и обнаружения очагов пожаров. Аэрофотосъемка, выполняемая с помощью самолетов или БПЛА, позволяет получать более детальные снимки с высоким пространственным разрешением, что особенно важно для оценки состояния отдельных деревьев и выявления признаков болезней и вредителей. Данные LiDAR, получаемые с помощью лазерного сканирования, позволяют создавать трехмерные модели лесных насаждений, определять высоту деревьев, сомкнутость крон, запас древесины и другие важные параметры.

Мониторинг ключевых показателей является важным этапом дистанционного мониторинга лесовосстановления. Вегетационные индексы, такие как NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) и EVI (Enhanced Vegetation Index), рассчитываются на основе спектральных характеристик растительности и отражают ее вегетационную активность, биомассу и состояние здоровья. Мониторинг вегетационных индексов позволяет оценивать динамику роста и развития лесных насаждений, выявлять участки с угнетенной растительностью и определять эффективность лесовосстановительных мероприятий. Высота деревьев, сомкнутость крон и биомасса являются важными структурными характеристиками лесных насаждений, которые могут быть определены с помощью данных LiDAR. Мониторинг этих показателей позволяет оценивать запас древесины, продуктивность лесов и их способность поглощать углерод. Влажность почвы является важным фактором, влияющим на рост и развитие лесных насаждений. Данные о влажности почвы могут быть получены с помощью микроволновых радиометров, установленных на спутниках или самолетах. Мониторинг влажности почвы позволяет выявлять участки, подверженные засухе, и принимать меры по их обводнению.

Раннее выявление стрессовых состояний и болезней является важной задачей дистанционного мониторинга лесовосстановления. С помощью данных дистанционного зондирования можно выявлять изменения в спектральных характеристиках растительности, которые могут свидетельствовать о наличии болезней, вредителей или других стрессовых факторов. Например, изменение цвета хвои или листьев, снижение вегетационной активности или увеличение отражения в инфракрасном диапазоне могут быть признаками заболевания. Своевременное выявление проблем позволяет оперативно принимать меры по их устранению и предотвращать распространение болезней и вредителей [5].

Оценка эффективности лесовосстановительных мероприятий является важным этапом дистанционного мониторинга. С помощью данных дистанционного зондирования можно сравнивать состояние лесных насаждений до и после проведения лесовосстановительных мероприятий, оценивать прирост биомассы, увеличение сомкнутости крон и другие показатели. Сравнение различных стратегий и методов лесовосстановления позволяет выявлять наиболее эффективные подходы и оптимизировать процесс восстановления лесных экосистем.

Анализ и визуализация данных являются важными этапами дистанционного мониторинга. Данные дистанционного зондирования обрабатываются с помощью специальных программных средств, таких как геоинформационные системы, для создания карт и моделей, отражающих состояние лесных насаждений. Визуализация данных позволяет наглядно представлять информацию о лесных ресурсах и принимать обоснованные решения по управлению лесами.

Преимущества дистанционного мониторинга очевидны: охват больших территорий, оперативность получения данных, снижение затрат на проведение полевых исследований и возможность мониторинга труднодоступных участков. Благодаря этим преимуществам дистанционный мониторинг становится незаменимым инструментом для эффективного управления лесовосстановительными мероприятиями и обеспечения устойчивого развития лесного хозяйства.

Несмотря на явные преимущества, внедрение перспективных технологий искусственного лесовосстановления сталкивается с рядом серьезных вызовов, особенно в развивающихся странах, а также открывает широкие перспективы для дальнейшего развития лесного хозяйства [6]. Высокая начальная стоимость оборудования, требуемая квалификация персонала и затраты на адаптацию технологий к местным условиям существенно ограничивают доступность для стран с ограниченными ресурсами. Решение заключается в разработке упрощенных, экономически эффективных версий технологий, развитии международного сотрудничества для обмена опытом и предоставления грантов, а также в стимулировании локального производства оборудования.

Объем данных, генерируемых системами дистанционного мониторинга и другими технологиями, огромен и требует специализированных навыков для обработки и анализа. Необходимы разработка открытых и доступных программных платформ, обучение специалистов по анализу данных, а также создание интегрированных систем, позволяющих связать данные с различными источниками информации (почвенные карты, климатические данные и т.д.). Микроклональное размножение движется к автоматизации процессов и снижению затрат на питательные среды [7]. В точной посадке разрабатываются более автономные и маневренные роботизированные системы, способные работать на сложных рельефах. Дистанционный мониторинг совершенствуется за счет использования искусственного интеллекта для автоматической детекции болезней и вредителей, а также за счет интеграции данных с наземными наблюдениями. Отсутствие четких правил и стандартов, а также недостаточная поддержка со стороны государства, сдерживают внедрение инноваций. Необходима разработка стимулирующих механизмов (налоговые льготы, субсидии), создание фондов для поддержки научных исследований и внедрения новых технологий, а также адаптация существующих нормативных актов к новым реалиям. Преодоление этих вызовов и использование открывающихся перспектив позволит существенно повысить эффективность и устойчивость искусственного лесовосстановления, внося значительный вклад в сохранение и приумножение лесных ресурсов планеты.

В контексте современных экологических вызовов, обусловленных глобальным изменением климата, деградацией почв и интенсивной антропогенной нагрузкой на лесные экосистемы, проблема эффективного лесовосстановления приобретает исключительную актуальность. Традиционные методы искусственного возобновления лесов, основанные на использовании семенного материала и ручном труде, зачастую оказываются недостаточно эффективными для обеспечения быстрого и устойчивого восстановления лесных площадей. В связи с этим, возрастает необходимость в разработке и внедрении инновационных технологических решений, способных повысить продуктивность и устойчивость лесовосстановительных мероприятий. Настоящее исследование посвящено анализу перспективных технологических решений, направленных на оптимизацию процесса искусственного возобновления лесов и обеспечение эффективного восстановления лесных экосистем. В рамках данного обзора рассмотрены и проанализированы три ключевые инновации, обладающие значительным потенциалом для преобразования лесохозяйственной практики: микроклональное размножение (*in vitro* propagation), позволяющее получать генетически однородный и оздоровленный посадочный материал; технологии прецизионной посадки (*precision planting*), оптимизирующие процесс высадки саженцев с учетом характеристик конкретных участков; и системы дистанционного мониторинга (*remote sensing monitoring*), обеспечивающие оперативный контроль за состоянием лесных насаждений и своевременное выявление возникающих проблем.

Список литературы

1. Алексеев, В. А. Технологии искусственного лесовосстановления в условиях изменяющегося климата / В. А. Алексеев, Г. С. Кузнецова, Е. И. Петрова. – Санкт-Петербург : СПбНИИЛХ, 2022. – 280 с.

2. Ecoestate. Лесовосстановление. Порядок проведения лесовосстановления. URL: <https://ecoestate-russia.ru/news/lesovosstanovlenie?ysclid=mewgah7nfz560224360> (дата обращения 09.07.2025).
3. Комаров, И. А. Автоматизация процессов лесовосстановления с использованием беспилотных летательных аппаратов / И. А. Комаров, П. С. Орлов // Лесное хозяйство: вызовы XXI века : материалы междунар. науч.-практ. конф., Воронеж, 15–17 мая 2018 г. – Воронеж : ВГЛУ, 2018. – С. 120-125.
4. RSF. Russian Science Foundation. Разработан метод упрощения дистанционного ИИ-мониторинга природы. URL: <https://rscf.ru/en/news/biology/razrabotan-metod-uproshcheniya-dstantsionnogo-ii-monitoringa-prirody/> (дата обращения 15.07.2025).
5. Своё| Фермство. Микроклональное размножение растений для непрерывного производства посадочного материала. URL: <https://svoefermerstvo.ru/svoemedia/videos/mikroklonal-noe-razmnozhenie-rastenij-dlja-nepreryvnogo-proizvodstva-posadochnogo-materiala> (дата обращения 17.07.2025)
6. Сушко, О. П. Внедрение биотехнологий в сельском хозяйстве для увеличения добавленной стоимости продукции / О. П. Сушко, А. Р. Есина // Экономика высокотехнологичных производств. – 2025. – Т. 6, № 3.
7. Forest complex.ru. Портал о лесозаготовке и деревообработке. Технологии в помощь лесовосстановлению. URL: <https://forestcomplex.ru/rf-protection/tehnologii-v-pomoshh-lesovosstanovleniju/> (дата обращения 23.08.2025).

References

1. Alekseev, V. A., Kuznetsova, G. S., & Petrova, E. I. (2022). *Tekhnologii iskusstvennogo lesovosstanovleniya v usloviyakh menyayushchegosya klimata* [Artificial reforestation technologies in a changing climate]. SPbNIILKh.
2. Ecoestate. (n.d.). *Lesovosstanovlenie. Poryadok provedeniya lesovosstanovleniya* [Reforestation. The procedure for reforestation]. Retrieved July 9, 2025, from <https://ecoestate-russia.ru/news/lesovosstanovlenie?ysclid=mewgah7nfz560224360>.
3. Komarov, I. A., & Orlov, P. S. (2018). Avtomatizatsiya protsessov lesovosstanovleniya s ispol'zovaniem bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Automation of reforestation processes using unmanned aerial vehicles]. In *Lesnoe khozyaistvo: vyzovy XXI veka: Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*, Voronezh, May 15–17, 2018 (pp. 120-125). VGLTU.
4. Russian Science Foundation. (n.d.). *Razrabotan metod uproshcheniya distantsionnogo II-monitoringa prirody* [A method for simplifying remote AI monitoring of nature has been developed]. Retrieved July 15, 2025, from <https://rscf.ru/en/news/biology/razrabotan-metod-uproshcheniya-dstantsionnogo-ii-monitoringa-prirody/>.
5. Svoye Fermerstvo. (n.d.). *Mikroklonal'noe razmnozhenie rastenii dlya nepreryvnogo proizvodstva posadochnogo materiala* [Microclonal propagation of plants for continuous production of planting material]. Retrieved July 17, 2025, from <https://svoefermerstvo.ru/svoemedia/videos/mikroklonal-noe-razmnozhenie-rastenij-dlja-nepreryvnogo-proizvodstva-posadochnogo-materiala>
6. Sushko, O. P., & Yesina, A. R. (2025). Vnedrenie biotekhnologii v sel'skom khozyaistve dlya uvelicheniya dobavlennoi stoimosti produktsii [Implementation of biotechnologies in agriculture to increase the added value of products]. *Ekonomika vysokotekhnologichnykh proizvodst*, 6(3). [Note: If advance online publication, add URL. If in print, add page range.]
7. Forestcomplex.ru. (n.d.). *Tekhnologii v pomoshch' lesovosstanovleniyu* [Technologies to aid reforestation]. Retrieved August 23, 2025, from <https://forestcomplex.ru/rf-protection/tehnologii-v-pomoshh-lesovosstanovleniju/>.