УДК: 630*181

DOI: 10.58168/EnvPr2026_214-223

МЕТОДЫ СОХРАНЕНИЯ ГЕНЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА РЕДКИХ ВИДОВ В БОТАНИЧЕСКИХ САДАХ

METHODS OF PRESERVING GENETIC MATERIAL OF RARE SPECIES IN BOTANICAL GARDENS

Богачук Д.О., студентка 2 курса Лесного факультета, направление подготовки «Государственное управление лесами» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Bogachuk D.O., 2nd-year student of the Faculty of Forestry, majoring in "Public Forest Management", Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация: В работе рассмотрена роль ботанических садов как ключевых институтов сохранения биологического разнообразия, особенно редких и исчезающих видов растений в условиях нарастающей антропогенной нагрузки и климатических изменений. Проанализированы основные методы сохранения генетического материала ex situ: банки семян, живые коллекции, криоконсервация, микроклональное размножение и банки ДНК. Показаны преимущества и ограничения каждого метода, включая проблему «исключительных» видов, семена которых не выдерживают стандартной сушки и низких температур. Описаны оптимальные режимы хранения семян, а также влияние климатических условий на качество семенного материала. Приведены результаты прогнозирования выживаемости коллекций. Сделан вывод о необходимости комплексного применения традиционных и биотехнологических подходов для эффективного сохранения генофонда редких видов и устойчивого развития ботанических садов.

Abstract: The paper examines the role of botanical gardens as key institutions for the conservation of biological diversity, particularly rare and endangered plant species in the context of increasing anthropogenic pressure and climate change. The main methods of ex situ conservation of genetic material are analyzed: seed banks, living collections, cryopreservation, micropropagation, and DNA banks. The advantages and limitations of each method are shown, including the problem of "exceptional" species whose seeds cannot withstand standard drying and low temperatures. Optimal seed storage regimes are described, as well as the influence of climatic conditions on seed quality. The results of collection viability prediction are presented. A conclusion is made about the need for an integrated application of traditional and biotechnological approaches for effective conservation of the gene pool of rare species and sustainable development of botanical gardens.

Ключевые слова: ботанические сады, сохранение ex situ, редкие виды, банки семян, микроклональное размножение, криоконсервация, биоразнообразие.

Keywords: botanical gardens, ex situ conservation, rare species, seed banks, micropropagation, cryopreservation, biodiversity.

© Богачук Д. О., 2026

В современном мире ботанические сады выполняют не только научно-просветительскую и коллекционную функции, но и выступают ключевыми институтами сохранения биологического разнообразия, особенно в условиях нарастающего антропогенного прессинга и глобальных климатических изменений [4, 5]. Особое стратегическое значение они приобретают в контексте сохранения редких и исчезающих видов ex situ (вне естественной среды обитания), что подтверждается как международными природоохранными программами, так и многолетним опытом функционирования российских ботанических садов [2, 4].

Совокупные коллекции мировых ботанических садов насчитывают более 100 тысяч видов растений, включая 41% таксонов, отнесенных к категории находящихся под угрозой исчезновения [4]. При этом распределение коллекционного материала не ограничивается открытыми ландшафтными экспозициями: значительная часть генетического ресурса консервируется в специализированных банках семян, что является наиболее экономически эффективным и компактным способом сохранения для подавляющего большинства видов [4, 7].

Однако методика банков семян применима не ко всем таксонам. Как демонстрируют современные исследования, по меньшей мере 10% покрытосеменных растений и 36% видов, находящихся под угрозой исчезновения, формируют семена, не выдерживающие стандартных процессов десикации (сушки) при хранении. Другие виды образуют крайне малое количество семян, либо производят диаспоры, чувствительные к сверхнизким температурам (около -20°C), используемым в криокамерах, либо их семена утрачивают жизнеспособность в течение короткого периода (менее the 10 лет) [4].

Такие таксоны, не поддающиеся консервации стандартными методами, классифицируются как «исключительные» (exceptional species). Для их сохранения требуются альтернативные стратегии ex situ, в первую очередь — поддержание живых коллекций в ботанических садах. Помимо прямой охраны и обеспечения физической сохранности исключительных видов, такие коллекции формируют страховой генетический резерв для программ размножения и фундаментальных научных исследований [3, 4].

В критических ситуациях сохранение ex situ может стать единственным способом предотвращения полного вымирания таксона [4]. Нередко специалисты прибегают к интеграции процедур сохранения in situ (в естественной среде) и ex situ для восстановления численности видов, их реинтродукции в природу и экологической реставрации нарушенных местообитаний. Как подчеркивается в методических рекомендациях, разработанных специалистами Центрального сибирского ботанического сада, интродукция редких и исчезающих видов рассматривается как одно из приоритетных направлений решения

проблемы сохранения фиторазнообразия, причем для каждого таксона необходим строго индивидуальный подход, учитывающий его специфические биологические особенности [2].

Популяции, поддерживаемые вне естественной среды, служат надежным страховым резервом от быстрых и непредсказуемых изменений окружающей среды. Они оказывают ключевую поддержку стратегиям сохранения in situ, выигрывая время, необходимое для восстановления деградированных местообитаний и проведения комплексных научных изысканий. Более того, такие популяции обеспечивают запас посадочного материала, необходимого для реинтродукции, генетического обогащения природных популяций или организации генетического обмена между изолированными группами особей [2, 4].

Тем не менее, стратегии сохранения ex situ, как и любое активное вмешательство человека в природные процессы, сопряжены с рядом ограничений. Растения в условиях культуры могут претерпевать генетические и фенотипические модификации, вызванные адаптацией к новой среде выращивания, непреднамеренным искусственным отбором (который иногда неосознанно проводят садоводы), а также генетическим инбридингом, спонтанной гибридизацией и интрогрессией. Значительная часть этих нежелательных изменений связана с обычно малой эффективной численностью популяций растений в коллекциях ботанических садов [4]. В связи с этим особую научную и практическую актуальность приобретает создание генетических банков in vitro, которое позволяет консервировать генофонд редких видов с минимальными потерями генетического разнообразия [3].

Согласно имеющимся научным данным, увеличение эффективного размера популяции в культуре снижает эффекты генетического дрейфа и депрессию инбридинга. Кроме того, уравнивание количества особей, представляющих разные материнские линии, и периодическое поступление диаспор из диких популяций смягчает эффекты непреднамеренного отбора. Адекватное репрезентативное представление вида в условиях ex situ может потребовать отбора большого количества особей из различных частей его географического ареала, что влечет за собой серьезные практические сложности, такие как необходимость дополнительного финансирования, расширение площадей коллекций и, что наиболее важно, обеспечение высокой выживаемости собранных растений [2, 4].

Таким образом, ботанические сады играют центральную роль в сохранении редких видов ex situ, предоставляя незаменимую платформу для поддержки таксонов, которые не могут быть законсервированы традиционными методами банков семян. При грамотном управлении коллекциями, строгом учете генетических рисков, а также активном внедрении методов микроклонального размножения и создания банков меристем, ботанические сады

способны вносить все более весомый вклад в глобальное сохранение биологического разнообразия [3, 4, 5].

Методы сохранения генетического материала редких видов. Обеспечение сохранности генетического материала редких таксонов в ботанических садах реализуется посредством комплекса методик, которые условно разделяются на традиционные (живые коллекции, банки семян, гербарные фонды) и современные биотехнологические (криоконсервация, микроклональное размножение, создание коллекций ДНК). Выбор конкретного метода детерминирован биологическими особенностями вида, его репродуктивной стратегией, а также доступными пространственными и финансовыми ресурсами ботанического сада [1, 4]. Как отмечается в работе сотрудников Волгоградского регионального ботанического сада, комплексное исследование условий культивирования позволяет определить наиболее эффективные и адаптированные подходы для каждого конкретного генотипа [3].

Наиболее экономически эффективным и компактным методом консервации генофонда для значительного числа видов выступает хранение семян в специализированных банках. Эта методика позволяет сохранить репрезентативное количество образцов на относительно малой площади при сравнительно невысоких эксплуатационных затратах. Банк семян ботанического сада является фундаментальным хранилищем генофонда растений, объективно отражающим все разнообразие имеющихся коллекций и экспозиций. Ежегодно такой банк пополняется семенным материалом новых видов, что позволяет поддерживать и расширять двусторowe связи (обмен делетусами) между ботаническими садами различных стран [6].

Ярким примером успешной реализации данного подхода является Национальный банк семян Республики Беларусь, в котором по состоянию на 2024 год насчитывалось 54 348 коллекционных образцов, включая 89 редких видов, занесенных в Красную книгу Республики Беларусь [1]. В Ботаническом саду Воронежского государственного университета, в свою очередь, поддерживается активное двустороннее сотрудничество с 80 ботаническими садами Франции, Германии, Исландии, Италии, Финляндии, Швеции, Норвегии, Великобритании, Бельгии, Швейцарии, Австрии, Австралии, Японии и других государств. Только Германия предоставляет делетусы более чем двадцати ботанических садов страны [6].

Вместе с тем, как подчеркивается в научной литературе, методика банков семян имеет ограничения и подходит далеко не для всех растений. По меньшей мере 10% покрытосеменных и 36% видов, находящихся под угрозой исчезновения, образуют семена, которые не выдерживают стандартных процессов десикации и воздействия низких температур (около -20°C). Такие виды классифицируются как «исключительные», и для их

консервации требуются альтернативные методы сохранения [1, are 4]. Кроме того, исследования, проведенные на базе Саратовского государственного университета, показали, что в пойменных лесных сообществах запас жизнеспособных семян в почвенном банке невелик (от 400 до 7800 шт·м$^{-2}$), что обусловлено неблагоприятным экологическим режимом: повышенной влажностью и долговременным затоплением [7].

При хранении семян в банках критически важным становится вопрос о продолжительности сохранения их жизнеспособности, что во многом зависит от исходного состояния семян, их наследственных свойств и внешних условий хранения [2, 6]. Международным советом ботанических садов по охране растений (BGCI) предложено несколько режимов для генных банков: низкие положительные температуры (около +5°C), неглубокое замораживание (до -20…-25°C), а также глубокая криоконсервация семян в жидком азоте (-196°C) или в его парах (около -160°C) [6].

Как показано в исследованиях Воронежского ботанического сада, подсушивание семян после сбора является важнейшим условием успешного долгосрочного хранения. При высокой влажности продолжительность жизнеспособности семенного материала критически сокращается. При относительной влажности воздуха 50–90% создаются благоприятные условия для развития мицелиальных грибов, снижающих всхожесть семян даже после предварительной обработки фунгицидами. Однако чрезмерное иссушение семян может привести к необратимым деструктивным изменениям в структуре цитоплазмы и преждевременной гибели, хотя многие виды переносят умеренное подсушивание без вреда. Показатели оптимального содержания воды в семенах при хранении значительно ниже величины воздушно- сухого состояния (например, у ели, сосны, лиственницы, березы) [6].

Согласно классификации, предложенной еще в 1908 году Юартом, семена по способности к длительному хранению дифференцируются на три категории: микробиотики (например, ивовые и буковые) — срок хранения до 3 лет; мезобиотики (большинство хвойных пород) — срок хранения 3–15 лет; макробиотики (например, бобовые) — срок хранения свыше 15 лет [6]. Длительное хранение семян имеет особое практическое значение для видов, которые характеризуются нерегулярным плодоношением [6].

Семена многих видов при оптимальной влажности и естественных температурах умеренной зоны могут храниться долгие годы без заметного снижения всхожести. При пониженных температурах (0…+5°C) жизнеспособность семян сохраняется значительно дольше, так как при температуре ниже +5°C процессы дыхания семян и развитие патогенных грибов сильно подавляются. В таких условиях семена менее чувствительны к незначительным колебаниям влажности, чем при более высоких температурах [6]. В Ботаническом саду Воронежского государственного университета для сохранения семян

применяется метод подсушивания их в герметичных контейнерах до достижения равновесной влажности с последующим хранением в холодильных или морозильных камерах [6].

Живые коллекции исторически представляют собой наиболее традиционный и наглядный метод консервации генетического материала. Они особенно важны для «исключительных» видов, а также для древесных растений, кустарников и лиан, семена которых обладают низкой лежкостью или прорастают с минимальной всхожестью.

В рамках масштабного исследования, реализованного на базе Миссурийского ботанического сада, проводился мониторинг 1184 насаждений 410 видов, полученных из 530 локаций по всему миру. Наблюдения велись в период с 1990 по 2019 год. Растения были представлены различными жизненными формами (разнотравье, злаки, кустарники, деревья и лианы), произрастающими в Северном полушарии. Все растения были выращены на территории ботанического сада в тепличных условиях из вегетативных органов, заимствованных у диких растений. Уход за коллекцией включал регламентированный полив, подкормку и борьбу с вредителями [4]. Полученные в этом исследовании данные свидетельствуют о том, что при надлежащем контроле и агротехнике ботанические сады могут вносить все более весомый вклад в сохранение биоразнообразия, успешно поддерживая коллекции редких и находящихся под угрозой исчезновения видов [4].

Живые коллекции, помимо прямой охранной функции, служат страховым резервом для программ размножения, реинтродукции и фундаментальных научных изысканий. Они позволяют детально изучать онтогенез, репродуктивную биологию и адаптационный потенциал редких видов в контролируемых условиях. Однако этот метод требует выделения значительных площадей, постоянного квалифицированного ухода и несет определенные риски генетических изменений растений в условиях длительной культуры [2, 3, 4]. Как подчеркивается в методических рекомендациях Центрального сибирского ботанического сада, при переносе растений из природы в культуру может проявиться эффект торможения роста надземной части, поскольку в первые 1–2 года наблюдается преимущественное накопление подземной биомассы [2].

При формировании банка семян необходимо учитывать, что гидротермический и световой режимы, а также продолжительность вегетационного периода оказывают непосредственное влияние на ход генеративного развития растений и заметно сказываются на процессах созревания семян и их качественных характеристиках. Как отмечается в работе специалистов Воронежского ботанического сада, условия холодного и влажного года зачастую являются неблагоприятными для полноценного формирования семян. Напротив, засушливое и жаркое лето способствует завязыванию и созреванию семян, но они, как

правило, бывают мельче по размерам и имеют более плотную семенную оболочку. Продуктивность растений и всхожесть семян имеют определенную многолетнюю динамику. Из этого следует, что регулярное пополнение банка полноценным семенным материалом напрямую зависит от климатических условий конкретного года [6].

Для особо ценных и уязвимых видов, а также для таксонов, семена которых не подлежат длительному хранению, применяются методы криоконсервации — хранения генетического материала (семян, пыльцы, меристем, апексов побегов, каллусных культур) при сверхнизких температурах (обычно в жидком азоте, -196°C). Перспективной технологией, как указывается в научной литературе, является глубокое замораживание семян в жидком азоте или в его парах [6]. В таких криогенных условиях метаболические процессы практически полностью останавливаются, что позволяет сохранять генетический материал неограниченно долгое время без потери жизнеспособности и генетической стабности.

Метод микроклонального размножения позволяет из небольшого фрагмента материнского растения (например, почки или части листа) получить генетически идентичные растения (клоны) в стерильных условиях на специализированных питательных средах. Этот метод особенно ценен для видов, которые в природе размножаются с трудом, а также для массового получения посадочного материала с контролируемым генетическим фоном для последующей реинтродукции в природу [3, 4]. Как показали исследования Волгоградского регионального ботанического сада, разработанные методы микроклонального размножения являются надежной основой для создания генетических банков in vitro редких и исчезающих видов растений [3].

В ходе данных исследований была сформирована коллекция in vitro, насчитывающая 72 редких вида из 25 семейств. Установлено, что реализация морфогенетического потенциала у редких видов определяется генетическими особенностями исходных растений, типом экспланта, его физиологическим состоянием, составом питательных сред и условиями культивирования. Коэффициент размножения изученных генотипов варьировал от 2 до 17,4, а оптимальной питательной средой на этапе микроразмножения оказалась среда с добавлением цитокинина БАП (6-бензиламинопурин) в концентрации 1,0–2,5 мг/л [3].

Современным дополнением к вышеуказанным методикам выступает создание банков ДНК. В таких коллекциях хранятся образцы выделенного генетического материала (ДНК), которые позволяют проводить молекулярно-генетический анализ без необходимости поддержания живых растений. ДНК-банки используются для оценки генетического разнообразия популяций, точной идентификации видов и гибридов, а также для молекулярной паспортизации коллекций ботанических садов. Хотя этот метод не сохраняет

живое растение целиком, он является важнейшим дополнением к другим способам консервации генетической информации [4].

Важным инструментом оптимизации стратегий сохранения является прогнозирование выживаемости растений в условиях ботанического сада. В исследовании, проведенном в Миссурийском ботаническом саду, для прогнозирования выживаемости многолетних растений была использована модель Кокса со смешанным эффектом, которая включала климатические переменные, учитывающие садоводческие вмешательства, а также географическое происхождение образцов. Результаты показали, что выживаемость растений лучше предсказывалась климатом места сбора пропагул, чем общим климатическим ареалом вида. Значимое влияние на выживаемость оказывали форма роста растения, минимальная температура самого холодного месяца и максимальная температура самого теплого месяца. Меньшую зависимость показали осадки самого засушливого месяца [4].

Также было отмечено, что древесные растения демонстрировали более высокую выживаемость в условиях ботанического сада по сравнению с недревесными формами. Наблюдения показали, что как экстремально высокие, так и низкие температуры оказывают неблагоприятное физиологическое воздействие на растения, при этом толерантность к холоду проявлялась более широко, чем устойчивость к жаре. Несмотря на все преграды, Миссурийский ботанический сад оказался подходящим местом для сохранения ex situ растений из регионов со сходным климатом, а также (с некоторыми агротехническими поправками) для растений из самых разных климатических зон. Например, растения, страдающие от низких температур, могут испытывать дополнительные проблемы при высоких температурах, а растения, которые тяжело переносят экстремальные температуры, могут испытывать стресс из-за избыточного количества осадков [4].

На основе полученных данных были разработаны карты прогнозируемой выживаемости, которые учитывают влияние множества климатических переменных. Эти карты предполагают, что ботанический сад может успешно вмещать популяции ex situ из самых разных географических регионов. Однако данные прогнозы относятся преимущественно к регионам Северного полушария; что касается тропических регионов, эмпирических данных оказалось недостаточно. Опыт исследования, проведенного в Миссури, как подчеркивается авторами, может быть экстраполирован и актуален для других ботанических садов мира [4].

Подводя итоги, следует подчеркнуть, что ботанические сады играют центральную и незаменимую роль в сохранении редких и исчезающих видов растений ex situ, особенно в условиях растущей антропогенной нагрузки и глобальных климатических изменений. Комплексное применение традиционных методов (банки семян, живые коллекции) и

современных биотехнологических подходов (криоконсервация, микроклональное размножение, банки ДНК) позволяет эффективно сохранять генетический материал видов с различными репродуктивными стратегиями. При этом для «исключительных» видов, семена которых не выдерживают стандартной десикации и низких температур, безальтернативными методами служат живые коллекции и криоконсервация меристем. Прогнозирование выживаемости коллекций на основе климатических переменных существенно повышает эффективность и долговечность стратегий сохранения. Успешная реализация этих масштабных задач возможна только при тесной интеграции усилий ботанических садов, активном развитии международного сотрудничества и повсеместном внедрении передовых биотехнологий.

Список литературы

1. Гриб С.И., Матьс И.С., Маркевич И.М. Формирование, сохранение и результаты использования генетических ресурсов растений национального банка семян в селекции растений // Земледелие и селекция в Беларуси. 2025. № 61. С. 140–147.

2. Елисафенко Т.В., Дорогина О.В. Методические рекомендации по интродукции и восстановлению природных популяций редких и исчезающих видов растений. Кемерово: Примула, 2021. 48 с.

3. Жолобова О.О., Коротков О.И., Сафронова Г.Н., Буганова А.В., Сорокопудова О.А. Сохранение редких и исчезающих видов растений при помощи методов биотехнологии // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 1. С. 195.

4. Лёзина В.А., Старицына И.А., Лёзин М.С. Ботанические сады и их роль в сохранении ex situ // Молодёжь и наука. 2023. № 7. Порядковый номер 8.

5. Реут А.А., Миронова Л.Н. Роль ботанических садов в сохранении биоразнообразия и экологическом воспитании населения // Вестник Иссык-Кульского университета. 2013. № 35. С. 63–67.

6. Сафонова О.Н. Формирование банка семян растений региональной и мировой флоры // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2010. № 2. С. 217–219.

7. Торгашкова О.Н., Ефимова Д.И., Татьянина Е.О., Каргина Р.Р. Структурное разнообразие почвенного банка семян пойменных лесных сообществ // Изучение водных и наземных экосистем: история и современность: Тезисы докладов Международной научной конференции (Севастополь, 13–18 сентября 2021 г.). Севастополь: Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН, 2021. С. 184–185.

References

1. Grib S.I., Mats I.S., Markevich I.M. Formirovaniye, sokhraneniye i rezultaty ispolzovaniya geneticheskikh resursov rasteniy natsionalnogo banka semyan v selektsii rasteniy [Formation, conservation and results of using plant genetic resources of the national seed bank in plant breeding]. Zemledeliye i selektsiya v Belarusi. 2025;(61):140-147. (In Russian)

2. Yelisafenko T.V., Dorogina O.V. Metodicheskiye rekomendatsii po introduktsii i vosstanovleniyu prirodnykh populyatsiy redkikh i ischezayushchikh vidov rasteniy [Methodological recommendations for the introduction and restoration of natural populations of rare and endangered plant species]. Kemerovo: Primula Publ.; 2021. 48 p.

3. Zholobova O.O., Korotkov O.I., Safronova G.N., Buganova A.V., Sorokopudova O.A. Sokhraneniye redkikh i ischezayushchikh vidov rasteniy pri pomoshchi metodov biotekhnologii [Conservation of rare and endangered plant species using biotechnology methods]. Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya. 2012;(1):195.

4. Lezina V.A., Staritsyna I.A., Lezin M.S. Botanicheskiye sady i ikh rol v sokhranenii ex situ [Botanical gardens and their role in ex situ conservation]. Molodyozh i nauka. 2023;(7):Article No. 8.

5. Reut A.A., Mironova L.N. Rol botanicheskikh sadov v sokhranenii bioraznoobraziya i ekologicheskom vospitanii naseleniya [The role of botanical gardens in biodiversity conservation and environmental education of the population]. Vestnik Issyk-Kulskogo universiteta. 2013;(35):63-67.

6. Safonova O.N. Formirovaniye banka semyan rasteniy regionalnoy i mirovoy flory [Formation of a seed bank of plants of regional and world flora]. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Khimiya. Biologiya. Farmatsiya. 2010;(2):217-219.

7. Torgashkova O.N., Efimova D.I., Tatyanina E.O., Kargina R.R. Strukturnoye raznoobraziye pochvennogo banka semyan poymennykh lesnykh soobshchestv [Structural diversity of the soil seed bank of floodplain forest communities]. In: Izucheniye vodnykh i nazemnykh ekosistem: istoriya i sovremennost [Study of aquatic and terrestrial ecosystems: history and modernity]: Abstracts of the International Scientific Conference (Sevastopol, September 13–18, 2021). Sevastopol: Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS; 2021. p. 184-185