

Глава 5.

ОБОРОТ И ПРОИЗВОДСТВО ЛЕСНОГО РЕПРОДУКТИВНОГО МАТЕРИАЛА, ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ

Каждый этап производства лесного репродуктивного материала (ЛРМ), от сбора семян до производства сеянцев и саженцев древесных и кустарниковых пород в питомнике, оказывает влияние на генетическое разнообразие будущих насаждений. При массовом производстве ЛРМ необходимо обращать внимание на такие этапы, как сбор, обработка и хранение семян, а также условия и технологии операций в питомнике, которые могут благоприятствовать одним генотипам и снижать частоту других. Произвольная или непроизвольная сортировка семян, сеянцев и саженцев может привести к направленному отбору ЛРМ [Ivetić et al., 2016].

Совершенствование существующих стратегий сбора может способствовать увеличению генетического разнообразия в партиях семян. Такими стратегиями могут быть: сбор семян с деревьев разного возраста, смешивание семян, собранных в разные годы, семян различных классов качества перед посевом. Что касается производства саженцев, то выбраковка низкорослых растений оказывает наибольшее влияние на снижение генетического разнообразия посадочного материала. В этом контексте посев семян вместо использования саженцев снижает риски потери генетического разнообразия, которые связаны с направленным отбором при обработке семян и в дальнейшем с производством саженцев.

5.1. Тенденции в производстве и спросе на лесной репродуктивный материал

Для повышения эффективности лесного семеноводства в России осуществляются: лесосеменное районирование; создание и выделение объектов лесного селекционного семеноводства (см. главу 6); формирование федерального и страховых фондов семян лесных растений; семенной контроль в отношении семян лесных растений (оценка качества и всхожести семян); другие регламентированные мероприятия по

производству, заготовке, обработке, хранению, реализации, транспортировке и использованию семян лесных растений. В отношении семян лесных растений органами государственной власти страны осуществляется контроль в области семеноводства при проведении федерального государственного лесного надзора (лесной охраны).

В лесном хозяйстве Российской Федерации семена лесных растений в зависимости от наследственных свойств подразделяют на категории: сортовые, улучшенные и нормальные. Нормальными называют семена, заготовленные на постоянных лесосеменных участках (ПЛСУ), временных лесосеменных участках (ВЛСУ)⁷³, а также с нормальных деревьев в насаждениях (в том числе на лесосеках) нормальной селекционной категории. Улучшенные – это семена, получаемые на лесосеменных объектах, созданных или выделенных на основе отбора по фенотипу, но не испытанных по потомству, в том числе: на лесосеменных плантациях (ЛСП); ЛСП повышенной генетической ценности; ЛСП-1 (клоновых и семейственных), а также на ПЛСУ, сформированных в культурах, созданных из семян, заготовленных в плюсовых насаждениях. Сортовые семена получают на объектах, прошедших генетическую оценку по потомству, выделенных в качестве сортов-популяций, сортов-гибридов и включенных в Государственный реестр охраняемых селекционных достижений, в том числе: на ЛСП-2, созданных с использованием вегетативных потомств элитных деревьев; на ЛСП-1, ПЛСУ и в иных насаждениях, генетическая ценность которых подтверждена результатами испытания их семенных потомств.

Посадочный материал лесных растений (саженцы, сеянцы) выращивают на лесных участках, предоставляемых уполномоченными федеральными органами исполнительной власти в постоянное (бессрочное) пользование государственным и муниципальным учреждениям, другим лицам – в аренду.

За организацию и контроль работ по лесному семеноводству отвечает Рослесхоз. Для концентрации работ в области лесного семеноводства и получения посадочного материала с улучшенными свойствами в России создана сеть лесных селекционно-семеноводческих центров (ЛССЦ). Каждый из селекционно-семеноводческих центров представляет собой современный селекционно-семеноводческий комплекс,

⁷³ В урожайные годы в районах интенсивных рубок для заготовки семян используют временные лесосеменные участки, которые отводят в спелых и приспевающих насаждениях нормальной селекционной категории и специально подготавливают для заготовки семян. Рубку ВЛСУ совмещают с оптимальными сроками заготовки шишек, плодов и семян.

включающий весь цикл работ, связанных с заготовкой, хранением улучшенных семян и выращиванием селекционного посадочного материала. Центры оснащены современными технологическими линиями для переработки лесосеменного сырья и семян, в них представлен весь цикл подготовки посадочного материала – от сушки шишек до закаливания семян. Помимо производства посадочного материала с закрытой корневой системой из семян с улучшенными наследственными свойствами, в функции ЛССЦ входит выполнение комплекса работ по созданию объектов лесного семеноводства, включая ЛСП для производства семян с улучшенными наследственными свойствами; хранение и переработку лесосеменного сырья, поступающего с пунктов сбора в зоне деятельности; производство и хранение лесных семян; реализацию партий семян для нужд воспроизводства лесов в регионе; поставку семян в федеральный фонд.

В соответствии с государственной программой «Развитие лесного хозяйства на 2012–2020 годы»⁷⁴ в России для производства в теплицах посадочного материала с закрытой корневой системой (ЗКС) с ценными наследственными свойствами были созданы шесть ЛССЦ: в Республике Татарстан, Алтайском крае, Костромской, Архангельской, Воронежской, Ленинградской областях. Крупнейшим является ЛССЦ в Республике Татарстан. Производственная мощность этого центра составляет 2 т семян хвойных пород, 12 млн шт. посадочного материала с ЗКС, в том числе: 4 млн шт. сосны обыкновенной, 4 млн шт. ели европейской, 2 млн шт. лиственницы сибирской, 2 млн шт. декоративных древесно-кустарниковых пород. Центр имеет 4 теплицы и 13 полей доращивания посадочного материала, в том числе 8 с автоматизированным затенением. Сейчас комплекс полностью обеспечивает потребность республики в воспроизводстве лесных ресурсов.

Внедрение технологий производства посадочного материала с ЗКС позволяет не только существенно уменьшить сроки выращивания и обеспечить его высокую приживаемость и всхожесть, но и повысить рентабельность использования такого посадочного материала и эффективность продуцирующих площадей. Так, по традиционным методикам, применяемым в лесном хозяйстве, норма посадки семян и саженцев на 1 га лесокультурной площади составляет 4 000–5 000 шт., а внедряемая технология использования посадочного материала с ЗКС предполагает посадку 2 000 семян на 1 га. В базисных лесных питомниках,

⁷⁴ <https://www.gosprog.ru/gp-razvitie-lesnogo-hozyaystva/>

ориентированных на выращивание посадочного материала в открытом грунте, с 1 га продуцирующей площади, в зависимости от породы, можно получить от 650 тыс. до 1,7 млн шт. посадочного материала. Новые технологии в ЛССЦ позволяют на 1 га площади (4 теплицы по 0,25 га каждая) производить 12 млн шт. посадочного материала с ЗКС за счет внедрения системы ротаций, т.е. более эффективно использовать продуцирующую площадь.

5.1.1. Формирование фондов семян и организация процесса их заготовки

Федеральный фонд семян лесных растений – объект стратегического значения, элемент экологической безопасности Российской Федерации. Создание федерального фонда лесных семян предусмотрено Федеральным законом «О семеноводстве»⁷⁵ в целях гарантированного воспроизводства лесов в любом регионе страны в случаях стихийных бедствий или катастроф, а также для обеспечения воспроизводства лесов в регионах с ограниченными возможностями для заготовки семян. Фонд формируется в соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации «О формировании и использовании федерального фонда семян лесных растений» и Инструкцией по формированию и хранению федерального фонда семян лесных растений⁷⁶ по основным лесообразующим породам: ели, лиственнице, сосне обыкновенной и кедровой. В фонде представлены семена из всех лесосеменных районов страны, в которых осуществляется их заготовка. Федеральный фонд семян лесных растений является федеральной собственностью.

Формирование и хранение федерального фонда осуществляется Рослесхозом за счет и в пределах средств, выделяемых из федерального бюджета на ведение лесного хозяйства. Функции по формированию и хранению федерального фонда семян лесных растений, в числе прочих работ, выполняет Рослесхозащита. В здании этого учреждения создано современное хранилище семян федерального фонда. Оно рассчитано на хранение 25 т семян основных лесообразующих пород – сосны, ели, лиственницы – в течение 30 лет без потери посевных качеств. Для этого

⁷⁵ Федеральный закон от 17.12.1997 № 149-ФЗ «О семеноводстве» (с изменениями от 03.07.2016).

⁷⁶ Постановление Правительства Российской Федерации от 03.10.1998 № 1151 «Об утверждении Положения о формировании и использовании федерального фонда семян лесных растений» (с изменениями на 27.04.2016) и приказ Рослесхоза от 08.04.2013 № 100 «Об утверждении Инструкции по формированию и хранению федерального фонда семян лесных растений» (ред. от 28.09.2017).

в хранилище с использованием кондиционеров и автоматики поддерживаются постоянная температура -18°C и влажность воздуха 70%. Ведется ежедневный контроль за температурным режимом и относительной влажностью воздуха.

Для целей формирования фонда закупаются семена лесных растений, имеющие сертификаты, удостоверяющие их качество, при этом посевные качества семян должны соответствовать первому классу, согласно действующим нормативам «семена должны быть заготовлены в текущем или прошлом году, переработка лесосеменного сырья и семян должна быть произведена в соответствии с требованиями нормативных документов в области лесного семеноводства, семена не должны быть повреждены вредителями и иметь патогенной микрофлоры».

Каждая партия семян до закладки на хранение подвергается сепарации (очистке от посторонних примесей, удалению пустых семян), а также подсушке до оптимальной влажности. Семена сосны, ели, лиственницы, прошедшие все этапы сепарации, подсушиваются до влажности 5%, семена сосны кедровой сибирской и сосны кедровой корейской – до 7%. Семена хранятся в герметичной упаковке. Ведется проверка семян на всхожесть.

Рослесозащита в электронном виде ведет базу данных о количестве поступивших, хранящихся, отпущенных (по решению Рослесхоза для нужд субъектов Российской Федерации) семян федерального фонда, в базу заносится информация о происхождении и посевных качествах коллекционных образцов⁷⁷. На 01.12.2023 г. в федеральном фонде хранилось 16,9 т семян основных лесообразующих пород, из них 10,8 т семян сосны, 5,4 т ели, 0,7 т лиственницы.

Семена федерального фонда всегда сопровождаются документом, удостоверяющим их посевные качества. Всего с 2007 г. фондом передано более 11,7 т семян. Эти семена использованы для лесовосстановления в 20 субъектах Российской Федерации.

С 2013 г., согласно Лесному кодексу РФ, полномочия по организации лесного семеноводства и обеспечения воспроизводства лесов переданы

⁷⁷ Коллекционный образец семян лесных растений, являющийся единицей хранения в федеральном фонде, получают из партии семян лесных растений, закупленной для целей формирования фонда, путем ее очистки от посторонних включений, подсушки до оптимальной влажности и герметичной упаковки. Для контроля качества семян коллекционного образца из партии семян также отбирают контрольные образцы. Контрольный образец хранят в тех же условиях, что и соответствующий коллекционный образец семян, в отдельной упаковке. Семена, находящиеся в контрольных образцах, в соответствии с установленными сроками оцениваются на посевные качества. Каждый коллекционный образец имеет паспорт с уникальным номером, данные которого переносятся на этикетку тары для хранения семян.

субъектам РФ, которые могут осуществлять заготовку (приобретение) семян лесных растений, т.е. формировать страховые фонды семян лесных растений. Страховые фонды создают согласно Федеральному закону от 17.12.1997 № 149-ФЗ «О семеноводстве» (с изменениями от 03.07.2016). Разработан Порядок формирования и использования страховых фондов семян лесных растений⁷⁸, который реализует специально уполномоченный федеральный орган управления лесным хозяйством субъекта Российской Федерации.

Страховые фонды семян создают в субъектах РФ, и они предназначены для хранения запасов семян лесных растений в целях обеспечения воспроизводства лесов и лесоразведения на территории соответствующих субъектов в случае неурожая семян лесных растений. Формирование страховых фондов осуществляется путём заготовки (закупки) нормальных или улучшенных семян лесных растений. Семена, заготавливаемые (закупаемые) для страховых фондов, проверяют на посевные качества. В соответствии с национальными стандартами в сфере лесного семеноводства семена должны удовлетворять требованиям первого класса качества. В настоящее время в страховых фондах семян лесных растений субъектов РФ находится 0,5–10 т семян.

Независимо от места хранения, семена, относящиеся к федеральному и страховым фондам, содержатся и учитываются отдельно от общего объёма заготовленных и хранящихся семян.

5.1.2. Процесс сертификации лесного репродуктивного материала

Главными задачами сертификации репродуктивного материала лесных растений являются: защита интересов государства и потребителя от недобросовестного производителя и продавца семян; подтверждение соответствия сортовых и посевных (посадочных) качеств семян требованиям государственных и отраслевых стандартов; осуществление инспекционного контроля; оказание содействия потребителям в компетентном выборе семян с высокими сортовыми и посевными качествами. В Российской Федерации утвержден Порядок проведения сертификации семян сельскохозяйственных и лесных растений⁷⁹.

⁷⁸ Приказ Рослесхоза от 19.02.2015 № 58 «Об утверждении Порядка формирования и использования страховых фондов семян лесных растений»

⁷⁹ Приказ Министерства сельского хозяйства и продовольствия от 08.12.1999 № 859 «Об утверждении Положения о порядке проведения сертификации семян сельскохозяйственных и лесных растений»

Выдача сертификатов, удостоверяющих сортовые и посевные качества семян, осуществляется аккредитованными отборщиками партий семян на лесосеменных станциях. Объектом сертификации являются партии семян, предназначенные для реализации или поставок в федеральный или региональные страховые фонды. Сертификация семян проводится по показателям, удостоверяющим их сортовые и посевные качества, в соответствии с действующей нормативной документацией. Сертификат выдаётся на партию семян вида лесных растений⁸⁰.

Процесс сертификации семян лесных растений включает: подачу заявки на проведение сертификации; контроль за соблюдением стандартов и другой нормативной документации при упаковке и маркировке семян; отбор проб для проведения испытаний; проведение испытаний; анализ полученных материалов и принятие решения о возможности выдачи сертификата; выдачу сертификата; осуществление инспекционного контроля за сертифицированными семенами; осуществление корректирующих мероприятий при выявлении в результате инспекционного контроля нарушений соответствия сертифицированных семян установленным требованиям; информацию о результатах сертификации и последующих изменениях. Вместе с заявкой представляется документация, удостоверяющая торговую принадлежность высеваемых семян, происхождение и качество, а также законность их получения. Заявкой на проведение сертификации семян лесных растений является акт отбора средних проб установленной формы. У каждой партии семян лесных растений определяют всхожесть (доброкачественность, жизнеспособность), чистоту семян, влажность, зараженность вредителями, наличие карантинных объектов, массу 1 000 семян.

Регламентацию географических и экологических перемещений семян древесных пород для целей лесовыращивания осуществляют на основе лесосеменного районирования [Приказ... № 353, 2015; Приказ... № 1032, 2022]. Лесосеменное районирование в Российской Федерации установлено отдельно по видам древесных растений. Основной единицей лесосеменного районирования является лесосеменная район, т.е. определенная территория в пределах ареала вида со сравнительно

⁸⁰ Приказ Рослесхоза от 10.01.2012 № 2 «Об утверждении Порядка реализации и транспортировки партий семян лесных растений», приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 02.06.2014 № 298 «Об утверждении Порядка заготовки, обработки, хранения и использования семян лесных растений», приказ Рослесхоза от 10.01.2012 № 3 «Об утверждении Порядка производства семян отдельных категорий лесных растений» и др.

однородными природными условиями и генотипическим составом популяций, с ясно выраженными природными и лесохозяйственными особенностями. В каждом лесосеменном районе принят общий характер основных мероприятий по организации лесного семеноводства и использованию однородного по наследственным свойствам семенного материала, установлены лесосеменные районы, в пределах которых можно перемещать семена. Основная задача лесосеменного районирования – рациональное использование географической (популяционной) изменчивости видов для выращивания высокопродуктивных и устойчивых лесных насаждений. Лесосеменное районирование является основой создания лесосеменной базы в отдельных районах, что обеспечивает оптимизацию породного и генетического состава создаваемых насаждений, перевод лесокультурного производства на использование генетически ценных семян, сохранение генофонда основных лесобразующих пород (см. главы 6 и 7).

Для осуществления контроля при сертификации лесных репродуктивных материалов Рослесозащита предлагает использовать перспективные методы молекулярно-генетического анализа. На основании применения молекулярно-генетических методов может быть составлен индивидуальный генетический паспорт ЛГР (см. раздел 5.2). Генетическая паспортизация растений позволяет осуществлять контроль за оборотом репродуктивного материала и оценку законности переброски его в соответствии с разработанными основами лесосеменного районирования Российской Федерации, а также устанавливать принадлежность семян лесных растений к селекционной категории.

5.2. Применение современных молекулярно-генетических методов и подходов в работе с оборотом лесных генетических ресурсов

Непременным условием организации в Российской Федерации контроля за оборотом ЛРМ при воспроизводстве лесов и законности происхождения древесины является проведение масштабного мониторинга состояния лесных генетических ресурсов на основе молекулярно-генетических методов анализа. Решение этой задачи стало возможным с 2008 г., когда на базе Рослесозащиты была создана необходимая приборная база, апробированы методы работы и подготовлено достаточное число квалифицированных кадров.

На Рослесозащиту были возложены полномочия по сбору материалов и проведению ДНК-анализа популяций основных лесобразующих пород с целью изучения состояния генофонда лесобразующих видов. На базе филиалов Рослесозащиты в системе Рослесхоза была создана сеть из восьми отделов мониторинга состояния лесных генетических ресурсов, включающих восемь лабораторий молекулярно-генетического анализа, которые работают в Пушкино Московской обл. (с 2008 г.), Красноярском крае (с 2010 г.), Алтайском крае и Воронежской обл. (с 2013 г.), Хабаровском крае, Архангельской и Ленинградской областях (с 2016 г.), Республике Бурятия (с 2021 г.). Сеть лабораторий оснащена приборной базой и оборудованием, позволяющим осуществлять работы с применением различных методов (молекулярное маркирование методами полимеразной цепной реакции, в том числе в реальном времени, капиллярное секвенирование, фрагментный анализ, детектирование на основе капиллярного электрофореза с применением мультиплексных панелей) в объеме 34 тыс. анализов в год.

Восемь ДНК-лабораторий Рослесозащиты вошли в состав сети лесных биотехнологических кластеров⁸¹, создаваемой в России по территориальному признаку (рис. 5.1). Каждый кластер включает в себя генетические лаборатории, селекционно-семеноводческие центры, научно-исследовательские отраслевые и академические институты, в целом покрывая исследованиями данного направления всю территорию страны. Такой подход обеспечивает эффективность разработки и внедрения инновационных методов биотехнологии в лесном хозяйстве.

Ключевыми задачами созданных Рослесхозом на базе Рослесозащиты лабораторий являются: осуществление мониторинга состояния ЛГР, в том числе на основе генетического контроля при проведении работ в сфере лесовосстановления и лесного семеноводства (сертификация репродуктивного материала по месту происхождения, контроль его оборота), лесопатологического мониторинга (ранняя диагностика заболеваний насаждений), мониторинга фитосанитарного состояния питомников (определение наличия инфекции экспресс-методами), а также ДНК-контроль иной хозяйственной деятельности (в том числе при контроле оборота круглых лесоматериалов или любой древесной продукции).

⁸¹ Созданы в соответствии с планом мероприятий «Развитие биотехнологий и геномной инженерии», утвержденным распоряжением Правительства Российской Федерации от 28.02.2018 № 337-р.

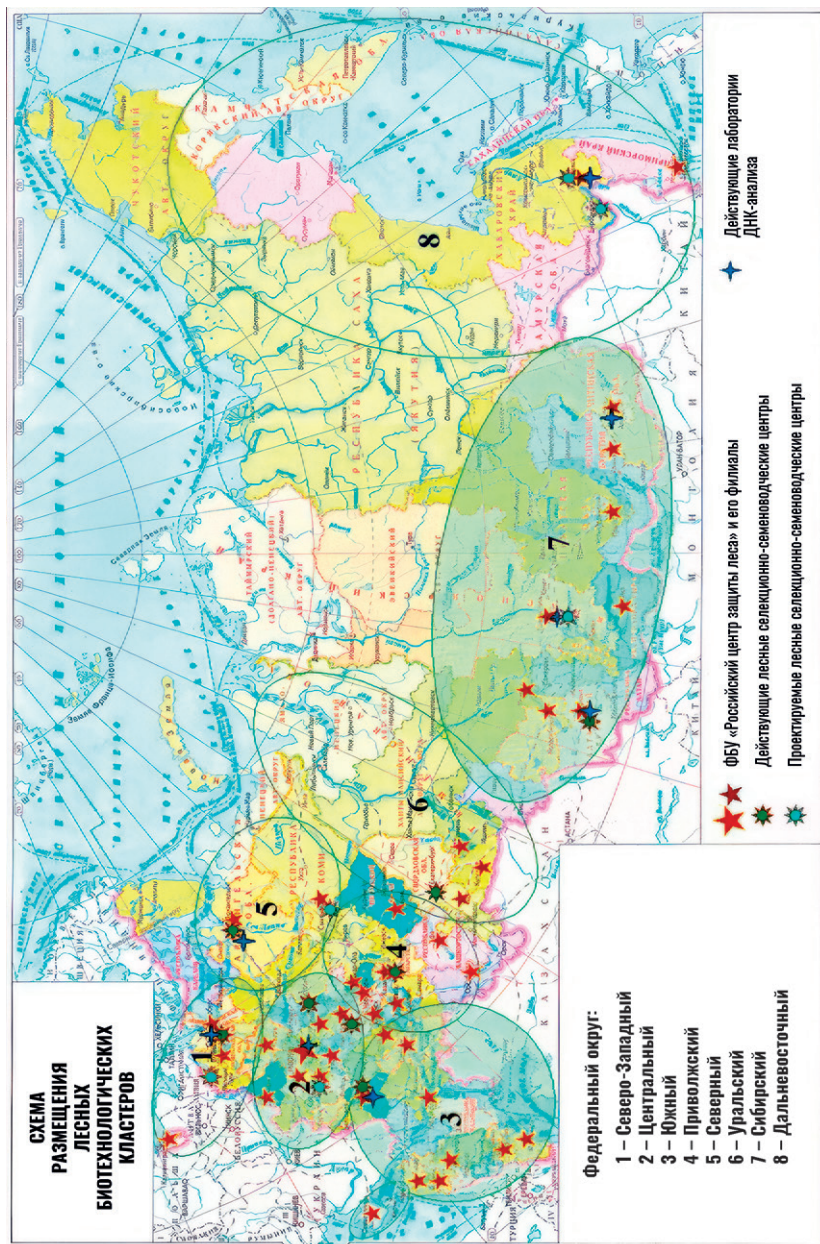


Рис. 5.1. Схема размещения лесных биотехнологических кластеров в России

Рослесозащита проводит генетическую паспортизацию ЛРМ и объектов лесного семеноводства (см. также раздел 6.5). На основе отбора образцов и генотипирования ядерных микросателлитных локусов создается компьютерная референсная база генетических данных, которая содержит информацию о деревьях четырех родовых комплексов основных лесообразующих пород лесов России (лиственница, сосна, в том числе кедровая, ель и дуб). В базе собраны результаты более 200 тыс. ДНК-анализов по генетической паспортизации образцов. База данных является основой сформированной в Рослесозащите автоматизированной аналитической системы (ААС) «Лесная генетика»⁸², в которой собрана информация о результатах генотипирования порядка 15 тыс. образцов основных лесообразующих пород: лиственницы даурской, сосны обыкновенной, сосны кедровой сибирской, сосны кедровой корейской, ели европейской, ели сибирской, ели колючей, дуба черешчатого, дуба красного и др. из 73 субъектов Российской Федерации.

Рослесозащита планирует развивать компьютерную базу данных разнообразия генотипов лесообразующих пород в зависимости от места их произрастания с расчетом уровня гетерозиготности популяций, а также формировать геногеографические карты распределения митотипов популяций деревьев и кустарников лесных насаждений по всей территории России. Накопление данных по уровням генетической изменчивости (в виде частот аллелей и распределения генотипов) основных лесообразующих пород из разных точек произрастания необходимо для установления границ ареалов видов и оценки внутривидовой дифференциации популяций. Эти данные могут быть использованы, в том числе, как часть экспертной доказательной базы при осуществлении контроля за легальностью оборота не только круглого леса, но и пиломатериалов, деловой древесины, а также ЛРМ.

Рослесозащита при существующей развитой филиальной сети, которая позволяет целенаправленно и регулярно обеспечивать сбор, обработку данных, а также проводить оценку состояния генетического разнообразия лесов по всей стране, является единственным учреждением в России, обладающим наработанной базой данных о молекулярно-генетической структуре популяций основных лесообразующих видов. Эта база данных содержит сведения об аллельных вариантах образцов основных лесообразующих пород, их

⁸² Запущена в производственную эксплуатацию в 2022 г. в соответствии с приказом Рослесозащиты от 21.11.2021 № 243-Р «О вводе в производственную эксплуатацию ААС «Лесная генетика».

описательных и статистических характеристиках. База данных постоянно актуализируется и пополняется результатами мониторинга ЛГР в местах их естественного произрастания и искусственного лесовосстановления.

5.2.1. Технологии *in vitro* в производстве лесного репродуктивного материала

В России, как и во всем мире, появление и активное развитие лесных биотехнологий для производства ЛРМ связано с последними десятилетиями XX – началом XXI в. За почти полвека исследований в данной области их цели и задачи постепенно менялись. Так, в 1970-е гг. основная цель заключалась в исследовании возможностей выращивания изолированных органов, тканей и клеток древесных растений *in vitro*. В 1980–1990-е гг., в связи с достижениями в области изучения механизмов действия фитогормонов, ставились и решались задачи создания инновационных для того времени методик (протоколов) культивирования тканей. Эти разработки до сих пор сохраняют свою актуальность и позволяют инициировать *in vitro* морфо- и органогенез трудноукореняемых видов древесных растений с сохранением их биологических особенностей и хозяйственно ценных свойств [Ветчинникова, Титов, 2022а].

Клональное микроразмножение (микрклональное размножение) в культуре *in vitro* по своей сути аналогично вегетативному типу размножения растений с той лишь разницей, что осуществляется в искусственных условиях вне организма и основано на тотипотентности соматических клеток высших растений. Вегетативное размножение древесных растений в культуре тканей может происходить тремя способами за счёт: 1) активации развития пазушных (аксиллярных) почек, уже имеющих в пазухах листовых зачатков на ранних этапах развития материнского побега; 2) индукции образования новых придаточных (адвентивных) побегов непосредственно, например, из придаточных почек, возникающих не в пазухе листа, как обычно, а на междоузлии, листьях или из каллусных клеток; 3) возникновения почек или эмбриоидов (соматический эмбриогенез) из каллусной ткани, суспензионной культуры клеток или протопластов.

Важной особенностью первого способа размножения является генетическая стабильность получаемых растений. Размножение путем адвентивного побегообразования показало его преимущество по количеству вновь формируемых побегов. Однако, как правило, оно сопровождается

процессом каллусообразования, при котором существует вероятность появления соматклональной изменчивости. Преимущество соматического эмбриогенеза состоит в том, что у соматических зародышей апикальные меристемы побега и корня формируются одновременно. Этот путь в силу особенностей биологии является пока единственным для размножения *in vitro* хвойных пород. Необходимо, однако, отметить, что при соматическом эмбриогенезе повышается вероятность возникновения мутаций [Larkin, Scowcroft, 1981]. Таким образом, одной из проблем при клональном микроразмножении ценных генотипов растений является соматклональная изменчивость. Генетическая стабильность в культуре *in vitro* рассмотрена в ряде работ [Kumar, Mathur, 2004; Nontaswatsri, Fukai, 2005; Mishiba et al., 2006; Clarindo et al., 2008; Лебедев и др., 2012; Krutovsky et al., 2014; Гуляева и др., 2020]. Как правило, при поддержании коллекции микроклонов в виде культуры микропобегов на безгормональных средах длительное время удаётся избегать проявлений соматклональной изменчивости [Машкина и др., 2019б].

Изолированная меристемная ткань под воздействием определённых факторов (например, гормональной природы) в соответствующих стерильных условиях культивирования *in vitro* может давать начало большому числу новых растений, по своим свойствам и признакам полностью идентичных исходным (материнским) генотипам. При этом коэффициент размножения растений может быть в несколько десятков и даже сотен раз выше, чем при использовании обычных способов вегетативного размножения, позволяя получить в более короткие сроки в массовом количестве высококачественный посадочный материал и даже искусственные семена⁸⁵ ценных пород. Чрезвычайно важно, что при этом методе размножения происходит освобождение растений от патогенных микроорганизмов и во многих случаях от вирусов, т.е. оздоровление посадочного материала.

В последние годы многие российские лесные научные институты и университеты наибольшее внимание уделяют клональному микроразмножению лиственных древесных пород. Разработаны технологии клонального микроразмножения триплоидных осин и других тополей [Машкина, Табацкая, 2005; Бовичева и др., 2006; Машкина, Исаков, 2007; Зонтиков, 2011; Зонтиков, Корнев, 2012; Королева и др., 2012; Лебедев и др., 2012; Жигунов и др., 2014; Шабунин, 2014; Зонтиков и др.,

⁸⁵ Искусственные семена – соматические эмбрионы (эмбриогенный каллус, диспергированный на отдельные эмбриониды), пазушные и верхушечные почки, а также стеблевые и корневые сегменты, капсулированные в гелевую оболочку.

2014; Лобанова, 2014; Луценко и др., 2015; Макаров, Панкратова, 2016; Луценко и др., 2017; Korchagin et al., 2019; Машкина и др., 2019а; Petrova et al., 2021; Анохина и др., 2021; Петрова и др., 2022; Макаров и др., 2023]. Многолетние полевые испытания клонов после их длительного хранения *in vitro* демонстрируют хорошее состояние и высокую сохранность (75–97%), а также идентичность исходным экземплярам (по особенностям роста, габитусу, качеству древесины, пloidности и молекулярно-генетическим особенностям), т.е. сохранение специфичных для их исходных генотипов особенностей роста и относительной внутриклоновой однородности. Активные исследования ведутся по берёзе [Машкина и др., 2019б], особенно по берёзе карельской [Ветчинникова и др., 2013; Ветчинникова, Титов, 2022а] (см. раздел 5.4.3).

Посадочный материал тополя, берёзы и ивы (свыше 1 млн растений), полученный в ФИБХ РАН методом клонального микроразмножения, был использован для закладки лесных плантаций площадью более 300 га в пяти регионах страны⁸⁴. Во ВНИИЛГИСбиотех выращены опытные партии посадочного материала и созданы опытные плантационные культуры берёзы, тополя и осины, возраст которых варьирует от 1 до 30 лет [Машкина, Табацкая, 2014; Машкина, Табацкая, 2017, Машкина и др., 2019а]. ВНИИЛГИСбиотех одним из первых предложил проводить «прямую» высадку микрорастений берёзы, тополя и осины из культуры *in vitro* непосредственно в нестерильный грунт теплицы, что упрощает и удешевляет процесс выращивания посадочного материала, обеспечивая достаточно высокую его приживаемость и сохранность *ex vitro* (теплица, лесной питомник) – 70–100% [Машкина и др., 2019а; Табацкая, Машкина, 2020].

Намного более сложными объектами для клонального микроразмножения *in vitro* являются хвойные растения. Первые работы в нашей стране по органогенезу *Pinus sylvestris* и *Picea abies* были выполнены в РГАУ – МСХА им. К.А. Тимирязева [Родина, 1989], *Picea abies* – в СПбНИИЛХ [Божков, 1994], *Pinus sibirica* – в ИЛ СО РАН [Скрипаченко, 1992]. Удалось разработать методику размножения, выращены опытные партии посадочного материала и заложены опытные лесные культуры *Pinus sylvestris* и *Picea abies* [Божков, 1994; Бутенко и др., 2016].

В настоящее время разработка методов получения посадочного материала на основе использования соматического эмбриогенеза сибирских видов хвойных растений (*Larix sibirica*, *L. gmelini*, *L. sukaczewii*,

⁸⁴ <https://www.ibch.ru/press/news/science/1895>

Pinus sibirica, *P. pumela*, *Picea ajaensis*) активно ведется в ИЛ СО РАН [Третьякова, 2012; Третьякова, Пак, 2018, 2023; Третьякова и др., 2022; Tretyakova, Park, 2023], сосны и ели – в ИБХ РАН [Лебедев, Шестибратов, 2018] и в ИЛ КарНЦ РАН [Ершова и др., 2022], ели – в СПбНИИЛХ [Шабунин, 2014]. Однако в этих экспериментах только экспланты единичных донорских растений формируют эмбриогенный каллус, зародыши и растения пока удастся получить только из эксплантов зародышевой семян. Такой посадочный материал аналогичен посадочному материалу из семян, а уровень наследуемости ценных признаков составляет всего 10–20% [Долголиков, Попивший, 1992].

Поскольку работы по культуре *in vitro* лиственных пород родов *Populus*, *Betula*, *Pinus*, *Salix* и *Fraxinus* ведутся в России достаточно давно и интенсивно, можно прогнозировать успешное использование этих пород для плантационного лесовыращивания [Жигунов и др., 2011]. Так, для осины преимуществом использования технологии клонального микроразмножения является получение посадочного материала, устойчивого к сердцевинной гнили, для берёзы – увеличение запаса насаждения. Однако необходимо принимать во внимание, что насаждения, полученные в рамках данной технологии от ограниченного количества особей, будут генетически менее разнообразными, следовательно, и менее устойчивыми к неблагоприятным экологическим факторам.

В настоящее время и на ближайшую перспективу можно выделить следующие научные и прикладные задачи в области биотехнологии производства ЛРМ: а) использование клонального микроразмножения для производства посадочного материала в целях создания лесосырьевых культур плантационного типа⁸⁵ или для ландшафтного дизайна; б) определение генетической чистоты полученных растений-регенерантов с помощью ДНК-маркёров (особенно в случае их выращивания из каллусной ткани), их генетическая паспортизация. Таким образом, применение современных лесных биотехнологий позволяет существенно расширить возможности сохранения и воспроизводства экономически ценных генотипов древесных растений, а метод клонального микроразмножения дает возможность поддерживать их морфо- и органогенез круглогодично и сохранять в течение десятилетий.

⁸⁵ Сдерживающим фактором разработки и внедрения технологий клонального микроразмножения древесных растений в России является отсутствие спроса на соответствующий посадочный материал, что объясняется конъюнктурой рынка и особенностями правового регулирования в области лесовосстановления.

5.2.2. Применение молекулярно-генетических методов в области генетической идентификации вида и категории семян

С 2016 г. Рослесозащита с помощью молекулярно-генетических методов на постоянной основе проводит генетическую оценку семян, получаемых с объектов единого генетико-селекционного комплекса (ЕГСК), а также имеет возможность регулярно осуществлять контроль среднепопуляционного сбора семян с целью установления их категории. Эти возможности предоставляет проводимая учреждением генетическая паспортизация ЛРМ, основанная на определении количества материнских линий в партиях лесного репродуктивного материала.

С целью установления принадлежности семян к определенной селекционной категории (нормальные или улучшенные) применяется метод исследования митохондриальной ДНК (мтДНК). Методика разработана и апробирована Рослесозащитой в 2011–2014 гг. на зарастающих сосной обыкновенной бывших сельхозугодьях Московской и Владимирской областей. Определение селекционной категории проведено на основе двух полиморфных фрагментов митохондриальных генов сосны обыкновенной *nad3* (intron1) и *mh09*. Изучены количество и частота гаплотипов в зависимости от места сбора и удаленности от культур посадки 1983–1985 гг. Расстояние между объектами от 42 до 190 км. Получены данные по распределению основных материнских линий мтДНК в естественных насаждениях сосны обыкновенной в зависимости от расстояния до плодоносящих культур.

В силу цитоплазматического наследования, у голосеменных растений мтДНК по материнской линии на ЛСП хвойных деревьев представлено столькими же клонами, сколько линий (как правило, материнских по митохондриальной ДНК-единице) отобрано с плюсовых деревьев. Выявление методом ДНК-идентификации в партии семян более 5–7 гаплогенотипов (материнских линий) позволяет характеризовать семена данной партии как семена улучшенной категории. В случае определения в партии семян меньшего числа генотипов, партию можно отнести к категории нормальных семян, собранных в естественном насаждении (рис. 5.2).

Применение данного метода позволяет достоверно устанавливать, где заготовлена партия семян сосны, ели, лиственницы или другой древесной породы – в естественном насаждении или на ЛСП. Этот подход даст возможность в дальнейшем осуществлять эффективный контроль за действиями заготовителей семян и пресекать возможные попытки

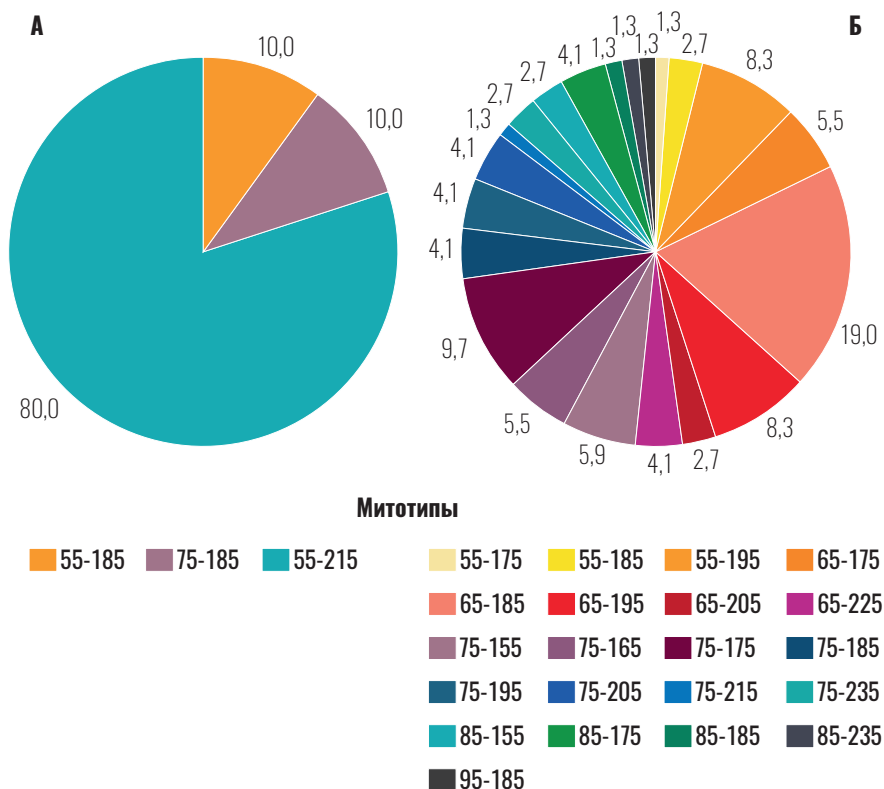


Рис. 5.2. Соотношение митотипов в (А) естественном насаждении сосны обыкновенной (Московская обл.) и (Б) ЛСП (Московская обл., Орехово-Зуевское лесничество)

выдать за улучшенные обычные семена, заготовленные в естественных насаждениях.

В случае необходимости, которая порой возникает в практике работы с семенами древесных растений, молекулярно-генетические методы позволяют решать вопросы установления их видовой принадлежности. Метод ДНК-тестирования эффективен, поскольку со 100%-й вероятностью обеспечивает идентификацию близких таксонов лесных растений, например, видов рода лиственница или рода сосна. Это актуально и значимо, в том числе для предотвращения недобросовестных поставок семян.

5.2.3. Контроль за оборотом репродуктивного материала лесных растений

Главные инструменты выполнения функции контроля – наблюдение, проверка всех сторон деятельности, учет и анализ. Для осуществления генетического контроля за оборотом ЛРМ наиболее информативными на сегодняшний день считаются ядерные микросателлиты (nrSSR) – кодоминантно-наследуемые, высокополиморфные маркёры. Разработка информативных молекулярно-генетических маркёров открывает возможности для достаточно точного и эффективного надзора и хозяйствования на основе сравнения генетического состава семян или сеянцев, использование таких маркёров необходимо для создания результативной системы оценки перемещения лесных репродуктивных материалов.

Послеозащитой разработана методика, основанная на комплексном анализе ядерной микросателлитной и митохондриальной ДНК. В процессе проведения работ по генотипированию ЛРМ апробирован набор из 10–15 наиболее информативных ядерных микросателлитных локусов для каждой породы. На основе сравнительного анализа состава и частот аллелей в локусах дифференцированно по исследуемым породам отобраны наиболее оптимальные и отбракованы мономорфные и малоинформативные локусы. Выбранные наборы маркёров с довольно высоким уровнем достоверности позволяют подтверждать идентичность происхождения обследуемого ЛРМ. Наиболее часто используют следующие локусы:

- ✓ для сосны обыкновенной – Psyl_44, Psyl_42, Psyl_17, Psyl_57 [Sebastiani et al., 2012], PtTx_3116, PtTx_3107, PtTx_2123, PtTx_2146 [Liewlaksaneeyanawin et al., 2004], lw isotig_04195, lw isotig_04306, lw isotig_07383, lw isotig_21953, lw isotig_27940 [Fang et al., 2014], PtTx_4001 [Gonzalez-Martinez et al., 2004], Spag 7.14 [Soranzo et al., 1998];
- ✓ для ели европейской – EATC1B02, EATC1E03 [Scotti et al., 2002]; EATC206, EATC1F07B; Pa_28, Pa_33, Pa_36, Pa_41, Pa_56, Pa_59 [Fluch et al., 2011]; Pa_60, UAPgAG105, UAPgAG150, UAPgTG25 [Hodgetts et al., 2001]; SpagG3 [Pfeiffer et al., 1997];
- ✓ для ели сибирской – EATC1B02, UAPgAG105 [Экарт и др., 2014]; EATC1E03; Pa_33; Pa_36;
- ✓ для лиственниц сибирской и даурской – bcLK056, bcLK60, bcLK066, bcLK224, bcLK225, bcLK232, bcLK235, [Isoda et al., 2006], UAKLly6 [Khasa et al., 2000], UBCLXtet_1–22 [Chen et al., 2009];

- ✓ для сосны кедровой корейской – Pc_1b, P_5, Pc_7, Pc_18, Pc_22, Pc_23, P_29, Pc_35, Pc_52, P_79 [Salzer et al., 2009];
- ✓ для сосны кедровой сибирской – PS_25981, PS_31489, PS_39709, PS_80612, Ps_364418, Ps_718958, PS_1375177, PS_1502048, Ps_1915155 [Белоконь и др., 2016; Орешкова и др., 2020];
- ✓ для дубов черешчатого и красного – QrZAG 5b, QrZAG 7, QrZAG 11, QrZAG 20, QrZAG 39, QrZAG 65, QrZAG 87, QrZAG 96, QrZAG 110, QrZAG 112 [Lepais et al., 2006].

В качестве примера на рис. 5.3 показаны аллельный состав и частоты аллельных вариантов изученных микросателлитных локусов в контрольных партиях семян и сеянцев ели сибирской из питомников Красноярского края.

Подход, используемый Рослесозащитой, состоит в том, чтобы контролировать происхождение семян путем использования референсной базы, куда заносятся генетические данные взрослых насаждений, происхождение которых достоверно известно, и дальнейшего их сравнения с генетическими данными семян сомнительного происхождения. С целью контроля за оборотом ЛРМ при воспроизводстве лесов по

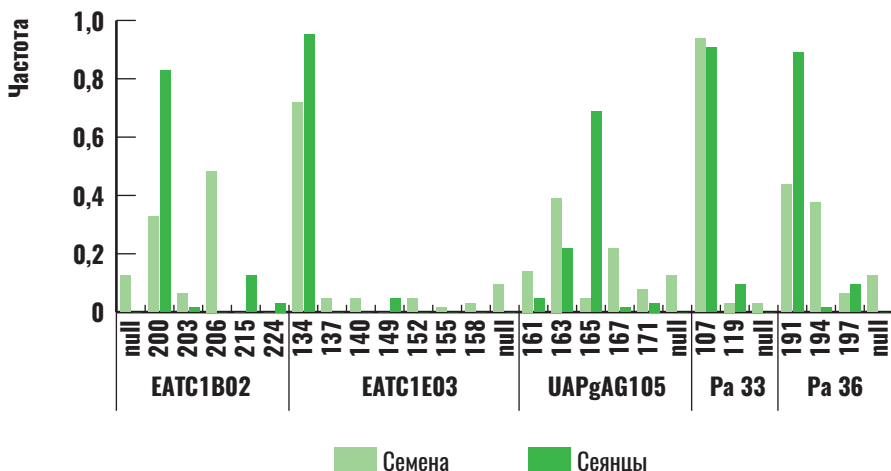


Рис. 5.3. Аллельный состав и частоты встречаемости аллелей 5 изученных ядерных микросателлитных локусов в контрольных партиях семян и сеянцев ели сибирской в питомниках Красноярского края

предложенной схеме проводится его выборочная генетическая паспортизация в разрезе этого вида мониторинга (ст. 61.1 Лесного кодекса РФ).

5.2.4. Разработка подхода «от семени до взрослого растения» для контроля оборота репродуктивного материала лесных растений при воспроизводстве лесов

Работы по контролю оборота репродуктивных материалов генетическими методами по схеме «от семени до взрослого растения» проводятся в сети генетических лабораторий Рослесозащиты с 2016 г. на основе типирования ядерных микросателлитных и митохондриальных локусов ДНК образцов семян и сеянцев. Основная задача заключается в осуществлении контроля за перемещением ЛРМ от ЛСП к питомникам, а затем к лесным культурам/насаждениям с заданными полезными свойствами.

В рамках разработки данного метода контроля в 2016 г. были протипированы партии семян сосны обыкновенной и выращенные из них в Ульяновском лесном питомнике Московской обл. однолетние сеянцы. Данный посадочный материал в 2018 г. был использован для создания участков лесных культур на площади 5 га в Отраденском участковом лесничестве лесничества «Русский лес» Московской обл. По итогам проведённого ДНК-анализа нативных образцов изучено сходство генетических показателей партий семян с партиями сеянцев, выращенных из них в питомнике (2018 г.), и с теми же ДНК-показателями образцов хвои лесных культур, созданных этими сеянцами в 2021 г.

Средние значения генетического сходства (r) между выборками рассчитывали по формуле Майяла и Линдстрема:

$$r = \frac{\sum(X_i \times Y_i)}{\sqrt{\sum X_i^2 \times Y_i^2}},$$

где:

r – индекс генетического сходства;

X_i, Y_i – частоты одних и тех же аллелей в сравниваемых выборках.

Проведённые расчеты показали, что уровень сходства партий семян и выращенных из них однолетних сеянцев, составил 90,6%. Показатель сходства между партиями сеянцев из обследуемого питомника и трёхлетних растений лесных культур сосны обыкновенной, созданных из них, составил 95,8%. Высокие показатели генетического сходства между сравниваемыми

группами репродуктивного материала позволили подтвердить идентичность их происхождения. Таким образом, в условиях Московской обл. в 2021 г. осуществлен контроль полного цикла оборота ЛРМ «от семени до взрослого растения» для лесохозяйственных предприятий.

Разработанный подход предполагается использовать в практике лесного хозяйства как элемент генетического контроля за формированием и последующей генетической сертификацией искусственно создаваемых лесных насаждений. Объёмы работ данного направления ежегодно расширяются, и каждый год закладка новых участков лесных культур осуществляется под ДНК-контролем используемого ЛРМ в зоне деятельности отделов мониторинга состояния ЛГР Рослесозащиты.

Аналогично данные схемы анализа можно применять для ежегодного контроля за оборотом ЛРМ при воспроизводстве лесов, определения идентичности генотипов семян и сеянцев при установлении их происхождения в целях надзора за соблюдением допустимости переброски семян согласно Правилам лесосеменного районирования.

5.2.5. Контроль соблюдения правил лесосеменного районирования в процессе переброски семян

Для осуществления генетического контроля за оборотом ЛРМ при воспроизводстве лесов путём сравнения партий семян и предположительно выращенных из них сеянцев на основании проведенных ДНК-анализов при помощи программного пакета GenAEx 6.2 статистически определяется степень генетического сходства партий семян и партий сеянцев. Уровни идентичности, полученные сотрудниками Рослесозащиты с 2016 по 2022 г. между партиями семян и их предполагаемым потомством, лежат в достаточно широком интервале средних значений сходства, определяемых по 5–9 локусам. Степень сходства в зависимости от вида (породы) деревьев и года обследований варьировала от 0,4 до 1,0 (или от 40 до 99,9% идентичности).

В Северо-Западном федеральном округе (Республика Карелия, Ленинградская, Архангельская, Вологодская, Кировская, Мурманская области) значения этого показателя находились в пределах:

- ✓ по сосне обыкновенной – 0,77–0,91 (77–91%);
- ✓ по ели европейской – 0,69–0,96 (69–96%).

В Центральном федеральном округе (Московская, Липецкая, Орловская, Владимирская, Смоленская области) и Приволжском федеральных округах (Пензенская, Саратовская, Волгоградская области):

- ✓ по сосне обыкновенной – 0,77–0,96 (77–95,8%);
- ✓ по ели европейской – 0,96–0,99 (96–99%);
- ✓ по дубу черешчатому – 0,72 (72%);
- ✓ по дубу красному – 0,87–0,98 (87–98%).

На территории Сибирского федерального округа (Республика Хакасия, Республика Алтай, Алтайский, Красноярский края):

- ✓ по сосне обыкновенной – 0,4–0,98 (40–98%);
- ✓ по сосне кедровой сибирской – 0,92–0,96 (92–96%);
- ✓ по ели сибирской – 0,53–0,98 (53–98%).

В Дальневосточном федеральном округе (Хабаровский край, Еврейская автономная области):

- ✓ по сосне кедровой корейской – 0,98–0,999 (98–99%).

Анализ ДНК семян и сеянцев указанных выше видов, а также высокие значения вычисленной степени генетического сходства между ними (выше 0,7) позволяют утверждать, что основная масса обследованных сеянцев, выращенных из семян известного (по документам) происхождения и проверенных методами молекулярно-генетической диагностики, соответствует областям заготовки семян, указанным в документах. Однако в отдельных случаях полученные невысокие значения сходства (0,4; 0,53; 0,69) не позволяют достоверно подтвердить идентичность проверяемых партий ЛРМ. Такие расхождения могут быть объяснены смешением разнородных партий семян в процессе посева.

Применение описанных выше методических подходов даёт возможность Рослесозащите проверять принадлежность партий семян определённым местам сбора и их соответствие информации, заявленной в прилагаемых документах (паспортах, сертификатах). В подавляющем большинстве случаев выявлено, что работы по производству посадочного материала (проверенного в рамках проведённых обследований в целях контроля за переброской семян основных лесообразующих пород) ведутся на должном уровне, с соблюдением основных положений лесосеменного районирования.

5.2.6. Оценка фитосанитарного состояния репродуктивного материала и насаждений основных лесообразующих пород

Своевременное выявление и идентификация патогенной микрофлоры являются необходимыми процедурами для разработки стратегии защиты лесных насаждений, в том числе при организации оборота ЛРМ для лесовосстановления и лесоразведения, поскольку поражение

болезнями лесных насаждений приводит к снижению их продуктивности, ухудшению санитарного состояния, потере потребительских качеств заготавливаемых лесоматериалов и другим негативным последствиям [Федоров, 2004].

Уже несколько десятилетий отмечается ослабление и частичное усыхание лесов Байкальской природной территории (БПТ). С 2019 г. в России реализуется федеральный проект «Сохранение озера Байкал» в рамках национального проекта «Экология». Показано, что во многих случаях причиной усыхания крон деревьев в данном регионе является массовое развитие грибных и бактериальных болезней, а также размножение насекомых-вредителей [Плешанов, Морозова, 2009], а не химические повреждения от аэровыбросов Байкальского целлюлозного комбината [Воронин, Соков, 2005], как считалось изначально.

С 2020 г. в рамках упомянутого выше проекта Рослесозащита проводит работы по внедрению системы молекулярно-генетического мониторинга фитосанитарного состояния БПТ. Объектами исследований служат древесные породы в возрасте от 7 до 100 лет: сосна кедровая сибирская, пихта сибирская, лиственница сибирская, сосна обыкновенная, ель сибирская в естественных насаждениях, а также посадочный материал в виде 2-летних сеянцев сосны обыкновенной из питомников.

Молекулярно-генетический анализ является одним из самых эффективных методов диагностики фитопатогенных организмов, поскольку позволяет определять трудноидентифицируемые по морфологическим признакам виды заболеваний, а также выявлять их на ранней стадии патогенеза. Молекулярно-генетическое обследование фитосанитарного состояния было проведено в лесничествах Республики Бурятия, Иркутской обл. и Забайкальского края. Идентифицировано более 80 видов грибов, среди которых 60 видов фитопатогенов и 24 вида грибов, не имеющих морфологического описания, с неизвестным болезнетворным потенциалом и идентифицированных в настоящее время исключительно молекулярно-генетическими методами диагностики [Бедрицкая и др., 2024]. Выявленные изоляты наиболее значимых фитопатогенов *Cyclaneusma minus* и *Dothistroma septosporum* депонированы⁸⁶ в международный генный банк Национального центра биотехнологической информации (NCBI, США).

Кроме того, в лесах БПТ зафиксировано более двух десятков инфекционных заболеваний, таких как диплодиоз, дотистромоз,

⁸⁶ Присвоены идентификационные номера OP804516, OP804517 и OP804518.

кладоспориоз, побурение хвои, ржавчина и пузырчатая ржавчина хвои, рак ветвей, ризосфериоз, склеротиниоз, склерофомоз, сосновый вертун, филлостиктоз (бурая пятнистость), фомоз, ценангиевый некроз, цитоспороз, разные типы шютте (пожелтение хвои, фацидиоз, шютте сосны обыкновенное, шютте ели, шютте лиственницы, шютте пятихвойных сосен и др.), различные виды пятнистостей и усыхания побегов.

В зарегистрированных очагах бактериальной водянки пихты сибирской отдельных лесничеств Республики Бурятия проведена молекулярно-генетическая диагностика возбудителей бактериозов. Идентифицировано 8 видов и один видовой комплекс фитопатогенных бактерий – возбудителей бактериальной водянки, бактериального рака, ожога и мягкой гнили (*Pectobacterium*, *Erwinia*, *Pseudomonas*, *Brenneria*, *Pantoea*, *Serratia*, *Rhizobium*).

Выявлена эндوفитная условно-патогенная микрофлора (*Burkholderia* spp., *Sodalis* spp.), а также почвенные бактерии (*Pseudoxanthomonas*), включая виды с неизвестным болезнетворным потенциалом (*Uncultured soil bacterium*). Находка *Erwinia* sp. на *Abies sibirica* и *Pinus sibirica* в очагах бактериальной водянки Гусиноозерского, Прибайкальского и Бабушкинского лесничеств Республики Бурятия также зафиксирована путём регистрации нуклеотидных сиквентов, по которым идентифицированы патогены, в международном геномном банке NCBI⁸⁷. Проведено депонирование в международном геномном банке NCBI двух видов патогенных грибов, выявленных впервые на БПТ: чашевидного гриба *Crumenulopsis sororia*⁸⁸, вызывающего язвы на коре сосны кедровой сибирской, из насаждения Быстринской дачи Слюдянского лесничества Иркутской обл., и гриба *Stagonospora bicolor*⁸⁹, обнаруженного в Хилокском лесничестве Забайкальского края, вызывающего стагоноспороз, или «красный ожог», на лиственнице даурской. При дальнейших исследованиях планируется депонирование других выявленных патогенов, поражающих хозяйственно ценные лесные породы БПТ.

На основании вышеперечисленного рекомендован постоянный лесопатологический и генетический мониторинг инфекционных заболеваний в лесных питомниках Республики Бурятия и насаждениях БПТ во избежание их массового распространения. Актуальность контроля за развитием инфекционных болезней лесных древесных растений БПТ

⁸⁷ Присвоены идентификационные номера OP804634, OR835529.1, OR872176.1–OR872179.1.

⁸⁸ Присвоен идентификационный номер OR852615.1.

⁸⁹ Присвоен идентификационный номер OR852616.1.

обусловлена и тем фактом, что на охраняемой природной территории запрещены химические способы борьбы с ними.

Общеизвестно, что фитопатогенные организмы оказывают негативное влияние на сеянцы, выращенные в лесных питомниках. Классический фитопатологический анализ посадочного материала основан на обнаружении болезней на поздних стадиях развития по внешним признакам растений. Такой подход упускает возможность проведения ранней профилактики заболеваний посадочного материала и оздоровления сеянцев, что создает условия для частичной или даже полной гибели посадочного материала. Благодаря методам молекулярной диагностики можно выявить наличие патогенной микрофлоры задолго до появления видимых признаков заболевания, если проводить её на регулярной основе.

В рамках федерального проекта «Сохранение озера Байкал» специалистами Рослесозащиты обследован посадочный материал в лесничествах Республики Бурятия. Было идентифицировано 19 видов микобиоты, из которых 14 являются возбудителями инфекционных заболеваний растений: фомоз, диплодиоз, склерофомоз, цитоспороз, некрозы и пятнистости хвои, заболевания типа шютте. В результате обследования в 7 питомниках, расположенных в лесничествах БПТ, были выявлены следующие виды фитопатогенов: *Phoma* Sacc. и *Didymella* Sacc. (фомозы), *Cyclaneusma* DiCosmo, Peredo & Minter (пожелтение хвои сосны), *Cytospora* Ehrenb. (цитоспороз), *Sclerophoma* Höhn. (телеоморфа – *Sydowia* Bres.) (склерофомоз), *Sphaeropsis* Sacc. (диплодиоз – сферопсисовый некроз сосны). Среди перечисленных есть фитопатогенные грибы, ранее не определяемые в Республике Бурятия [Бедрицкая и др., 2024].

Актуальность знания видов грибов возбудителей болезней в питомниках многократно возрастает в связи с изменением правил лесовосстановления, увеличением объёмов лесовосстановления, в том числе на БПТ, появлением инвазионных видов и угроз распространения болезней, наносящих существенный материальный ущерб лесному хозяйству. Для снижения ущерба, вызываемого болезнями, планирования и проведения мероприятий по защите растений особенно важны сведения по каждому конкретному лесному питомнику. Необходимо иметь сведения о видах встречающихся фитопатогенов, болезнях, которые они вызывают, а также о способах профилактики и борьбы с ними.

Сотрудниками Рослесозащиты также проведено обследование питомников в шести федеральных округах России (Северо-Западный,

Центральный, Приволжский, Южный, Сибирский, Дальневосточный) на территориях 26 субъектов РФ: республик Крым и Хакасия, Алтайского, Красноярского и Хабаровского краев, Еврейской автономной области, Архангельской, Белгородской, Брянской, Воронежской, Владимирской, Ивановской, Калужской, Костромской, Курской, Ленинградской, Липецкой, Московской, Новосибирской, Орловской, Рязанской, Смоленской, Тамбовской, Тверской, Тульской, Ульяновской областей.

В 114 питомниках проверен посадочный материал 17 видов: ели европейской, ели сибирской, лиственницы сибирской, можжевельника, сосны обыкновенной, сосны крымской, сосны чёрной, сосны кедровой, сосны кедровой корейской, берёзы повислой, вяза шершавого, груши лесной, дуба черешчатого, липы мелколистной, осины обыкновенной, туи западной, ясеня обыкновенного.

По данным молекулярно-генетического анализа, в лесных питомниках Дальнего Востока, Сибири, европейской части России, Республики Крым обнаружены представители более 50 видов, относящихся к более чем 40 родам патогенных и условно-патогенных сумчатых (Ascomycota) и трубчатых (Basidiomycota) грибов. В значительной степени патогенная микрофлора представлена сумчатыми грибами. На обследованных сеянцах хвойных и лиственных растений чаще идентифицировали представителей родов *Cladosporium*, *Alternaria*, *Phoma*, *Lophodermium*. Полученные данные использованы при разработке рекомендаций по профилактическому и защитным мероприятиям в лесных питомниках.

В рамках работ над федеральным проектом «Сохранение озера Байкал» специалисты Рослесозащиты секвенируют образцы геномного разнообразия в наиболее распространенных линиях грибов, взаимодействующих с растениями, и сапрофитных грибов, имеющих важнейшее экологическое значение для понимания функционирования наземных экосистем. Сравнительный анализ геномов сапротрофных, микоризных и патогенных грибов дает новое представление о специфических и законсервированных адаптациях, связанных с образом жизни каждого гриба, что позволяет наиболее полно и корректно использовать полученный комплекс знаний.

Результаты исследований по оценке фитосанитарного состояния посадочного материала в лесных питомниках и насаждений на территории страны представлены в разделе «Фитопатология» формируемой в Рослесозащите компьютерной автоматизированной аналитической системы «Лесная генетика».

5.2.7. Перспективы применения современных молекулярно-генетических методов диагностики происхождения древесины в борьбе с незаконным оборотом древесины и продукции её переработки⁹⁰

Незаконная рубка лесов⁹¹ имеет масштабные негативные экологические, социальные и экономические последствия. Это приводит к усилению обезлесения, эрозии почвы, нарушению водного режима, опустыниванию, снижению биоразнообразия и генетической эрозии насаждений, ускорению изменения климата, криминализации общества и коррупции [Sheng et al., 2023].

Борьба с незаконным оборотом древесины должна иметь комплексный характер и сопровождаться как устранением факторов спроса на незаконно заготовленные лесные материалы, так и пресечением незаконных операций на региональном, национальном и международном уровнях [Johnson, Laestadius, 2011]. В России предусмотрен федеральный государственный надзор в сфере транспортировки, хранения древесины, производства продукции переработки древесины и учета сделок с ним (далее – надзор за оборотом древесины)⁹². В задачи системы отслеживания Рослесхоза входят контроль движения древесины и лесоматериалов с момента рубки на лесосеке до приобретения конечным покупателем по всей территории страны. Разработаны и вступили в действие электронные сопроводительные документы на продукцию из древесины, где в обязательном порядке должны быть указаны породный состав, точные географические координаты лесосек и мест складирования лесоматериалов. В целях обеспечения надзора за оборотом древесины в 2016 г. в России была введена единая государственная автоматизированная информационная система учета древесины и сделок с ней (ст. 50.6 Лесного кодекса РФ). С её помощью проводится комплексный учет древесины, поставляемой лесопользователями на сырьевые рынки.

⁹⁰ Коллектив авторов раздела 5.2.7 благодарит Е.А. Шилкину (Центр защиты леса Красноярского края, г. Красноярск), М.А. Арефьеву и Т.В. Нарбутовских (Рослесозащита, г. Пушкино), О.В. Шейкину (Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола) и С.А. Семерикову (ИЭРиЖ УрО РАН, г. Екатеринбург) за ценные замечания и помощь в ходе подготовки рукописи. Отдельные слова благодарности авторы выражают В.Л. Семерикову (ИЭРиЖ УрО РАН, г. Екатеринбург) за продуктивное обсуждение основных работ по филогеографии хвойных, проводимых в рамках государственного задания № 122021000090-5.

⁹¹ В международных правовых актах к незаконному лесопользованию отнесены рубки, произведённые с нарушением норм законодательства в области устойчивого управления лесами.

⁹² Постановление Правительства РФ от 30.06.2021 № 1099 «О федеральном государственном надзоре в сфере транспортировки, хранения древесины, производства продукции переработки древесины и учета сделок с ними» (с изменениями и дополнениями).

К сожалению, общей проблемой перечисленных выше и соответствующих нормативных актов является возможность фальсификации деклараций и данных, которые с ними связаны, например, информации о местопроисхождении лесных материалов [Космодемьянская и др., 2021]. В решении последней проблемы могут помочь научные достижения в области идентификации происхождения древесины [Dormontt et al., 2015]. В зависимости от используемого метода подходы к идентификации древесины можно подразделить на структурные (анализ анатомии древесины, визуальный осмотр или использование технологий машинного зрения), физико-химические методы (стабильные изотопы, масс-спектрометрия и спектроскопия ближнего инфракрасного диапазона) и генетические методы (ДНК-штрихкодирование и ДНК-профилирование, фило- и геогеография). Перечисленные методы объединяет то, что в анализ вовлечены созданные самой природой уникальные характеристики лесных материалов, которые невозможно подделать. Эти методы можно применять в мониторинге незаконного оборота древесины как комплексно, так и по отдельности. Наибольшая эффективность может быть достигнута при использовании комплекса методов.

Сравнительный анализ молекулярно-генетических методов, используемых для выявления происхождения лесных материалов (ДНК-штрихкодирование, ДНК-фингерпринтинг и популяционно-генетические/филогеографические), представлен в табл. 5.1 (см. также Введение). ДНК-штрихкодирование направлено на выявление принадлежности растения к тому или иному виду на основе сравнения нуклеотидных последовательностей нескольких стандартных генов. Следует отметить, что каждое дерево, если только оно не является раметой клона, имеет уникальный генотип (как отпечаток пальца «фингерпринт»), что можно использовать в судебно-ботанической практике для установления связи между изъятым лесным материалом и древесиной пня незаконно заготовленного дерева [Шилкина и др., 2019; Рябухина, Крутовский, 2023а,б]. Суть метода состоит в сравнительном анализе генотипов образцов растений (древесина и др. ткани), изъятых в партии неизвесного происхождения, с образцами конкретного насаждения, взятыми, например, с места незаконной рубки.

Для определения вероятности совпадения генотипических профилей образцов необходимы популяционные данные о частоте аллелей маркёров, использованных для генотипирования образцов, что является основой экспертного заключения об их принадлежности

Таблица 5.1. Диагностические генетические методики для судебно-ботанической идентификации древесины (по [Dormont et al., 2015] с изменениями)

Задача	ДНК-штрихкодирование	Популяционная генетика / филогеография	ДНК-фингер-принтинг
Идентификация рода	Да	–	Иногда
Идентификация вида	Да	Иногда	Иногда
Выявление происхождения	Иногда	Да	Иногда
Идентификация особи	Нет	Нет	Да
Определение возраста	Нет	Нет	Нет
Приблизительная стоимость образца	100–300 долл.		
Скорость анализа	Несколько дней		
Необходимость предварительной информации	Нет, но информация о предполагаемом таксоне полезна	О роде для вида, о регионе для вида, популяционно-генетические данные о частоте аллелей	О виде. В случае выявления происхождения нужна информация о локализации незаконной рубки
Требования к оборудованию	Лаборатория молекулярной биологии		
Требования к материалу	Образцы листьев, камбия или древесины нужных таксонов и потенциальных видов-двойников	Образцы листьев, камбия или древесины от многих особей со всего ареала вида	
Использование в настоящее время	Используется для идентификации видов в широком диапазоне таксонов, для древесины в настоящее время применяется ограниченно	Используется преимущественно в контексте исследований и в пилотных проектах	ДНК-дактилоскопия, ДНК-паспортизация с.-х. видов растений и животных. Для древесины в настоящее время применяется ограниченно
Ограничения для использования	Разработка видоспецифичных генетических маркёров (ДНК-штрихкодов), которые работают с ДНК, выделенной также из древесины	Разработка генетических маркёров и референсных баз, позволяющих различать области и таксоны, представляющие интерес	Разработка генетических маркёров и референсных баз, позволяющих различать особи в таксонах, представляющих интерес
Потребности в исследованиях	Разработка и судебно-ботаническая валидация методов	Разработка и судебно-ботаническая валидация дискриминирующих генетических маркёров и референсных баз данных	

к одному и тому же дереву. Несмотря на высокую точность данного подхода, при наличии достаточных популяционных данных, у метода есть существенный недостаток – это необходимость в информации о нахождении предполагаемого места незаконной рубки [Шуваев и др., 2022]. Для определения источника происхождения древесины отдельных деревьев и их групп необходимы популяционно-генетические базы с данными по частотам аллелей генетических маркёров для всех или основных районов рубок, которые основаны на результатах популяционно-генетических и филогеографических исследований.

Технологии ДНК-штрихкодирования и ДНК-фингерпринтинга в России могут быть особенно полезными для охраны краснокнижных древесных видов в таких флористически богатых регионах, как Кавказ и Дальний Восток. Так, они могут представлять большой интерес для охраны берёзы карельской [Ветчинникова, Титов, 2021a]. Хлоропластный геном берёзы карельской был полностью секвенирован и аннотирован, что дает возможность дополнительного выбора генов для разработки ДНК-штрихкодов этого ценного вида [Shestibratov et al., 2021].

Применение результатов популяционно-генетических и филогеографических исследований для определения источника происхождения древесины хозяйственно ценных древесных видов хвойных России (*Pinus sylvestris*, *P. sibirica*, *P. korainensis*, *Picea abies*, *P. obovata*, *Abies sibirica*, *Larix sibirica*, *L. sukaczewii*, *L. gmelinii*) дает более сложную картину. Это связано с тем, что данные виды произрастают от европейской части России до Дальнего Востока в разнообразных эколого-географических условиях, формируя огромные непрерывные ареалы. Для этих видов характерны низкие уровни межпопуляционной дифференциации, что способно снизить точность ДНК-методов при идентификации географического происхождения древесины. Тем не менее исторически повторявшиеся циклы репродуктивной изоляции и консолидации популяций у вышеперечисленных видов привели к формированию сложной генетической структуры, что было обусловлено дрейфом и потоками генов, гибридизацией и естественным отбором [Krutovskii, Bergmann, 1995; Semerikov, Lascoux, 2003; Polezhaeva et al., 2010; Semerikova et al., 2011; Petrova et al., 2018; Semerikov et al., 2018, 2020; Vasilyeva et al., 2021; Shuvaev, Ibe, 2021; Semerikov, Semerikova, 2023a,b; Zhou et al., 2023; Shuvaev et al., 2023; Bruxaux et al., 2024]. Выявленную с помощью фило- и геногеографических исследований генетическую структуру популяций можно использовать в качестве основы для разработки методов идентификации источников происхождения

древесины и репродуктивного материала хвойных видов России. К сожалению, перспективные широкоареальные исследования с применением большого числа маркёров из-за наличия у хвойных больших и сложных геномов и высокой распространенности этих видов в России очень затратны и поэтому редки [Новикова и др., 2023; Zhou et al., 2023; Bruhaux et al., 2023 и др.].

Для отечественных видов полностью секвенированы, собраны и аннотированы геномы: лиственницы сибирской – хлоропластный [Bondar et al., 2019], митохондриальный [Putintseva et al., 2020] и ядерный [Kuzmin et al., 2019; Bondar et al., 2022b]; ели европейской – хлоропластный и ядерный [Nystedt et al., 2013], а также митохондриальный [Sullivan et al., 2020]; сосны обыкновенной – хлоропластный⁹³ [Yu et al. 2022]; пихты сибирской – хлоропластный⁹⁴; сосны кедровой сибирской – хлоропластный [Baturina et al., 2019] и частично ядерный [Крутовский и др., 2014; Oreshkova et al., 2015].

Полногеномные данные позволили разработать высокоэффективные микросателлитные маркёры (SSRs) для сосны кедровой сибирской [Белоконь и др., 2016], лиственницы сибирской [Орешкова и др., 2017б, 2019] и пихты сибирской [Oreshkova et al., 2023], анализ которых можно проводить без привлечения дорогостоящего оборудования и специалистов.

Таким образом, возможности применения результатов проведённых исследований в области филогеографии и популяционной генетики для идентификации древесины и лесоматериалов выглядят следующим образом: 1) виды, исследованные с помощью митохондриальных и ядерных микросателлитных маркёров: сосна обыкновенная [Semerikov et al., 2018, 2020; Semerikov, Petrova, 2023], сосна сибирская [Shuvaev, Ibe, 2021; Shuvaev et al., 2023], пихта сибирская [Semerikov et al., 2019; Semerikov, Semerikova, 2023a], пихта сахалинская и белокорая [Semerikov, Semerikova, 2023б], ель сибирская и ель европейская [Tollefsrud et al., 2015; Tsuda et al., 2016], а также виды лиственниц Сибири и Дальнего Востока [Semerikov, Lascoux, 2003; Polezhaeva et al., 2010]; 2) виды, исследованные с помощью анализа однонуклеотидных полиморфизмов: лиственница сибирская [Blanc-Jolivet et al., 2018; Новикова и др., 2023] и другие виды лиственниц (*L. gmelinii*, *L. gmelinii* var. *olgensis*, *L. cajanderi*, *L. czekanowskii*) [Blanc-Jolivet et al., 2018], сосна

⁹³ NCBI GenBank accession number NC_035069.1.

⁹⁴ NCBI GenBank accession number KR476376.1.

обыкновенная [Vruxaugh et al., 2023], или сибирская и европейская [Zhou et al., 2023]. Идентификацию происхождения древесины вышеперечисленных видов можно проводить на уровне крупных регионов России. В крайнем случае, если район предполагаемого географического происхождения образцов отсутствует в геногеографической базе данных, то его всегда можно проверить на соответствие тому, который указан в электронных сопроводительных документах, собрав и проанализировав растительный материал из заявленной области.

Если для большинства видов хвойных России фило- и геногеографический подход в контроле за оборотом древесины в целом оправдан, то для популяций сосны обыкновенной не все так однозначно. С одной стороны, на западе Русской равнины, в Причерноморье и Крыму, в западной и восточной частях Кавказа и на Южном Урале можно проследить происхождение образцов сосны обыкновенной с помощью цитоплазматических маркёров [Semerikov et al., 2018, 2020]. С другой стороны, цитоплазматические маркёры не выявляют дифференциацию для всей остальной восточной части ареала вида. В то же время ядерные микросателлитные маркеры и данные по изменчивости 25830 SNP-локусов выделяют дальневосточный кластер сосны обыкновенной, но при этом обширная сибирская группа популяций остается крайне однородной по своему генетическому составу [Vruxaugh et al., 2023; Semerikov, Petrova, 2023; Sheller et al., 2023b]. Следовательно, возможность ДНК-идентификации географического происхождения древесины сосны обыкновенной в Сибири пока является открытым вопросом, что отнюдь не означает бесперспективности применения подхода, а лишь свидетельствует об ограничениях ДНК-метода при данных генетических маркёрах. Поэтому необходимы дальнейшие поиски более информативных маркёров с высоким уровнем генетической дифференциации между регионами и популяциями. Возможно, что для сибирских популяций сосны потребуется изучение большего числа локусов SNP ядДНК, разработка высокоизменчивых локусов мтДНК, а также комплексное применение физико-химических и дендрохронологических методов анализа. Альтернативным подходом к идентификации нелегальной древесины сосны в Сибири может стать метод ДНК-фингерпринтинга на основе ядерных локусов SSR [Шуваев и др., 2022] или ISSR [Сбоева и др., 2020; Vasilyeva et al., 2021], конечно, при условии обязательного наличия представительной референсной генетической базы данных популяций, а также информации о возможных районах нелегальных рубок.

Необходимо также отметить, что из-за дороговизны разработки высокопроизводительных панелей SNP-локусов важен предварительный анализ популяционной структуры вида с помощью более дешёвых методов (например, микросателлитной ядДНК). Это поможет отобрать референсные популяции, а также путём моделирования определить оптимальное число локусов для географических областей, где вид малоизменчив. Одновременно с этим можно проводить и подбор генетических маркёров путем их пространственной фильтрации на корреляции с географическими расстояниями, как это было продемонстрировано в исследовании по лиственницам [Blanc-Jolivet et al., 2018], где была показана эффективность применения пространственно скоррелированных SNP-мутаций при идентификации географического происхождения древесины лиственниц в России на уровне физико-географических областей Урала, Средней Сибири, Восточной Сибири и Дальнего Востока.

Результаты упомянутых выше работ Рослесозащиты по созданию базы данных по генетической изменчивости основных лесообразующих пород России могут стать основой при отборе референсных популяций, а также помочь в выявлении структуры изменчивости лесообразующих видов. Результаты дифференциации популяций позволят провести анализ и пространственную фильтрацию полногеномных наборов SNP-локусов, чтобы определить значимые корреляции их изменчивости с географическими расстояниями.

В случае комплексов видов лиственницы, в зависимости от наличия соответствующего набора оборудования, можно использовать маркёры митохондриальной и в некоторых случаях хлоропластной ДНК [Semerikov, Lascoux, 2003; Polezhaeva et al., 2010] или уже разработанный метод генотипирования 76 SNP-локусов [Blanc-Jolivet et al., 2018]. Кроме того, проведение пространственной фильтрации гораздо более масштабных панелей SNP-локусов [Новикова и др., 2023; Novikova et al., 2023a,b] даст возможность использовать географические карты с более высоким пространственным разрешением. Нужно подчеркнуть, что имеющийся задел для ДНК-идентификации древесины в ареале лиственниц на территории Российской Федерации связан, прежде всего, с генетическими кластерами комплекса видов лиственницы сибирской, даурской, ольгинской, Чекановского и Сукачёва, а также подразделением популяций лиственницы сибирской на западную и восточную группировки [Semerikov, Lascoux, 2003], причем дополнительные 3 кластера были выявлены

в западной части ареала по широтной трансекте Урала [Новикова и др., 2023].

Результаты исследования комплекса двух видов елей – сибирской и европейской – с применением набора из 480 тыс. SNP-локусов [Zhou et al., 2023] также позволяют анализировать происхождение их древесины в макрогеографическом масштабе (предуральский, уральский, обский и енисейский кластеры популяций). Однако, как и в случае с лиственницами, большое число локусов данной SNP-панели, возможно, избыточно и их следует проверить на корреляции с географическими расстояниями, чтобы отобрать наиболее информативные сайты. Аналогично этому географическое происхождение древесины других распространенных хвойных видов Сибири и Дальнего Востока – сосны сибирской и видов пихт – можно выявить на уровне крупных географических областей России (Алтай, Урал, Прибайкалье и т.д.) [Shuvaev et al., 2023; Semerikov, Semerikova, 2023a,б]. Таким образом, для всех перечисленных видов хвойных в той или иной мере существует потенциал при ДНК-контроле происхождения их древесины, за исключением протяжённых зон гибридизации (как внутри-, так и межвидовых), поскольку для них отследить происхождение образцов крайне сложно [Blanc-Jolivet et al., 2018].

По сравнению с хвойными видами, широко распространённые лиственные древесные растения с большими непрерывными ареалами в популяционно-генетическом отношении исследованы в России несравнимо меньше. Для некоторых из них (берёза повислая, осина и др.) проблема незаконного оборота древесины не является острой. Исключением являются дубы с их ценной древесиной, особенно дуб черешчатый. Для этого вида проведены масштабные популяционно-генетические исследования с применением современных генетических маркёров. В европейской части России и соседних странах наблюдается закономерное географическое размещение хлоропластных гаплотипов (хпДНК) этого вида [Семерикова и др., 2021]. В восточной части Русской равнины распространены два гаплотипа, не встречающиеся на северо-западе России, а также в Белоруссии, Польше и Западной Украине. В свою очередь, в западной части обнаружено девять других географически структурированных гаплотипов дуба черешчатого.

Крымско-Кавказская часть ареалов дуба сложна в отношении таксономической структуры и долгое время оставалась малоизученной с применением современных генетических маркёров. Исследования С.А. Семериковой с сотрудниками показали уникальность гаплотипов

популяций дуба Кавказа и Крыма [Семерикова и др., 2023а]. В Крыму выделены две географические группы популяций [Семерикова и др., 2023б]. В восточной горно-лесной части Крыма и на Западном Кавказе были распространены одни и те же гаплотипы. Установлено, что на Кавказе наиболее часто встречающиеся и родственные им гаплотипы территориально четко ограничены [Семерикова и др., 2023а]. Кроме того, выраженная генетическая дифференциация групп кавказских популяций дуба черешчатого подтверждена при использовании микросателлитных локусов ядерной ДНК [Семерикова и др., 2023б], а также SNP митохондрий и хлоропластов [Degen et al., 2023]. Показано резкое отличие Крымско-Кавказских популяций дуба черешчатого от популяций северной части ареала и дифференциация популяций внутри Крымско-Кавказского региона. Структура матерински наследуемых хпДНК-маркёров у близкородственных видов робуроидных дубов (дубы скальный, пушистый и др.) в Крымско-Кавказском регионе совпадает географически со структурой *Q. robur* [Семерикова и др., 2023а,б]. Однако виды дубов хорошо отличаются по ядерным микросателлитным маркёрам, как описано для *Q. robur* и *Q. petraea* [Семерикова и др., 2023б].

Результаты вышеперечисленных популяционно-генетических и филогеографических исследований дают возможность с высокой эффективностью географически локализовать древесину дуба в региональных масштабах, а также определить происхождение лесных материалов из России и других стран Европы. Например, исследование генетической дифференциации 197 выборок дуба черешчатого по 359 локусам SNP и InDel (мутация по типу инсерция-делеция) ядерной ДНК позволило выявить в пределах всего ареала вида подразделенность популяций на несколько крупных групп (рис. 5.4) [Degen et al., 2021].

Показано, что генетические расстояния между популяциями дуба черешчатого, вычисленные для ядерных генетических маркёров, достоверно коррелируют с расстояниями, вычисленными для хлоропластных и митохондриальных генетических маркёров. Для более точного выявления места происхождения древесины или репродуктивного материала лучше использовать несколько типов генетических маркёров, каждый из которых имеет собственные методические преимущества. Результативность тестов на правильность определения принадлежности выборки из 10 особей дуба черешчатого к той или иной группе популяций составила 93–95%. Высокий процент правильной идентификации объясняется статистически значимой ($p < 0,001$)

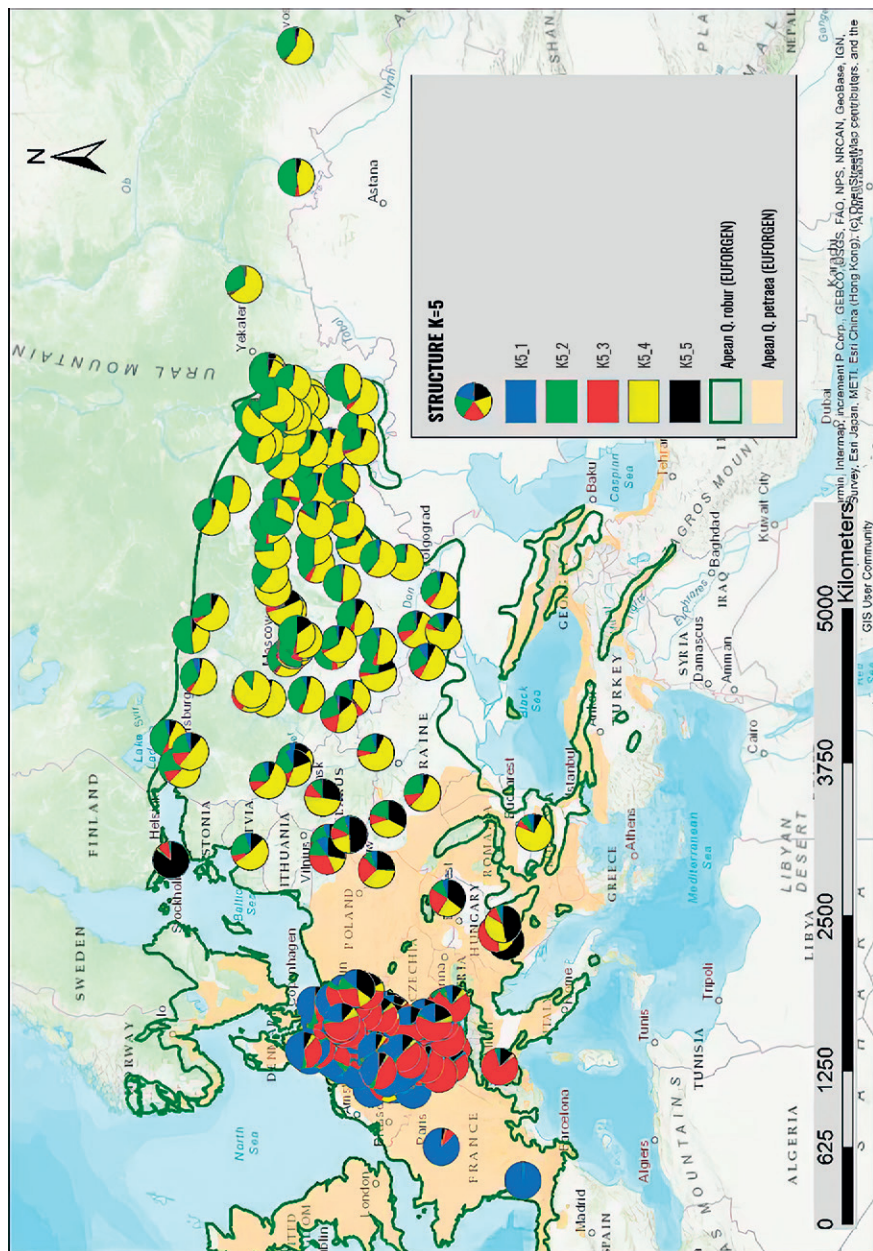


Рис. 5.4. Генетическая кластеризация 197 выборков дуба черешчатого в пределах ареала вида по данным 359 локусов SNP и InDel (инсерция-делеция) ядерной ДНК [Degen et al., 2021b].

корреляцией географических и генетических дистанций на расстоянии до 1 300 км (рис. 5.5). На Русской равнине число генетических групп дуба сравнительно небольшое (см. рис. 5.4). Тем не менее правильность географической идентификации выборок для данных локальных популяций достигала 93% [Degen et al., 2022]. Приведенное выше исследование генетической структуры робуроидных дубов является хорошим примером международного сотрудничества с целью решения проблем сохранения генетического разнообразия и мониторинга основных лесообразующих пород.

Интенсификация исследований в области разработки ДНК-маркёров древесных видов позволяет предположить, что потенциал методов ДНК-анализа при установлении законности происхождения древесины будет только повышаться. По мере развития ДНК-технологий их разрешающая способность и производительность увеличиваются, а стоимость анализа многократно снижается.

Развитие молекулярно-генетического подхода в контроле за оборотом древесины, помимо сугубо практической пользы, также обещает

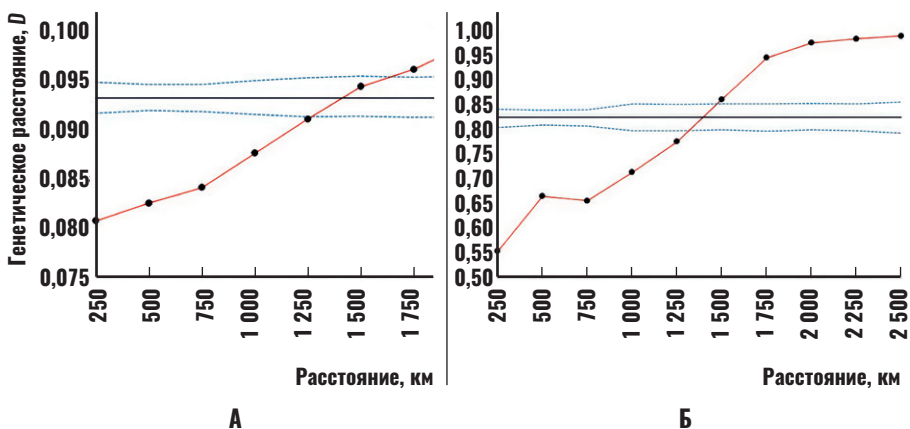


Рис. 5.5. Корреляция географических расстояний с генетическими, вычисленными по частотам аллелей локусов ядерной ДНК (А), хлоропластных и митохондриальных гаплотипов (Б) дуба черешчатого [Degen et al., 2021в].

Горизонтальной линией черного цвета обозначены генетические расстояния между популяциями при их случайном распределении, синими пунктирными линиями показаны границы 95%-го доверительного интервала, за пределами которого корреляции статистически значимы

и беспрецедентные перспективы в области мониторинга биоразнообразия и устойчивого управления лесными экосистемами. В свою очередь, эффективность применения генетических маркёров в контроле за происхождением древесины напрямую определяется наличием соответствующих референсных популяционно-генетических баз данных конкретных видов и большинства их популяций. В отсутствие таких баз использование генетических методов ограничено и эффективно часто только в сочетании с другими методами.

5.3. Использование лесных генетических ресурсов⁹⁵

Лесные генетические ресурсы используются в лесном хозяйстве, прежде всего, для воспроизводства лесов и проведения мероприятий по защитному лесоразведению. Воспроизводство лесов включает комплекс мероприятий по лесному семеноводству, лесовосстановлению и уходу за насаждениями. В России мероприятия по лесовосстановлению и лесоразведению регулируются законодательно на федеральном уровне Лесным кодексом РФ и соответствующими приказами Минприроды России⁹⁶. Они направлены на сохранение видового и типологического разнообразия лесных ресурсов, повышение потенциала самовоспроизводства, улучшение качества лесов, в том числе на увеличение их продуктивности.

Искусственное восстановление лесов, лесоразведение, реконструкция малоценных лесных насаждений осуществляются путем создания лесных культур: посадки семян, саженцев, в том числе с закрытой корневой системой, черенков или посева семян лесных растений. Для выращивания посадочного материала и создания лесных культур используют районированные семена лесных насаждений. Не допускается применение нерайонированных семян, а также семян лесных растений, посевные и иные качества которых не проверены.

⁹⁵ В данном разделе сообщается об использовании ЛГР с упором на лесной репродуктивный материал и воспроизводство лесов/плантационное лесоводство, в то время как в главах 6 и 7 обсуждается использование ЛГР в программах лесной селекции.

⁹⁶ Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 25.03.2019 №188 «Об утверждении Правил лесовосстановления, состава Проекта лесовосстановления, Порядка разработки проекта лесовосстановления и внесения в него изменений», приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 28.12.2018 № 700 «Об утверждении Правил лесоразведения, состава проекта лесоразведения, порядка его разработки», постановление Правительства Российской Федерации от 07.05.2019 № 566 «Об утверждении Правил выполнения работ по лесовосстановлению или лесоразведению лицами, использующими леса в соответствии со статьями 43–46 Лесного кодекса Российской Федерации, и лицами, обратившимися с ходатайством или заявлением об изменении целевого назначения лесного участка» и др.

Для устойчивого обеспечения воспроизводства лесов семенами лесных растений с ценными наследственными свойствами в стране созданы объекты лесного селекционного семеноводства (см. главу 6).

Лесные культуры могут создаваться одной главной лесной древесной породой (чистые культуры) или несколькими главными и сопутствующими видами лесных деревьев и кустарников (смешанные культуры). Главную породу отбирают из местных лесных древесных пород, и она должна отвечать целям лесовосстановления и соответствовать природно-климатическим условиям лесного участка. При выборе сопутствующих пород учитывают их влияние на главную породу. Сопутствующие породы вводят в лесные культуры в основном путем чередования их рядов с рядами главной породы или путем смешения звеньев главной и сопутствующих пород в ряду.

Лесовосстановление осуществляется естественным, искусственным или комбинированным способом в целях восстановления вырубленных, погибших, повреждённых лесов, а также сохранения полезных функций лесов, их биологического разнообразия (ст. 62 Лесного кодекса РФ). В лесах, повреждённых в результате промышленных выбросов, рекреационных нагрузок, воздействий вредных организмов и пр., лесовосстановительные мероприятия проводят для формирования лесных насаждений, устойчивых к указанным факторам повреждения. В защитных лесах и на особо защитных участках лесов эти мероприятия обеспечивают создание лесных насаждений, соответствующих целевому назначению категорий защитных лесов и особо защитных участков лесов.

Лесовосстановительные мероприятия в России в последние десятилетия практически полностью компенсируют площади сплошных рубок. В 2023 г. лесовосстановительные мероприятия проведены на площади 1 420,1 тыс. га, в том числе искусственное лесовосстановление – на площади 217,8 тыс. га, комбинированное лесовосстановление – 72,5 тыс. га, меры содействия естественному лесовозобновлению – 1 129,8 тыс. га. Большая часть площадей (80%) восстанавливается естественным путем, что гарантирует в будущем сохранение ЛПР, характерных для местных условий произрастания лесов. Кроме того, Рослесхозом, в целях привлечения внимания общества к вопросам сохранения благоприятной окружающей среды и воспитания бережного отношения к российскому лесу, ежегодно проводятся общественные акции по посадке деревьев и кустарников с привлечением общественности, активистов и студентов. В 2022 г. в рамках акции «Сад памяти» было высажено 33,2 млн

деревьев, а в рамках акции «Сохраним лес» – 70,6 млн деревьев [О состоянии..., 2023].

Лесоразведение осуществляется на землях лесного фонда и землях иных категорий, в основном на землях сельскохозяйственного назначения, в целях предотвращения эрозии почв и других связанных с повышением потенциала земель целях. Основным методом создания лесных насаждений при лесоразведении является посадка культур. Большое значение для восстановления генетического разнообразия имеет лесоразведение на землях иных категорий, на которых ранее леса не произрастали, их создают с целью предотвращения водной, ветровой и иной эрозии почв, формирования защитных насаждений. Объемы работ по лесоразведению из года в год сокращаются (от 6,6 тыс. га в 2007 г. до 0,8 тыс. га в 2018 г.). Между тем в России резерв площадей для проведения лесоразведения, в том числе в целях защиты почв, водных источников и населенных пунктов, имеется в различных категориях земель.

С 2016 г. юридические лица, осуществляющие воспроизводство лесов, ежегодно предоставляют в органы государственной власти (Рослесхоз) и/или органы местного самоуправления отчет о воспроизводстве лесов. В отчете о воспроизводстве лесов содержится информация о мероприятиях по лесовосстановлению: площади, на которой осуществляется воспроизводство лесов, характеристики используемых при воспроизводстве лесов семян и посадочного материала лесных растений и другая информация, установленная законом.

В Российской Федерации разработана система мер, обеспечивающих проведение государственного мониторинга воспроизводства лесов⁹⁷. Работы по мониторингу воспроизводства лесов выполняет Рослесозащита. Государственный мониторинг воспроизводства лесов включает ежегодную оценку изменения площади земель, на которых расположены леса; ежегодное выявление земель, требующих лесовосстановления; оценку характеристик лесных насаждений при воспроизводстве лесов; оценку характеристик используемых при воспроизводстве лесов семян лесных растений и посадочного материала лесных растений, а также оценку эффективности воспроизводства лесов. Государственный мониторинг воспроизводства лесов осуществляется путем наблюдения с использованием наземных, авиационных или космических средств, а также

⁹⁷ Приказ от 19.02.2015 № 59 «Об утверждении Порядка осуществления государственного мониторинга воспроизводства лесов» и приказ от 20.01.2015 № 28 «Об установлении Порядка предоставления отчета о воспроизводстве лесов и лесоразведении и его формы».

путем сбора и анализа информации. Государственный мониторинг воспроизводства лесов является частью государственного экологического мониторинга (государственного мониторинга окружающей среды).

5.4. Промышленные лесные плантации

Плантационное лесовыращивание широко распространено во многих странах мира и является доходной статьей лесного бизнеса. Ежегодно в мире создается более 1 млн га плантационных культур для получения балансов, пиловочника, фанерного кряжа, сырья для энергетических нужд и др. [Цивенкова и др., 2005]. По экспертным оценкам, от 10 до 17% древесины, потребляемой в мире, производится на плантациях [Комментарии..., 2022].

По определению ФАО «лесные плантации – это лес, созданный посевом или посадкой в рамках лесовосстановления или лесоразведения, представленный интродуцированными породами». В России несколько иной подход к данному понятию: согласно статье 42 Лесного кодекса РФ «Плантации – лесные насаждения искусственного происхождения определенных пород (целевых пород), за счет которых обеспечивается получение древесины с заданными характеристиками», т.е. в нашей стране ключевым является то, что лесные плантации создаются не только интродуцированными, но и аборигенными породами и предназначены для ускоренного выращивания древесины разного целевого назначения [Загидуллина, 2018].

В России имеется достаточно большой опыт плантационного (ускоренного) лесовыращивания [Шутов и др., 1984; Шутов, Маркова, 2007; Желдак, 2013]. Создание лесных плантаций и их эксплуатация в стране являются новым видом использования лесов, который введен с 2007 г. Лесным кодексом РФ, и представляет собой предпринимательскую деятельность. Лесные плантации могут создаваться на землях лесного фонда и землях иных категорий. Проведение рубок на лесных плантациях допускается без ограничений.

Создание специальных балансовых плантаций хвойных пород с коротким оборотом рубки способствует обеспечению лесопильной и целлюлозно-бумажной промышленности сырьём. Для создания лесных плантаций используют ель, сосны, пихты и лиственницы. В южных регионах с той же целью в основном выращивают быстрорастущие лиственные породы: эвкалипт, тополь и осину. В Центральной России и в некоторых других регионах страны выделено большое число

быстрорастущих и хозяйственно ценных форм (клонов) тополя, осины, березы, которые могут быть использованы для создания лесных плантаций [Царев и др., 2019, 2021в; Паничев и др., 2023].

В зависимости от сроков ротации лесные плантации подразделяются на мини-ротационные, миди-ротационные и лонг-ротационные. Мини-ротационными, или короткоротационными, плантациями считаются насаждения с оборотом рубки для быстрорастущих лиственных пород 1–5 лет и для хвойных – 10 лет с густотой посадки 5–40 тыс. шт./га. Они позволяют в короткие сроки получать большие объемы древесной биомассы. Миди-ротационными плантациями называются плантации с оборотом рубки 6–10 лет при густоте посадки 1–4 тыс. шт./га [Zuffa, 1981; Царев, Мироненко, 1997]. Лонг-ротационными плантациями считаются искусственные насаждения с ротацией 11–20 лет и более (до наступления количественной спелости древесины, например, у тополей количественная спелость древесины наступает в 25–27 лет) [Царев и др., 2010, 2023].

При создании лесосырьевых плантаций в России всё большее применение находит клональное микроразмножение (см. раздел 5.2.1.), которое позволяет не только производить репродуктивные материалы наиболее ценных генотипов древесных пород, но и в ускоренном режиме использовать селекционные достижения на основе производства высококачественного посадочного материала [Сиволапов и др., 2014б]. Лесные плантации, как и любые лесные насаждения, имеют экологическое значение. Можно отметить их почвозащитное значение в борьбе с деградацией почв, их роль в поглощении углерода и пр.

Следует учесть, что при создании промышленных лесных плантаций воспроизводится узкое генетическое разнообразие, поскольку ЛРМ для них часто формируют на уровне клонов. Это не несёт рисков при коротких «севооборотах» быстрорастущих пород, поскольку даже при сильном снижении генетического разнообразия создаваемой плантации риск неудачи не очень высок. При культивировании медленно-растущих видов, выращиваемых в длительных «севооборотах», сокращение генетического разнообразия создаваемой плантации увеличивает риск неудачи по неизвестным или неожиданным причинам, даже начиная со времени посадки. Этот риск дополнительно возрастает в случае переноса семян и в условиях изменения климата, главным образом за счет направленного отбора, и его следует учитывать представителям лесного бизнеса (см. раздел 5.4.4).

5.4.1. Промышленные плантации тополей

Интерес к тополи для создания высокопродуктивных плантационных насаждений связан с его быстрым ростом, способностью к вегетативному размножению, высокой приживаемостью, большим разнообразием видов, гибридов и сортов. Имеются исследования о возможности плантационного выращивания тополей в условиях полупустыни Астраханской обл. при орошении сточными водами [Царев, 1985; Царев и др., 2021б].

Сырье, выращиваемое на мини-ротационных плантациях, используют в следующих целях: получение щепы и пеллет для энергетических нужд, производство спичечной соломки, лекарственного сырья, веточного корма для скота; в химической промышленности – для изготовления винного спирта, шёлка, штапеля, кордовых волокон, целлофана и прочих изделий. Для создания мини-ротационных плантаций можно использовать бальзамические тополя и их гибриды как наиболее быстрорастущие в ювенильном возрасте виды. Черные тополя на мини-ротационных плантациях в ювенильном возрасте несколько уступают бальзамическим. Исследования показали, что средний выход фитомассы плантаций бальзамических тополей, созданных в условиях лесостепи при густоте посадки 20 тыс. шт./га, составляет 12 т/га в год. Максимальный выход отмечен при обороте рубки 2–3 года [Царев, Мироненко, 1997].

В видовой ассортимент миди-ротационных плантаций входят в основном чёрные тополя и некоторые межсекционные гибриды, которые к возрасту 6–10 лет догоняют и даже обгоняют по росту бальзамические. Тополя, выращенные на миди-ротационных плантациях, в 7–10 лет имеют высоту 11,5–19,7 м, диаметр – 16–29 см. По результатам многолетних испытаний, проведённых селекционерами ВНИИЛГИСБиотех, в группу перспективных из 84 изученных на Семилукском популетуме⁹⁸ клонов отобрано 11 лучших генотипов [Царев и др., 2010]. В ассортимент для миди-ротационных плантаций включены в основном евро-американские культивары (9 клонов), отечественный межсекционный гибрид ‘Э.с.-38’ и спонтанный гибрид тополь берлинский (табл. 5.2). Древесина тополей миди-ротационных плантаций может использоваться в целлюлозно-бумажной промышленности, строительстве, для химической переработки и в других производствах.

⁹⁸ Популетум – это испытательное насаждение тополей, созданное в соответствии с методикой полевого опыта с определенным числом повторностей и рандомизированным размещением растений.

Таблица 5.2. Динамика роста тополей Семилукского популутума, рекомендуемых для закладки миди-ротационных плантаций в лесостепной и степной зонах Воронежской обл.

Тополь	Инв. №	Средние показатели роста в зависимости от возраста, лет										Запас в 10 лет, м ³ /га
		Высота, м					Диаметр, см					
		7	8	9	10	7	8	9	10			
'Бахельери'	30	11,8	15,1	17,6	19,7	17	22	23	26	26	186	
'Вернирубенс'	54	13,0	15,8	17,1	19,2	18	21	22	26	240		
'Гельрика'	21,80	11,5	14,8	16,8	19,0	20	24	25	29	256		
'Брабантика175'	158	12,4	14,4	16,6	18,6	18	21	24	26	166		
'Брабантика176'	56	12,4	14,8	16,9	18,8	18	22	24	27	277		
'Каролинский'	162	12,2	14,7	16,5	18,9	18	21	22	24	182		
'Регенерата'	78,79	11,9	14,7	16,6	19,1	19	24	26	29	282		
'Робуста-236'	156	11,5	14,5	16,4	18,9	16	20	22	24	269		
'Сакрау-59'	161	12,3	15,3	16,2	17,8	17	19	21	23	173		
'Э.с.-38'	94	11,5	14,0	16,3	19,1	17	21	22	25	232		
Берлинский	130	10,5	13,4	15,5	17,8	16	19	21	23	166		
Среднее по рекомендуемым тополям		12,0	14,7	16,6	18,8	18	21	23	26	212		
Осокорь (контроль № 1)	131	10,2	12,2	14,0	15,6	14	20	21	22	72		
'Пионер' (контроль № 2)	42	11,0	13,3	15,1	16,7	16	19	21	22	119		

Для создания лонг-ротационных плантаций рекомендуются в основном деревья чёрного тополя с раскидистой формой кроны, включая евро-американские культивары, как наиболее быстрорастущие клоны. Сохранность рекомендуемых клонов тополей в возрасте количественной спелости древесины достаточно высокая (86%). Запасы древесины в 20-летнем возрасте в среднем составляли 423 м³/га. В 25 лет они существенно увеличились – до 613 м³/га. Запасы древесины на контрольном участке (местного тополя осокоря) в 20-летнем возрасте составляли всего 185 м³/га (табл. 5.3).

При создании лонг-ротационных плантаций тополя с оборотом рубки 11–20 лет и более необходимо тщательно подбирать участки, которые должны отличаться высоким плодородием, оптимальной влажностью и близкой к нейтральной реакцией среды (рН 6,8–7,2). Необходимо также отбирать перспективный ассортимент конкурентно способных культиваров, обеспечивать оптимальную технологию выращивания, своевременно и тщательно проводить уходы.

Таблица 5.3. Сохранность и продуктивность тополей Семилукского популетума, рекомендуемых для закладки лонг-ротационных плантаций в лесостепной и степной зонах Воронежской обл.

Тополь	Инв. No	Средний показатель			
		Сохранность, %		Запас древесины, м ³ /га	
		20 лет	25 лет	20 лет	25 лет
Волосистоплодный	83	100	96	342	428
‘Вернирубенс’	54	92	88	465	612
‘Гельрика’	21,80	88	79	535	824
‘Брабантика175’	158	63	63	352	512
‘Регенерата’	78,79	82	82	710	976
‘Робуста-236’	156	92	88	370	414
‘Э.с.-38’	94	100	100	405	641
Берлинский	130	88	88	371	570
Среднее по рекомендуемым тополям		88	86	423	613
Осокорь (контроль No 1)	131	54	50	185	218
‘Пионер’ (контроль No 2)	42	63	50	285	410

Древесина тополя, выращенная на лонг-ротационных плантациях, может использоваться в целлюлозно-бумажной промышленности с целью получения пиловочника, балансов, целлюлозы, бумаги и специальных бумажных изделий (салфетки, полотенца, картон и пр.). Она также может применяться в строительстве (бревна, доски, брусья, ДСП, ДВП, фанера, дрань для кровли), в химической промышленности и биоэнергетике [Царев, 2018].

5.4.2. Промышленные плантации хвойных деревьев на севере европейской части России

В России плантационное выращивание хвойной древесины слабо развито, но определенный опыт в этом направлении все же имеется. Ниже представлены некоторые итоги создания плантаций хвойных деревьев в Республике Карелии, Псковской и Ленинградской областях.

Лесные плантации Республики Карелии. В настоящее время лесная промышленность Республики Карелии обеспечивает два гиганта целлюлозно-бумажной промышленности – Кондопожский ЦБК (сульфитная варка ели) и Сегежский ЦБК (сульфатная варка сосны) – как собственным сырьем, так и поставками за счет привозной древесины. Со временем вопрос обеспечения ЦБК сырьём будет еще актуальнее. Наряду с неудачными плантационными посадками ели⁹⁹, в Карелии имеется успешный опыт плантационного выращивания сосны обыкновенной.

Культуры сосны обыкновенной созданы в Петрозаводском лесхозе в 1982–1984 гг. на площади 2,9 га по плантационному типу¹⁰⁰. В качестве посадочного материала использованы 1–2-летние сеянцы, выращенные в теплице базисного питомника Петрозаводского лесхоза. Первоначальное количество сеянцев сосны при схеме посадки 3 × 1 м составило 3 тыс. шт./га, при схеме 3 × 2 м – 1,5 тыс. шт./га. Почва супесчаная. В начале XXI в. было проведено обследование 3-х участков [Царев, Лаур, 2009; Лаур, 2012]. Результаты измерений, приведенные в табл. 5.4, показывают, что в 28–29-летнем возрасте запас культур сосны, созданных

⁹⁹ Балансовая плантация ели Пудожского лесхоза Республики Карелии, заложенная 1–2-летними сеянцами в 1981–1984 гг. на песчаной почве без гумусового слоя посадочным материалом неизвестного происхождения. Неудачный опыт показал, что при создании промышленных плантаций необходимы подбор соответствующих лесорастительных условий и использование селекционно улучшенного посадочного материала.

¹⁰⁰ Культуры созданы под руководством доцента СПбГЛТУ Ф.А. Чепика.

Таблица 5.4. Показатели культур сосны обыкновенной при разной густоте посадки в черничном типе леса (2009 г.)

№ участка	Год посадки	Схема посадки, м	Кол-во живых, шт./га	Средний диаметр, см	Средняя высота, м	Средний объем* ствола, м ³	Запас, м ³ /га	Средний прирост, м ³ /га/год
1	1982	3×2	697	20,5	14,0	0,22	154,3	5,14
2	1983	3×1	2 161	15,1	13,2	0,11	241,6	8,33
3	1987	3×1	1 526	13,3	10,0	0,07	105,9	4,24

* Видовое число при определении объема ствола $f = 0,47-0,50$; коэффициент формы $q = 0,67$

по плантационному типу при разной схеме посадки, составил 154,3 и 241,6 м³/га, что для условий Карелии высокопродуктивно. При более редкой посадке сосны (3 × 2 м) средний объем ствола составил 0,22 м³, что в 2 раза превышает объем ствола при более густой посадке (3 × 1 м) в том же возрасте. Также отмечено, что недостаток ухода (участок № 3) существенно влияет на прирост. Несмотря на минимум ухода (проведены прополка после посадки и рубки ухода в междурубьях), состояние культур удовлетворительное. Низкая приживаемость культур связана с отсутствием дополнения и естественным отпадом.

Балансовые плантации сосны можно закладывать с различной исходной густотой:

а) При посадке сосны по схеме 3 × 1 м (3 тыс. шт./га) к 30-летнему возрасту в черничниках можно получить запас до 240 м³/га. При этом средний диаметр деревьев составляет 15 см, средняя высота – 13 м. Необходимо проведение рубок ухода (рубка больших, отстающих в развитии или имеющих пороки деревьев). При отсутствии изреживания будет происходить естественный отпад деревьев. Культуры такого типа пригодны для выращивания древесины на биомассу в условиях низкоинтенсивного лесного хозяйства.

б) При более редкой посадке 3 × 2 м (1,5 тыс. шт./га) запас сосны на 1 га в том же возрасте на 36% ниже (154,3 м³ по сравнению с 241,6 м³). Но средний объем одного ствола в 2 раза больше (0,22 м³ по сравнению с 0,11 м³), что при дальнейшем выращивании позволит получать не только балансы, но и пиловочник.

Лесные плантации Ленинградской и Псковской областей. В 1975–1992 гг. СПБНИИЛХ были созданы опытные объекты с целью

изучения роста и продуктивности лесных плантаций сосны обыкновенной и ели обыкновенной в зависимости от методов их создания, первоначальной густоты, разной интенсивности разреживаний и комплексных уходов [Ковалев, 2005; Лесосырьевые плантации, 2008]. Например, опытные и опытно-производственные участки лесных культур сосны и ели II класса возраста были заложены по сходным технологиям в Балтийско-Белозёрском таежном лесном районе (лесной стационар «Орлинский», Ленинградская обл.) и в лесном районе хвойно-широколиственных (смешанных) лесов (лесной стационар «Дигонец», Псковская обл.).

Лесной стационар «Дигонец» площадью 12 га был создан на пахотных землях, вышедших из сельскохозяйственного оборота в конце 1930-х гг. Типы лесорастительных условий – кисличные и кислочно-черничные. Обработка почвы выполнена летом 1975 г. плугом ПЛО-400. Весной 1976 г. проведена посадка 4-летних (2+2) саженцев ели и 3-летних (1+2) саженцев сосны. Для выращивания сеянцев сосны и ели использовали местные семена нормальной селекционной категории.

Лесной стационар «Орлинский» площадью 11 га был заложен на бывшем осушенном закусаренном сенокосе. Лесорастительные условия – от разнотравных до травяно-таволжных. Обработка почвы проведена летом 1975 г. плугом ПЛО-400. Посадка осуществлена в мае 1976 г. 3-летними сеянцами ели, выращенными из местных семян нормальной селекционной категории.

Обследование этих участков плантационных культур позволило выявить закономерности, определяющие их устойчивость и получение максимального объема древесного сырья. Установлено, что механическая обработка почвы является эффективным технологическим приёмом, она обеспечивает высокую скорость роста лесных плантаций на протяжении 26 лет [Бутенко, 2008]. При посадке в плужные пласты в кисличных лесорастительных условиях ель быстро выходит из-под влияния травяного покрова. Внесение минеральных удобрений без ограничения развития травянистой растительности химическими методами мало сказывается на росте ели, поскольку почва богата элементами питания, которых достаточно для нормального роста и развития ели в течение первых 20–25 лет.

Оценивая влияние минеральных удобрений (100 кг/га аммиачной селитры) на динамику роста плантаций сосны, нужно отметить, что их внесение в первом 5-лети не сказалось на росте сосны как в высоту, так и по диаметру при всех режимах густоты (в вариантах без

ограничения развития травяного покрова гербицидами). В 15-летнем возрасте 2-кратное внесение минеральных удобрений вызвало увеличение среднего диаметра на 7–11%, запаса древесины – на 20–26 м³/га. Таким образом, в кисличных и кислично-черничных лесорастительных условиях богатство почвы обеспечивает сосну элементами питания в первые 15–25 лет и даже 2-кратное внесение аммиачной селитры не во всех вариантах опытов приводит к увеличению диаметра и запаса древесины [Ковалев и др., 2004].

Более значительное влияние на рост плантаций сосны и ели оказывает густота посадки. Опытные участки были заложены с разной густотой культур: 1 000, 2 000 и 4 000 шт./га (среднее расстояние между рядами 3,5 м, в ряду – 3,2 м, 1,6 м и 0,8 м соответственно).

В первое 5-летие достоверных различий в показателях роста сосны по вариантам исходной густоты не выявлено. Во втором 5-летию с увеличением густоты посадки от 1 тыс. до 4 тыс. шт./га средний диаметр снижается на 3–20%. В последующие 5 лет высота практически во всех вариантах густоты выравнивается, а диаметр с увеличением густоты уменьшается на 31–54%. Средняя высота насаждений в этом возрасте практически не реагирует на густоту древостоя. Площади сечения стволов и запасы древесины в вариантах с густотой посадки 2 тыс. и 4 тыс. шт./га выравниваются. В 26-летнем возрасте процесс выравнивания некоторых показателей роста культур между вариантами густоты посадки продолжается. В густых посадках отмечается интенсивный отпад деревьев в процессе самоизреживания, в редких культурах отпад растений не наблюдается. В 34-летних культурах (через 25–27 лет после разреживания) при количестве сохранившихся деревьев 0,88–2,5 тыс. шт./га площадь сечения стволов составляет 18,5–45,5 м²/га, запас древесины – 300–500 м³/га. Класс бонитета – Iа–II.

Закономерности, установленные в сосновых насаждениях, проявляются и в культурах ели, но в более сглаженном виде из-за биологических свойств породы. Конкуренция в культурах ели с густотой посадки 4 тыс. шт./га возникает уже в 10–15-летнем возрасте. Максимальные значения средней высоты и диаметра в этот период наблюдаются при исходной густоте посадки 1 тыс. шт./га. В вариантах с исходной густотой 2,0 тыс. шт./га эти показатели меньше на 6–18%, а при густоте 4 тыс. шт./га – на 11,5–43,9%. В густых культурах преобладают более тонкомерные деревья, усиливается процесс дифференциации деревьев. К 35 годам продолжается самоизреживание: при густоте 4 тыс. шт./га отпад составляет 22,7–42,4%, 2 тыс. шт./га – 3,4–33,6%,

а при густоте 1 тыс. шт./га – 2,2 %. На разреженных секциях отпад растений – 2,3–24,3%.

Изучение динамики пространственной структуры искусственных древостоев показало, что лучшие, хорошо сформированные деревья растут быстрее средних в 1,5–1,8 раза и производят в течение жизни древостоя 2/3 его общей биологической и древесной массы. Ранговый статус деревьев определяется в 8–10 лет, затем на уровне высокой (0,8–0,9) вероятностной детерминации устойчиво сохраняется [Лесосырьевые плантации..., 2008].

Жёсткая внутривидовая конкуренция при избыточной густоте сильно снижает влияние лесохозяйственных мероприятий. Негативное воздействие избыточной густоты проявляется тем раньше, чем быстрее и лучше растут культуры. Удаление отставших в росте и мешающих лидерам особей позволяет в процессе ухода сформировать интенсивно растущий древостой целевого назначения [Степаненко, 2013].

Для плантационных культур старше 11–12 лет разреживание особенно важно, но именно в этом возрасте оно редко выполняется из-за отсутствия коммерчески ценной древесины. В возрасте 15–25 лет максимальные значения диаметра ствола имеют культуры густотой до 2,0 тыс. шт./га. С увеличением густоты уменьшаются средние диаметры стволов, усиливается дифференциация и естественный отпад культур (сосновых меньше, чем еловых). В последующие годы происходит увеличение запасов разреженных древостоев до показателей продуктивности, соответствующих типу условий местопроизрастания [Степаненко, 2013]. К 25-ти годам средние запасы древесины на стационарах в вариантах опытов, рекомендуемых к внедрению в Ленинградской обл., по ели составляли 117 м³/га, по сосне – 147 м³/га, что соответствует показателям прогнозных таблиц хода роста плантационных древостоев и в 2,0–2,5 раза превышает запасы хвойных молодняков естественного происхождения [Лесосырьевые плантации..., 2008]. В 40-летних культурах ели средние запасы составляют 300 м³/га, сосны – 350 м³/га.

В настоящее время плантационные культуры сосны и ели в Псковской и Ленинградской областях по высоте в 1,5–2 раза превосходят аналогичные одновозрастные естественные древостои и производственные лесные культуры в схожих условиях произрастания.

При низкой густоте закладки лесных плантаций сосны и ели не обеспечиваются требуемое количество растений для отбора (деревьев-лидеров) при разреживании, а также исключается возможность

Таблица 5.5. Рекомендуемая густота плантационных культур в таежной зоне по возрастным этапам

Порода	Возраст, лет	Густота, тыс. шт./га*
Сосна	11–13	2,0–2,5
	21–25	1,5–2,0
	35–40	0,6–0,9
Ель	12–15	1,8–2,5
	25–30	1,5–2,0
	35–40	0,7–1,0

* Рекомендуемая густота по возрастным этапам для выращивания посадочного материала семян селекционной категории улучшенные и сортовые будет корректироваться.

коммерческого промежуточного пользования. Использование улучшенных и сортовых семян для выращивания посадочного материала для закладки лесных плантаций позволит снизить исходную густоту. В зависимости от густоты будет меняться и сбег ствола: в редких культурах заметна сильная сбежистость, с увеличением густоты она уменьшается. Реализация режимов оптимальной густоты на протяжении всего цикла выращивания древостоев сосны и ели (табл. 5.5) обеспечивает формирование основной массы древесины за счет деревьев с повышенной энергией роста.

Следовательно, при разреживании формируются более крупномерные деревья, а фитоценозы восстанавливают сомкнутость и продуктивность в соответствии с лесорастительными условиями. При этом будет формироваться высокопродуктивный древостой, однородный по размерам и качеству древесины.

Таким образом, определяющими факторами на этапе закладки плантационных культур сосны и ели являются обработка почвы и исходная густота посадки. Для закладки рассмотренных выше участков были использованы нормальные семена, при этом относительная разница в продуктивности насаждений, созданных из генетически улучшенных семян, по сравнению с опытными культурами могла бы достигать от 9 до 15%. Еще больший эффект при создании лесных плантаций ели (повышение на 35–40%) может дать применение технологии клоновой селекции для вегетативного размножения отобранных лучших генотипов.

5.4.3. Лесные плантации берёзы карельской

Берёза карельская – один из наиболее ценных и уникальных представителей аборигенной лесной дендрофлоры Северо-Запада России. Лесов берёза карельская не образует, произрастает одиночно или небольшими, как правило, изолированными друг от друга группами [Ветчинникова и др., 2013].

В России первые лесные культуры берёзы карельской были созданы в 1930-е гг. Н.О. Соколовым по инициативе академика В.Н. Сукачева Карелии. С 1949 г. эти работы проводились планомерно, хотя ежегодные объёмы до 1971 г. были незначительными. Для их увеличения в конце 1960-х гг. в Карелии были организованы специализированные хозяйства. Посев семян заменили на выращивание посадочного материала: сначала в открытом грунте, а с 1972 г. – с использованием полиэтиленовых теплиц [Ветчинникова и др., 2013; Ветчинникова, Титов, 2022б]. В результате к 1986 г. в Республике Карелии (табл. 5.6) площадь лесных культур берёзы карельской составила более 5,5 тыс. га [Щурова, 1992]. Однако лесные культуры берёзы карельской, созданные в Карелии в 1970–1980 гг. по принятым на тот период в лесном хозяйстве методикам без учета её биологических особенностей, не оправдали связанные с ними ожидания: в 2005 г. более 70% культур были оценены как неудовлетворительные [Лаур, 2012; Ветчинникова, Титов, 2021а]. Основные причины низкого качества созданных культур связаны с недостатком знаний о биологических особенностях породы, использованием семян от общего сбора со случайных деревьев, отсутствием своевременных и регулярных уходов, а также незаконными рубками, объём которых резко возрос в 1990-е гг. [Ветчинникова и др., 2013].

Таблица 5.6. Годы создания и площадь лесных культур берёзы карельской на территории Республики Карелии

Годы создания	Площадь, га
1934–1952	15,5
1953–1958	134,5
1959–1960	9,0
1961–1969	141,5
1970–1986	5 202,0
1987–2003	17,5
2004–2007	29,4
2008–2022	1,0
Всего	5 550,4

Положительные результаты были получены при плантационном выращивании берёзы карельской с использованием её семенного потомства, полученного в результате контролируемого опыления плюсовых деревьев между собой.

Анализ технологий воспроизводства карельской берёзы, применяемых как в России, так и за рубежом, позволил установить, что при создании её лесных плантаций необходимо использовать посадочный материал, полученный путем клонального микроразмножения и/или из семян в результате контролируемого опыления [Ветчинникова и др., 2013]. В настоящее время не менее 70% общего объёма производства посадочного материала берёзы карельской приходится на клональное микроразмножение. При создании искусственных насаждений необходимо обращать внимание на густоту посадки, так как при высокой плотности узорчатость в древесине проявляется слабо или может вообще отсутствовать [Ветчинникова, Титов, 2022б]. Эффективность интродукции зависит также от выполнения своевременных и регулярных уходов.

Следует подчеркнуть, что создание лесных плантаций берёзы карельской экономически оправданно, так как она является быстрорастущей породой, достигает возраста спелости в 20–30 лет. В ИЛ КарНЦ РАН на основе клонального микроразмножения разработаны и поддержаны патентами технологии, позволяющие за один вегетационный период выращивать посадочный материал с ЗКС высотой в среднем 0,8 м и более (в зависимости от генотипа) с сохранением уникальных признаков и свойств берёзы карельской [Ветчинникова, Кузнецова, 2017; Ветчинникова и др., 2018; Ветчинникова, Серебрякова, 2021]. Эти технологии значительно удешевляют процесс культивирования древесных растений *in vitro* и получения микрорастений. Эффективность создания плантаций берёзы карельской увеличивается при использовании земель, бывших в сельскохозяйственном пользовании, благодаря снижению затрат на подготовку почвы и проведение регулярных уходов [Ветчинникова и др., 2013; Ветчинникова, Титов, 2021в, 2022б].

Новые возможности открывают недавно полученные результаты молекулярно-генетических исследований, благодаря которым удалось вывить маркер «гена узорчатости» [Gubaev et al., 2024], позволяющий проводить прямую диагностику посадочного материала берёзы карельской на ранних стадиях её развития.

5.4.4. Вопросы пространственного размещения промышленных плантаций

Поскольку спрос на лесную продукцию и накопление углерода лесными насаждениями увеличивается, ожидается, что объёмы посадки лесных плантаций также будут возрастать. Учитывая расширение

практики создания промышленных плантаций, необходимо понимать, какие факторы влияют на вероятность того, где будут создаваться такие плантации. Потенциальное их распределение в ближайшие десятилетия будет определяться политической и рыночной конъюнктурой, а также необходимостью их генетической изоляции от естественных насаждений (в случае использования для создания плантаций генетически обеднённого сортового материала).

Лесное законодательство Российской Федерации допускает создание лесных плантаций на землях лесного фонда. Научно разработанной стратегии или рекомендаций по их размещению на территории России не разработано. Отечественная плантационная экономика в настоящее время находится на начальной стадии своего развития, отдельные публикации носят отрывочный характер, на уровне постановки проблемы [Шутов и др., 1984, 2007; Желдак, 2013]. Можно выделить следующие предпосылки для принятия решения по размещению промышленных плантаций:

Лесоводственные: выбор древесных пород с генетической предрасположенностью к быстрому росту (или иным свойствам) и соответствующих им мест произрастания (макро- и мезорельеф, климат, плодородие и водный режим почвы и др.).

Экономические: величина арендной платы за право пользования лесным участком, единовременных и текущих затрат, расчётная прибыль от реализации конечной продукции, транспортная инфраструктура, перерабатывающие мощности, рынки сбыта продукции и др.

Социальные: квалифицированная рабочая сила, средняя заработная плата в регионе, объекты социальной инфраструктуры и др.

Экологические: возможные последствия трансформации лесов после создания монокультур, внесения удобрений, снижение биологического разнообразия и экосистемных функций лесов, а также поступления углерода в почву и др.

Юридические: разработка нормативов и правил плантационного выращивания и размещения промышленных плантаций и др.

Земли лесного фонда находятся в федеральной собственности. Для создания лесных плантаций и их эксплуатации лесные участки из состава земель лесного фонда гражданам и юридическим лицам предоставляются в аренду согласно Лесному кодексу РФ. Следовательно, юридическим основанием для размещения на той или иной территории промышленных плантаций является договор аренды лесного участка, предоставленного для плантационного выращивания.

Аренда лесных участков – разновидность предпринимательской деятельности, преследующая получение прибыли, следовательно, любой предприниматель будет стремиться к сокращению текущих и единовременных затрат, связанных с созданием, уходом и эксплуатацией лесных плантаций, поиском рынков сбыта продукции. При этом ключевым аргументом лесного бизнеса является то, что пространственное размещение промышленных плантаций должно отвечать требованиям минимальных транспортных расходов потребителя или переработчика соответствующих ресурсов. Соответственно, местоположение лесного участка, планируемого для создания промышленных плантаций, за счёт которых будет обеспечено получение древесины и иных продуктов с заданными характеристиками, должно быть максимально приближено к местам их потребления. Создание в России новых лесоперерабатывающих мощностей, ориентированных только на промышленные плантации, в настоящее время маловероятно. Следовательно, при решении вопроса оптимизации размещения промышленных плантаций лесной бизнес ориентируется на имеющиеся деревообрабатывающие мощности, целлюлозно-бумажные комбинаты и пр.

Экономическим обоснованием для размещения на той или иной территории промышленных плантаций с точки зрения бизнеса является превышение конечных экономических результатов – цены – над единовременными и текущими затратами, связанными с созданием, уходом и эксплуатацией промышленных плантаций. В настоящее время в отсутствие разработанной стратегии или рекомендаций по размещению промышленных плантаций на территории России основными факторами, влияющими на решение лесного бизнеса вложить в этот вид деятельности свои капиталы, являются наличие свободных лесных участков, производственных мощностей, рабочей силы и разработанных правовых оснований.

Таким образом, для принятия на государственном уровне решения по размещению промышленных плантаций необходим анализ всего комплекса вышеперечисленных факторов. Однако государственный, стратегический подход требует, прежде всего, разработки для каждого вида деревьев, которые планируются к промышленному плантационному лесовыращиванию, научно обоснованного отбора площадей, возможных для размещения промышленных плантаций, во избежание снижения устойчивости лесных экосистем России в целом [Семериков и др., 1998; Горошкевич, Крутовский, 2017].

Представители как лесного бизнеса, так и лесной администрации, которая дает разрешение на размещение лесных промышленных плантаций, недостаточно осведомлены о потенциальных угрозах, которые несут такие насаждения, и не учитывают, что в силу природы лесных репродуктивных материалов, которые используют для их создания (искусственные семена клонального микроразмножения, вегетативные потомки отселектированных продуктивных генотипов, отобранный элитный семенной материал и пр.), для таких насаждений будет характерен очень низкий уровень генетического разнообразия. Сорта и ценные генотипы лесных древесных растений используются для ускоренного получения заданного количества нужных продуктов в условиях лесосырьевых плантаций, создаваемых в лучших лесорастительных условиях и при соответствующих уходах, компенсирующих их сниженную устойчивость к лимитирующим факторам. В этой связи принципиальное значение имеет не число клонов на плантациях, а генетическая изоляция плантационных сортовых лесов от естественных насаждений. Создание промышленных плантаций может привести к потере генетического разнообразия соседних локальных популяций, вызывая генетическую эрозию, что подразумевает потерю отдельных аллелей, изменение их частоты внутри локальных популяций насаждений лесообразующих видов, произрастающих рядом с лесными промышленными плантациями [Quiñones-Pérez et al., 2017]. Стратегический подход требует устойчивого и неистощительного ведения лесного хозяйства, которое подразумевает в том числе постоянные усилия для сохранения популяционных генофондов основных лесообразующих пород России [Динамика..., 2004].

Оптимальное пространственное размещение промышленных плантаций должно быть научно обосновано, в частности, исходя из доли площадей наивысших классов бонитета, пригодных для интенсивного лесопользования [Семерилов и др., 1998; Онучин и др., 2012], и возможностей изоляции промышленных плантаций (сортовых насаждений) от естественных популяций вида. Решение данной задачи необходимо совместить с разграничением функций продукционных лесов и генетических резерватов, определением соотношения их площадей для стабильного воспроизводства генетической изменчивости каждого древесного вида при сочетании естественного и безопасного для генофонда искусственного воспроизводства.

Таким образом, хотя проблема создания промышленных плантаций в России на конкретных территориях имеет локальный коммерческий

характер, но её решение невозможно без научно обоснованного пространственного планирования и, соответственно, требует участия органов государственной власти, принимающих политические, стратегические и управленческие решения в лесной отрасли.

5.4.5. Ключевые итоги опыта создания промышленных плантаций

В России идеи плантационного лесовыращивания сдерживаются широко распространенным представлением о неисчерпаемости запасов древесины. Поэтому лесные плантации не получили широкого распространения в стране. Россия действительно имеет обширную покрытую лесом площадь, тогда как запасы древесины, доступные для эксплуатации по экологическим и экономическим обстоятельствам, невелики [Шутов, Жигунов, 2008]. Однако неизбежное в современных условиях развитие лесопромышленной деятельности должно сопровождаться, по нашему мнению, организацией промышленного производства деловой древесины на лесосырьевых плантациях повышенной продуктивности с сокращенными оборотами рубки.

Сопоставление показателей роста плантационных культур с нормативными затратами на их производство позволяет сделать вывод, что, несмотря на 1,5–2-кратное увеличение стоимости закладки таких культур, экономическая эффективность производства возрастает из-за положительного взаимодействия комплекса используемых лесохозяйственных мероприятий, каждое из которых усиливает действие друга [Маркова, Жигунов, 2003].

Исследования мини-, миди- и лонг-ротационных плантаций тополей, осин и других лиственных пород в Центральной России, полупустыне и некоторых северных регионах европейской части страны показали положительные результаты в получении древесины различного целевого назначения. Использование отселектированного материала (быстрорастущее семенное потомство плюсовых деревьев, лучшие гибриды и сорта) позволит повысить производительность плантаций лесных древесных растений и получить более высокий результат на единицу площади в единицу времени.

Например, перспективно выращивание плантационных культур сосны на юге Карелии: запас в 30-летнем возрасте в черничном типе леса достигает 241,6 м³/га. Для сравнения: в этом регионе запас 220–260 м³/га наблюдается при полноте 0,7 в 60-летних сосняках I класса бонитета, 80-летних сосняках II класса бонитета или 100-летних

сосняках III класса бонитета. На опытных участках лесных плантаций сосны и ели в Ленинградской и Псковской областях к 40-летнему возрасту формируются однородные по составу, производительные (Ia класс бонитета), высокополнотные древостои. Под влиянием лесоводственных мероприятий структура древостоев и их таксационные показатели значительно отличаются от таксационных показателей естественных древостоев, а также рядовых производственных лесных культур. Варьирование исходной густоты закладки лесных плантаций сосны и ели к 35-летнему возрасту обуславливает большое различие по запасу – от 270 до 532 м³/га. Наибольшие запасы приходятся на исходную густоту 4 тыс. шт./га, наименьшие – на 1 тыс. шт./га. Анализ полученных данных свидетельствует о том, что для получения в России балансовой древесины в 40-летнем возрасте оптимальной следует считать густоту древостоя 1,5–2 тыс. шт./га для ели и 1,0–1,2 тыс. шт./га для сосны. При этом будет сформирован высокопродуктивный древостой, однородный по размерам и качеству древесины.

В то же время необходимо помнить, что для сохранения генетического разнообразия и устойчивости соседних локальных популяций, сохранения популяционных генофондов лесобразующих пород России необходима разработка научно обоснованной стратегии оптимального пространственного размещения промышленных плантаций.

5.5. Кедровые плантации и кедросады

По разнообразию полезных свойств сосна кедровая сибирская (кедр сибирский) превосходит все лесные породы России. Этот вечнозелёный исполин сибирской тайги не только даёт уникальную древесину, но и имеет высокую пищевую ценность и широкий спектр целебного воздействия. Кедровые орехи – экономически важный ресурс России и востребованный продукт экспорта, который в настоящее время стал дефицитным и дорогостоящим товаром при неограниченном спросе. В редкие урожайные годы объем орехозаготовок в стране не превышает 1–3(10) тыс. т вместо регулярно заготавливаемых 15–20 тыс. т.

Ускоренное массовое, регулярное и рентабельное производство кедрового ореха связано с созданием надёжной орехопромысловой базы на качественном новом уровне, на генетико-селекционной и сортовой основе путем: 1) формирования кедровых лесосадов (кедросадов) из кедровых и кедрово-лиственных молодняков; 2) закладки прививочных высокоурожайных орехопродуктивных плантаций.

Технологии создания объектов орехопроизводства основаны на биологии формирования высоких урожаев кедровых орехов с учетом биоэкологии и физиологии репродуктивных органов кедрового сибирского, половой специализации растений, эффекта репродуктивного взаимодействия биологически разнокачественных организмов, возрастной специфики формирования женского генеративного яруса кроны, что обеспечивает максимальную реализацию потенциальной семенной продуктивности генотипов в предлагаемых условиях.

Кедросады. Раннее осветление позволяет деревьям кедрового сибирского (на 30–40 лет) ускорить начало плодоношения, быстрее достичь максимальной семенной продуктивности и полнее использовать свои потенциальные биологические возможности. В своевременно осветлённых кедровых молодняках у деревьев формируется низкоопущенная, хорошо развитая крона с большой протяженностью плодоносящего яруса. При интенсивности рубки в молодом возрасте 80–90% по запасу и 60–80% по числу стволов, т.е. при полном освобождении от затенения, кедровые деревья в течение 2–3 лет адаптируются к изменяющимся условиям [Поликарпов, 1985]. Среднегодовой прирост в высоту осветлённых деревьев увеличивается в 1,5–2,0 раза, а их диаметр в 2–3 раза больше, чем в неосветленных насаждениях; объем кроны возрастает в 2–3 раза, общая масса хвои – в 3–4 раза [Коловский, 1965]. Это доказывает, что в кедрово-лиственных молодняках целесообразны и эффективны одноприёмные рубки высокой интенсивности.

С учётом этих биологических особенностей породы селекционными рубками ухода целесообразно формировать высокоурожайные кедровые лесосады из доступных, произрастающих в наиболее продуктивных (II–III класс бонитета) лесорастительных условиях 10–30(40)-летних кедровых и кедрово-лиственных молодняков с участием кедрового сибирского в составе 5 ед. и более. Цель проведения мероприятий – создание благоприятных условий для их плодоношения и роста, формирования хорошо развитой кроны у перспективных деревьев.

При осветлении в первый прием (в 10–20 лет) проводят интенсивное изреживание. В смешанных кедрово-лиственных молодняках вырубают все сопутствующие породы и худшие по развитию кроны кедровые, интенсивность рубки – 70–80% по числу стволов. В чистых кедровниках удаляют не перспективные для плодоношения особи. На 1 га оставляют 400–500 кедров с протяженностью кроны не менее 40–70% высоты ствола, желательного равномерно размещённых на площади, сомкнутость – 0,3–0,4 [Титов, 2019].

Через 8–10 лет проводят второй прием, который обеспечивает создание благоприятных условий для формирования кроны у лучших деревьев и регулярное равномерное размещение их по площади. На 1 га оставляют 250–300 деревьев кедра [Данченко, Бех, 2010]. В это время начинают плодоносить достигшие генеративного возраста осветлённые деревья. Урожай орехов на 1 га достигает 40–80 кг [Титов, 2019].

Еще через 8–10 лет проводят селекционную рубку – отбирают на дорастивание лучшие по урожайности и пыльцевой продуктивности деревья в количестве 150–160 шт./га, что соответствует показателям орехопродуктивной плантации [Титов, 2012]. Надёжное семеношение кедра сибирского обеспечивается в результате репродуктивного взаимодействия биологически разнокачественных особей [Титов, 2004]. Поэтому в формируемых кедросадах для получения высоких урожаев необходимо оставлять вместе с высокоурожайными деревьями небольшое количество среднеурожайных деревьев-опылителей в соотношении 6:1...5:1.

Через 15–20 лет после окончания осветления, к 50–60-летнему возрасту деревьев, в сформированных рубками ухода насаждениях промышленный урожай может достигать средних показателей спелых 161–200-летних таежных кедровников (160–200 кг/га). К 100 годам достоверно прогнозируется его рост до 300–500 кг/га [Поликарпов, 1985].

В насаждениях, достигших возраста прореживания (41–80 лет), ранее не пройденных рубками ухода, проводят селекционные рубки стимулирования семеношения. Их цель – создание благоприятных условий для максимальной реализации урожайности у перспективных деревьев [Ирошников, 1985; Титов, 2021]. В первый прием удаляют полностью все второстепенные породы и худшие, низкоурожайные кедр: до 70–80% по числу стволов или 80–90% по запасу. На 1 га оставляют 400–500 деревьев кедра, в том числе 300–400 высокой и повышенной урожайности, 100 – среднеурожайных, равномерно размещённых по площади, с протяжённой общей кроной и хорошо развитым женским генеративным ярусом (с большим количеством плодоносящих побегов), занимающим соответственно не менее 60 и 40% высоты ствола. Для достижения потенциально возможного объема женского генеративного яруса у перспективных деревьев через 5–7 лет проводят второй прием рубок ухода, чем завершают селекционный отбор лучших по семеношению и пыльцевой продуктивности деревьев. На корню оставляют 150–160 шт./га лучших особей, в том числе 120–130 шт. высокой

и повышенной урожайности, 20 шт. среднеурожайных, в соотношении 6:1, равномерно размещенных на площади.

К 90–100 годам в кедросадах достоверно прогнозируется повышение урожая орехов не менее чем в 1,7 раза: на отдельных деревьях – до 2,5–3,5 кг в среднеурожайные годы и до 4–6(8) кг в высокоурожайные. К 100 годам рост промышленного урожая достигает 300–500 кг/га [Поликарпов, 1985]. Общая семенная продуктивность – 750–1 000 кг/га.

Прививочные кедровые орехопродуктивные плантации. Главное назначение таких плантаций – массовое получение пищевого и товарного ореха, а не селекционная работа по улучшению вкусовых качеств семян. Поэтому на них размещают небольшое количество клонов (6–8 шт./га). Повышенная вероятность близкородственных скрещиваний не оказывает существенного влияния на качество ореха.

Постоянная лесосеменная база для плантационного ореховодства кедра сибирского стала формироваться в России с 1991 г. с началом выполнения государственной программы «Кедр». Почти 40-летняя работа по селекции кедра сибирского на семенную продуктивность дала выдающийся результат: выявлены и зарегистрированы в качестве сортов-клонов два высокоурожайных сорта кедра сибирского – ‘Кедроградский’ и ‘Романтик’¹⁰¹. Эти сорта – основа для создания элитных высокоурожайных промышленные орехопродуктивных плантаций. Их использование может обеспечить создание прибыльных целевых хозяйств, являясь инновационным решением.

Разработаны научные основы создания орехопродуктивных плантаций кедровых сосен [Титов, 2004, 2021]. Технологический процесс создания прививочных кедровых орехопродуктивных плантаций включает выполнение следующих основных этапов: выбор участка и организация территории, обработка почвы, подбор, размещение и смешение клонов, получение привитого посадочного материала, посадка привитых саженцев, уход за плантацией. На плантации используют два типа клонов: 1) отселектированные по семенной продуктивности и ритмике семеношения высокоурожайные генотипы-клоны и 2) клоны среднеурожайных плюсовых деревьев с хорошими товарными признаками семян (крупношишечные, многосемянные, крупносемянные), с высокой пыльцевой продуктивностью и оплодотворяющей способностью, развивающиеся синхронно с высокоурожайными

¹⁰¹ Реестр селекционных достижений Госсорткомиссии: род, вид – сосна кедровая сибирская. Селекционное достижение – 54971/8953669 КЕДРОГРАДСКИЙ и селекционное достижение – 54970/8953668 РОМАНТИК.

генотипами. Их состав и размещение на плантации определяется с учётом физиологической разнокачественности (половой специализации), эффекта репродуктивного взаимодействия особей различной сексуальности, биоэкологии развития генеративных органов, дальности разлёта основной массы пыльцы, избирательности оплодотворения и других факторов [Ефимов и др., 1980; Минина, Ларионова, 1979; Титов, 1998, 2004, 2018, 2021].

Размещение клонов на плантации должно обеспечить эффективное переопыление, гарантирующее максимальный биологически возможный выход полнозернистых семян из шишки. Установлено, что при опылении высокоурожайных деревьев среднеурожайными, их семенная продуктивность в 80% наблюдений была в среднем на 30% выше, чем при переопылении с высокоурожайными [Титов, 2006]. Поэтому для получения высоких урожаев на орехопродуктивной плантации, при отсутствии естественных источников пыления, необходимо размещать клоны различного полового типа и урожайности: высоко- и среднеурожайные. Сроки цветения высокоурожайных генотипов (клонов) должны совпадать со временем пыления клонов-опылителей. Размещение клонов – рядами, смещение – регулярное. Преимущество такого чередования не только в надёжной обеспеченности пыльцой опыляемых клонов, но и в эффекте репродуктивного взаимодействия разнокачественных по типу сексуализации генотипов.

Представительство клонов-опылителей на плантации зависит от источников естественного опыления – прилегающих стен леса или отдельных взрослых деревьев кедра сибирского. В районах кедровых лесов, на участках вблизи них, на плантации высаживают преимущественно высокоурожайные привои. При их отсутствии в естественном ареале породы и в районах успешной её интродукции необходимо в непосредственной близости с высокоурожайными размещать среднеурожайные клоны-опылители в соотношении 3:1 или 4:1.

С учетом особенностей развития кроны у свободностоящих деревьев кедра сибирского рекомендуется на орехопродуктивных плантациях в зоне экологического оптимума вида размещать привитые деревья в ряду и между рядами по схемам 8×8 , 8×10 , 10×10 м (100–150 шт./га). В подзонах хвойно-широколиственных лесов, южной тайги европейской части России и в близких к ним по природно-климатическим условиям регионах Западной Европы – 7×7 м (200 шт./га) или 7×6 м (240 шт./га). На плантации прививают клоны, отобранные из одного географического района или высотно-экологического подпояса.

Плантации создают по определенной схеме посадкой 7–9-летних привитых саженцев или прививкой ценных генотипов на ранее высаженные кедровые подвои. Установлена ускоренная и повышенная репродуктивная способность клонов на возрастном (13–17-летнем) крупном (высотой до 1,7 м) подвое кедрового сибирского по сравнению с 6–10-летними [Матвеева и др., 2007; Титов, 2018].

Первый промышленный урожай семян (70–100 кг/га) на орехопродуктивной плантации формируется в 10–14-летнем возрасте привоев, в 20 лет он достигает 150–200, в 25 – 230–310, в 30 – 320–400 кг/га, при использовании сортов-клонов – 500–600 кг/га [Титов, 2021], в высокоурожайные годы – 1 225 кг/га [Земляной, 2010] и возрастает в дальнейшем. Урожайность 30-летних плантаций сопоставима с показателями высокоурожайных 140–180-летних припоселковых кедровников (250–450 кг/га). По сравнению с ними максимальное семеношение на плантациях наступает на 20 лет раньше, в 60–100 лет.

Большая концентрация отселектированных по семенной продуктивности генотипов-клонов и сортов-клонов из высокопроизводительных кедровников позволяет получать на орехопродуктивных кедровых плантациях высокие промышленные урожаи кедровых орехов (180–240 кг/га) уже к 20-летнему возрасту, т.е. на 20–30 лет раньше, чем в кедросадах.

В России имеются все условия для создания кедровых лесосадов и орехопродуктивных плантаций. География создания орехопродуктивных кедровых плантаций обширна. На основе лесорастительного районирования С.Ф. Курнаева (1973) разработана очередность закладки орехопродуктивных кедровых плантаций [Титов, 2012]. Постоянная лесосеменная база кедрового сибирского России включает: а) более 1 000 шт. плюсовых деревьев, отобранных в различных регионах, от Республики Коми до Иркутской обл., из них в Республике Алтай, зоне экологического оптимума породы – 406 шт., в том числе 242 шт. – по семенной продуктивности; в Красноярском крае, Хакасии, Республике Тыва – по 200–220 шт. [Матвеева, Буторова, 2000]; б) более 120 га клоново-испытательных плантаций и архивов клонов плюсовых деревьев, в том числе в Республике Алтай – 92 га; в) более 50 шт. генотипов-клонов, отселектированных по семенной и пыльцевой продуктивности в Республике Алтай, 5 сортов и кандидатов в сорта-клоны по семенной продуктивности [Титов, 2021].

Использование ценного генофонда кедрового сибирского и современных биологически обоснованных технологий плантационного

и таёжного ореховодства позволит за 30–40(50) лет создать в России надёжную высокопродуктивную базу орехозаготовок (10–12 тыс. т кедрового ореха), снизить их себестоимость и приступить к промышленному производству кедрового масла. При ежегодной закладке отселектированным материалом в течение 20 лет по 1 000 га прививочных плантаций, кедровых лесосадов и припоселковых кедровников и проведении интенсивных селекционных рубок ухода через 20 лет промышленный урожай кедровых орехов на этих рукотворных объектах составит не менее 1–1,5 тыс. т, достигнув к 30 годам 3–4 тыс. т, к 40 – 6–7 тыс. т, к 50 – 10–12 тыс. т, возрастая в дальнейшем. Затраты на формирование кедросадов в первом десятилетии полностью окупаются за один урожайный год второго десятилетия [Поликарпов, 1985]. Затраты на создание плантаций при реализации неочищенного кедрового ореха окупаются через 24–27 лет, очищенного ядра – через 14–17 лет, кедрового масла и жмыха – через 13–15 лет [Титов, 2021].

5.6. Лесные генетические ресурсы в условиях радиоактивного загрязнения

Авария на Чернобыльской АЭС стала первой в истории мировой атомной энергетики тяжёлой аварией с длительным и масштабным выбросом радиоактивных веществ в окружающую среду. Площадь загрязнённых лесных территорий в СССР в 1986 г. оценивалась более 1,5 млн га. По состоянию на 2020 г. площадь российских лесов с плотностью загрязнения почвы выше 1 Ки/км² составляла 662 тыс. га [Российский..., 2021].

Через почти 40 лет после аварии наиболее серьёзную проблему представляет радиоактивное загрязнение лесов Брянской обл., где до сих пор сохраняются участки с высокой плотностью загрязнения почвы. В отдельных районах области плотность загрязнения почвы ¹³⁷Cs превышает 100 Ки/км², тогда как законодательно установлено, что загрязнение лесных территорий ¹³⁷Cs свыше 1 Ки/км² требует принятия защитных мер по радиационной безопасности¹⁰². Помимо Брянской обл. небольшие участки с уровнем загрязнения 15–40 Ки/км² сохраняются в Калужской обл. В Тульской, Белгородской и Курской областях встречаются локальные участки с уровнем 5–15 Ки/км².

¹⁰² Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 08.06.2017 № 283 «Об утверждении особенностей осуществления профилактических и реабилитационных мероприятий в зонах радиоактивного загрязнения лесов».

Основная масса работ по изучению действия ионизирующего излучения была выполнена на территориях с высокими уровнями радиоактивного загрязнения в первые 5–10 лет после радиационных аварий. Эти исследования показали, что генетические эффекты радиационного поражения на популяции древесных растений проявляются не только в увеличении темпов мутирования, но и в изменении структуры популяции [Динамика., 2004]. Несмотря на значительный прогресс в понимании процессов формирования радиобиологической реакции в ответ на острое облучение (видом-индикатором для изучения служит в основном сосна обыкновенная), воздействие хронического низкодозового облучения остается малоисследованным. Наиболее существенными последствиями хронического облучения являются снижение репродуктивной функции организмов, а также изменение генетической структуры популяций. Это было показано в многочисленных исследованиях на Восточно-Уральском радиоактивном следе и в зоне аварии на Чернобыльской АЭС [Дубинин, Кальченко, 1984; Кальченко и др., 1991; Шевченко и др., 1996; Федотов и др., 2006; Geras'kin, Volkova, 2014; Volkova et al., 2018].

Выявлено достоверное увеличение цитогенетических нарушений в условиях хронического радиационного воздействия наряду с возрастанием мутаций изоферментных локусов [Федотов и др., 2006; Гераськин и др., 2009, 2010; Волкова, Гераськин, 2012]. Однако проведенный аллозимный анализ не даёт информацию об изменчивости всего генома, так как опосредованно анализирует лишь его кодирующую часть.

Анализ ДНК-полиморфизма, в связи с разработкой новых методов ПЦР-анализа и использованием молекулярно-генетических маркёров, позволяет значительно расширить и углубить понимание адаптации популяций к радиационному воздействию. Подобные исследования создают реальную основу для прогнозирования отдалённых популяционно-генетических последствий хронического облучения, прогнозирования характера индуцированной микроэволюции. Тем не менее в случае применения неспецифических маркёров определить степень воздействия радиации не представляется возможным.

Метод AFLP обладает гораздо большей воспроизводимостью, чем неспецифические маркёры. Было показано, что в природных популяциях сосны обыкновенной, испытывающих хроническое облучение в районе Чернобыльской аварии, воздействие радиации статистически значимо увеличивает частоту мутаций в AFLP-локусах – в 3,5–3,8 раза по сравнению с контрольной группой [Kuchma, Finkeldey, 2011].

В другом исследовании популяций сосны обыкновенной Брянской и Гомельской областей при хроническом радиационном воздействии с ростом годовой поглощённой дозы была обнаружена тенденция к увеличению числа полиморфных AFLP-локусов [Volkova et al., 2018]. Среднее генетическое разнообразие на локус по Неи статистически значительно превышало контрольный уровень на радиоактивно загрязнённых участках. Основной пул мутаций составляли нулевые варианты, частота которых была в 1,4–7,5 раза выше, чем мутаций, изменяющих электрофоретическую подвижность. В свою очередь, частота мутаций, изменяющих электрофоретическую подвижность, в облучаемых популяциях в 1,5–2,8 раза выше, чем в контроле. Исследуемые популяции при анализе генетических расстояний между ними разделяются на два географических кластера, в пределах которых экспериментальные участки чётко подразделены по уровням радиационного воздействия. Однако использование метода AFLP для целей обнаружения мутационных событий ограничено сложной многостадийной технологией анализа, к тому же метод очень требователен к количеству и качеству исследуемых образцов ДНК [Kuchma, Finkeldey, 2011]. Опасность мутагенного действия радиоактивных веществ состоит в том, что увеличение частоты соматических мутаций и снижение жизнеспособности особей может проявляться не только в поколении, подверженном действию поллютантов, но и в последующих поколениях, и выражается в том числе ранней гибелью особей.

Наиболее перспективным методом анализа представляется микросателлитный анализ [Vornam et al., 2004], поскольку вследствие кодоминантности микросателлитов, для которых характерно высокое аллельное разнообразие и гетерозиготность, легко выявляются все гомо- и гетерозиготные генотипы. Высокий уровень полиморфизма делает анализ экономически эффективным, поскольку выход информации с учетом затраченных средств и усилий получается весьма высоким. Методом SSR-анализа был проведен поиск соматических мутаций в хвое сосны обыкновенной, произрастающей в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС [Kuchma et al., 2011]. Для анализа были использованы 9 полиморфных ядерных микросателлитных (SSR) локусов. Обнаруженные соматические мутации были подтверждены секвенированием полученных фрагментов.

Большой интерес представляет исследование передачи наследственного материала семенному потомству. Особенности репродуктивной биологии хвойных позволяют обнаружить наследуемые мутации

через генеративную систему в процессах мейоза, опыления и развития зародыша. По результатам фрагментного анализа частота мутаций на контрольном участке составила 0,003, на участке среднего уровня радиоактивного загрязнения – 0,016, а на участке высокой степени радиоактивного загрязнения ^{137}Cs – 0,031 (включая подтверждённые случаи отсутствия амплификации материнского аллеля в мегагаметофите и зародыше одного семени по определенным локусам, которые на контрольном участке не наблюдались) [Krutovsky et al., 2016]. Высокий уровень мутагенеза может оказывать негативное влияние и приводить к снижению средней приспособленности популяций. В то же время повышенные частоты мутаций могут быть основой адаптации растений к хроническому радиационному воздействию.

Исследования деревьев сосны обыкновенной, переживших радиационную аварию, показали тенденцию к увеличению генетической и фенотипической изменчивости популяций в процессе адаптации к умеренному стрессу [Mengoni et al., 2000; Slomka et al., 2011; Geras'kin et al., 2013]. Биологические последствия наблюдаемых изменений все ещё остаются предметом обсуждения. При исследовании генетического полиморфизма второго поколения деревьев средние значения основных показателей генетического разнообразия свидетельствуют о недостаточно высоком его уровне у потомства [Ромашкина, 2024]. В ходе анализа полученных данных было отмечено уменьшение аллельного разнообразия при передаче наследственного материала потомству деревьев, испытывающих хроническое радиационное воздействие, при этом отмечалось значительное снижение биологической устойчивости насаждений.

При изучении генетических процессов в популяциях сосны на радиоактивно загрязнённых территориях отмечали также эпигенетическую изменчивость [Zelena et al., 2005] и гиперметиляцию генома [Volkova et al., 2018; Bondarenko et al., 2023]. Анализ транскриптома показал чёткую картину адаптивной реакции на стресс, которая, по-видимому, зависит от дозы загрязнения. Транскрипционный ответ свидетельствует о постоянной модуляции клеточной редокс-системы, усилении экспрессии шаперонов и гистонов, а также о контроле баланса ионов [Duarte et al., 2019].

При изучении механизмов адаптации растений к выживанию в условиях радиоактивного загрязнения обнаружили более чем в 10 раз пониженный уровень рекомбинации и высокий уровень метилирования генома, что в совокупности позволяет растениям снизить уровень

нежелательных перестроек генома [Kovalchuk et al., 2003, 2004]. При этом на наиболее загрязнённых участках наблюдается увеличение концентрации антиоксидантов и более высокий уровень окислительного стресса по сравнению с контрольными участками [Geras'kin, Volkova, 2014].

Особенностью радиоактивного загрязнения лесов являются относительно медленные скорости снижения содержания радиоактивного цезия в ряде компонентов лесной биоты. В этой связи для загрязнённых территорий актуальными являются также вопросы, связанные с получением нормативно-чистой лесной продукции, обеспечением радиационной безопасности в лесах и предотвращением вторичного загрязнения вследствие лесных пожаров и других природных и антропогенных процессов [Раздайводин, Марадудин, 2014].