

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
Уфимский федеральный исследовательский центр Российской академии
наук (УФИЦ РАН)

Институт биохимии и генетики – обособленное структурное
подразделение Федерального государственного бюджетного научного
учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской
академии наук (ИБГ УФИЦ РАН)

На правах рукописи

МИНЕЕВ ЯКОВ ПАВЛОВИЧ

**МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ОСНОВЫ СОВМЕСТНОГО КУЛЬТИВИРОВАНИЯ
МИКОРИЗНОГО ГРИБА GLOMUS INTRARADICES НА
ВОЛОСОВИДНЫХ КОРНЯХ**

03.01.03 – молекулярная биология

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

Уфа – 2025

Работа выполнена в Институте биохимии и генетики - обособленном структурном подразделении Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук.

Научный руководитель: – **Кулуев Булат Разяпович**
доктор биологических наук, заведующий лабораторией геномики растений Института биохимии и генетики - обособленном структурном подразделении Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук.

Рецензенты: – **Цветков Вячеслав Олегович**
кандидат биологических наук, доцент кафедры биохимии и биотехнологии биологического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения Высшего образования «Уфимский Университет Науки и Технологии»;

– **Баймиев Андрей Ханифович**
доктор биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории биоинженерии растений и микроорганизмов Института биохимии и генетики - обособленного структурного подразделения Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы

Исследование актуально в связи с потребностью в создании устойчивых агробиотехнологий, способных уменьшить потребность сельского хозяйства в минеральных удобрениях. Перспективной альтернативой выступают препараты на основе арбускулярных микоризных грибов, однако их промышленное производство затруднено сложностями культивирования. В работе предложен инновационный подход, сочетающий использование волосовидных корней как альтернативы растениям-хозяевам и их генетическую модификацию для усиления симбиотического потенциала.

Изучение роли генов, контролирующей структуру клеточной стенки *NtEXPA5* и *PtrXTH1*, гена гормональной чувствительности этиленовой активности *AtARGOS-LIKE* и гена антиоксидантной защиты *AtGSTF11*, в процессе микоризации углубляет понимание молекулярных механизмов симбиоза и создает предпосылки для разработки новых арбускулярных микоризных биопрепаратов и селекции высокоотзывчивых сортов сельскохозяйственных растений. Результаты работы вносят вклад в развитие экологически безопасного земледелия и соответствуют мировым тенденциям внедрения ресурсозобновляемых и устойчивых агробиотехнологий.

Цель исследования

Оценить влияние эндосимбиотического гриба *Rhizophagus irregularis* на трансгенные растения с повышенной экспрессией генов-регуляторов роста. А также изучить возможности выращивания АМ на волосовидных корнях

Задачи исследования

- 1) Разработка и характеристика совместных культур микоризного гриба *Rhizophagus irregularis* и трансгенных волосовидных корней моркови, включая оценку их продуктивности и уровня колонизации.
- 2) Создание и оптимизация биотехнологического метода для глубинного культивирования совместных культур *R. irregularis* и корней моркови в барботажном биореакторе.
- 3) Биотехнологическое получение посевного материала спор *R. irregularis* и оценка его эффективности в качестве микоризного инокулянта на модельных растениях.
- 4) Оценка влияния арбускулярной микоризы на рост и развитие трансгенных растений табака, экспрессирующих гены *AtARGOS-LIKE*, *NtEXPA5*, *PtrXTH1* и *AtGSTF11*.
- 5) Изучение влияния снижения экспрессии генов биосинтеза стриголактонов и

гломалинов на эффективность формирования арбускулярно-микоризного симбиоза.

Научная новизна исследования

Впервые проведено комплексное исследование влияния конститутивной экспрессии генов *AtARL*, *NtEXPA5*, *PtXTH1* и *AtGSTF11* на эффективность симбиоза табака с арбускулярной микоризой *R. irregularis*. Показано, что экспрессия генов *NtEXPA5* и *AtARL* не только стимулирует рост растений, но и существенно увеличивает споруляцию гриба-симбионта. Установлено, что модификация клеточной стенки растений через экспрессию экспансинов и ксилоглюканэндотрансгликозилаз значительно облегчает колонизацию корней микоризным грибом. Обнаружен синергетический эффект между генетической модификацией растений и эффективностью микоризации. Оценено влияние пониженной экспрессии биосинтеза гломалинов и стриголактонов на процессы развития АМ симбиоза.

Научно-практическая значимость работы

Практическая ценность исследования заключается в формировании научного базиса для создания новых продуктов. Результаты работы открывают путь к разработке биотехнологических платформ для рентабельного производства микоризных инокулянтов на основе трансгенных корневых культур с повышенной экспрессией генов *NtEXPA5* и *AtARL*. Выявленные генетические мишени создают основу для селекции и генетического редактирования сельскохозяйственных культур с целью повышения их отзывчивости к микоризации. Разработка таких устойчивых агротехнологий соответствует задачам импортозамещения и продовольственной безопасности, предлагая экологичное решение для растениеводства в условиях изменения климата и деградации почв.

Степень достоверности и апробация результатов

Результаты исследований по НКР были доложены на 3 Международной научной конференции PLAMIC2022 «Растения и микроорганизмы: биотехнология будущего» Санкт-Петербург, 3-8 октября 2022 г.; IV Международной научной конференции «Растения и микроорганизмы: биотехнология будущего» и III Всероссийской конференции с международным участием «Механизмы адаптации микроорганизмов к различным условиям среды обитания». Иркутск, 2024 г.; Всероссийская научная конференция с

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

NtEXPA5 - гены экспансинов табака *Nicotiana tabacum* L.

PtXTH - гены ксилоглюканэндотрансгликозилазы осины *Populus tremula* L.

АМ – Арбускулярная микориза

ГЛ – Гломалин

СЛ – Стриголактон

ВК – Волосовидные корни

GST – Глутатион-S-трансфераза

АФК – Активная форма кислорода

XTH – Ксилоглюкан-эндотрансгликозилаза/гидролаза

XET – Эндотрансгликозилазная

XEN – Гидролазная

ARL – Ген ARGOS-LIKE

МС – Мурасиге-Скуга (питательная среда)

ММ – Минимальная среда (питательная среда)

ПЦР – полимеразная цепная реакция

ЭДТА – этилендиаминтетрауксусная кислота

Na₂ЭДТА – динатриевая соль ЭДТА

2,4-Д – 2,4-дихлорфеноксиуксусная кислота

ДТ – дикий тип

ИУК – индолилуксусная кислота

мкг – микрограмм

мкМ – микромоль

мМ – миллимоль

нМ – наномоль

см – сантиметр

г – грамм

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ НКР

Публикации в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Минеев Я.П., Кузнецова М.В., Мусин Х.Г., Кулуев Б.Р., Создание совместных культур волосовидных корней моркови с микоризным грибом *Rhizophagus irregularis* // вестник биотехнологии и физико-химической биологии имени Ю.А. Овчинникова, 2023, Т. 19, № 3 Р. 28.
2. Минеев Я.П., Кузнецова М.В., Членов И.В., Кулуев Б.Р., Использование микоризного гриба *Rhizophagus irregularis*, выращенного в совместной культуре с волосовидными корнями для обработки саженцев деревьев // Вестник биотехнологии и физико-химической биологии имени Ю.А. Овчинникова 2024, Т. 20, № 3 Р. 34.
3. Минеев Я.П., Бережнева З.А., Кулуев Б.Р., Влияние микоризного гриба *Rhizophagus irregularis* на рост трансгенных растений табака с конститутивной экспрессией генов *argos-like*, экспансинов, ксиланглюканэндотрансглюкозилаз и глутатион-S-трансфераз // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология (на рецензии от 12.03.2025).

Статьи в других изданиях и материалы научных мероприятий

1. Минеев Я.П., Кулуев Б.Р., Микроскопический анализ совместных культур гриба *Rhizophagus irregularis* и волосовидных корней моркови // Всероссийская научная конференция с международным участием «Геномика и биотехнология для медицины и сельского хозяйства». 2022. Р. 114.
2. Минеев Я.П., Мусин Х.Г., Кулуев Б.Р., Эффективность микоризации трансгенных растений табака с конститутивной экспрессией генов *NtEXPA5*, *AtGSTF11* и *ARGOS-LIKE* // IV Международной научной конференции «Растения и микроорганизмы: биотехнология будущего» и III Всероссийской конференции с международным участием «Механизмы адаптации микроорганизмов к различным условиям среды обитания». Иркутск, 2024 г. Р. 250
3. Минеев Я.П., Мусин Х.Г., Кузнецова М.В., Кулуев Б.Р. Культивирование микоризного гриба *Glomus intraradices* на волосовидных корнях моркови // 3 Международной научной конференции PLAMIC2022 «Растения и микроорганизмы: биотехнология будущего» Санкт-Петербург, 3-8 октября 2022 г. 156.

международным участием «Геномика и биотехнология для медицины и сельского хозяйства». Уфа, 2022 г.

Личный вклад автора в проведенные исследования

Автором проведены экспериментальные работы по созданию совместных культур трансгенных волосовидных корней моркови и микоризного гриба *R. irregularis*. Осуществлена оценка инфекционного потенциала полученных *in vitro* спор гриба для формирования арбускулярной микоризы на тест-растениях. Выполнены исследования по изучению эффективности симбиотического взаимодействия между арбускулярной микоризой и трансгенными растениями табака.

Публикации

По материалам НКР опубликовано 5 печатных работ, из них 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем НКР

НКР состоит из введения, обзора литературы, материалов и методов, результатов и обсуждений, заключения и выводов, библиографического списка и приложений. Работа изложена на 107 страницах и содержит 5 таблиц, 12 рисунков. Список литературы включает 130 источников.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалы исследования. В работе использовался штамм арбускулярного микоризного гриба *Rhizophagus irregularis* (ранее известный как *Glomus intraradices*) ВКПМ F-1572. Трансгенные растения табака сорта Petit Havana линии SR1 с конститутивной экспрессией генов экспансинов *NtEXPA5* (*Nicotiana tabacum*), *PtXTH* (*Populus tremula*), *AtARL* (ген резуховидки Таля), *AtGSTF11* (ген глутатион-S-трансферазы резуховидки Таля). В качестве контроля использовались растения табака дикого типа (ДТ). Волосовидные корни моркови посевной (*Daucus carota*) получены ранее методом агробактериальной трансформации *Agrobacterium rhizogenes* штамма A4.

Методы исследования. Семена трансгенных линий и дикого типа стерилизовали и проращивали на агаризованной среде МС, содержащей гигромицин (50 мг/л) для селекции трансформантов. Через 20 дней проростки пересаживали в вегетационные сосуды с грунтом. Суспензию спор вносили непосредственно в лунку во время пересадки, обеспечивая непосредственный контакт инокулянта с корневой системой. Эксперимент с табаком проводился в

строго контролируемых условиях фитотрона: искусственное освещение (фитолампы, ~10000 люкс), фотопериод 16/8 ч (день/ночь), температура 23–24 °С. Полив осуществляли 2 раза в неделю по 50 мл отстоянной водопроводной воды на сосуд. Достоверность различий во всех экспериментах оценивали при помощи *U*-критерия Манна-Уитни.

Количественное содержание арбускулярной микоризы оценивалось посредством окрашивания корней по методу (Trouvelot, Kough, Gianinazzi, Pearson), с помощью трипанового синего.

Для поддержания культуры АМ фрагменты ВК моркови стерильно переносили в чашки Петри или колбы со средой МС. Инокуляцию проводили, добавляя к ВК суспензию спор *R. irregularis*. Культивирование вели в течение 6 недель при температуре 24–26 °С в темноте. Для оценки колонизации проводили регулярный микроскопический анализ образцов корней, окрашенных метиловым или трипановым синим.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Совместная культура волосовидных корней с АМ

Проведена Инокуляция ВК спорами *R. irregularis* на твердой питательной среде Мурасиге-Скуга вызывала сложную нелинейную динамику ростовых процессов с выраженными фазами. На 2–3 неделе культивации наблюдалась незначительная стимуляция темпов роста ВК.

Контрольная линия ВК демонстрировала интенсивный экспоненциальный рост с самого начала культивации, в то время как микоризированные ВК проявляли выраженное замедление развития в течение первой и второй недели после перенесения на новый субстрат. Существенное ускорение роста наблюдалось лишь с 3 недели культивации, однако к 5 неделе эксперимента рост чистых ВК стабильно превосходил микоризированные корни на 10–15%, а к концу эксперимента эта разница сохранялась, указывая на системный характер изменений метаболизма растений-хозяев.

Обнаруженный феномен первоначального торможения роста представляет значительный теоретический интерес и связан с комплексом взаимосвязанных факторов:

Значительными энергозатратами на процесс колонизации и глубокой структурной перестройки тканей корня.

жизнеспособности для колонизации растений *in vivo*, оказывая при этом позитивный эффект на параметры роста обработанных саженцев деревьев.

3. Установлено, что сверхэкспрессия генов *AtARL*, *NtEXPA5*, *PtrXTH1* и *AtGSTF11* оказывает позитивное воздействие на арбускулярно-микоризный симбиоз, что выражается в повышении ростовых параметров растений, ускоренном развитии самой арбускулярной микоризы, а также увеличении продукции спор гриба.

4. Показано, что индукция РНК-интерференции генов биосинтеза стриголактонов растений и гломалинов *Rhizophagus irregularis* оказывает негативное воздействие на арбускулярно-микоризный симбиоз, что выражается в снижении параметров роста растений и более медленном развитии арбускулярной микоризы.

Практические рекомендации

Полученные результаты открывают широкие перспективы для селекции растений с большей активностью генов связанных с экспрессией экспансинов, ксилотрансфераз, ксиланэстераз, глутатион-S-трансфераз, снижения экспрессии генов этиленовой активности также генов активности стриголактоновой регуляции с целью повышения продуктивности и стрессоустойчивости растений за счёт усиленного контакта с арбускулярными микоризами, что представляется весьма актуальным для современного устойчивого сельского хозяйства и биотехнологии растений.

стебля, но и обеспечили оптимальные условия для развития и споруляции гриба-симбионта *R. irregularis*, что подтверждается достоверным увеличением количества спор в ризосфере.

Результаты воздействия на биосинтез гломалинов и стриголактонов подчеркивают фундаментальную важность обоих соединений для установления и поддержания арбускулярной микоризы, но указывают на различные временные аспекты их вовлеченности в симбиотический процесс.

Фундаментальное значение исследования состоит в раскрытии многокомпонентных механизмов усиления симбиоза. Установлено, что позитивный эффект реализуется через комплексное воздействие на физиологию растения-хозяина: модификацию свойств клеточной стенки, облегчающую проникновение гиф; оптимизацию гормонального статуса, замедляющую старение тканей; и усиление антиоксидантной защиты, снижает окислительный стресс на начальных этапах взаимодействия и экспрессии сигнальных молекул. Таким образом, работа вносит значительный вклад в понимание молекулярных основ симбиоза, демонстрируя возможность управления его эффективностью через гены, опосредованно влияющие на способность растения к формированию взаимовыгодных отношений.

Практическая значимость полученных результатов заключается в создании научного базиса для развития двух перспективных направлений: выведения новых генотипов сельскохозяйственных культур с повышенной симбиотической отзывчивостью для увеличения урожайности и стрессоустойчивости, а также разработки биотехнологических платформ на основе трансгенных корневых культур для экономически эффективного производства инновационных микоризных препаратов. В совокупности, эти подходы открывают новые возможности для развития устойчивых агроэкосистем, основанных на управлении растительно-микробными взаимодействиями.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что *Rhizophagus irregularis* способен поддерживать жизнеспособность, а также производить споры при совместном выращивании с волосовидными корнями в качестве замены нативного растения хозяина.
2. Выявлено, что споры *Rhizophagus irregularis* полученные с помощью выращивания на волосовидных корнях обладают достаточным уровнем

Активной конкуренцией за питательные вещества между двумя гетеротрофными партнерами в условиях ограниченных ресурсов.

Перераспределением ассимилятов в пользу грибного симбионта, который может потреблять до 20% фотосинтатов растения-хозяина при обычном симбиозе с фотосинтезирующим растением.

Процесс колонизации характеризовался четкой временной и пространственной стадийностью и протекал высокоэффективно как при инокуляции фрагментами спор, так и спорово-мицелиальными комплексами гриба *R. irregularis* (рис 1).

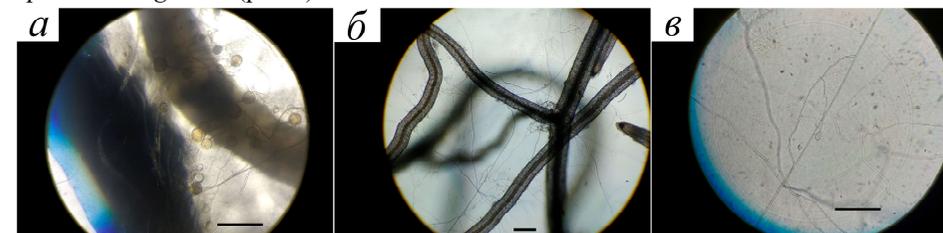


Рисунок 1. Микрофотографии волосовидных корней, колонизированных микоризой *R. irregularis*. а — волосовидные корни с инокулянтном. б — экзоспоры на внешнем мицелии. в — эндоспоры из трансформированных везикул. Увеличения x60 (б) x150 (а,в). Масштаб: 200 мкм.

Оценка эффективности полученных на ВК спор *R. irregularis* на саженцах

Применение препарата показало устойчивый ростостимулирующий эффект на саженцах древесных пород в условиях открытого грунта. У клена полевого через месяц после инокуляции отмечено увеличение высоты на 19,5%, а у лапыны ясенелистной наблюдался комплексный эффект с приростом высоты на 11,6% и ширины кроны на 22,3%. Через пять месяцев положительное влияние микоризации сохранялось: у клена превышение по высоте составило 15,2%, у лапыны - 15,9% по высоте и 12,9% по ширине кроны. (рис. 2)

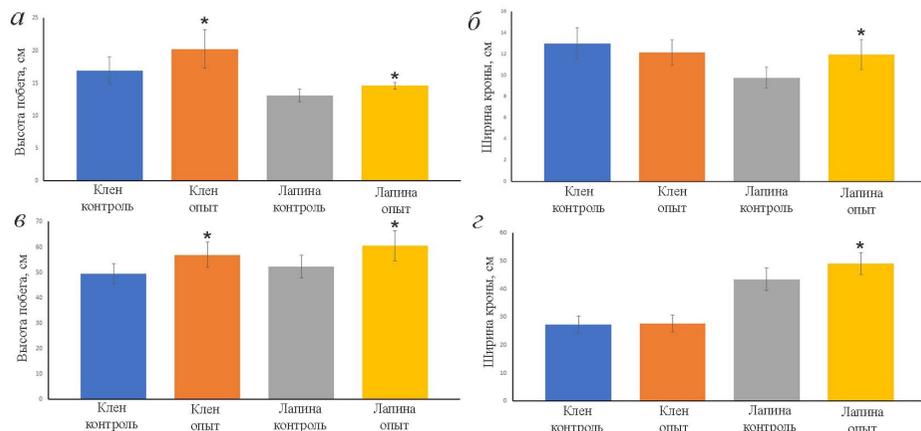


Рисунок 2. Высота саженцев в мае (а), ширина кроны в мае (б), высота саженцев в сентябре (в) и ширина кроны в сентябре (г). Контроль – саженцы поливались лишь водой. Опыт – саженцы однократно поливали спорами микоризного гриба *R. irregularis* за месяц до первого замера. Второй замер проводился через 5 месяцев после полива спорами микоризного гриба.

Исследование подтвердило высокую эффективность биотехнологического инокулянта на основе арбускулярной микоризы *Rhizophagus irregularis*, полученного методом *in vitro* культивирования с волосовидными корнями моркови. Разработанный биотехнологический метод обладает значительными преимуществами, включая стабильно высокую концентрацию жизнеспособных пропагул (до 80 000 спор/мл), гарантированную чистоту от патогенов и сорняков благодаря стерильным условиям культивирования, а также потенциал для масштабирования промышленного производства.

Влияние арбускулярной микоризы на трансгенные растения табака

Исследование продемонстрировало синергетический эффект между конститутивной экспрессией генов *AtARL*, *NtEXPA5*, *PttXTH1*, *AtGSTF11* и эффективностью арбускулярной микоризы *R. irregularis* у трансгенных растений табака.

На 2-й неделе эксперимента наблюдалось выраженное снижение роста в опытных группах: растения с подавлением синтеза стриголактонов демонстрировали высоту в среднем 4.5 см, что было на 25% ниже контроля 6 см, в то время как группа с подавлением гломалина показала промежуточный результат 7.5 см. Микоризированные растения при этом достигали среднего роста 12 см.

К 4-й неделе эксперимента картина существенно изменилась: группа с подавлением синтеза стриголактонов начала проявлять компенсаторный эффект увеличив рост 21 см, превысив показатель без микоризного контроля в 6.5 см и опередив даже линию микоризированных растений с ростом 20.5 см. Группа с подавлением гломалина сохраняла отставание в росте 18.5 см.

К моменту завершения эксперимента на 8 неделе, максимальные показатели роста сохраняли микоризированные растения 68 см, тем временем группа с подавлением синтеза стриголактонов показала значительное восстановление ростовых показателей до 59 см, существенно превышая контроль 37.5 см и группу с подавлением гломалина 44.5 см.

Анализ сырой массы надземной части растений в конце эксперимента выявил схожую корреляцию. Максимальная биомасса зафиксирована у микоризированных растений 48.455 г, тогда как группа с подавлением синтеза стриголактонов показала результат 34.914 г, значительно превышающий контроль 21.399 г и группу с подавлением гломалина 28.564 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты настоящей работы свидетельствуют о том, что целевая генетическая модификация растений, затрагивающая ключевые механизмы регуляции роста и устойчивости к стрессам, создаёт новые перспективы для повышения эффективности симбиотического взаимодействия с арбускулярными микоризными грибами. Экспериментально установлено, что конститутивная экспрессия генов *AtARL*, *NtEXPA5*, *PttXTH1* и *AtGSTF11* не просто аддитивно сочетается с положительным влиянием микоризации, но и вызывает синергетическое усиление эффективности симбиоза. Наибольший эффект наблюдался у линий, экспрессирующих гены *NtEXPA5* и *AtARL*, которые продемонстрировали не только максимальные показатели биомассы и высоты

высокопродуктивных микоризных препаратов и создания генетически улучшенных линий сельскохозяйственных культур.

Изучение влияния активности экспрессии генов стриголактона и гломалина на эффективность формирования арбускулярного микоризного симбиоза.

В ходе исследования было проведено направленное подавление ключевого гена, участвующих в биосинтезе гломалина (ген *hsp60* гриба *Rhizophagus irregularis*) и стриголактонов (ген *carotenoid cleavage dioxygenase 7* растения табака), с использованием специфических РНК-олигонуклеотидов для индукции РНК-интерференции. Обработка проводилась на этапе посадки проростков табака методом смачивания корневой системы в растворе олигонуклеотидов в течении 2 минут, с последующим дополнительным внесением раствора в посадочные лунки.

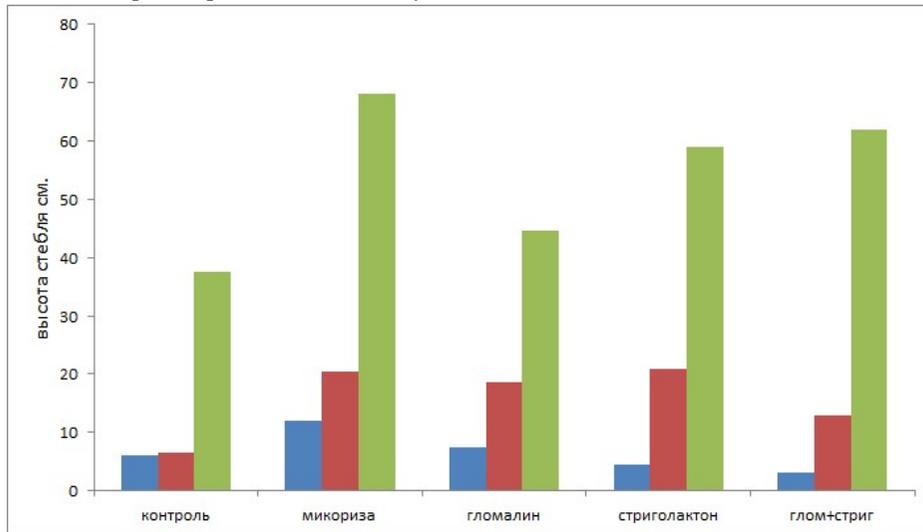


Рисунок 7. Замеры ростовых показателей на 2 – синий, 4 – красный и 8 – зеленый неделях опыта для экспериментальных линий.

Динамика ростовых показателей показывает существенное влияние подавления целевых генов на развитие ростовых показателей растений (Рис. 7).

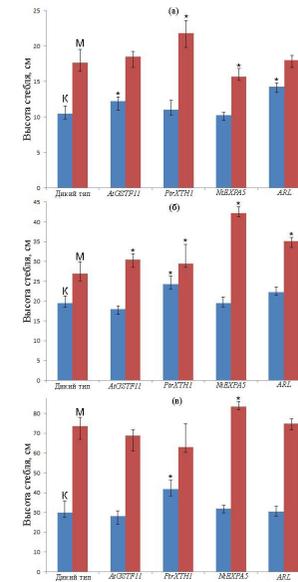


Рисунок 3. Высота стебля исследуемых табаков с микоризой и без микоризы: а – спустя 15 дней после пересадки на грунт, б – спустя 34 дня после пересадки на грунт, в – спустя 43 дня выращивания (перед завершением эксперимента). К – немикоризованный контроль, М – микоризованные растения.

Как показано на рисунке 3, динамика роста стебля в трех временных точках выявила значительное преимущество трансгенных линий: если на 15-й день максимальный прирост (98%) показали растения *PtrXTH1* (Рис. 3а), то к 43-му дню растения линии *NtEXPA5* демонстрировали наибольший прирост в 61,6%, тогда как линии *AtARL* и *AtGSTF11* показали около 59% прироста от немикоризированных растений, превзойдя дикий тип (Рис. 3в).

Анализ вегетативного развития (Рис. 4) подтвердил устойчивое преимущество трансгенных растений: на 34-й день линии *NtEXPA5*, *AtARL* и *AtGSTF11* формировали на 3,6–3,7 листа больше контроля, сохраняя преимущество в 1,5–2,5 листа к концу эксперимента (Рис. 4в). Наиболее объективные показатели продуктивности – биомасса побегов – также показали существенное увеличение у этих линий (Рис. 5): сырая масса увеличилась на

41,2% у *AtARL*, 25,9% у *NtEXPA5* и 37,3% у *AtGSTF11*, а сухая масса – на 26,5%, 27,3% и 22,3% соответственно.

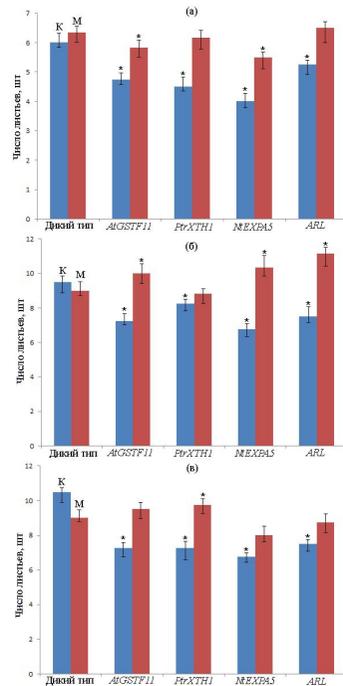


Рисунок 4. Число листьев у табаков с микорризой и без микорризы во время эксперимента: а – спустя 15 дней после пересадки на грунт, б – спустя 34 дня после пересадки на грунт, в – спустя 43 дня после пересадки на грунт. К – немикорризованный контроль, М – микорризованные растения.

Ключевым доказательством усиления эффективности симбиоза стало увеличение количества спор *R. irregularis* в ризосфере трансгенных растений (Рис. 6): максимальные показатели зафиксированы у линий *NtEXPA5* (4,91 споры/30 мкл) и *AtARL* (4,04 споры/30 мкл) против 3,27 у дикого типа.

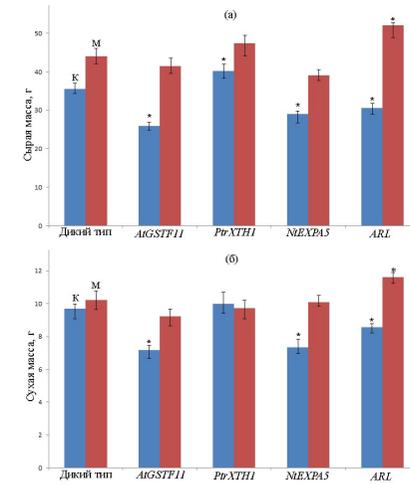


Рисунок 5. Сырая масса побегов анализируемых растений (а) и сухая масса побегов анализируемых растений (б). К – немикорризованный контроль, М – микорризованные растения.

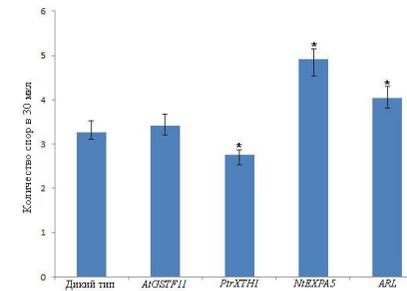


Рисунок 6. Количество содержащихся спор в 30 мкл раствора просеянного из образцов почв после выращивания микорризованных растений табака.

Полученные результаты свидетельствуют, что модуляция экспрессии генов, регулирующих структуру клеточной стенки (*NtEXPA5*, *PtrXTH1*), гормональный статус (*AtARL*) и антиоксидантную защиту (*AtGSTF11*), не только улучшает ростовые показатели растений, но и повышает эффективность самого симбиотического взаимодействия, создавая основу для разработки