

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИКРОБНЫХ ПРЕПАРАТОВ НА ОСНОВЕ ГРИБОВ АРБУСКУЛЯРНОЙ МИКОРИЗЫ И ГРИБОВ РОДА TRICHODERMA ДЛЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ В УСЛОВИЯХ ДЕФИЦИТА ВЛАГИ

**П.А. Иванов<sup>1</sup>**, аспирант лаборатории генетики растительно-микробных взаимодействий, ФГБНУ ВНИИСХМ, p.ivanov@arriam.ru, ORCID ID: 0009-0000-5181-9620;

**А.П. Юрков<sup>1</sup>**, кандидат биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории экологии симбиотических и ассоциативных ризобактерий, ФГБНУ ВНИИСХМ, ap.yurkov@arriam.ru, ORCID ID: 0000-0002-2231-6466;

**А.И. Беляева<sup>1</sup>**, инженер-исследователь лаборатории экологии симбиотических и ассоциативных ризобактерий, ФГБНУ ВНИИСХМ, angelkapustnikova@yandex.ru;

**Ю.В. Лактионов<sup>1</sup>**, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экологии симбиотических и ассоциативных ризобактерий, ФГБНУ ВНИИСХМ laktionov@arriam.ru, ORCID ID: 0000-0001-6241-0273;

**Ю.В. Косульников<sup>1</sup>**, кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории экологии симбиотических и ассоциативных ризобактерий, ФГБНУ ВНИИСХМ, yv.kosulnikov@arriam.ru, ORCID ID: 0000-0003-1134-3503;

**К.Н. Бердышева<sup>1</sup>**, аспирант лаборатории экологии симбиотических и ассоциативных ризобактерий, ФГБНУ ВНИИСХМ, k.berdysheva@arriam.ru; ORCID ID: 0000-0002-5102-6310;

**С.А. Васильченко<sup>2</sup>**, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник лаборатории технологии возделывания зерновых и пропашных культур, ФГБНУ «АНЦ «Донской», wasilchenko12@gambler.ru, ORCID ID: 0000-0003-1587-2533;

**О.Г. Цирульник<sup>3</sup>**, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент ФГБОУ ВО СПбГАУ, red9027@yandex.ru, ORCID 0000-0003-2340-0587;

**А.А. Крюков<sup>1</sup>**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории экологии симбиотических и ассоциативных ризобактерий, ФГБНУ ВНИИСХМ, aa.krakov@arriam.ru, ORCID ID: 0000-0002-8715-6723.

<sup>1</sup>ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной микробиологии», 196600, г. Санкт-Петербург, ш. Подбельского, д. 3; e-mail: arriam2008@yandex.ru;

<sup>2</sup>ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», 347740, Ростовская область, г. Зерноград, ул. Научный городок, д. 3; e-mail: vniizk30@mail.ru;

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет» (СПбГАУ), 196601, г. Санкт-Петербург, Петербургское шоссе, д. 2, e-mail: agro@spbgau.ru

В обзоре рассмотрены возможности использования микробных препаратов на основе грибов арбускулярной микоризы (АМ) и грибов рода Trichoderma (Тр) с целью повышения устойчивости сельскохозяйственных культур Российской Федерации к стрессам, связанным с дефицитом влаги. Рассматриваемые группы грибов оказывают схожее положительное воздействие на растения, способствуя их росту, повышению сопротивляемости абиотическим и биотическим факторам, улучшению минерального питания. Особое внимание уделено различиям в механизмах действия арбускулярной микоризы и триходермы, а также их возможному совместному применению в виде микробных препаратов. Показано, что грибы арбускулярной микоризы обеспечивают долговременные эффекты за счет глубокой интеграции с растением, тогда как триходерма характеризуется более быстрым ответом на стрессовые условия и относительной простотой культивирования, что делает их доступными для эффективного использования. Рассмотрены проблемы внедрения микробных препаратов в практику сельского хозяйства, включая возможный антагонизм компонентов, технологические трудности и сложность использования совместно с фунгицидами. Показано, что грибы рода триходерма и грибы арбускулярной микоризы показывают увеличение эффективности роста растений, повышение урожайности при совместном использовании, в частности для брокколи и кукурузы. В тоже время механизмы таких взаимодействий изучены не до конца. Сделан вывод о высокой перспективности разработок в этой области и необходимости создания микробных консорциумов, устойчивых к экстремальным температурам и недостатку влаги в южных областях европейской части территории России.

**Ключевые слова:** Trichoderma, арбускулярная микориза, засуха, совместное культивирование, микробные препараты.

**Для цитирования:** Иванов П.А., Юрков А.П., Беляева А.И., Лактионов Ю.В.\*, Косульников Ю.В., Бердышева К.Н., Васильченко С.А., Цирульник О.Г., Крюков А.А. Перспективы использования микробных препаратов на основе грибов арбускулярной микоризы и грибов рода Trichoderma для сельского хозяйства Российской Федерации в условиях дефицита влаги // Зерновое хозяйство России. 2026. Т.18, №2. С. 77-84. DOI: 10.31367/2079-8725-2026-103-2-77-84



## PROSPECTS FOR THE USE OF MICROBIAL PRODUCTS WITH ARBUSCULAR MYCORRHIZA FUNGI AND TRICHODERMA FUNGI FOR THE RUSSIAN AGRICULTURE UNDER MOISTURE DEFICIENCY

**P.A. Ivanov**<sup>1</sup>, post graduate of the laboratory for genetics of plant-microbial correlations, p.ivanov@arriam.ru, ORCID ID: 0009-0000-5181-9620;

**A.P. Yurkov**<sup>1</sup>, Candidate of Biological Sciences, associate professor, leading researcher of the laboratory for ecology of symbiotic and associative rhizobacteria, ap.yurkov@arriam.ru, ORCID ID: 0000-0002-2231-6466;

**A.I. Belyaeva**<sup>1</sup>, technician-researcher of the laboratory for ecology of symbiotic and associative rhizobacteria, angelkapustnikova@yandex.ru;

**Yu.V. Laktionov**<sup>1</sup>, Candidate of Biological Sciences, leading researcher of the laboratory for ecology of symbiotic and associative rhizobacteria, laktionov@arriam.ru, ORCID ID: 0000-0001-6241-0273;

**Yu.V. Kosulnikov**<sup>1</sup>, Candidate of Biological Sciences, researcher of the laboratory for ecology of symbiotic and associative rhizobacteria, yv.kosulnikov@arriam.ru, ORCID ID: 0000-0003-1134-3503;

**K.N. Berdysheva**<sup>1</sup>, post graduate of the laboratory for ecology of symbiotic and associative rhizobacteria, k.berdysheva@arriam.ru; ORCID ID: 0000-0002-5102-6310;

**S.A. Vasilchenko**<sup>2</sup>, Candidate of Agricultural Sciences, senior researcher of the laboratory for cultivation technologies of grain and row crops, wasilchenko12@rambler.ru, ORCID ID: 0000-0003-1587-2533;

**O.G. Tsirulnik**<sup>3</sup>, Candidate of Agricultural Sciences, associate professor, ORCID 0000-0003-2340-0587;

**A.A. Kryukov**<sup>1</sup>, Candidate of Biological Sciences, senior researcher of the laboratory for ecology of symbiotic and associative rhizobacteria, aa.kryukov@arriam.ru, ORCID ID: 0000-0002-8715-6723.

<sup>1</sup>FSBSI All-Russian Research Institute for Agricultural Microbiology, 196600, Saint-Petersburg, Pushkin, Podbelskiy Sh., 3; e-mail: arriam2008@yandex.ru;

<sup>2</sup>FSBSI Agricultural Research Center "Donskoy", 347740, Russia, Rostov region, Zernograd, Nauchny Gorodok, 3; email: vniizk30@mail.ru;

<sup>3</sup>FSBEI HE "Saint-Petersburg State Agrarian University" (SPb SAU), 196601, Saint-Petersburg, Peterburgskoe Sh, 2, e-mail: agro@spbgau.ru

The current review has considered the possibilities of using microbial products based on arbuscular mycorrhiza (AM) fungi and Trichoderma (Tr) fungi to improve the resistance of the Russian agricultural crops to a moisture deficiency stress. The fungi groups discussed here have demonstrated similar beneficial effects on plants, promoting their growth, improving resistance to abiotic and biotic factors, and mineral nutrition. Particular attention has been paid to the differences in the mechanisms of arbuscular mycorrhiza and Trichoderma, as well as their potential combined use as microbial products. There has been shown that arbuscular mycorrhizal fungi provide long-term effects due to deep integration with the plant, while Trichoderma fungi are characterized by a more rapid response to stress conditions and relative simplicity of cultivation, making them accessible for effective use. There have been considered challenges of introducing microbial products into agricultural practices, including potential antagonism between components, technological difficulties, and the difficulty of using them in combination with fungicides. There has been shown that Trichoderma fungi and arbuscular mycorrhiza fungi improve plant growth efficiency and productivity when used together, particularly for broccoli and maize. At the same time, the mechanisms of such interactions remain incompletely studied. There has been concluded that developments in this area are of great promise, and that it is necessary to develop microbial consortia resistant to the extreme temperatures and moisture deficits found in the southern regions of European Russia.

**Keywords:** *Trichoderma*, *arbuscular mycorrhiza*, *drought*, *co-cultivation*, *microbial products*.

**Введение.** Грибы арбускулярной микоризы (AM), образующие симбиоз с большинством наземных растений, повышают устойчивость растений к различным неблагоприятным факторам окружающей среды, таким как засоление, переувлажнение, тяжелые металлы, высокая кислотность, низкое содержание воды в почве, инфекции фитопатогенов. В первую очередь, AM значительно улучшает усвоение растениями фосфора и интенсифицирует минеральное питание в целом, способствует более эффективному использованию воды (Zenteno-Alegría et al., 2024).

Кроме грибов AM, другие представители почвенного сообщества, такие как грибы родов *Trichoderma* (Tr), *Penicillium*, *Fusarium*, *Curvularia*, *Mortierella*, *Glomus*, *Piriformospora* и др. также могут вступать в полезные

взаимодействия с растениями (Zenteno-Alegría et al., 2024). Они находятся в ризосфере и, изредка, в филлосфере; иногда могут колонизировать внутренние ткани растений как эндофиты, либо же быть свободноживущими.

В данном обзоре мы сосредоточимся на двух известных группах полезных почвенных грибов – грибах рода *Trichoderma* и грибах AM. В литературе именно они в первую очередь рассматриваются как возможные микробные препараты для использования в сельском хозяйстве. Позитивный эффект от взаимодействия растений с Tr и AM зачастую поверхностно схож, и практически всегда выражается в повышении их сопротивляемости абиотическим и биотическим стресс-факторам, росте массы надземной и подземной

частей, а также в нормализации окислительно-восстановительных процессов растения-хозяина (Harman, Uphoff, 2019; Szczałba et al., 2019).

Целью данного обзора является рассмотрение перспектив возможного совместного использования грибов АМ и грибов рода *Trichoderma* в условиях засухи в форме микробных препаратов для сельского хозяйства.

#### **Грибные микробные препараты в сельском хозяйстве**

Ранее в совместной работе ФГБНУ «АНЦ «Донской» и ФГБНУ ВНИИСХМ были проведены полевые исследования нескольких прототипов микробных препаратов (Васильченко и др., 2025). В засушливых условиях Ростовской области для кукурузы и сорго зернового использования данных препаратов привело к существенному росту урожайности и рентабельности. Одним из препаратов, показавших наилучшие результаты, был инокулянт на основе гриба АМ *Rhizophagus irregularis*, воздействие которого привело к росту урожайности на 10,1%, росту рентабельности на 15,1%.

Поддержка растений препаратами АМ не ограничивается засушливыми регионами. Так, например, в Орловской области, страдающей от избытка дождей, были проведены полевые испытания для нута и чины при обработке ризоторфином (препаратом, составляющей которого является микоризованная суданская трава). В итоге, биомасса инокулированных растений нута увеличилась на 21,1% к контролю, чины – на 35,1% к контролю. Семенная продуктивность нута увеличивалась на 25,9% к контролю у сорта Аватар и на 17,8% к контролю у сорта Краснокутский 123. Это привело к увеличению урожайности в вариантах с ризоторфином на 0,33-0,34 т/га (Донская, 2023). Это показывает, что применение биопрепаратов крайне перспективно на большей части территорий России.

В то же время, более широко в сельском хозяйстве используется такой род микромицетов, как *Trichoderma*. Различные виды грибов этого рода, такие как *T. longibrachiatum*, *T. harzianum*, *T. asperellum*, *T. atroviride* и некоторые другие, существенно повышают устойчивость растений к абиотическим и биотическим стрессам (Zenteno-Alegría et al., 2024). Одно из основных отличий в использовании препаратов, содержащих *Tr*, по сравнению с АМ заключается в том, что грибы рода *Trichoderma* возможно культивировать в биореакторах глубинным способом на полусинтетических питательных средах, в то время как грибы АМ являются облигатными симбионтами и чаще всего растут только на корнях растений-хозяев (Poudel et al., 2021). Исторически больше внимания ученых привлекало возможное использование *Tr* в качестве индуктора стрессоустойчивости, а также в защите растений от ряда грибковых фитопатогенов (в частности *Fusarium*, *Rhizoctonia*, *Pythium*). Антагонизм такого рода достигается посредством конкуренции за пространство и питательные вещества, аллелопатии и микопаразитизма (Poudel et al., 2021).

Помимо Ростовской области, практическая эффективность грибных микробных препаратов в сложных почвенно-климатических условиях засушливых регионов была показана в ходе различных полевых исследований в Египте (Metwally et al., 2025),

где при обработке АМ и *Tr* урожайность брокколи (сбор соцветий, в тоннах на гектар) увеличилась в 1,27 или 1,17 раз, соответственно. Улучшение состояния растений продемонстрировано и в ходе экспериментов в теплицах с искусственно созданными засушливыми условиями (Eftekhari et al., 2025; Zhang et al., 2025). Тем не менее, препараты на основе грибов АМ остаются достаточно дорогими для внедрения в промышленность и с логистической точки зрения, так как их облигатная форма существования вынуждает производить и перевозить не столько гифы грибов, сколько инокулированную почву или корни растений (Igiehon, Babalola, 2017).

В целом, стратегия использования грибных микробных препаратов является экономически эффективным и экологически безопасным инструментом для повышения адаптивного потенциала в растениях к различным стресс-факторам, в том числе – недостатку влаги и высокому засолению почв (Poudel et al., 2021).

#### **Роль симбионтов в ответе на осмотический стресс-фактор.**

В контексте борьбы с засухой симбиозы и ассоциации растений с АМ и *Tr* демонстрируют хорошие результаты. Происходит опосредованная регуляция биохимических процессов, протекающих в растительных тканях и определяющих адаптивные реакции растения. Регуляция сводится к двум стратегиям: снижение потерь влаги и поддержание водного статуса растения на нормальном уровне, либо обеспечение толерантности к таким потерям. В обеих стратегиях ответ выражается в нескольких вариантах адаптации (Poudel et al., 2021; Szczałba et al., 2019; Zenteno-Alegría et al., 2024):

- изменение метаболизма растения в отношении антиоксидантов (супероксиддисмутазы (СОД), пероксидазы, каталазы), что позволяет уменьшить пагубный эффект для растительных клеток со стороны активных форм кислорода (АФК);

- накопление и распределение осмолитов, таких как пролин, полиамины или моносахариды;

- изменение фитогормонального профиля для ускорения роста и развития корневой системы растения-хозяина, а также экссудация в ризосферу метаболитов (как от растения, так и от микосимбионта), улучшающих структуру почвы и доступность минеральных веществ в ней;

- регуляция работы устьиц, фотосистемы II, а также регуляция работы транспортеров моносахаридов и фосфора, транспортеров воды – аквапоринов (AQP);

- регуляция экспрессии различных генов (*P5CS* (пролин), *NCED* (метаболизм абсцизовой кислоты), *ZmPIP* (AQP) и др.);

В тоже время, между рассматриваемыми объектами, АМ и *Tr*, есть и отличительные черты, которые обуславливают разные механизмы действия, и отчасти разные преимущества для растения.

**Механизм действия и особенности для грибов АМ и *Tr*.** Основное различие между АМ-грибами и *Tr* заключается в характере их взаимодействия с растением-хозяином. Грибы АМ формируют с растением облигатный для них симбиоз, тогда как грибы триходермы либо являются свободноживущими обитателями ризосферы, либо факультативными

эндофитами. В литературе отмечены наблюдения, когда *T. harzianum* может проникать именно через гифы гриба АМ в корень растения при одновременной инокуляции (De Jaeger, Declerck, De La Providencia, 2010).

В общем случае, отличия в характере взаимодействия обуславливают разные подходы к поддержанию минерального питания растения. АМ-грибы осуществляют прямой транспорт фосфора и других элементов (см. табл. 1) через сеть гиф,

которая значительно увеличивает поглощающую поверхность корня. В свою очередь, грибы триходермы модифицируют минеральные вещества ризосферы посредством хелатирования и окисления в процессе своей жизнедеятельности, мобилизуя их из труднорастворимых почвенных минералов и, тем самым, повышая их доступность для растения (Szczalba et al., 2019).

**Таблица 1. Отличия и сходства в симбиотическом воздействии грибов рода *Trichoderma* и грибов АМ (Szczalba et al., 2019)**  
**Table 1. Differences and similarities in the symbiotic effects of *Trichoderma* fungi and AM fungi (Szczalba et al., 2019)**

<i>Trichoderma</i>	Грибы АМ
Перевод труднорастворимых фосфатов в почве в доступную растениям форму посредством окислительно-восстановительных процессов и хелатирования.	Распространение гиф за пределы корня, увеличение площади всасывающей поверхности корневой системы, усиление транспорта воды, а также N, Cu, Fe, Mn, Zn и других элементов, особенно фосфора.
Индукция синтеза растением жасмоната и этилена, что приводит к приобретению общей устойчивости. Синтез ауксинов для стимуляции роста растения.	
Специфические метаболиты способны индуцировать синтез фитоалексинов, либо же самостоятельно проявлять такую активность, как в случае харзиановой кислоты	Устойчивость растения-хозяина к фитопатогенам растет за счет: улучшенной хитиноподобной активности и лигнификации, уменьшения доступных для патогенов питательных веществ.
Опосредованная индукция СОД, индукция каталазной и пероксидазной активности растения, как элементов механизма защиты от АФК	
Фитогормональная регуляция закрытия устьиц с целью снижения потерь воды, включая регуляцию биосинтеза и катаболизма абсцизовой кислоты	Системная и локальная регуляция за счет аквапоринов, включая тканеспецифическую регуляцию экспрессии их генов

Антиоксидантная защита, хотя в основном и схожа для рассматриваемых симбионтов, у грибов АМ отличается большей превентивностью, накоплением неферментативных антиоксидантов, таких как аскорбат, токоферолы, глутатион в дополнение к ранее обозначенным ферментам, противодействующим АФК (Poudel et al., 2021).

В целом, грибы АМ характеризуются долгосрочными и устойчивыми эффектами, что обусловлено их глубокой интеграцией с растением-хозяином. Тр, в свою очередь, обеспечивает быстрый ответ на изменения условий и неблагоприятные стресс-факторы (Szczalba et al., 2019).

Итоговое влияние на растение при этом остается относительно равным и положительным для обоих вариантов. Так, например, у исследователей из Ирана инокуляция кукурузы триходермой привела к большей массе стебля (25,5 г против 21 г) и относительной активности СОД (85±1% против 78±2%) по сравнению с инокуляцией АМ. При этом инокуляция значительно улучшала состояние растения по сравнению с контролем, масса стебля которого составляла 10,75 г, активность СОД – 42±1%, а наиболее показательна общая масса растения, которая в случае контроля равна 15 г, а в случаях обработки триходермой или АМ – 37 г и 38,5 г, соответственно (Eftekhari et al., 2025).

Для брокколи при увлажнении, равном 40% от нормы, достоверных различий между обработкой Тр (*T. afroharzianum* и *T. longibrachiatum*) и грибами АМ (представителями родов *Glomus* и *Gigaspora*) практически не наблюдалось. При этом, в сравнении с

контролем оба варианта показывали улучшения. Так, для АМ и Тр, соответственно, содержание пролина увеличилось на 36,6% и 32,5% относительно контроля, средняя масса надземной части была равна 544,2±9.1 и 525.5±9.9 (при контроле 489.7±16.4), активность СОД увеличилась на 89,5% и 76,7%, активность пероксидазы – на 56,9% и 61,2% относительно контроля. Прочие оцениваемые в исследовании показатели (относительное содержание воды, содержание хлорофилла в листьях, индекс стабильности мембран) также преимущественно увеличивались. Увеличение наблюдалось не только при сильной засухе, но и при более мягких условиях (60%, 80% от нормы вплоть до оптимальных условий) (Metwally и др., 2025).

Последним фактором, отличающим Тр и грибы АМ друг от друга, можно назвать механизм влияния на регуляцию растением водного баланса, которая полностью отличается: если для Тр закрытие устьиц является в большей степени побочным эффектом усиленного накопления абсцизовой кислоты и жасмоната, то для АМ – это масштабная система регуляции генов AQP (Кудряшова и др., 2025). АМ-грибы осуществляют дифференциальную регуляцию различных типов AQP в зависимости от силы засухи. Их значительная часть при засухе и инокуляции грибом АМ подвергается снижению экспрессии, чтобы замедлить отток воды из растений. В эксперименте на кукурузе исследователи наблюдали индукцию экспрессии *ZmTIP2;3* – одного из ключевых аквапоринов, важных для засухоустойчивости растений. На ключевую роль этого транспортера воды указывает то, что мутация

гена *ZmTIP2;3* приводит к снижению массы растения (подземной части на 53,0%, надземной – на 39,6%), эффективности фотосинтеза (на 58,1%) и к снижению уровня экспрессии ряда генов, связанных с засухой (*LEA3*, *P5CS4* и *NECD1*), по сравнению с диким типом при инокуляции грибом АМ в условиях засухи. Подобная регуляция может наблюдаться на транскрипционном, трансляционном и посттрансляционном уровнях (Кудряшова и др., 2025).

Разница механизмов действия Тр и грибов АМ, вероятно, мало сказывается на конечном действии на инокулируемое растение. Между тем, итогом их совместного применения в качестве биопрепаратов может стать успешная адаптация агрокультур к засухе и, следовательно, лучшие показатели использования грибных инокулянтов в сельском хозяйстве (Hartan, Urhoff, 2019), что может быть полезно в засушливых регионах России, например, Республики Калмыкии, Курганской области, Ставропольского края и прочих (Исаев, 2025).

#### **Проблемы внедрения и использования микробных препаратов в России**

Практическое применение и стандартизация микробных препаратов на основе грибов АМ в значительной степени осложнена невозможностью культивирования без фитосимбионта. Еще больше вопросов возникает при попытке сочетания нескольких объектов в одном препарате. Для триходермы и грибов АМ такое объединение привело бы к совмещению защитных функций от Тр, укреплению корневой системы растения при микоризации и, возможно, синергическому эффекту в устойчивости к засухе.

Впрочем, ранее в литературе преобладало мнение об антагонистических отношениях между грибами рода *Trichoderma* и грибами АМ. Более того, до конца не было ясно, как именно происходило взаимодействие – в ранних статьях на данную тему встречаются противоречивые свидетельства как об агрессивной колонизации первого в гифах и спорах последнего (конкретно: *R. irregularis*), так и о полном подавлении развития *T. harzianum* путем конкуренции за питательные вещества при совместном культивировании (СК) с тем же *R. irregularis* в почве (Green et al., 1999).

Сейчас парадигма меняется и встречается все больше исследований, направленных на поиск эффективных ассоциаций макро- и микроорганизмов. Так, например, такая попытка была предпринята на кукурузе (Eftekhari et al., 2025) при анализе стресса от засухи и засоления. Исследователям из Ирана удалось показать, что СК действительно в некоторой степени объединяет достоинства каждого объекта в отдельности. При засухе относительная активность СОД и аскорбатпероксидазы в условиях СК либо находятся на уровне, либо превышают таковые в условиях одиночного культивирования тем более, контроля (СОД: 86±1%, 85±1%, 78±2%, 44±2%; аскорбатпероксидаза: 83±3%, 78±2%, 71±5%, 28±1% в условиях совместной инокуляции, инокуляции Тр, инокуляции АМ и контроля, соответственно).

В данном контексте было рассмотрено и накопление вторичных метаболитов у солодки: инокуляция *R. irregularis* увеличивала концентрации глицирризина и ликвиритина на 29,9% и в 3,3 раза, соответственно, в условиях засухи (Zhang et al., 2025). Совместная

инокуляция с *T. harzianum* дополнительно повышала выход глицирризина на 93,7%, что демонстрирует синергическое взаимодействие между этими двумя микроорганизмами.

Таким образом, оказывается, что перспективная идея объединения нескольких микробных агентов в составе одного микробного препарата сталкивается с их возможной несовместимостью или противодействием. Эту проблему можно расширить не только на взаимодействие грибов рода *Trichoderma* с грибами АМ, но и на другие возможные комбинации. Конечный благоприятный эффект на растение может нивелироваться вследствие снижения эффективности обоих агентов из-за взаимной конкуренции. Она может быть как прямой – за выделяемые растением вещества, так и косвенной – например, при подавлении грибами АМ ключевых метаболических путей, зависимых от салицилата и жасмоната. В свою очередь, Тр опосредованно стимулирует эти пути у растения-хозяина (Martínez-Medina et al., 2011).

Нельзя также забывать о близости мутуализма к паразитизму, о том, насколько легко полезный почвенный микроорганизм может обратиться против растения-хозяина (Szczałba et al., 2019). Возможность и пагубность такого события определяется генотипами гриба и растения, стадией развития, условиями роста участников взаимодействия. Этот фактор не может не ограничивать применение биопрепаратов в сельском хозяйстве. В данном контексте взаимное ослабление разных микробных агентов может, наоборот, представлять интерес как своеобразная система сдержек и противовесов. Нахождение баланса идеального как с точки зрения безопасности, так и с точки зрения эффективности, является важнейшей задачей промышленного применения микробных препаратов. Наконец, в текущих реалиях зачастую оказывается, что уже на практике, при масштабировании производства в сельском хозяйстве, микробные препараты могут вовсе не работать. Особенно распространена эта проблема в отношении препаратов грибов АМ. Проводимый ВНИИСХМ контроль качества коммерческих препаратов различных производителей показывает, что их состав зачастую не соответствует заявленному. Вместо грибов АМ в них могут обнаруживаться бактериальные штаммы различных видов и посторонние микромикеты при полном отсутствии мицелия и спор грибов АМ. Схожая ситуация для препаратов триходермы: в большинстве случаев реальный титр препарата на 3-4 порядка ниже заявленного.

Помимо качества препаратов на основе грибов АМ и Тр, одним из основных вопросов является технологичность применения препаратов. Прежде всего, это связано с тем, что существующие методы инокуляции (например, обработка семян, внесение в почву или капельный полив) часто требуют специального оборудования и строгого соблюдения условий внесения (температуры, влажности, pH).

Особо актуален вопрос совмещения препаратов микромикетов с химическими средствами защиты растений. В частности, в сельскохозяйственной практике широко применяются химические фунгициды как для обработки семян, так и для полива. Данные вещества очевидным образом вредны для грибов при непосредственном контакте, более того, в

последующие годы остаточные количества пестицидов также способны ингибировать активность грибных препаратов. Аналогичным образом могут действовать и биопрепараты на основе микроорганизмов с фунгицидными свойствами, например, на основе бактерий рода *Bacillus*, для которых известна разная степень совместимости с грибами рода *Trichoderma* (Braga et al., 2025).

Другим критически важным требованием для микробиологических препаратов является разработка удобной препаративной формы (например, жидкой суспензии с мелкодисперсными частицами, гранулированной или порошкообразной с высокой растворимостью), которая не будет агрегировать, выпадать в осадок и забивать форсунки сельскохозяйственной техники при использовании. Неподходящая технологически или неадаптированная к современным методам обработки препаративная форма существенно ограничивает широкое внедрение даже потенциально эффективных препаратов в практике интенсивного земледелия.

**Заключение.** Применение микробных препаратов в сельском хозяйстве является крайне перспективной областью, которая, в то же время, требует внимательного подхода. С разработкой и внедрением таких препаратов связано множество проблем, в первую очередь относящихся к специфике биологических объектов, их возможного антагонизма. Не без оптимизма можно отметить, что многие из проблем решаемы в ближайшее время при наличии заинтересованности как со стороны разработчиков этих препаратов, так и со стороны сельскохозяйственных производителей. Перспективным направлением является создание поликомпонентных препаратов на основе как различных

грибов, так и совместимых штаммов бактерий и грибов с взаимодополняющими свойствами. Такие препараты сейчас находятся на стадии разработки и пока не внедрены в широкое использование. Задачей данного обзора также является попытка показать возможную эффективность таких препаратов и целесообразность их разработки и внедрения в сельское хозяйство.

Разработка таких микробных консорциумов, в идеале, не должна ориентироваться на регион применения и сельскохозяйственную культуру, на которой эти микробиологические препараты будут применяться. То, что было разработано, тестировано и произведено для Северо-Запада РФ, должно так же эффективно работать в условиях Республики Калмыкии, Курганской области, Ростовской области, Воронежской области и других регионов (Исаев, 2025). Высокая температура и недостаток влаги в южных регионах влияют не только на растения, но и на микроорганизмы, снижая их способность к колонизации, длину гиф и шансы на прорастание спор. Обзор литературы показал, что применение инокулянтов на основе грибов рода триходерма и грибы АМ приводит, как правило, к усилению роста растений и в ряде экспериментов привело к повышению урожайности при их совместном использовании. Это указывает на перспективность исследований для получения комплексных препаратов триходермы и АМ. В тоже время механизмы таких взаимодействий изучены не до конца. Необходимо разобраться в механизмах развития эффективного симбиоза растений с микроорганизмами и использовать эти знания для создания высокоэффективных микробных препаратов.

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке РФФ № 24-26-00181.

#### Библиографический список

1. Васильченко С. А., Метлина Г. В., Юрков А. П., Лактионов Ю. В. Сравнительная оценка применения современных биопрепаратов ФГБНУ ВНИИСХМ на продуктивность кукурузы и сорго зернового в условиях южной природно-сельскохозяйственной зоны Ростовской области. // Зерновое Хозяйство России. 2025. Т. 17, № 4. С. 77–83. DOI: 10.31367/2079-8725-2025-99-4-77-83
2. Донская М. В, Донской М. М. Использование микробиологических препаратов при возделывании перспективных сортов нута и чины в Орловской области // 2023. DOI: 10.24412/2309-348X-2023-1-33-39
3. Исаев О. И. Повышение водообеспеченности засушливых регионов в условиях изменения климата // Вопросы степеведения. 2025. Т. 1. С. 25–34. DOI: 10.24412/2712-8628-2025-1-25-34
4. Кудряшова Т. Р., Крюков А. А., Горенкова А. И., Юрков А. П. Аквалорины и их роль в растительно-микробных системах // Вавиловский Журнал Генетики И Селекции. 2025. Т. 29. № 2. С. 238–247. DOI: 10.18699/vjgb-25-27
5. Braga A. F., Santos L. D. C., Mendes S. P. D. S. C., Pires F. A., Geraldine A. M., Ferreira Junior W. N. Interaction between *Trichoderma asperellum* and *Bacillus* spp. in the biological control of disease in the soya bean // Rev. Ciênc. AGRONÔMICA. 2025. Vol. 56, С. 1–9. DOI: 10.5935/1806-6690.20250041
6. Cheng S., Zou Y.-N., Kuča K., Hashem A., Abd\_Allah E. F., Wu Q.-S. Elucidating the Mechanisms Underlying Enhanced Drought Tolerance in Plants Mediated by Arbuscular Mycorrhizal Fungi // Front. Microbiol. 2021. Vol. 12, С. 809473. DOI: 10.3389/fmicb.2021.809473
7. De Jaeger N., Declerck S., De La Providencia I. E. Mycoparasitism of arbuscular mycorrhizal fungi: a pathway for the entry of saprotrophic fungi into roots: Mycoparasitism of arbuscular mycorrhizal fungi // FEMS Microbiol. Ecol. 2010. С. no-no. DOI: 10.1111/j.1574-6941.2010.00903.x.
8. Eftekhari F., Sarcheshmehpour M., Lohrasbi-Nejad A., Boroomand N. Effects of mycorrhizal and *Trichoderma* treatment on enhancing maize tolerance to salinity and drought stress, through metabolic and enzymatic evaluation // BMC Plant Biol. 2025. Vol. 25, № 1. С. 687. DOI: 10.1186/s12870-025-06729-x.
9. Green H., Larsen J., Olsson P. A., Jensen D. F., Jakobsen I. Suppression of the Biocontrol Agent *Trichoderma harzianum* by Mycelium of the Arbuscular Mycorrhizal Fungus *Glomus intraradices* in Root-Free Soil // Appl. Environ. Microbiol. 1999. Vol. 65, № 4. С. 1428–1434. DOI: 10.1128/AEM.65.4.1428-1434.1999
10. Harman G. E., Uphoff N. Symbiotic Root-Endophytic Soil Microbes Improve Crop Productivity and Provide Environmental Benefits // Scientifica. 2019. Vol. 2019. С. 1–25. DOI: 10.1155/2019/9106395
11. Igjehon N. O., Babalola O. O. Biofertilizers and sustainable agriculture: exploring arbuscular mycorrhizal fungi //

Appl. Microbiol. Biotechnol. 2017. Vol. 101, № 12. С. 4871–4881. DOI: 10.1007/s00253-017-8344-z

13. Martínez-Medina A., Roldán A., Albacete A., Pascual J. A. The interaction with arbuscular mycorrhizal fungi or *Trichoderma harzianum* alters the shoot hormonal profile in melon plants // *Phytochemistry*. 2011. Vol. 72, № 2–3. С. 223–229. DOI: 10.1016/j.phytochem.2010.11.008

14. Metwally A. A., Riad G. S., Ghoname A. A., El-Sawy S. M., Salama D. S., Alkhwaga L., Shahin M. G., Saady H. S., et al. Physiological defensive modes to biologically induce drought tolerance in broccoli via inoculation with mycorrhiza and *Trichoderma* // *BMC Plant Biol.* 2025. Vol. 25, № 1. С. 934. DOI: 10.1186/s12870-025-06956-2

15. Poudel M., Mendes R., Costa L. A. S., Bueno C. G., Meng Y., Folimonova S. Y., Garrett K. A., Martins S. J. The Role of Plant-Associated Bacteria, Fungi, and Viruses in Drought Stress Mitigation // *Front. Microbiol.* 2021. Vol. 12, С. 743512. DOI: 10.3389/fmicb.2021.743512

16. Rousseau A., Benhamou N., Chat I., Piché Y. Mycoparasitism of the extramatrical phase of *Glomus intraradices* by *Trichoderma harzianum*. // *Phytopathology*. 1996. Vol. 86, № 5. С. 434–443

17. Szczałba M., Kopta T., Gaśtoł M., Sękara A. Comprehensive insight into arbuscular mycorrhizal fungi, *Trichoderma* spp. and plant multilevel interactions with emphasis on biostimulation of horticultural crops // *J. Appl. Microbiol.* 2019. Vol. 127, № 3. С. 630–647. DOI: 10.1111/jam.14247

18. Zenteno-Alegria C. O., Yarzabal Rodríguez L. A., Ciancas Jiménez J., Álvarez Gutiérrez P. E., Gunde-Cimerman N., Batista-García R. A. Fungi beyond limits: The agricultural promise of extremophiles // *Microb. Biotechnol.* 2024. Vol. 17, № 3. С. e14439. DOI: 10.1111/1751-7915.14439

19. Zhang K., Sun M., Feng H., Wei X., Xie W., Fu W., Guo L., Zhang X., et al. Synergistic Effects of *Rhizophagus irregularis* and *Trichoderma harzianum* Co-Inoculation on Enhancing Drought Tolerance and Secondary Metabolite Production in Licorice (*Glycyrrhiza uralensis*) // *J. Fungi*. 2025. Vol. 11, № 7. С. 488. DOI: 10.3390/jof11070488.

### References

1. Vasil'chenko S. A., Metlina G. V., Yurkov A. P., Laktionov Yu. V. Sravnitel'naya otsenka primeneniya sovremennykh biopreparatov FGBNU VNIISKHM na produktivnost' kukuruzy i sorgo zernovogo v usloviyakh yuzhnoi prirodno-sel'skokhozyaistvennoi zony Rostovskoi oblasti. [Comparative assessment of the use of modern bioproducts from the FSBSI All-Russian Research Institute for Agricultural Microbiology on maize and grain sorghum productivity in the southern natural agricultural part of the Rostov Region] // *Zernovoe Khozyaistvo Rossii*. 2025. T. 17. № 4. S. 77–83. DOI: 10.31367/2079-8725-2025-99-4-77-83

2. Donskaya M. V, Donskoi M. M. Ispol'zovanie mikrobiologicheskikh preparatov pri vozdeleyvanii perspektivnykh sortov nuta i chiny v Orlovskoi oblasti [The use of microbiological products in the cultivation of promising chickpea and vetch varieties in the Oryol region] // 2023. DOI: 10.24412/2309-348X-2023-1-33-39

3. Isaev O. I. Povyshenie vodoobespechennosti zasushlivykh regionov v usloviyakh izmeneniya klimata [Water availability increase in arid regions under climate change] // *Voprosy stepovedeniya*. 2025. T. 1, S. 25–34. DOI: 10.24412/2712-8628-2025-1-25-34

4. Kudryashova T. R., Kryukov A. A., Gorenkova A. I., Yurkov A. P. Akvaporiny i ikh rol' v rastitel'no-mikrobynykh sistemakh [Aquaporins and their role in plant-microbial systems] // *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Selekcii*. 2025. T. 29, № 2. S. 238–247. DOI: 10.18699/vjgb-25-27

5. Braga A. F., Santos L. D. C., Mendes S. P. D. S. C., Pires F. A., Geraldine A. M., Ferreira Junior W. N. Interaction between *Trichoderma asperellum* and *Bacillus* spp. in the biological control of disease in the soya bean // *Rev. Ciênc. AGRONÔMICA*. 2025. T. 56, C. 1–9. DOI: 10.5935/1806-6690.20250041

6. Cheng S., Zou Y.-N., Kuča K., Hashem A., Abd\_Allah E. F., Wu Q.-S. Elucidating the Mechanisms Underlying Enhanced Drought Tolerance in Plants Mediated by Arbuscular Mycorrhizal Fungi // *Front. Microbiol.* 2021. Vol. 12, С. 809473. DOI: 10.3389/fmicb.2021.809473

8. De Jaeger N., Declerck S., De La Providencia I. E. Mycoparasitism of arbuscular mycorrhizal fungi: a pathway for the entry of saprotrophic fungi into roots: Mycoparasitism of arbuscular mycorrhizal fungi // *FEMS Microbiol. Ecol.* 2010. C. no-no. DOI: 10.1111/j.1574-6941.2010.00903.x.

9. Eftekhari F., Sarcheshmehpour M., Lohrasbi-Nejad A., Boroomand N. Effects of mycorrhizal and *Trichoderma* treatment on enhancing maize tolerance to salinity and drought stress, through metabolic and enzymatic evaluation // *BMC Plant Biol.* 2025. Vol. 25, № 1. С. 687. DOI: 10.1186/s12870-025-06729-x.

10. Green H., Larsen J., Olsson P. A., Jensen D. F., Jakobsen I. Suppression of the Biocontrol Agent *Trichoderma harzianum* by Mycelium of the Arbuscular Mycorrhizal Fungus *Glomus intraradices* in Root-Free Soil // *Appl. Environ. Microbiol.* 1999. Vol. 65, № 4. С. 1428–1434. DOI: 10.1128/AEM.65.4.1428-1434.1999

11. Harman G. E., Uphoff N. Symbiotic Root-Endophytic Soil Microbes Improve Crop Productivity and Provide Environmental Benefits // *Scientifica*. 2019. Vol. 2019, S. 1–25. DOI: 10.1155/2019/9106395

12. Igiehon N. O., Babalola O. O. Biofertilizers and sustainable agriculture: exploring arbuscular mycorrhizal fungi // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2017. Vol. 101, № 12. С. 4871–4881. DOI: 10.1007/s00253-017-8344-z

13. Martínez-Medina A., Roldán A., Albacete A., Pascual J. A. The interaction with arbuscular mycorrhizal fungi or *Trichoderma harzianum* alters the shoot hormonal profile in melon plants // *Phytochemistry*. 2011. Vol. 72, № 2–3. С. 223–229. DOI: 10.1016/j.phytochem.2010.11.008

14. Metwally A. A., Riad G. S., Ghoname A. A., El-Sawy S. M., Salama D. S., Alkhwaga L., Shahin M. G., Saady H. S., et al. Physiological defensive modes to biologically induce drought tolerance in broccoli via inoculation with mycorrhiza and *Trichoderma* // *BMC Plant Biol.* 2025. Vol. 25, № 1. С. 934. DOI: 10.1186/s12870-025-06956-2

15. Poudel M., Mendes R., Costa L. A. S., Bueno C. G., Meng Y., Folimonova S. Y., Garrett K. A., Martins S. J. The

Role of Plant-Associated Bacteria, Fungi, and Viruses in Drought Stress Mitigation // *Front. Microbiol.* 2021. Vol. 12, S. 743512. DOI: 10.3389/fmicb.2021.743512

16. Rousseau A., Benhamou N., Chat I., Piché Y. Mycoparasitism of the extramatrical phase of *Glomus intraradices* by *Trichoderma harzianum*. // *Phytopathology.* 1996. Vol. 86, № 5. S. 434–443

17. Szczałba M., Kopta T., Gaśtoł M., Sękara A. Comprehensive insight into arbuscular mycorrhizal fungi, *Trichoderma* spp. and plant multilevel interactions with emphasis on biostimulation of horticultural crops // *J. Appl. Microbiol.* 2019. Vol. 127, № 3. S. 630–647. DOI: 10.1111/jam.14247

18. Zenteno-Alegría C. O., Yarzabal Rodríguez L. A., Ciancas Jiménez J., Álvarez Gutiérrez P. E., Gunde-Cimerman N., Batista-García R. A. Fungi beyond limits: The agricultural promise of extremophiles // *Microb. Biotechnol.* 2024. Vol. 17, № 3. С. e14439. DOI: 10.1111/1751-7915.14439

19. Zhang K., Sun M., Feng H., Wei X., Xie W., Fu W., Guo L., Zhang X., et al. Synergistic Effects of *Rhizophagus irregularis* and *Trichoderma harzianum* Co-Inoculation on Enhancing Drought Tolerance and Secondary Metabolite Production in Licorice (*Glycyrrhiza uralensis*) // *J. Fungi.* 2025. Vol. 11, № 7. S. 488. DOI: 10.3390/jof11070488.

Поступила: 01.10.25; доработана после рецензирования: 10.12.25; принята к публикации: 19.01.26.

**Критерии авторства.** Авторы статьи подтверждают, что имеют на статью равные права и несут равную ответственность за плагиат.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Авторский вклад.** Иванов П.А., Крюков А.А. — концепция, название, план статьи; абстракт; введение; заключение; раздел «Роль симбионтов в ответе на осмотический стресс-фактор»; корректура; Юрков А.П., Косильников Ю.В. — разделы «Грибные микробные препараты в сельском хозяйстве», «Механизм действия и особенности для грибов АМ и Тр», «Проблемы внедрения и использования микробных препаратов в России»; Беляева А.И. — поиск литературы; подготовка черновика библиографического списка; Бердышева К.Н. — поиск литературы по взаимодействию *Trichoderma* и АМ; формирование итогового библиографического списка (включая DOI); Лактионов Ю.В. (\*) — координация; анализ полевых данных; финальное редактирование; Васильченко С.А. — полевые испытания в Ростовской области; агрономические аспекты; Цирульник О.Г. — совместимость биопрепаратов с фунгицидами и бактериями.

**Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.**