

Экология / Ecology

Научная статья

Original article

DOI: [10.12731/2658-6649-2026-18-2-1513](https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1513)EDN: [HERUUR](https://www.edn.ru/HERUUR)

УДК 582.661.15:581.5:579.6



Влияние эндофитных грибов на формирование устойчивости у *Krascheninnikovia* *ceratoides* Gueldenst. к засухе

П.А. Кузьмин, П.А. Крылов, П.А. Панасенко, А.А. Олейников

ФНЦ агроэкологии РАН, Волгоград, Российская Федерация

Аннотация

Обоснование. В настоящее время остается не изученным вопрос влияния указанных эндофитных, в том числе арбускулярных микоризных грибов (АМГ) на формирование устойчивости к засухе у *Krascheninnikovia ceratoides* (L.) Gueldenst. на территории Юга России.

Цель – изучить влияния представителей эндофитных грибов *Fusarium oxysporum* var. *redolens* и *Simplicillium obclavatum* (W. Gams) Zare & W. Gams, а также АМГ *Rhizophagus intraradices* (Błaszk., Wubet, Renker & Buscot) C. Walker & A. Schüsler и *Funneliformis mosseae* (T.H. Nicolson & Gerd.) C. Walker & A. Schuessler на формирование устойчивости у *K. ceratoides* к засухе.

Материалы и методы. Исследования проводили в контролируемых условиях полива и засухи (n=80). Объект исследования – двухлетние саженцы *K. ceratoides*. Схема опыта включала три экспериментальных группы: *F. oxysporum* var. *redolens*, *S. Obclavatum* и *Glomeraceae*. Проводилась оценка жизненного состояния *K. ceratoides* по морфологическим признакам. Анализ содержания фотосинтетических пигментов и метаболитов в листьях *K. ceratoides* проводили с помощью анализатора растений Dualex Scientific. Оценка наличия и степени заселения корневой системы эндофитной микоризой, проводилась с использованием метода Травло.

Результаты. Жизненное состояние по морфологическим параметрам и фотосинтетическим показателям *K. ceratoides* варьировало по экспериментальным группам и по срокам наблюдения. Лучше жизненное состояние *K. ceratoides* отмечено в вариантах с инокуляцией *S. obclavatum* и *Glomeraceae* при засухе к концу эксперимента по сравнению с *F. oxysporum* var. *redolens*. Содержание суммы хлорофиллов в листьях *K. ceratoides* в вариантах *S. Obclavatum* и *Glomeraceae*

при засухе через две недели эксперимента увеличивается, но к концу эксперимента снижалось. Наибольшее содержания флавоноидов и антоцианов в листьях *K. ceratoides* в условиях засухи к концу эксперимента наблюдалось после инокуляции *F. oxysporum* var. *redolens*. Динамика микоризации во всех инокулированных грибами растениях демонстрировала последовательное увеличение показателей между началом и концом эксперимента. Различия между видами грибов выражались преимущественно в показателях обилия арбускул в корневой системе *K. ceratoides*. Наиболее заметное повышение содержания хлорофиллов, улучшение морфологического состояния и активный рост листьев при дефиците влаги отмечались в растениях с *S. obclavatum* и *Glomeraceae*.

Ключевые слова: *Krascheninnikovia ceratoides*; эндوفитная микориза; арбускулярные микоризные грибы; фотосинтетический аппарат; засуха

Для цитирования. Кузьмин, П. А., Крылов, П. А., Панасенко, П. А., & Олейников, А. А. (2026). Влияние эндوفитных грибов на формирование устойчивости у *Krascheninnikovia ceratoides* Gueldenst. к засухе. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 134–156. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1513>

The effect of endophytic fungi on the formation of resistance in *Krascheninnikovia ceratoides* Gueldenst. to the drought

P.A. Kuzmin, P.A. Krylov, P.A. Panasenko, A.A. Oleynikov

FSC of Agroecology RAS, Volgograd, Russian Federation

Abstract

Background. Currently, the influence of these endophytic fungi, including arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), on the formation of drought resistance in *Krascheninnikovia ceratoides* Gueldenst. in Southern Russia remains unexplored.

Purpose. The aim was to study the effects of representatives of the endophytic fungi *Fusarium oxysporum* var. *redolens* and *Simplicillium obsclavatum*, as well as AMF *Rhizophagus intradices* (Błaszk., Wubet, Renker & Buscot) C. Walker & A. Schüsler and *Funneliformis mosseae* (T.H. Nicolson & Gerd.) C. Walker & A. Schuessler on the formation of resistance in *K. ceratoides* to drought.

Materials and methods. The studies were conducted under controlled laboratory experimental conditions (n=80). The object of the study is two-year-old *K. ceratoides* seedlings. The experimental scheme included four experimental groups: 1. Control; 2. *F. oxysporum* var. *redolens*; 3. *S. Obsclavatum*; 4. *Glomeraceae*. In each group, the reaction from irrigation and drought was determined. The content of photosynthetic pigments and metabolites in *K. ceratoides* leaves was analyzed using a Dualox Scientific plant

analyzer. The assessment of the presence and degree of colonization of the root system by endophytic mycorrhiza was carried out using the Etching method.

Results. The state of life in terms of morphological parameters and photosynthetic parameters of *K. ceratoides* varied by experimental groups and by observation periods. A better vital condition of *K. ceratoides* was noted in variants with inoculation of *S. oblatum* and *Glomeraceae* during drought by the end of the experiment compared with *F. oxysporum* var. *redolens*. The total chlorophyll content in the leaves of *K. ceratoides* in the *S. Oblatum* and *Glomeracea* variants increases after two weeks of the experiment during drought, but decreased by the end of the experiment. The highest content of flavonoids and anthocyanins in the leaves of *K. ceratoides* in drought conditions was observed by the end of the experiment after inoculation with *F. oxysporum* var. *redolens*. The dynamics of mycorrhization in all plants inoculated with fungi demonstrated a consistent increase in indicators between the beginning and the end of the experiment. The differences between the fungal species were expressed mainly in the abundance of arbuscules in the root system of *K. ceratoides*. The most noticeable increase in chlorophyll content, improvement in morphological condition, and active leaf growth with moisture deficiency were observed in plants with *S. oblatum* and *Glomeraceae*.

Keywords: *Krascheninnikovia ceratoides*; endophytic mycorrhiza; arbuscular mycorrhizal fungi; photosynthetic apparatus; drought

For citation. Kuzmin, P. A., Krylov, P. A., Panasenko, P. A., & Oleynikov, A. A. (2026). The effect of endophytic fungi on the formation of resistance in *Krascheninnikovia ceratoides* Gueldenst. to the drought. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 18(2), 134–156. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2026-18-2-1513>

Введение

Терескен серый (*Krascheninnikovia ceratoides* Gueldenst.) является типичным ксерофитом, важным элементом в фитоценозах засушливых территорий, применяется в агролесомелиоративных технологиях. *K. ceratoides* – многолетний полукустарничек, играющий ключевую экологическую роль в пустынных экосистемах, а также используется в качестве ценного кормового ресурса [2; 13; 22].

Арбускулярные микоризные грибы (АМГ) способствуют формированию симбиотических связей между растением и грибом, за счет которого обеспечивается питание, рост и формирование устойчивости древесных и кустарниковых растений к неблагоприятным факторам внешней среды. АМГ является космополитным представителем различных биоценозов [11; 23]. АМГ значительно усиливает доступность минеральных веществ, витаминов, воды, ферментов, гормонов и активных веществ (фосфат и ам-

моний) для растений за счет увеличения площади питания и стабилизации функционирования фотосинтетического аппарата [1; 5].

Типичным представителем АМГ являются *Rhizophagus intraradices* (Błaszk., Wubet, Renker & Buscot) C. Walker & A. Schüsler и *Funneliformis mosseae* (T.H. Nicolson & Gerd.) C. Walker & A. Schuessler, относящиеся к семейству *Glomeraceae*. Данные грибы образуют симбиотические связи с корнями многих видов растений. АМГ широко используется в сельском хозяйстве для стимулирования роста растений, улучшения урожайности и снижения зависимости от химических удобрений [8; 26].

Ранее нами были выявлены и идентифицированы следующие представители эндофитных грибов в корневой системе *K. ceratoides*: *Fusarium oxysporum* var. *redolens* (Wollenw.) W.L. Gordon и *Simplicillium obclavatum* (W. Gams) Zare & W. Gams (Bioproject: PRJNA1188096). Эндофитные грибы рассматриваются как перспективные биологические агенты, способные повышать толерантность растений к абиотическим стрессам за счёт регуляции водного обмена, усиления антиоксидантной защиты и модуляции фитогормонального статуса [10; 16; 17]. *F. oxysporum* var. *redolens* широко распространён в различных экосистемах и часто выступает в роли фитопатогена [6; 12]. *S. obclavatum* часто относят к фитопатогенам, однако также имеются сведения о его антагонистической роли по отношению к ним [24].

В настоящее время остается не изученным вопрос влияния указанных эндофитных грибов, в том числе АМГ, на формирование устойчивости к засухе у *K. ceratoides* на территории Юга России.

В связи с этим целью исследования стало изучение влияния представителей эндофитных грибов *Fusarium oxysporum* var. *redolens* (Wollenw.) W.L. Gordon и *Simplicillium obclavatum* (W. Gams) Zare & W. Gams, а также АМГ *Rhizophagus intraradices* (Błaszk., Wubet, Renker & Buscot) C. Walker & A. Schüsler и *Funneliformis mosseae* (T.H. Nicolson & Gerd.) C. Walker & A. Schuessler на формирование устойчивости у *Krascheninnikovia ceratoides* (L.) Gueldenst. к засухе.

Материалы и методы

Изучение влияния *F. oxysporum* и *S. obclavatum*, а также АМГ *R. intraradices* и *F. mosseae* (коммерческий препарат «Эджис») на формирование устойчивости *K. ceratoides* проводилось в лабораторных условиях. Для проведения эксперимента было выращено 80 двухлетних *K. ceratoides* из семян, собранных с насаждений в Астраханской области на территории «урочища Кордон» (47°24'49.2»N 47°53'01.2»E) в 2023 году. Перед посевом семена подвергли

обработке 1%-м раствором марганцовки для обеззараживания и снижения риска возникновения грибковой гнили во время стратификации. По окончании обработки семена смешивали с влажным песком (соотношение 1:3) и помещали в холодильник при температуре +4 °C на 30 дней для стратификации. Через месяц семена замачивались со стимулятором роста и развития «Эпин-экстра» (соотношение 0,5 мл на 1 л воды) на 2 часа. Обработанные семена помещали в подготовленный заранее грунт: смесь почв с естественного места произрастания (зональные бурые аридные супесчаные и песчаные почвы [3]) и песка в соотношении 1:2 соответственно. Влажность почвы измеряли с помощью влагомера почвы Landtek AZ MC-7828SOIL (AZ Instrument, Китай). Условия проращивания растений из семян подбирались согласно ГОСТу 13056.6-97. Поливали посеянные семена каждые два дня, при этом влажность почвы сохраняли в диапазоне 70-80 % НВ в горшках объемом 2 л, температуру в тепличной комнате на базе Фитотрона ФНЦ агроэкологии РАН, поддерживали около +25 °C. В течение всего периода развития растения получали освещение от полноспектральной фитолампы (максимальная мощность ламп 60 Вт) и имели 12-часовой фотопериод.

Перед началом эксперимента было сформировано одна контрольная (20 особей) и три экспериментальные (60 особей) группы. Контрольная группа представляла собой смесь почв с естественного места произрастания *K. ceratoides*. В первой и второй экспериментальной группе в почву добавляли чистые культуры *F. oxysporum* var. *redolens* и *S. obclavatum* соответственно, которые были нами ранее выделены и идентифицированы в корневой системе *K. ceratoides* (Bioproject: PRJNA1188096). Инокулянты эндофитных грибов добавлялись при первом поливе растений в объеме 20 мл. В третьей экспериментальной группе в почву добавляли смесь *R. intraradices* и *F. mosseae* (*Glomeraceae*). В каждой группе было по две подгруппы (по 10 растений в каждой), в одной из которых осуществлялся полив (влажность почвы 65-75 % НВ), а в другой была смоделирована почвенная засуха (влажность почвы 15-25 % НВ).

Измерение содержания суммы хлорофиллов *a* и *b*, флавоноидов и антоцианов (в мкг/см²), а также расчета индекса азотного баланса (NBI) в листьях *K. ceratoides* проводили с помощью анализатора растений Dualex Scientific (Pessl Instruments GmbH, Австрия).

Измерение содержания фотосинтетических пигментов и метаболитов, а также отбор боковых корней для оценки микоризации корневой системы осуществлялась в начале эксперимента (НЭ), а также через 2 и 4 недели соответственно.

Оценка наличия и степени заселения корневой системы эндофитной микоризой, проводилась с использованием метода Травло [21]. Сегменты корней *K. ceratoides* размером 1 см, предварительно очищенные от земли, дважды промывались в 2%-ном растворе КОН в течение 60 мин при температуре 90°C на водяной бане BW-12 (BEING, Китай). Далее с помощью сетки и пинцетов корни трижды промывали под проточной водой, а затем помещались в 2%-й раствор HCl на 45 мин. После этого корни в индивидуальных кассетах помещались на 1 час в раствор 0,05% трипанового синего в лактоглицерине (молочная кислота, глицерин и вода в соотношении 5:1:1) при температуре 90°C на водяной бане.

Корни после окраски переносились в чашку Петри с 50%-м раствором глицерина. С помощью пинцета аккуратно отделяли слой ризодермы и помещали на предметное стекло. Готовые препараты просматривали на световом микроскопе Микомед-5 (Ломо, Россия). Микрофотографии были получены с помощью насадки для микроскопа E3ISPM08300KPE (ООО «Центр Информационных Технологий «НЕ-ЛИАН», Россия) и программы TourView (TourTek, Китай). Оценка колонизации микоризой корней *K. ceratoides* проводилась на 6 сегментах в 30 полях зрения по следующим показателям в процентах: F – частота появления микоризы в корневой системе (%), M – интенсивность заселения корневой системы микоризой (%), m – интенсивность заселения микоризой фрагментов корней (%), а – наличие арбускул в корневой системе (%) и A – обилие арбускул в микоризных частях фрагментов корней (%). Оценка жизненного состояния *K. ceratoides* проводилась по комплексу признаков, согласно методике [4]: цвету и форме листьев, приросту, наличию увядших молодых побегов и листьев. Были определены следующие категории:

- 1 – хорошее состояние кустарников;
- 2 – удовлетворительное состояние кустарников;
- 3 – неудовлетворительное состояние кустарников.

Количественные данные, полученные после расчета F, M, m, a и A в процентах, обрабатывали с помощью программы Statistica 12.0 (StatSoftInc., США). Рассчитывались показатели, принятые для оценки непараметрических выборок в биологических исследованиях: нормальность распределения значений, медиана [1-й квартиль, 3-й квартиль], анализировалась достоверность различий выборок. Для определения различий между двумя независимыми выборками использовали критерий Манна – Уитни при уровне достоверности $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

В течение всего эксперимента регулярно проводили измерения влажности почвы, результаты которых представлены на рисунке 1. Влажность почвы при засухе составляла от 15 % до 28 % НВ, при поливе – от 58 % до 82 % НВ.

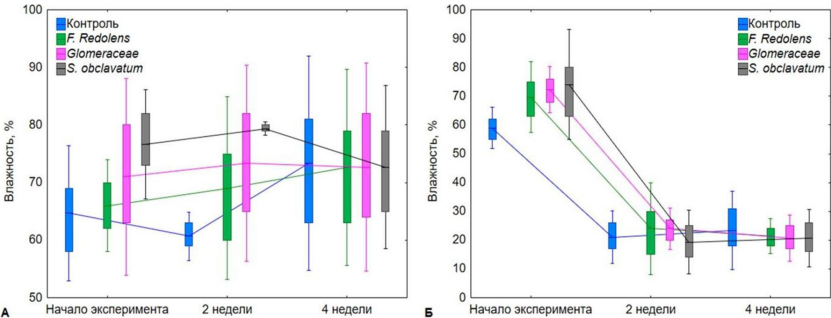


Рис. 1. Показатели влажности почвы в течение 4 недель лабораторных экспериментов у двух подгрупп: А – «полив», Б – «засуха».

Fig. 1. Soil moisture readings over the course of 4 weeks of laboratory experiments for two subgroups: А – “irrigation,” В – “drought.”

Результаты оценки жизненного состояния *K. ceratoides* до и после инокуляции исследуемыми видами эндофитных грибов, а также АМГ, представлены в таблице 1.

Жизненное состояние растений с повышенной концентрацией *F. oxysporum* в почве по прошествии двух недель эксперимента как при поливе, так и при засухе было таким же, как и в контрольном варианте, и составляло 1,2 балла.

Таблица 1.

Оценка жизненного состояния *K. ceratoides* в течение эксперимента

Table 1. Assessment of the Vital Condition of *K. ceratoides* Throughout the Experiment

Экспериментальная группа		Средний балл жизненного состояния
Начало эксперимента		1,1
2 недели		
Контрольная группа	полив	1,2
	засуха	1,2
<i>F. oxysporum</i>	полив	1,2
	засуха	1,2
<i>S. obclavatum</i>	полив	1,1
	засуха	1,2
<i>Glomeraceae</i>	полив	1,1
	засуха	1,3

4 недели		
Контрольная группа	полив	1,2
	засуха	2,6
<i>F. oxysporum</i>	полив	1,2
	засуха	2,7
<i>S. obclavatum</i>	полив	1,1
	засуха	2,6
<i>Glomeraceae</i>	полив	1,3
	засуха	2,8

В варианте с применением *S. obclavatum* и *Glomeraceae* при поливе наблюдалось снижение баллов жизненного состояния растений на 0,1 балл, а при засухе, наоборот, увеличение баллов на 0,1 и 0,2 соответственно, по сравнению с контролем. В течение первых двух недель у растений во всех группах активно развивались новые зелёные побеги, почки и молодые листья (рис. 2). Было отмечено появление новых корневых волосков в контрольной группе растений, а также с *S. obclavatum* и *Glomeraceae* в почве.



Рис. 2. Общий вид *K. ceratoides* через две недели в условиях полива:

А – контрольная группа, Б – *F. oxysporum*, В – *S. obclavatum*, Г – *Glomeraceae* и засухи: Д, Е, Ж, З – А – контрольная группа, Б – *F. oxysporum*, В – *S. obclavatum*, Г – *Glomeraceae*

Fig. 2. General view of *K. ceratoides* after two weeks under irrigated conditions: А – control group, В – *F. oxysporum*, С – *S. obclavatum*, Д – *Glomeraceae*; and under drought conditions:

Е, F, G, H – А – control group, В – *F. oxysporum*, С – *S. obclavatum*, Д – *Glomeraceae*

Через четыре недели эксперимента было отмечено увеличение на 1,4 и 1,6 баллов жизненного состояния при засухе во всех вариантах эксперимента, по сравнению с контролем. Наилучшие значения параметров морфологического состояния наблюдались в группе *S. obclavatum* в варианте с поливом. У большинства растений данной группы отмечался активный прирост относительно начала эксперимента (средний показатель около

13,5 см), длина листовых пластин составляла в среднем 1,3-1,5 см, а ширина – 0,5-0,6 см. У контрольной группы растений и в варианте с применением *F. oxysporum* при поливе среднее значение прироста составляло 6,0-7,0 см и 3,0-4,0 см при засухе соответственно. В варианте с использованием *Glomeraceae* прирост побегов растений составлял 5,0-6,0 см в условиях полива и засухи, длина листьев – 1,5 см (при поливе) и 0,3-0,5 см (при засухе) (Рис. 3).

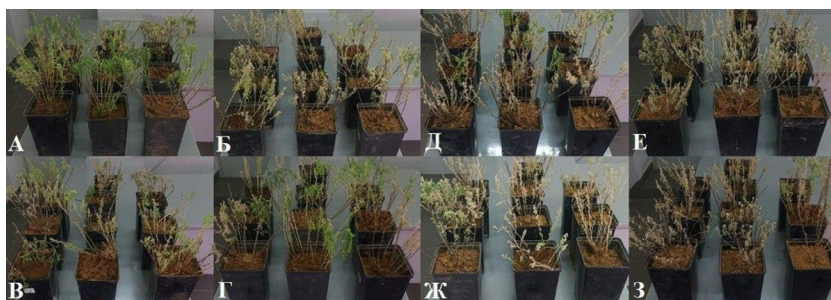


Рис. 3. Общий вид *K. ceratoides* через четыре недели в условиях полива: А – контрольная группа, Б – *F. oxysporum*, В – *S. obclavatum*, Г – *Glomeraceae* и засухи: Д – контрольная группа, Е – *F. oxysporum*, Ж – *S. obclavatum*, З – *Glomeraceae*

Fig. 3. General view of *K. ceratoides* after four weeks under irrigated conditions: А – control group, В – *F. oxysporum*, С – *S. obclavatum*, Д – *Glomeraceae*; and under drought conditions: Е – control group, F – *F. oxysporum*, G – *S. obclavatum*, H – *Glomeraceae*

Результаты по содержанию суммы хлорофиллов, флавоноидов, антоцианов и индекса азотного баланса в листьях у *K. ceratoides*, выращенного в лабораторных условиях в вариантах с применением эндофитных грибов и АМГ при поливе и засухе, представлены в таблице 2.

Через две недели после начала эксперимента максимальное содержание суммы хлорофиллов при поливе отмечено в контрольной группе (8,0 мкг/см² сырой массы). В экспериментальной группе, где была произведена инокуляция *F. oxysporum*, достоверная разница в содержании хлорофиллов составила 7,39 мкг/см² сырой массы по сравнению с контролем, в группе с инокуляцией *S. obclavatum* – 15,84 мкг/см² сырой массы и 10,30 мкг/см² сырой массы относительно варианта с *Glomeraceae*. На второй неделе при инокуляции *S. obclavatum* большее содержание хлорофиллов было при засухе, и разница составила 15,7 мкг/см² сырой массы ($p < 0,05$). При инокуляции *K. ceratoides* *Glomeraceae* показатель содержания хлорофиллов в листьях увеличился и был выше при засухе на 13,13 мкг/см² сырой массы по сравнению с поли-

вом. Также были выявлены достоверные отличия между экспериментальными группами на второй неделе при засухе, а именно в группе с *F. oxysporum* было наименьшее содержание хлорофиллов по сравнению с *S. obclavatum* и *Glomeraceae* на 15,84 и 10,24 мкг/см² сырой массы соответственно. Через две недели при засухе после инокуляции *S. obclavatum* и *Glomeraceae* было зафиксировано превышение на 16,9 и 11,3 мкг/см² сырой массы суммы хлорофиллов, а на четвертой неделе на 2,25 и 1,97 мкг/см² сырой массы соответственно. При этом внутри этих же экспериментальных групп отмечалась тенденция по снижению данного показателя к четвертой неделе.

Таблица 2.

**Содержание фотосинтетических пигментов и метаболитов
у *K. ceratoides* в условиях засухи и полива**

Table 2. Content of photosynthetic pigments and metabolites in *K. ceratoides*
under drought and irrigation conditions

Экспериментальная группа	Параметры	Хл <i>a</i> + <i>b</i> , мкг/см ² сырой массы	Флавоноиды, мкг/см ² сырой массы	Антоцианы, мкг/см ² сырой массы	NBI, усл. ед.
	Начало эксперимента	6,73* [4,61 ÷ 8,04]	0,25* [0,16 ÷ 0,35]	0,26 [0,22 ÷ 0,32]	21* [16 ÷ 30]
	2 недели				
Контрольная	Полив	8,00#& [7,57 ÷ 11,0]	0,35& [0,22 ÷ 0,35]	0,34& [0,29 ÷ 0,44]	25 [18 ÷ 38]
	Засуха	15,15#& [11,0 ÷ 23,6]	0,16 [0,14 ÷ 0,30]	0,26 [0,15 ÷ 0,30]	50 [14 ÷ 65]
<i>F. oxysporum</i>	Полив	3,52 [3,04 ÷ 8,35]	0,14&^ [0,13 ÷ 0,21]	0,30 [0,21 ÷ 0,45]	22* [16 ÷ 52]
	Засуха	7,76&^ [6,16 ÷ 8,77]	0,15* [0,10 ÷ 0,29]	0,36 [0,16 ÷ 0,37]	43^ [21 ÷ 57]
<i>S. obclavatum</i>	Полив	7,90#^ [6,42 ÷ 13,04]	0,90*^ [0,29 ÷ 1,10]	0,26 [0,17 ÷ 0,29]	21*# [18 ÷ 22]
	Засуха	23,6*#^ [19,46 ÷ 24,23]	0,23 [0,20 ÷ 0,62]	0,35 [0,27 ÷ 0,39]	35*# [31 ÷ 115]
<i>Glomeraceae</i>	Полив	4,87#&^ [2,67 ÷ 5,68]	0,13 [0,10 ÷ 0,36]	0,22& [0,19 ÷ 0,23]	19# [16 ÷ 42]
	Засуха	18,00*#^ [15,07 ÷ 19,29]	0,21 [0,08 ÷ 0,31]	0,31 [0,10 ÷ 0,37]	89*#^ [58 ÷ 170]
4 недели					
Контрольная	Полив	5,20 [3,13 ÷ 8,06]	0,05#& [0,04 ÷ 0,12]	0,28 [0,26 ÷ 0,33]	71#& [65 ÷ 97]
	Засуха	9,19 [5,69 ÷ 10,12]	0,40#& [0,34 ÷ 0,66]	0,17& [0,17 ÷ 0,27]	16#& [15 ÷ 23]

<i>F. oxysporum</i>	Полив	10,54 [7,58 ÷ 11,76]	0,09# [^] [0,06 ÷ 0,20]	0,37 [0,30 ÷ 0,38]	81*# [^] [57 ÷ 151]
	Засуха	8,90 [5,47 ÷ 9,83]	0,42*# [^] [0,39 ÷ 0,48]	0,41& [^] [0,32 ÷ 0,45]	21# [^] [11 ÷ 25]
<i>S. obclavatum</i>	Полив	10,57 [7,81 ÷ 12,43]	0,08* [0,02 ÷ 0,15]	0,33 [0,30 ÷ 0,35]	131* [^] [82 ÷ 289]
	Засуха	8,98* [7,95 ÷ 9,92]	0,22& [^] [0,06 ÷ 0,23]	0,39 [0,27 ÷ 0,40]	43* [^] [40 ÷ 125]
<i>Glomeraceae</i>	Полив	6,79 [5,28 ÷ 8,49]	0,25& [^] [0,14 ÷ 0,42]	0,38 [0,25 ÷ 0,56]	20& [^] [16 ÷ 57]
	Засуха	8,70* [8,17 ÷ 12,40]	0,26 [^] [0,23 ÷ 0,57]	0,25 [^] [0,11 ÷ 0,32]	32* [14 ÷ 52]

* – достоверно значимые различия между началом эксперимента, 2-мя и 4-мя неделями в каждой экспериментальной группы, # – между экспериментальными под-группами «засуха» и «полив», & – между контрольной группой и экспериментальной группой, ^ – между экспериментальными группами. Тест Манна-Уитни ($p < 0,05$)

* – statistically significant differences between the start of the experiment, weeks 2 and 4 in each experimental group; # – between the “drought” and “irrigation” experimental subgroups; & – between the control group and an experimental group; ^ – between experimental groups. Mann-Whitney test ($p < 0.05$)

Через две недели после начала эксперимента максимальное содержание флавоноидов, являющихся ключевыми компонентами защиты от окислительного стресса [19], при регулярном поливе выявили в группе с *S. obclavatum* (0,9 мкг/см² сырой массы), а при засухе – у *Glomeraceae* (0,25 мкг/см² сырой массы). В этот же период при поливе были выявлены достоверные различия в содержании флавоноидов между *F. oxysporum* и контрольной группой. При этом в варианте с *S. obclavatum* содержание флавоноидов в листьях *K. ceratoides* было больше на 0,76 мкг/см² сырой массы, чем у *F. oxysporum*. В контрольной группе на четвертой неделе при засухе увеличилось на 0,35 мкг/см² сырой массы по сравнению с поливом. Аналогичная картина наблюдалась также в группе *F. oxysporum*. Через четыре недели содержание флавоноидов при группе с добавлением *Glomeraceae* увеличилось на 0,20 мкг/см² сырой массы и по сравнению с контролем, а в варианте с *S. obclavatum*, наоборот, уменьшилось на 0,18 мкг/см² сырой массы ($p < 0,05$). К концу четвёртой недели динамика флавоноидов изменилась: на фоне адаптации растений к стрессу их уровень оставался более стабильным, но при этом варианты с *F. oxysporum* и *S. obclavatum* демонстрировали более высокую активность вторичного метаболизма, что подтверждает участие эндофитов в регуляции антиоксидантных путей [7].

Содержание антоцианов в листьях *K. ceratoides* в течение всего эксперимента значительно не снижалось. Однако, на второй неделе было зафиксировано снижение в группе с *Glomeraceae* на 0,12 мкг/см² сырой массы ($p < 0,05$). На четвертой неделе при засухе содержание антоцианов резко выросло в группе с *F. oxysporum* по сравнению с *Glomeraceae* ($p < 0,05$). Такое резкое увеличение содержания растительных пигментов может свидетельствовать о включении дополнительных механизмов защиты мембран в условиях сильного стресса.

Индекс азотного баланса в варианте с засухой через две недели после начала эксперимента был достоверно выше, чем при поливе на 14 и 70 единиц в экспериментальных группах *S. obclavatum* и *Glomeraceae*, соответственно. В этот же период показатель индекса азотного баланса был в 2 раза выше в группе *Glomeraceae* по сравнению с *F. oxysporum* ($p < 0,05$). На четвертой неделе после инокуляции *F. oxysporum* были выявлены достоверные различия между поливом и засухой. В группе с *S. obclavatum* индекс азотного баланса был меньше на 27 единиц по сравнению с контролем. В группе с *F. oxysporum* индекс был меньше в 2 раза по сравнению с *S. obclavatum* к концу эксперимента в условиях засухи ($p < 0,05$). Было зафиксировано, что к концу четвертой недели индекс азотного баланса сильно снизился при поливе и засухе в группе, где растения были инокулированы АМГ относительно *F. oxysporum* и *S. obclavatum*.

Таблица 3.

**Показатели интенсивности микоризации эндوفитными грибами
и АМГ корневой системы *K. ceratoides***

Table 3. Indicators of the intensity of mycorrhization by endophytic fungi and AMF in the root system of *K. ceratoides*

	Параметры	F, %	M, %	m, %	a, %	A, %
Экспериментальная группа	Начало эксперимента	66*	21*	42	32	8*
	2 недели					
Контрольная	Полив	17&	1&	1&	1&	1
	Засуха	66&	6&	8&	1&	2
<i>F. oxysporum</i>	Полив	100*&	43&	43&	6&^	5^
	Засуха	100*&	60*&^	13&	5&^	4^
<i>S. obclavatum</i>	Полив	100*&	56*&	56&	8&^	5^
	Засуха	100*&	42&^	42&^	7&^	3^
<i>Glomeraceae</i>	Полив	100*&	71&	71&	57*&^	39*&^
	Засуха	100*&	69*&	69&	57&^	49*&^

	4 недели					
Контрольная	Полив	83	27&	32&	28&	49&
	Засуха	68	44&	45&	7	11
<i>F. oxysporum</i>	Полив	100*	90	90	14#	7#&^
	Засуха	100*	72*&	72&	6^	2^
<i>S. obclavatum</i>	Полив	100*	90*&	90&	10#&^	7^
	Засуха	100*	75&	75	15#^	8^
<i>Glomeraceae</i>	Полив	100*	75	75	48*&^	36*&^
	Засуха	100*	80*\$	80\$	46^	36*&^

* – достоверно значимые различия между внутри каждой экспериментальной группы, # – между экспериментальными подгруппами «засуха» и «полив», & – между контрольной группой и экспериментальной, ^ – между экспериментальными группами. Показатели колонизации корневой системы эндифитными грибами, включая АМГ. F – частота появления микоризы в корневой системе, M – интенсивность заселения корневой системы микоризо, m – интенсивность заселения микоризой фрагментов корней, a – наличие арбускул в корневой системе и A – обилие арбускул в микоризных частях фрагментов корней.

* – statistically significant differences within each experimental group; # – between the “drought” and “irrigation” experimental subgroups; & – between the control group and an experimental group; ^ – between experimental groups. Indicators of endophytic fungal colonization of the root system, including AM fungi. F – frequency of mycorrhiza occurrence in the root system; M – intensity of mycorrhizal colonization of the root system; m – intensity of mycorrhizal colonization of root fragments; a – presence of arbuscules in the root system; and A – abundance of arbuscules in the mycorrhizal parts of root fragments.

Динамика микоризации во всех инокулированных грибами растениях демонстрировала последовательное увеличение показателей между началом эксперимента, двумя и четырьмя неделями. Наиболее заметное увеличение наблюдалось в показателях частоты колонизации микоризой в корневой системе, которая у растений с инокуляцией всех трёх исследуемых грибов достигала 100% уже на второй неделе и сохранялась на этом уровне до четвертой недели как при поливе, так и при засухе. Показатели интенсивности микоризной колонизации в вариантах с *F. oxysporum* и *S. obclavatum* были умеренно выше контрольных значений, однако обилие арбускул в микоризных частях корневой системы в вариантах *F. oxysporum* и *S. obclavatum* и контролем оставалось низким. Во всех вариантах опыта в начале эксперимента наблюдались единичные арбускулярные структуры.

Через 2 недели во всех корнях инокулированных растений происходило резкое увеличение частоты микоризы. Частота появления микоризы достигала 100 % у *Glomeraceae*, *F. oxysporum* и *S. obclavatum* независимо от ре-

жима увлажнения, при этом значения были достоверно выше контрольных измерений. В вариантах с засухой через две недели наблюдалось увеличение микоризной колонизации корневой системы и фрагментов корней на 54 %, 36 % и 63 % соответственно в группах *F. oxysporum*, *S. obclavatum* и *Glomeraceae* ($p < 0,05$). При поливе наблюдалась аналогичная ситуация. На четвертой неделе эксперимента в варианте с засухой наблюдалось усиление интенсивности микоризации корневой системы *K. ceratoides* во всех экспериментальных группах по сравнению с контролем.

На второй неделе эксперимента как при поливе, так и при засухе было выявлено максимальное значение наличия арбускул и их обилие в фрагментах корневой системы *K. ceratoides* после инокуляции *Glomeraceae* по сравнению с контролем и другими экспериментальными группами ($p < 0,05$). Данная тенденция сохранялась к концу эксперимента.

Таким образом, на всех этапах эксперимента образцы, взятые из инокулированных грибами *K. ceratoides*, демонстрировали достоверный рост частоты микоризы, интенсивности микоризной колонизации и обилия арбускул относительно контроля. Различия между видами грибов выражались преимущественно в показателях обилия арбускул, что отражало различную степень формирования арбускулярных структур в корневой системе *K. ceratoides*.

Наиболее заметное повышение содержания хлорофиллов, улучшение морфологического состояния и активный рост листьев при дефиците влаги отмечались в растениях при инокуляции *S. obclavatum*. Сходные эффекты описаны в работах по представителям близких родов *Simplicillium* и *Scolecobasidium*. Например, *Scolecobasidium humicola* стимулировал рост томата и повышал способность растений усваивать органический азот благодаря эндوفитной модуляции метаболизма [14]. Это совпадает с наблюдаемым у *K. ceratoides* ростом содержанием хлорофиллов, а также усилением физиологической активности под воздействием *S. obclavatum*, что позволяет предположить о возможной мутуалистической связи.

У *K. ceratoides* отмечается специфическая ответная реакция на засуху при инокуляции корневой системы *F. oxysporum*, которая проявляется в повышении содержания антоцианов и флавоноидов, что указывает на стресс, испытываемый растений и включением элементов антиоксидантной системы защиты. Подобная двойственная природа штаммов рода *Fusarium* хорошо известна: они могут как стимулировать рост растений, так и проявлять латентную патогенность в зависимости от условий и конкретного генотипа штамма [18; 20]. Исследования подчёркивают, что эндوفитные

штаммы *Fusarium* синтезируют широкий спектр вторичных метаболитов, способных усиливать стрессоустойчивость растений, хотя в ряде случаев описано наличие фитопатогенных свойств у близких популяций [9].

Наиболее предсказуемый и классический эффект продемонстрировали АМГ. Вариант *Glomeraceae* характеризовался высокой частотой и интенсивностью микоризации, значительным образованием арбускул и улучшением физиологического состояния растений как при поливе, так и при засухе. Эти результаты полностью соответствуют многочисленным исследованиям [8, 26], показывающим, что АМГ повышают устойчивость растений к засухе за счёт улучшения поглощения воды, фосфора и регулирования осмотического статуса. Например, *Rhizophagus clarus* значительно повышал устойчивость сои к водному дефициту за счёт улучшения фотосинтетической активности и статуса воды [15], а *R. irregularis* регулировал азотный обмен и усиливал устойчивость к засухе у других культур [25]. Это согласуется с наблюдаемым у *K. ceratoides* повышением NBI, увеличением содержания хлорофиллов и ускоренным развитием корневой микоризы под воздействием АМГ.

Заключение

1. В варианте с применением *S. obclavatum* и *Glomeraceae* при поливе наблюдается снижение баллов жизненного состояния растений на 0,1 балл, а при засухе, наоборот, увеличение баллов на 0,1 и 0,2 соответственно, по сравнению с контролем. Через четыре недели эксперимента отмечается увеличение на 1,4 и 1,6 баллов жизненного состояния при засухе во всех вариантах эксперимента, по сравнению с контролем. Наилучшие значения параметров морфологического состояния наблюдаются в группе *S. obclavatum* в варианте с поливом.

2. Содержание суммы хлорофиллов в листьях *K. ceratoides* в вариантах *S. Obclavatum* и *Glomeracea* при засухе через две недели эксперимента увеличивается, по сравнению с контролем, а через четыре недели, наоборот, снижается. В вариантах с засухой в течение всего периода наблюдения отмечается увеличение содержания флавоноидов в листьях *K. ceratoides*, при этом более высокое содержание его в вариантах с *F. oxysporum* и *S. Obclavatum*. Содержание антоцианов в листьях *K. ceratoides* в течение всего эксперимента значительно не снижалось. На четвертой неделе при засухе содержание антоцианов резко выросло в группе с *F. oxysporum* по сравнению с *Glomeraceae*. Индекс азотного баланса в варианте с засухой через две недели после начала эксперимента достоверно выше, чем при

поливе на 14 и 70 единиц в экспериментальных группах *S. obclavatum* и *Glomeraceae*, соответственно.

3. Динамика микоризации во всех инокулированных грибами растениях демонстрирует последовательное увеличение показателей между началом эксперимента, двумя и четырьмя неделями. Наиболее заметное увеличение наблюдается в показателях частоты колонизации микоризой в корневой системе, которая у растений с инокуляцией всех трёх исследуемых грибов достигает 100% уже на второй неделе и сохраняется на этом уровне до четвертой недели как при поливе, так и при засухе. В вариантах с засухой через две недели наблюдается увеличение микоризной колонизации корневой системы и фрагментов корней на 54 %, 36 % и 63% соответственно в группах *F. oxysporum*, *S. obclavatum* и *Glomeraceae*.

4. Во всех вариантах опыта наблюдается увеличение частоты микоризации, интенсивности микоризной колонизации и обилия арбускул относительно контроля. Различия между вариантами отмечаются в показателях обилия арбускул. Максимальные значения по содержанию хлорофиллов, морфологическим параметрам и активности роста листьев при дефиците влаги отмечаются в растениях, инокулированных *S. obclavatum*. Вариант с применением *Glomeraceae* характеризуется высокой частотой и интенсивностью микоризации, значительным образованием арбускул и улучшением физиологического состояния растений как при поливе, так и при засухе.

Информация о спонсорстве. Работа выполнена при поддержке проекта Российского научного фонда № 24-26-00174 «Видовое разнообразие арбускулярной эндомикоризы и ее влияние на засухоустойчивость ксерофитных растений аридных территорий Юга России».

Список литературы

1. Брындина, Л. В., Арнаут, Ю. И., & Алыкова, О. И. (2022). Микоризообразующие грибы в формировании биогеоценозов: аналитический обзор. *Лесотехнический журнал*, 12(1), 5–20. <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.1/1>. EDN: <https://elibrary.ru/TNJJDG>
2. Булахтина, Г. К. (2022). Изучение адаптивного потенциала кормовых кустарниковых растений для использования в восстановлении деградированных полупустынных пастбищных экосистем. *Аграрный вестник Урала*, 1(216), 2–11. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2022-216-01-2-11>. EDN: <https://elibrary.ru/BHZFBU>
3. Бурукина, Е. А., Колесников, С. И., Яковлева, Л. В., & Минникова, Т. В. (2024). Исследование фитотоксичности почв Астраханской области, подверженных

- пастбищной дигрессии. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки*, 1(221), 126–132. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2024-1-126-132>. EDN: <https://elibrary.ru/DONAMC>
4. Кириллов, С. Н., & Половинкина, Ю. С. (2013). Оценка состояния зеленых насаждений общего пользования г. Волгограда. *Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 11: Естественные науки*, 1(5), 29–34. EDN: <https://elibrary.ru/RTPMBP>
 5. Abdel Latef, A. A. H., & Chaoxing, H. (2011). Arbuscular mycorrhizal influence on growth, photosynthetic pigments, osmotic adjustment and oxidative stress in tomato plants subjected to low temperature stress. *Acta Physiol Plant*, 33, 1217–1225. <https://doi.org/10.1007/s11738-010-0650-3>. EDN: <https://elibrary.ru/GUXHHP>
 6. Abdel-Azeem, A. M., Abdel-Azeem, M. A., Darwish, A. G., Nafady, N. A., & Ibrahim, N. A. (2019). *Fusarium*: Biodiversity, ecological significances, and industrial applications. In A. Yadav, S. Mishra, S. Singh, & A. Gupta (Eds.), *Recent advancement in white biotechnology through fungi*. Fungal Biology. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-10480-1_6
 7. Hamilton, C. E., Gundel, P. E., Helander, M., & Saikkonen, K. (2012). Endophytic mediation of reactive oxygen species and antioxidant activity in plants: a review. *Fungal Diversity*, 54, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s13225-012-0158-9>. EDN: <https://elibrary.ru/PIODNL>
 8. Huang, S., Gill, S., Ramzan, M., Ahmad, M. Z., Danish, S., Huang, P., Al Obaid, S., & Alharbi, S. A. (2023). Uncovering the impact of AM fungi on wheat nutrient uptake, ion homeostasis, oxidative stress, and antioxidant defense under salinity stress. *Scientific reports*, 13(1), 8249. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35148-x>. EDN: <https://elibrary.ru/PJLGGS>
 9. Kamel, N. M., Abdel-Motaal, F. F., & El-Zayat, S. A. (2020). Endophytic fungi from the medicinal herb *Euphorbia geniculata* as a potential source for bioactive metabolites. *Arch Microbiol*, 202, 247–255. <https://doi.org/10.1007/s00203-019-01740-x>. EDN: <https://elibrary.ru/HSLVIX>
 10. Khan, A. L., Hussain, J., Al-Harrasi, A., Al-Rawahi, A., & Lee, I. J. (2015). Endophytic fungi: resource for gibberellins and crop abiotic stress resistance. *Critical reviews in biotechnology*, 35(1), 62–74. <https://doi.org/10.3109/07388551.2013.800018>
 11. Kryukov, A. A., Yurkov, A. P., Gorbunova, A. O., Kudriashova, T. R., Gorenkova, A. I., Kosulnikov, Y. V., & Laktionov, Y. V. (2025). Evaluation of the biodiversity of arbuscular mycorrhizal fungi during regenerative succession in quarries. *Vavilovskii zhurnal genetiki i selektsii*, 29(1), 72–78. <https://doi.org/10.18699/vjgb-25-09>. EDN: <https://elibrary.ru/FMBHOQ>

12. Laurence, M. H., Burgess, L. W., Summerell, B. A., & Liew, E. C. (2012). High levels of diversity in *Fusarium oxysporum* from non-cultivated ecosystems in Australia. *Fungal biology*, 116(2), 289–297. <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2011.11.011>
13. Liu, Y., Zheng, C., Su, X., Chen, J., Li, X., Sun, C., & Nizamani, M. M. (2024). Comparative analysis and characterization of the chloroplast genome of *Krascheninnikovia ceratoides* (Amarathaceae): a xerophytic semi-shrub exhibiting drought resistance and high-quality traits. *BMC genomic data*, 25(1), 10. <https://doi.org/10.1186/s12863-024-01197-y>. EDN: <https://elibrary.ru/FIBJIX>
14. Mahmoud, R. S., & Narisawa, K. (2013). A new fungal endophyte, *Scolecobasidium humicola*, promotes tomato growth under organic nitrogen conditions. *PloS one*, 8(11), e78746. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0078746>
15. Oliveira, T. C., Cabral, J. S. R., Santana, L. R., Tavares, G. G., Santos, L. D. S., Paim, T. P., Müller, C., Silva, F. G., Costa, A. C., Souchie, E. L., & Mendes, G. C. (2022). The arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus clarus* improves physiological tolerance to drought stress in soybean plants. *Scientific reports*, 12(1), 9044. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13059-7>. EDN: <https://elibrary.ru/MOGAPC>
16. Ramatsitsi, N., & Manyevere, A. (2025). Roles of endophytic fungi in plant resilience under abiotic stress: A mechanistic review with implications for climate-smart agriculture. *Plant Signaling & Behavior*, 20(1), 2578712. <https://doi.org/10.1080/15592324.2025.2578712>. EDN: <https://elibrary.ru/LUBRCG>
17. Ripa, F. A., Cao, W. D., Tong, S., & Sun, J. G. (2019). Assessment of plant growth promoting and abiotic stress tolerance properties of wheat endophytic fungi. *BioMed research international*, 2019, 6105865. <https://doi.org/10.1155/2019/6105865>
18. Rodriguez, R. J., White, J. F., Jr., Arnold, A. E., & Redman, R. S. (2009). Fungal endophytes: diversity and functional roles. *The New phytologist*, 182(2), 314–330. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.02773.x>
19. Shen, N., Wang, T., Gan, Q., Liu, S., Wang, L., & Jin, B. (2022). Plant flavonoids: Classification, distribution, biosynthesis, and antioxidant activity. *Food chemistry*, 383, 132531. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132531>. EDN: <https://elibrary.ru/JJBYKA>
20. Toghuco, R. M. K. (2019). Bioprospecting endophytic fungi from *Fusarium* genus as sources of bioactive metabolites. *Mycology*, 11(1), 1–21. <https://doi.org/10.1080/21501203.2019.1645053>
21. Trouvelot, A., Kough, J. L., & Gianinazzi-Pearson, V. (1986). Mesure du taux de mycorhization VA d'un système racinaire. Recherche de méthodes d'estimation ayant une signification fonctionnelle. In V. Gianinazzi-Pearson & S. Gianinazzi (Eds.), *Physiological and genetical aspects of mycorrhizae* (pp. 217–221). INRA Press.
22. Tyutyuma, N. V., Bulakhtina, G. K., & Kudryashova, N. I. (2018). Creation of fodder agrophytocenoses for the restoration of degraded native pastures and im-

- provement of their performance. *Arid Ecosyst*, 8, 122–128. <https://doi.org/10.1134/S2079096118020099>. EDN: <https://elibrary.ru/XXZCPZ>
23. Walker, C., Schüßler, A., Vincent, B., Cranenbrouck, S., & Declerck, S. (2021). Anchoring the species *Rhizophagus intraradices* (formerly *Glomus intraradices*). *Fungal systematics and evolution*, 8, 179–201. <https://doi.org/10.3114/fuse.2021.08.14>. EDN: <https://elibrary.ru/ZUDEOU>
 24. Wang, N., Fan, X., Zhang, S., Liu, B., He, M., Chen, X., Tang, C., Kang, Z., & Wang, X. (2020). Identification of a hyperparasitic *Simplicillium obclavatum* strain affecting the infection dynamics of *Puccinia striiformis* f. sp. tritici on wheat. *Frontiers in microbiology*, 11, 1277. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01277>. EDN: <https://elibrary.ru/LPDAOW>
 25. Wang, Z., Zhang, S., Liang, J., Chen, H., Jiang, Z., Hu, W., & Tang, M. (2024). *Rhizophagus irregularis* regulates RiCPSI and RiCARI expression to influence plant drought tolerance. *Plant physiology*, 197(1), kiae645. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiae645>
 26. Wu, F., Luo, W., Li, J., Xing, W., Lyu, L., Yang, J., Liu, R., & Shi, Z. (2022). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on accumulation and translocation of selenium in winter wheat. *Journal of the science of food and agriculture*, 102(14), 6481–6490. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12015>. EDN: <https://elibrary.ru/YGXXGG>

References

1. Bryndina, L. V., Arnaut, Yu. I., & Alykova, O. I. (2022). Mycorrhiza-forming fungi in the formation of biogeocenoses: An analytical review. *Forest Engineering Journal*, 12(1), 5–20. <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2022.1/1>. EDN: <https://elibrary.ru/TNJJDG>
2. Bulakhtina, G. K. (2022). Study of the adaptive potential of fodder shrub plants for use in the restoration of degraded semi-desert pasture ecosystems. *Agrarian Bulletin of the Urals*, 1(216), 2–11. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2022-216-01-2-11>. EDN: <https://elibrary.ru/BHZFBU>
3. Burukina, E. A., Kolesnikov, S. I., Yakovleva, L. V., & Minnikova, T. V. (2024). Study of phytotoxicity of soils in the Astrakhan region subjected to pasture degradation. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Series: Natural Sciences*, 1(221), 126–132. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2024-1-126-132>. EDN: <https://elibrary.ru/DONAMC>
4. Kirillov, S. N., & Polovinkina, Yu. S. (2013). Assessment of the condition of public green spaces in Volgograd. *Science Journal of Volgograd State University. Series 11: Natural Sciences*, 1(5), 29–34. EDN: <https://elibrary.ru/RTPMBP>
5. Abdel Latef, A. A. H., & Chaoxing, H. (2011). Arbuscular mycorrhizal influence on growth, photosynthetic pigments, osmotic adjustment and oxidative stress in toma-

- to plants subjected to low temperature stress. *Acta Physiol Plant*, 33, 1217–1225. <https://doi.org/10.1007/s11738-010-0650-3>. EDN: <https://elibrary.ru/GUXHHP>
6. Abdel-Azeem, A. M., Abdel-Azeem, M. A., Darwish, A. G., Nafady, N. A., & Ibrahim, N. A. (2019). *Fusarium*: Biodiversity, ecological significances, and industrial applications. In A. Yadav, S. Mishra, S. Singh, & A. Gupta (Eds.), *Recent advancement in white biotechnology through fungi*. Fungal Biology. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-10480-1_6
 7. Hamilton, C. E., Gundel, P. E., Helander, M., & Saikkonen, K. (2012). Endophytic mediation of reactive oxygen species and antioxidant activity in plants: A review. *Fungal Diversity*, 54, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s13225-012-0158-9>. EDN: <https://elibrary.ru/PIODNL>
 8. Huang, S., Gill, S., Ramzan, M., Ahmad, M. Z., Danish, S., Huang, P., Al Obaid, S., & Alharbi, S. A. (2023). Uncovering the impact of AM fungi on wheat nutrient uptake, ion homeostasis, oxidative stress, and antioxidant defense under salinity stress. *Scientific Reports*, 13(1), 8249. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35148-x>. EDN: <https://elibrary.ru/PJLGGS>
 9. Kamel, N. M., Abdel-Motaal, F. F., & El-Zayat, S. A. (2020). Endophytic fungi from the medicinal herb *Euphorbia geniculata* as a potential source for bioactive metabolites. *Arch Microbiol*, 202, 247–255. <https://doi.org/10.1007/s00203-019-01740-x>. EDN: <https://elibrary.ru/HSLVIX>
 10. Khan, A. L., Hussain, J., Al-Harrasi, A., Al-Rawahi, A., & Lee, I. J. (2015). Endophytic fungi: Resource for gibberellins and crop abiotic stress resistance. *Critical Reviews in Biotechnology*, 35(1), 62–74. <https://doi.org/10.3109/07388551.2013.800018>
 11. Kryukov, A. A., Yurkov, A. P., Gorbunova, A. O., Kudriashova, T. R., Gorenkova, A. I., Kosulnikov, Y. V., & Laktionov, Y. V. (2025). Evaluation of the biodiversity of arbuscular mycorrhizal fungi during regenerative succession in quarries. *Vavilovskii zhurnal genetiki i seleksii*, 29(1), 72–78. <https://doi.org/10.18699/vjgb-25-09>. EDN: <https://elibrary.ru/FMBHOQ>
 12. Laurence, M. H., Burgess, L. W., Summerell, B. A., & Liew, E. C. (2012). High levels of diversity in *Fusarium oxysporum* from non-cultivated ecosystems in Australia. *Fungal Biology*, 116(2), 289–297. <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2011.11.011>
 13. Liu, Y., Zheng, C., Su, X., Chen, J., Li, X., Sun, C., & Nizamani, M. M. (2024). Comparative analysis and characterization of the chloroplast genome of *Krascheninnikovia ceratoides* (Amaranthaceae): A xerophytic semi-shrub exhibiting drought resistance and high-quality traits. *BMC Genomic Data*, 25(1), 10. <https://doi.org/10.1186/s12863-024-01197-y>. EDN: <https://elibrary.ru/FIBJIX>
 14. Mahmoud, R. S., & Narisawa, K. (2013). A new fungal endophyte, *Scolecobasidium humicola*, promotes tomato growth under organic nitrogen conditions. *PloS ONE*, 8(11), e78746. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0078746>

15. Oliveira, T. C., Cabral, J. S. R., Santana, L. R., Tavares, G. G., Santos, L. D. S., Paim, T. P., Müller, C., Silva, F. G., Costa, A. C., Souchie, E. L., & Mendes, G. C. (2022). The arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus clarus* improves physiological tolerance to drought stress in soybean plants. *Scientific Reports*, 12(1), 9044. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13059-7>. EDN: <https://elibrary.ru/MOGAPC>
16. Ramatsitsi, N., & Manyevere, A. (2025). Roles of endophytic fungi in plant resilience under abiotic stress: A mechanistic review with implications for climate-smart agriculture. *Plant Signaling & Behavior*, 20(1), 2578712. <https://doi.org/10.1080/15592324.2025.2578712>. EDN: <https://elibrary.ru/LUBRCG>
17. Ripa, F. A., Cao, W. D., Tong, S., & Sun, J. G. (2019). Assessment of plant growth promoting and abiotic stress tolerance properties of wheat endophytic fungi. *BioMed Research International*, 2019, 6105865. <https://doi.org/10.1155/2019/6105865>
18. Rodriguez, R. J., White, J. F., Jr., Arnold, A. E., & Redman, R. S. (2009). Fungal endophytes: Diversity and functional roles. *The New Phytologist*, 182(2), 314–330. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.02773.x>
19. Shen, N., Wang, T., Gan, Q., Liu, S., Wang, L., & Jin, B. (2022). Plant flavonoids: Classification, distribution, biosynthesis, and antioxidant activity. *Food Chemistry*, 383, 132531. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132531>. EDN: <https://elibrary.ru/JJBKYA>
20. Toghueo, R. M. K. (2019). Bioprospecting endophytic fungi from *Fusarium* genus as sources of bioactive metabolites. *Mycology*, 11(1), 1–21. <https://doi.org/10.1080/21501203.2019.1645053>
21. Trouvelot, A., Kough, J. L., & Gianinazzi-Pearson, V. (1986). Measurement of the VA mycorrhization rate of a root system. Search for estimation methods having a functional significance. In V. Gianinazzi-Pearson & S. Gianinazzi (Eds.), *Physiological and genetical aspects of mycorrhizae* (pp. 217–221). INRA Press.
22. Tyutyuma, N. V., Bulakhtina, G. K., & Kudryashova, N. I. (2018). Creation of fodder agrophytocenoses for the restoration of degraded native pastures and improvement of their performance. *Arid Ecosystems*, 8, 122–128. <https://doi.org/10.1134/S2079096118020099>. EDN: <https://elibrary.ru/XXZCPZ>
23. Walker, C., Schüßler, A., Vincent, B., Cranenbrouck, S., & Declerck, S. (2021). Anchoring the species *Rhizophagus intraradices* (formerly *Glomus intraradices*). *Fungal Systematics and Evolution*, 8, 179–201. <https://doi.org/10.3114/fuse.2021.08.14>. EDN: <https://elibrary.ru/ZUDEOU>
24. Wang, N., Fan, X., Zhang, S., Liu, B., He, M., Chen, X., Tang, C., Kang, Z., & Wang, X. (2020). Identification of a hyperparasitic *Simplicillium obclavatum* strain affecting the infection dynamics of *Puccinia striiformis* f. sp. tritici on wheat. *Frontiers in Microbiology*, 11, 1277. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01277>. EDN: <https://elibrary.ru/LPDAOW>

25. Wang, Z., Zhang, S., Liang, J., Chen, H., Jiang, Z., Hu, W., & Tang, M. (2024). *Rhizopagus irregularis* regulates RiCPSI and RiCARI expression to influence plant drought tolerance. *Plant Physiology*, 197(1), kiae645. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiae645>
26. Wu, F., Luo, W., Li, J., Xing, W., Lyu, L., Yang, J., Liu, R., & Shi, Z. (2022). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on accumulation and translocation of selenium in winter wheat. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 102(14), 6481–6490. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12015>. EDN: <https://elibrary.ru/YGXXGG>

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Кузьмин Петр Анатольевич, канд. с.-х. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией молекулярной селекции
ФНЦ агроэкологии РАН
пр-т Университетский, 97, г. Волгоград, 400062, Российская Федерация
kuzmin-p@vfanc.ru

Крылов Павел Андреевич, канд. биол. наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией геномных и постгеномных технологий
ФНЦ агроэкологии РАН
пр-т Университетский, 97, г. Волгоград, 400062, Российская Федерация
krylov-p@vfanc.ru

Панасенко Полина Александровна, лаборант-исследователь лаборатории геномных и постгеномных технологий
ФНЦ агроэкологии РАН
пр-т Университетский, 97, г. Волгоград, 400062, Российская Федерация
panasenko.p@vfanc.ru

Олейников Александр Александрович, лаборант-исследователь лаборатории геномных и постгеномных технологий
ФНЦ агроэкологии РАН
пр-т Университетский, 97, г. Волгоград, 400062, Российская Федерация
olejnikov.a@vfanc.ru

DATA ABOUT THE AUTHOR

Petr A. Kuzmin, Cand. Sc. (Agriculture), Docent, Leading Researcher, Head of the Laboratory of Molecular Breeding

FSC of Agroecology RAS

97, Universitetsky Ave., Volgograd, 400062, Russian Federation kuzmin-p@vfanc.ru

SPIN-code: 7551-8803

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1303-765X>

ResearcherID: N-4277-2016

Scopus Author ID: 56192995500

Pavel A. Krylov, Cand. Sc. (Biology), Leading Researcher, Head of the Laboratory of Genomic and Postgenomic Technologies

FSC of Agroecology RAS

97, Universitetsky Ave., Volgograd, 400062, Russian Federation krylov-p@vfanc.ru

SPIN-code: 9652-7459

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9587-5886>

ResearcherID: V-6884-2017

Scopus Author ID: 57213164834

Polina A. Panasenko, Laboratory Research Assistant of the Laboratory of Genomic and Postgenomic Technologies

FSC of Agroecology RAS

97, Universitetsky Ave., Volgograd, 400062, Russian Federation panasenko.p@vfanc.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2618-5786>

Alexander A. Oleynikov, Laboratory Research Assistant of the Laboratory of Genomic and Postgenomic Technologies

FSC of Agroecology RAS

97, Universitetsky Ave., Volgograd, 400062, Russian Federation olejnikov.a@vfanc.ru

SPIN-code: 7869-2080

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8225-6001>

Поступила 18.11.2025

После рецензирования 26.12.2025

Принята 14.01.2026

Received 18.11.2025

Revised 26.12.2025

Accepted 14.01.2026