

Ростстимулирующий эффект симбиотических микроорганизмов на сорго под действием водodefицита

✉ Абдурашитов С.Ф., Грицевич К.С., Алексеева А.И., Абдурашитова Э.Р.

Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма

Республика Крым, Симферополь, Россия

✉ e-mail: asuleyman83@rambler.ru

Сорго зерновое – одна из культур, способных сохранять продуктивность в условиях водного дефицита. В настоящее время биопрепараты комплексного действия на основе эффективных штаммов бактерий и арбускулярных микоризных (АМ) грибов активно внедряют в сельскохозяйственное производство. Данные препараты улучшают минеральное питание растений, а также повышают адаптацию к различным стресс-факторам, в том числе и растений сорго. Рассмотрено воздействие микробных препаратов на уровень колонизации корней грибами АМ и ее влияние на продуктивность *Sorghum bicolor* в условиях водodefицита. Исследовано влияние ассоциации *Funnelliformis mosseae* 1-16 и биопрепарата Микробиоком-Агро на сорго зерновое сорта Крымбел. Вегетационный опыт проводили в горшечной культуре на стерильной песчано-вермикулитной смеси. Водный и питательный режим регулировали искусственным поливом. Для создания засушливых условий в сосудах поддерживали 30%-й уровень наименьшей влагоемкости субстрата, в оптимальных условиях – 60%. Выявлено, что Микробиоком-Агро и ассоциация *F. mosseae* 1-16 в условиях водodefицита оказывают положительное влияние на рост и развитие *S. bicolor*, увеличивая высоту растений на 6,6–11,5%, сухую массу – на 6,3–30,8%. Этому способствовала интенсификация колонизации корней *S. bicolor* ассоциацией АМ 1-16 на 14,7% под действием бактериального препарата. Показано, что используемые микроорганизмы способствовали увеличению содержания фосфора и калия в листьях сорго зернового на 29,8–60,6% по сравнению с контролем без обработки, что положительно коррелировало с продуктивностью культуры. Эти показатели также зависели от развития ассоциации грибов АМ 1-16 в корнях изучаемого растения со средней степенью корреляции ($r = 0,46$). Подтверждено, что сорго как засухоустойчивая культура способна выдерживать значительное время с пересыханием субстрата, однако грибы арбускулярной микоризы и ассоциативные бактерии способны поддерживать растения во время стресса и быстрее выводить из него.

Ключевые слова: *Sorghum bicolor*, грибы арбускулярной микоризы, ассоциативные бактерии, биопрепараты, содержание фосфора и калия, интенсивность микоризации, корреляция

Growth-stimulating effect of symbiotic microorganisms on sorghum under water deficit conditions

✉ Abdurashytov S.F., Gritsevich K.S., Alekseeva A.I., Abdurashytova E.R.

Research Institute of Agriculture of Crimea

Simferopol, Republic of Crimea, Russiae

✉ e-mail: asuleyman83@rambler.ru

Sorghum bicolor is one of the crops capable of maintaining productivity under water deficit conditions. Biological preparations based on effective strains of bacteria and arbuscular mycorrhizal (AM) fungi are actively introduced into agricultural production. These preparations improve mineral nutrition of plants, as well as increase adaptation to various stress factors, including sorghum plants. The effect of microbial preparations on the level of root colonization by AM fungi and its effect on the productivity of *S. bicolor* under water deficit conditions was considered. The effect of *Funnelliformis mosseae* 1-16 association and the biopreparation Microbiocom-Agro on sorghum variety Krymbel was investigated. The pot experiment was conducted on sterile sand-vermiculite mixture. Water and nutrient regime were regulated by artificial irrigation. To create drought conditions, 30% of the lowest moisture content of the substrate was maintained in the vessels, with optimal conditions – 60%. Microbiocom-Agro and the *F. mosseae* 1-16 association have a positive effect on the growth and development of *S. bicolor* under water deficit conditions, increasing the height of plants by 6.6–11.5%

and dry weight by 6.3–30.8%. This was promoted by intensification of colonization of the plant roots by 1-16 AM association by 14.7% under the action of the bacterial preparation. It was shown that the microorganisms used contributed to a significant increase in the content of phosphorus and potassium in the leaves of grain sorghum by 29.8–60.6% compared to the control without treatment, which was positively correlated with the crop productivity. These indicators also depended on the development of AM 1-16 fungi association in the roots of the studied plant with an average degree of correlation ($r = 0,46$). It was confirmed that sorghum, as a drought-resistant crop, is able to withstand a significant time with substrate desiccation, but arbuscular mycorrhizal fungi and associative bacteria are able to support plants in time of stress and bring them out of it faster.

Keywords: *Sorghum bicolor*, arbuscular mycorrhizal fungi, associative bacteria, biopreparation, phosphorus and potassium content, mycorrhization intensity, correlation

Для цитирования: Абдурашитов С.Ф., Грицевич К.С., Алексеева А.И., Абдурашитова Э.Р. Ростстимулирующий эффект симбиотических микроорганизмов на сорго под действием воддефицита // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2025. Т. 55. № 1. С. 41–51. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2025-1-5>

For citation: Abdurashytov S.F., Gritsevich K.S., Alekseeva A.I., Abdurashytova E.R. Growth-stimulating effect of symbiotic microorganisms on sorghum under water deficit conditions. *Sibirskii vestnik sel'skokhozyaistvennoi nauki = Siberian Herald of Agricultural Science*, 2025, vol. 55, no. 1, pp. 41–51. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2025-1-5>

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Благодарность

Исследование выполнено в рамках государственного задания № FNZW-2022-0006. Коллектив авторов выражает глубокую признательность лаборатории агрохимических исследований НИИСХ Крыма и ее заведующей А.А. Зубоченко в получении данных о содержании фосфора и калия в растениях сорго. В работе использовано оборудование НИЛ «Молекулярная и клеточная биофизика» Института перспективных исследований Севастопольского государственного университета.

Acknowledgements

The study was carried out under the state assignment No. FNZW-2022-0006. The team of authors expresses deep gratitude to the laboratory of agrochemical research of the Research Institute of Agriculture of Crimea and its head A.A. Zubochenko for obtaining data on the content of phosphorus and potassium in sorghum plants. The equipment of the Research Laboratory “Molecular and Cellular Biophysics” of the Institute of Advanced Studies of the Sevastopol State University was used in this work.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях изменяющегося климата, экономического развития, урбанизации и роста населения доступность воды и засушливые условия окружающей среды – актуальная проблема мира¹. Одна из культур, способных сохранять продуктивность в условиях водного дефицита, – сорго зерновое. Его достоинствами являются стрессоустойчивость, исключительные засухо- и солеустойчивость, высокая продуктивность, хорошие кормовые достоинства. Сорго занимает в мировом земледелии более 40 млн га и находится по посевным площадям на пятом месте².

У сорго зернового исследователями выявлены гены, чувствительные к засухе в ответ

на осмотический стресс [1]. В условиях воддефицита в растениях происходит перестройка механизмов на физиологическом, клеточном и молекулярном уровне, что приводит к депрессии ростовых процессов вегетативных органов. Для сорго отмечено снижение отрицательного эффекта воддефицита путем дополнительной продукции окислительно-восстановительных ферментов и фотосинтетических пигментов с помощью биопрепаратов на основе ассоциативных бактерий и грибов арбускулярной микоризы (АМ) [2].

Биопрепараты комплексного действия на основе эффективных штаммов бактерий и АМ грибов активно внедряют в сельскохозяйственное производство и заменяют

¹Luo T., Young R., Reig P. Aqueduct projected water stress country rankings // Technical note. World resources institute. 2015. N 26. P. 1–16. <https://www.wri.org/sites/default/files/aqueduct-water-stress-country-rankings-technical-note.pdf>

²FaoStat 2022. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>

или уменьшают ими массовое применение средств химизации [3, 4]. Данные препараты улучшают азотное и фосфорное питание растений, а также повышают адаптацию растений, в том числе и сорго, к стрессовым действиям различных экологических факторов [2]. Известно, что экстрарадикальный мицелий грибов АМ может поглощать воду непосредственно из почвы (когда корни не могут получить к ней доступ) и перераспределять ее по гифальным сетям, чтобы обеспечить и себя, и растения [5, 6]. АМ грибы в симбиозе способны включать и выключать ряд генов, ответственных за работу белков аквапоринов, отвечающих за транспорт воды у растений [7]. Микоризные сети играют важную роль в транспортировке питательных веществ через почвенные экосистемы [8].

Известны случаи применения двойной инокуляции грибами АМ и ростстимулирующими ризобактериями (PGPR) для элиминации действия засушливых условий среды, повышения доступности питательных веществ почвы и роста растений [9–11]. Тройной симбиоз также дополнительно повышает содержание некоторых полезных веществ в конечной сельскохозяйственной продукции: инулина и других сахаров, белка [11–13].

Цель исследования – изучить воздействие микробных препаратов на уровень колонизации корней грибами АМ и ее влияние на продуктивность растений сорго зернового в условиях водodefицита.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Объектами исследований послужили ассоциация грибов АМ *Funnelliformis mosseae* 1-16 и биопрепарат Микробиоком-Агро³, включающий штаммы бактерий *Paenibacillus polymyxa* П, *Lelliottia nimipressuralis* 32-3, *Agrobacterium radiobacter* 204 из Крымской коллекции микроорганизмов НИИСХ Крыма⁴. В качестве

модельного растения использовали сорго зерновое *Sorghum bicolor* (L.) Moench сорта Крымбел селекции Аграрной академии Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского.

Вегетационный опыт проводили в летней теплице в пластиковых сосудах объемом 5 л. Субстратом была стерильная смесь песка и вермикулита (1 : 1) с добавлением ортофосфата кальция (1 г/кг субстрата) согласно указаниям Лабутовой (2000). Семена обрабатывали микробным препаратом Микробиоком-Агро из расчета 10⁶ КОЕ/семя и ставили на проращивание во влажную камеру. Высадку проростков проводили по 35 шт. на сосуд, предварительно внося ассоциацию *F. mosseae* 1-16 на 1,5 см ниже уровня проростков в соответствующие варианты. Инокулюм грибов АМ вносили с нагрузкой не менее, чем 20 колонизирующих единиц на семя. Контролем были семена, обработанные водой и пророщенные во влажной камере без внесения микроорганизмов. Полив осуществляли обессоленной водой 3 раза в неделю, в том числе один раз в неделю питательным раствором Хогланда со снижением количества растворимого фосфора на 92% от описанного авторами для формирования микоризного симбиоза. Норму полива устанавливали по массе вегетационного сосуда из расчета 30 или 60% от наименьшей влагоемкости (НВ) субстрата [14].

Эксперимент проводили в три фазы. Первая – до 35 дней от момента прорастания семян во всех сосудах поддерживали 60% НВ субстрата, что оптимально для роста и развития культуры. Вторая фаза наступала на 35-е сутки. В этот срок весь эксперимент поделили на две группы: в первой остановили полив вариантов с планируемым водodefицитом (засуха), во второй растения продолжали содержать в оптимальных условиях (оптимум). На 41-е сутки от прораста-

³Патент № 2777194 С1 Российская Федерация, МПК C12N 1/20, A01N 63/20, C05F 11/08. Комплексный биопрепарат для оптимизации минерального питания растений, защиты от фитопатогенов, повышения продуктивности и способ получения этого биопрепарата; № 2022100801 / И.А. Каменева, Т.Н. Мельничук, А.И. Якубовская и др.; заявл. 13.01.2022; опубл. 01.08.2022. 10 с.

⁴<http://www.ckp-rf.ru/usu/507484/>

ния сорго в субстрате первой группы отмечен водный дефицит, равный 30% НВ. Первый отбор проводили на 45-е сутки во всех экспериментальных вариантах. В третью фазу на 49-е сутки возобновили полив ранее подверженных стрессу растений до 60% НВ, в остальных продолжали поддерживать нормальные условия роста. На 60-е сутки после восстановления тургора у всех растений осуществляли второй отбор.

Визуализацию развития микоризы проводили окрашиванием отрезков корней черными чернилами по методу Вирхейлига (1998). Микоризацию оценивали в проходящем свете под стереомикроскопом количественно по методике Травло (1996). Содержание фосфора и калия в надземной части растений определяли с использованием сжигания по методу Кьельдаля с последующим титрованием и фотометрией соответственно (ГОСТ 26715–85, ГОСТ 13496.4–2019).

Постановка вегетационного опыта и статистический анализ полученных результатов проведены по Б.А. Доспехову (1985). Обработка полученных результатов осуществлена с применением современных методов статистических исследований в программе Statistica 10.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По условиям исследования нормальные условия вегетации продолжались более 30 дней в связи с необходимостью колониза-

ции растений арбускулярными микоризными грибами. Проведенные эксперименты позволили установить, что к 45-м суткам роста растений 12,5–27,2% корней были микоризованы с интенсивностью 5,3–8,7% (см. рис. 1, табл. 1). В условиях отсутствия полива Микробиоком-Агро способствовал интенсификации колонизации корней ассоциацией *F. mosseae* 1-16 на 14,7%, или в 2,2 раза. Эффект сохранился и при возобновлении полива по прошествии 15 сут. В то же время в отсутствие стресса небактеризованные растения увеличили частоту встречаемости микоризной колонизации почти в 3,0 раза, интенсивность – в 9,4 раза. В вариантах, не обработанных микоризной ассоциацией, симбиотических структур не обнаружено.

Вместе с развитием колонизации при внесении ассоциации АМ 1-16 увеличилось формирование арбускул и везикул в условиях стабильного полива растений (см. табл. 2, рис. 2). В условиях засухи отмечено отсутствие развития структур арбускулярной микоризы в корнях сорго под действием ассоциации *F. mosseae* 1-16. Действие комплексного биопрепарата Микробиоком-Агро «открыло» клетки корня для установления симбиоза формированием арбускул и везикул.

Арбускулярные микоризные грибы и бактерии из комплексного биопрепарата способны поставлять растениям фосфор из труднорастворимых фосфатов [15]. В условиях нашего исследования выявлено, что

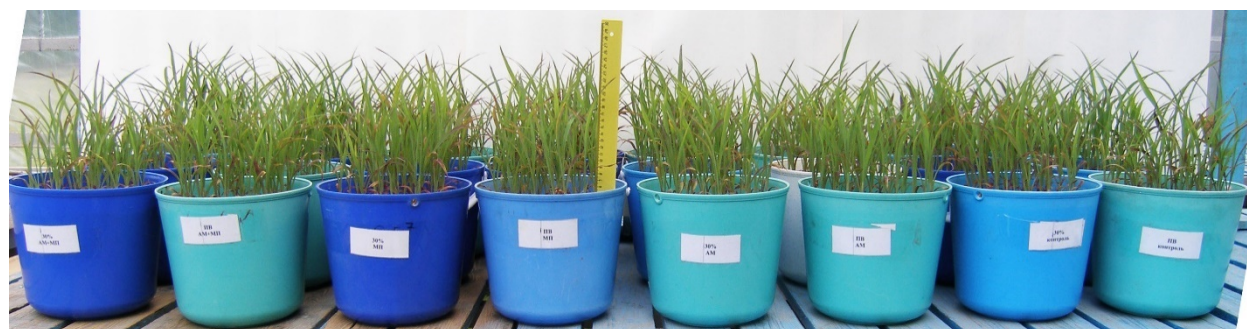


Рис. 1. Общий вид растений *S. bicolor* под действием ассоциации грибов АМ 1-16 и Микробиоком-Агро в условиях различного уровня водообеспечения; песчано-вермикулитный субстрат, 45-е сутки вегетации растений

Fig. 1. General view of *S. bicolor* plants under the action of AM fungi association 1-16 and Microbiocom-Agro under conditions of different water supply levels; sandy-vermiculite substrate, 45th day of plant vegetation

Табл. 1. Влияние инокуляции препаратом Микробиоком-Агро и ассоциацией грибов АМ 1-16 на колонизацию корней сорго зернового в условиях различной влагонасыщенности субстрата, %

Table 1. Effect of inoculation with Microbiocom-Agro and AM fungi association 1-16 on colonization of sorghum roots under conditions of different substrate moisture saturation, %

Вариант опыта	Частота встречаемости МК		Интенсивность МК	
	Сутки вегетации			
	45-е	60-е	45-е	60-е
Водообеспеченность	Оптимум			
Контроль	0	0	0	0
<i>F. mosseae</i> 1-16	21,7 ± 4,8	71,7 ± 12,5	5,3 ± 1,3	49,6 ± 11,9
Микробиоком-Агро	0	0	0	0
<i>F. mosseae</i> 1-16 + Микробиоком-Агро	20,6 ± 0,5	13,3 ± 7,1	6,8 ± 0,4	2,4 ± 0,7
Водообеспеченность	Засуха	Оптимум	Засуха	Оптимум
Контроль	0	0	0	0
<i>F. mosseae</i> 1-16	12,5 ± 1,4	13,3 ± 1,9	8,3 ± 0,7	5,2 ± 0,1
Микробиоком-Агро	0	0	0	0
<i>F. mosseae</i> 1-16 + Микробиоком-Агро	27,2 ± 3,5	20,6 ± 5,5	8,7 ± 2,6	10,4 ± 0,9

Примечание. МК – микоризная колонизация. Здесь и в табл. 1–4: оптимум – 60% НВ субстрата, засуха – 30% НВ субстрата.

Табл. 2. Влияние инокуляции комплексом биопрепаратов и ассоциации грибов АМ 1-16 на образование симбиотических микоризных структур в корнях сорго зернового в условиях различной влагонасыщенности субстрата, %

Table 2. Effect of inoculation with the complex of biopreparations and AM fungi association 1-16 on the formation of symbiotic mycorrhizal structures in sorghum roots under conditions of different substrate moisture saturation, %

Вариант опыта	Обилие арбускул		Обилие везикул	
	Сутки вегетации			
	45-е	60-е	45-е	60-е
Водообеспеченность	Оптимум			
Контроль	0	0	0	0
<i>F. mosseae</i> 1-16	0,2 ± 0,1	33,2 ± 11,3	0,2 ± 0,1	16,9 ± 4,2
Микробиоком-Агро	0	0	0	0
<i>F. mosseae</i> 1-16 + Микробиоком-Агро	0,4 ± 0,1	2,0 ± 0,1	0,9 ± 0,1	0,2 ± 0,1
Водообеспеченность	Засуха	Оптимум	Засуха	Оптимум
Контроль	0	0	0	0
<i>F. mosseae</i> 1-16	1,4 ± 0,2	0,6 ± 0,3	0,2 ± 0,1	0,0 ± 0,0
Микробиоком-Агро	0	0	0	0
<i>F. mosseae</i> 1-16 + Микробиоком-Агро	2,6 ± 1,3	5,3 ± 2,5	2,7 ± 1,3	5,3 ± 2,6

содержание фосфора в листьях снизилось от 45-х суток определения к 60-м в 1,6 раза и более, калия – повысилось в 1,4 раза и более, что, вероятно, связано с перераспределением его по разным органам растений в эту фазу (см. табл. 3). Используемые микроорганизмы способствовали значитель-

ному увеличению количества фосфора в надземной части растений на 29,8–60,6% по сравнению с контролем без обработки. Непродолжительное отсутствие влаги также стимулировало накопление 10,6–14,2% фосфора в листьях под действием микробных препаратов. При совместном приме-

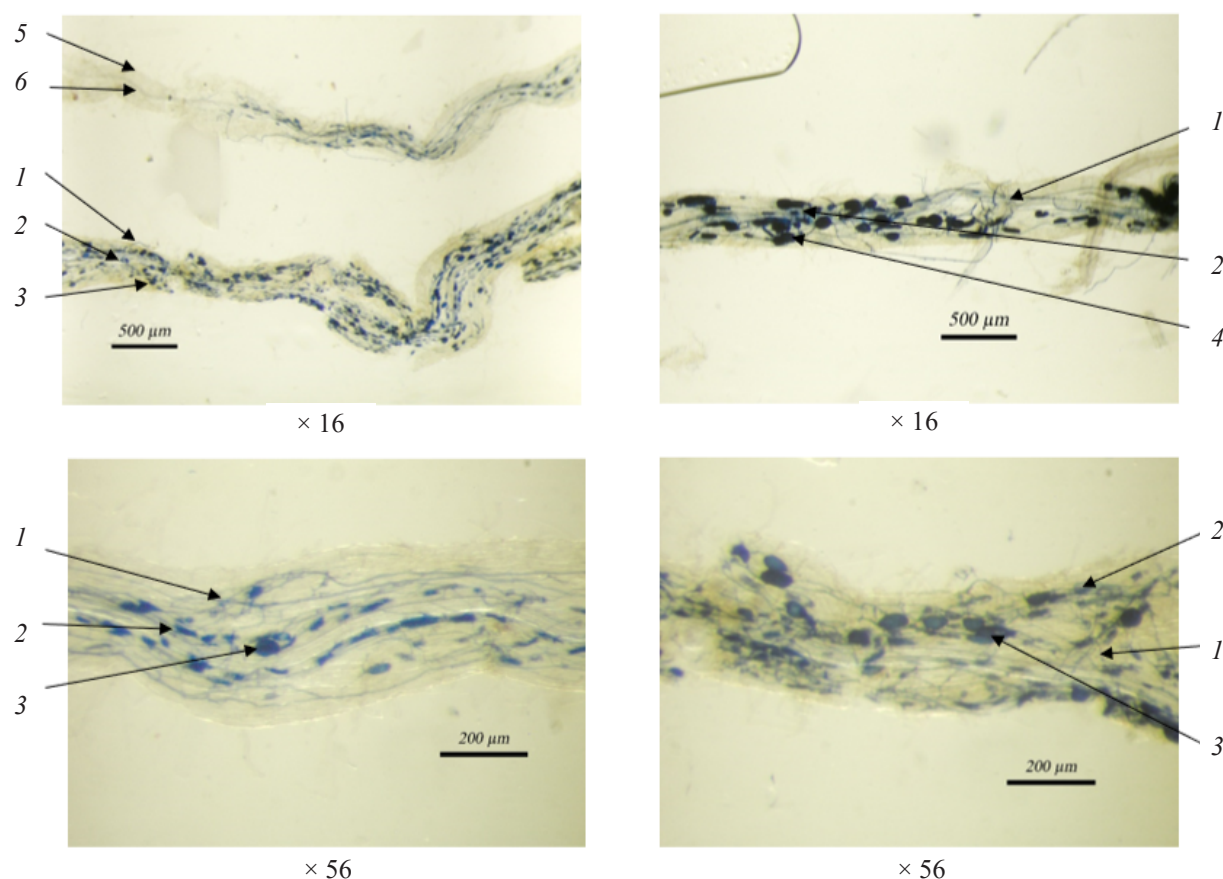


Рис. 2. Развитие арбускулярной микоризы ассоциации *F. mosseae* 1-16 в корнях *S. bicolor* под действием оптимального уровня водообеспечения; песчано-вермикулитный субстрат, 60-е сутки после всходов: 1 – мицелий грибов АМ; 2 – арбускулы; 3 – везикулы; 4 – споры грибов АМ; 5 – кортекс корня сорго; 6 – центральный цилиндр корня

Fig. 2. Arbuscular mycorrhiza development by association *F. mosseae* 1-16 in *S. bicolor* roots under the action of optimal water supply; sandy-vermiculite substrate, 60 days after seedlings: 1 – mycelium of AM fungi; 2 – arbuscules; 3 – vesicles; 4 – AM fungi spores; 5 – sorghum root cortex; 6 – root central cylinder

нии *F. mosseae* 1-16 и Микробиоком-Агро количество калия в листьях увеличилось на 36,0–43,4% в сравнении с контролем без обработки на 45-е сутки от прорастания семян как под действием оптимального полива, так и его отсутствия. На 60-е сутки вегетации, после регидротации получивших стресс растений сорго, отметили снижение содержания исследуемых биогенных элементов при применении микробных препаратов на 17,1–25,7 и 13,8–16,4% для фосфора и калия соответственно. Так как условия эксперимента предполагали использование стерильного субстрата (кварцевый песок + вер-

микулит) и обессоленной воды, а в качестве источника фосфорного питания – нерастворимый ортофосфат кальция, калий вносили с питательным раствором с избытком, предполагаем, что контрольные растения позже, чем обработанные, вышли из стрессового состояния и продолжали поглощать эти макроэлементы для борьбы с ним.

Согласно полученным результатам, под действием инокуляции комплексом биопрепаратов и ассоциацией АМ 1-16 в оптимальных условиях высота и масса сорго зернового увеличилась на 11,1–28,9 и 21,6–60,6% соответственно (см. табл. 4). При прекращении

Табл. 3. Влияние инокуляции семян Микробиоком-Агро и ассоциацией грибов АМ 1-16 на содержание фосфора и калия в листьях *S. bicolor* в условиях различной водообеспеченности субстрата, % абсолютно сухих листьев

Table 3. Effect of seed inoculation with Microbiocom-Agro and AM fungi association 1-16 on phosphorus and potassium content in *S. bicolor* leaves under different substrate water availability, % of absolutely dry leaves

Вариант опыта	Фосфор		Калий	
	Сутки вегетации			
	45-е	60-е	45-е	60-е
Водообеспеченность	Оптимум			
Контроль	0,47 ± 0,00	0,30 ± 0,02	0,50 ± 0,02	1,28 ± 0,03
<i>F. mosseae</i> 1-16	0,75 ± 0,03	0,33 ± 0,01	0,52 ± 0,01	1,53 ± 0,05
Микробиоком-Агро	0,61 ± 0,01	0,24 ± 0,01	0,43 ± 0,01	1,42 ± 0,05
<i>F. mosseae</i> 1-16 + Микробиоком-Агро	0,76 ± 0,04	0,23 ± 0,01	0,68 ± 0,07	1,40 ± ,04
Водообеспеченность	Засуха	Оптимум	Засуха	Оптимум
Контроль	0,71 ± 0,02	0,35 ± 0,01	0,53 ± 0,04	1,59 ± 0,08
<i>F. mosseae</i> 1-16	0,71 ± 0,01	0,26 ± 0,02	0,44 ± 0,03	1,35 ± 0,04
Микробиоком-Агро	0,78 ± 0,01	0,29 ± 0,01	1,01 ± 0,01	1,37 ± 0,04
<i>F. mosseae</i> 1-16 + Микробиоком-Агро	0,81 ± 0,04	0,28 ± 0,02	0,76 ± 0,08	1,33 ± 0,04
НСР ₀₅ АВ	0,05	0,04	0,12	0,15
НСР ₀₅ по фактору А	0,03	0,02	0,06	0,07
НСР ₀₅ по фактору В	0,04	0,03	0,09	0,10

Табл. 4. Влияние биопрепарата Микробиоком-Агро и ассоциации грибов АМ 1-16 на развитие растений *S. bicolor* в условиях различного водообеспечения субстрата (вегетационный опыт, песчано-вермикулитный субстрат)

Table 4. Effect of the biopreparation Microbiocom-Agro and AM fungi association 1-16 on the development of *S. bicolor* plants under conditions of different substrate water availability (vegetation experiment, sandy-vermiculite substrate)

Вариант опыта	Высота растений, см		Сухая надземная масса растений, мг	
	Сутки вегетации			
	45-е	60-е	45-е	60-е
Водообеспеченность	Оптимум			
Контроль	22,8 ± 0,9	25,3 ± 0,7	114,9 ± 10,8	141,6 ± 10,2
<i>F. mosseae</i> 1-16	27,3 ± 0,6	28,1 ± 0,7	150,0 ± 9,1	228,7 ± 20,4
Микробиоком-Агро	26,3 ± 0,5	28,1 ± 0,7	155,4 ± 9,3	172,3 ± 8,6
<i>F. mosseae</i> 1-16 + Микробиоком-Агро	29,4 ± 0,7	30,5 ± 0,5	184,5 ± 10,3	225,1 ± 12,4
Водообеспеченность	Засуха	Оптимум	Засуха	Оптимум
Контроль	22,7 ± 0,4	24,6 ± 0,6	114,4 ± 5,8	169,0 ± 11,0
<i>F. mosseae</i> 1-16	25,3 ± 0,7	27,0 ± 0,8	149,6 ± 8,7	197,6 ± 14,3
Микробиоком-Агро	24,2 ± 0,4	25,7 ± 0,6	121,6 ± 7,2	167,2 ± 10,3
<i>F. mosseae</i> 1-16 + Микробиоком-Агро	24,5 ± 0,9	25,9 ± 0,7	142,1 ± 10,6	180,3 ± 14,5
НСР ₀₅ АВ	0,6	1,0	7,6	14,7
НСР ₀₅ по фактору А	0,3	0,5	3,8	7,3
НСР ₀₅ по фактору В	0,4	0,7	5,4	10,4

полива и создании условий засухи также наблюдали повышение биометрических показателей под действием полезных бактерий и грибов, но прирост высоты растений снизился до 6,6–11,5%, массы – до 6,3–30,8%. При возобновлении нормального водного режима увеличение высоты побегов и их биомассы отмечено только у варианта с АМ 1-16.

Согласно проведенному корреляционному анализу, высота и масса растений сорго в раз-

личных условиях водообеспечения зависели от содержания фосфора в листьях ($r = 0,41$ и $r = 0,35$ соответственно) (см. рис. 3). В свою очередь, содержание фосфора от развития арбускулярной микоризы в корнях соответствовало $r = 0,46$, что равно среднему уровню взаимосвязи показателей. Таким образом, в показатель корреляции внесен эффект значительного снижения содержания фосфора и калия от последствий засухи.

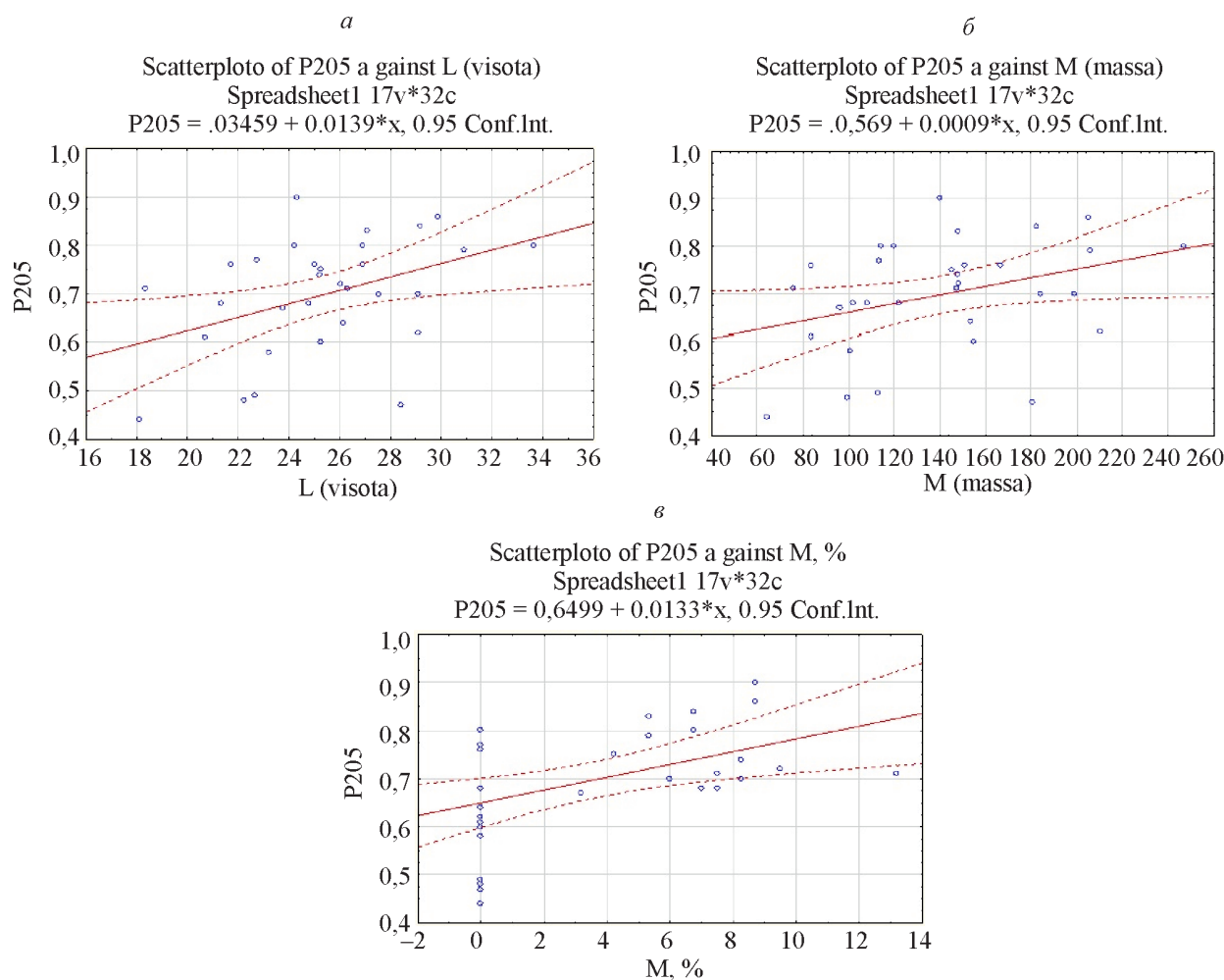


Рис. 3. Корреляционные зависимости высоты (а) и массы (б) растений от содержания фосфора, а также зависимость содержания фосфора от интенсивности МК (е) сорго, выращенного в различных условиях водообеспечения с применением инокуляции семян Микробиоком-Агро и ассоциацией грибов АМ 1-16. Примечание. Песчано-вермикулитный субстрат; P2O5 – содержание фосфора в листьях сорго; L (visota) – высота растений; M (massa) – сухая масса растений; M, % – интенсивность микоризной колонизации

Fig. 3. Correlations between plant height (a) and weight (б) and phosphorus content, and phosphorus content dependence on mycorrhizal colonization intensity (е) of the sorghum grown under different water availability conditions using seed inoculation with Microbiocom-Agro and AM fungi association 1-16. Note. Sandy-vermiculite substrate; P2O5 – phosphorus content in sorghum leaves; L(visota) – plant height; M(massa) – plant dry weight; M, % – intensity of mycorrhizal colonization

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлено, что Микробиоком-Агро и ассоциация *F. mosseae* 1-16 в условиях водodefицита оказывают положительное влияние на рост и развитие *S. bicolor*, увеличивая высоту растений на 6,6–11,5%, сухую массу – на 6,3–30,8%. Этому способствовала интенсификация колонизации корней *S. bicolor* ассоциацией АМ 1-16 на 14,7% под действием бактериального препарата. Показано, что используемые микроорганизмы оказали существенное влияние на увеличение содержания фосфора и калия в листьях сорго зернового – на 29,8–60,6% по сравнению с контролем без обработки, что положительно коррелировало с продуктивностью культуры. Отмечено, что эти показатели также зависели от развития ассоциации грибов АМ 1-16 в корнях изучаемого растения со средней степенью корреляции ($r = 0,46$). Таким образом, сорго как засухоустойчивая культура способна выдерживать значительное время с пересыханием субстрата, однако грибы арбускулярной микоризы и ассоциативные бактерии способны поддерживать растения во время стресса и быстрее выводить из него. Поскольку сорго зерновое постоянно взаимодействует с подобными симбионтами, при возделывании этой культуры в агроценозах, возможно, она справляется с засушливыми условиями не без их помощи. В качестве рекомендации предлагаем провести апробирование применения биопрепаратов на основе грибов АМ и полезных бактерий на сорго зерновом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hassan A.M., Ahmed M.F., Rashed M.A. Performance and transcriptomic analysis of sorghum bicolor responding to drought stress // SABRAO Journal of Breeding and Genetics. 2022. Vol. 54 (4). P. 814–825. DOI: 10.54910/sabrao2022.54.4.12.
2. Kamali S., Mehraban A. Nitroxin and arbuscular mycorrhizal fungi alleviate negative effects of drought stress on *Sorghum bicolor* yield through improving physiological and biochemical characteristics // Plant Signal Behavior. 2020. Vol. 15 (11). E: 1813998. DOI: 10.1080/15592324.2020.1813998.
3. Abdurashytova E.R., Melnichuk T.N., Abdurashytov S.F., Egovtseva A.Yu., Turin E.N., Gongalo A.A. Adaptability of the Sorghum Bicolor Rhizosphere Microbiocenosis Inoculated by Microbial Agents in Southern Chernozem Soils // Russian Agricultural Sciences. 2022. Vol. 48. N 3. P. 212–218. DOI: 10.3103/s1068367422030028.
4. Noceto P.A., Bettenfeld P., Boussageon R., Hériché M., Sportes A., Van Tuinen D., Courty P.-E., Wipf D. Arbuscular mycorrhizal fungi, a key symbiosis in the development of quality traits in crop production, alone or combined with plant growth-promoting bacteria // Mycorrhiza. 2021. Vol. 31 (6). P. 655–669. DOI: 10.1007/s00572-021-01054-1.
5. Figueiredo A.F., Boy J. Guggenberger G. Common Mycorrhizae Network: A Review of the Theories and Mechanisms Behind Underground Interactions // Frontiers Fungal Biology. 2021. Vol. 2. E: 735299. DOI: 10.3389/ffunb.2021.735299.
6. Püschel D., Bitterlich M., Rydlová J., Jansa J. Facilitation of plant water uptake by an arbuscular mycorrhizal fungus: a Gordian knot of roots and hyphae // Mycorrhiza. 2020. Vol. 30. P. 299–313. DOI: 10.1007/s00572-020-00949-9.
7. Wang D., Ni Y., Xie K., Li Y., Wu W., Shan H., Cheng B., Li X. Aquaporin ZmTIP2;3 Promotes Drought Resistance of Maize through Symbiosis with Arbuscular Mycorrhizal Fungi // International Journal Molecular Sciences. 2024. Vol. 25 (8). E: 4205. DOI: 10.3390/ijms25084205.
8. Ullah A., Gao D., Wu F. Common mycorrhizal network: the predominant socialist and capitalist responses of possible plant–plant and plant–microbe interactions for sustainable agriculture // Frontiers in Microbiology. 2024. Vol. 15. E: 1183024. DOI: 10.3389/fmicb.2024.1183024.
9. Behrooz A., Vahdati K., Rejali F., Lotfi M., Sarikhani S., Leslie C. Arbuscular Mycorrhiza and Plant Growth-promoting Bacteria Alleviate Drought Stress in Walnut // HortScience. 2019. Vol. 54 (6). P. 1087–1092. DOI: 10.21273/HORTSCI13961-19.
10. Yu L., Zhang H., Zhang W., Liu K., Liu M., Shao X. Cooperation between arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth-promoting bacteria and their effects on plant growth and soil quality // Peer Journal. 2022. Vol. 10. E: 13080. DOI: 10.7717/peerj.13080.

11. Nanjundappa A., Bagyaraj D.J., Saxena A.K., Chakdar H. Interaction between arbuscular mycorrhizal fungi and *Bacillus* spp. in soil enhancing growth of crop plants // *Fungal Biology and Biotechnology*. 2019. Vol. 6 (23). DOI: 10.1186/s40694-019-0086-5.
12. Nacoon S., Jogloy S., Riddech N., Mongkolthananaruk W., Kuyper T., Boonlue S. Interaction between Phosphate Solubilizing Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Growth Promotion and Tuber Inulin Content of *Helianthus tuberosus* L. // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. E: 4916. DOI: 10.1038/s41598-020-61846-x.
13. Raklami A., Bechtaoui N., Tahiri A., Anli M., Meddich A., Oufdou K. Use of Rhizobacteria and Mycorrhizae Consortium in the Open Field as a Strategy for Improving Crop Nutrition, Productivity and Soil Fertility // *Frontiers in Microbiology*. 2019. Vol. 10. E: 01106. DOI: 10.3389/fmicb.2019.01106.
14. Серегина И.И., Ниловская Н.Т. Фотосинтетическая активность и донорно-акцепторные отношения растений яровой пшеницы при применении молибденовокислого аммония в условиях засухи // *Агрохимия*. 2020. № 7. С. 26–35.
15. Qi S., Wang J., Wan L., Dai Z., Da Silva Matos D.M., Du D., Egan S., Bonser S.P., Thomas T., Moles A.T. Arbuscular Mycorrhizal Fungi Contribute to Phosphorous Uptake and Allocation Strategies of *Solidago canadensis* in a Phosphorous-Deficient Environment // *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. 13. E: 831654. DOI: 10.3389/fpls.2022.831654.
3. Abdurashytova E.R., Melnichuk T.N., Abdurashytov S.F., Egovtseva A.Yu., Turin E.N., Gongalo A.A. Adaptability of the Sorghum Bicolor Rhizosphere Microbiocenosis Inoculated by Microbial Agents in Southern Chernozem Soils. *Russian Agricultural Sciences*, 2022, vol. 48, no. 3, pp. 212–218. DOI: 10.3103/s1068367422030028.
4. Noceto P.A., Bettenfeld P., Boussageon R., Hériché M., Sportes A., Van Tuinen D., Courty P.-E., Wipf D. Arbuscular mycorrhizal fungi, a key symbiosis in the development of quality traits in crop production, alone or combined with plant growth-promoting bacteria. *Mycorrhiza*, 2021, vol. 31 (6), pp. 655–669. DOI: 10.1007/s00572-021-01054-1.
5. Figueiredo A.F., Boy J. Guggenberger G. Common Mycorrhizae Network: A Review of the Theories and Mechanisms Behind Underground Interactions. *Frontiers Fungal Biology*, 2021, vol. 2, e: 735299. DOI: 10.3389/ffunb.2021.735299.
6. Püschel D., Bitterlich M., Rydlová J., Jansa J. Facilitation of plant water uptake by an arbuscular mycorrhizal fungus: a Gordian knot of roots and hyphae. *Mycorrhiza*, 2020, vol. 30, pp. 299–313. DOI: 10.1007/s00572-020-00949-9.
7. Wang D., Ni Y., Xie K., Li Y., Wu W., Shan H., Cheng B., Li X. Aquaporin ZmTIP2;3 Promotes Drought Resistance of Maize through Symbiosis with Arbuscular Mycorrhizal Fungi. *International Journal Molecular Sciences*, 2024, vol. 25 (8), e: 4205. DOI: 10.3390/ijms25084205.
8. Ullah A., Gao D., Wu F. Common mycorrhizal network: the predominant socialist and capitalist responses of possible plant–plant and plant–microbe interactions for sustainable agriculture. *Frontiers in Microbiology*, 2024, vol. 15, e: 1183024. DOI: 10.3389/fmicb.2024.1183024.
9. Behrooz A., Vahdati K., Rejali F., Lotfi M., Sarikhani S., Leslie C. Arbuscular Mycorrhiza and Plant Growth-promoting Bacteria Alleviate Drought Stress in Walnut. *HortScience*, 2019, vol. 54 (6), pp. 1087–1092. DOI: 10.21273/HORTSCI13961-19.
10. Yu L., Zhang H., Zhang W., Liu K., Liu M., Shao X. Cooperation between arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth-promoting bacteria and their effects on plant growth and soil quality. *Peer Journal*, 2022, vol. 10, e: 13080. DOI: 10.7717/peerj.13080.
11. Nanjundappa A., Bagyaraj D.J., Saxena A.K., Chakdar H. Interaction between arbuscular my-

REFERENCES

- corrhizal fungi and *Bacillus* spp. in soil enhancing growth of crop plants. *Fungal Biology and Biotechnology*, 2019, vol. 6 (23). DOI: 10.1186/s40694-019-0086-5.
12. Nacoon S., Jogloy S., Riddech N., Mongkolthananuruk W., Kuyper T., Boonlue S. Interaction between Phosphate Solubilizing Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Growth Promotion and Tuber Inulin Content of Helianthus tuberosus L. *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, e: 4916. DOI: 10.1038/s41598-020-61846-x.
13. Raklami A., Bechtaoui N., Tahiri A., Anli M., Meddich A., Oufdou K. Use of Rhizobacteria and Mycorrhizae Consortium in the Open Field as a Strategy for Improving Crop Nutrition, Productivity and Soil Fertility. *Frontieres in Microbiology*, 2019, vol. 10, e: 01106. DOI: 10.3389/fmicb.2019.01106.
14. Seregina I.I., Nilovskaya N.T. Photosynthetic activity and donor-acceptor relations of spring wheat plants in the application of molybdenum-acid ammonium in drought conditions. *Agrokhimia = Agricultural Chemistry*, 2020, no. 7, pp. 26–35. (In Russian).
15. Qi S., Wang J., Wan L., Dai Z., Da Silva Matos D.M., Du D., Egan S., Bonser S.P., Thomas T., Moles A.T. Arbuscular Mycorrhizal Fungi Contribute to Phosphorous Uptake and Allocation Strategies of Solidago canadensis in a Phosphorous-Deficient Environment. *Frontiers in Plant Science*, 2022, vol. 13, e: 831654. DOI: 10.3389/fpls.2022.831654.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

✉ **Абдурашитов С.Ф.**, заведующий лабораторией, кандидат биологических наук; ORCID 0000-0003-1631-4840, SPIN-код 9957-9049; **адрес для переписки:** Россия, 295043, Республика Крым, Симферополь, Киевская улица, 150; e-mail: asuleyman83@rambler.ru

Грицевич К.С., младший научный сотрудник; ORCID 0000-0002-4640-0902, SPIN-код 8410-3110

Алексеева А.И., младший научный сотрудник; ORCID 0000-0001-8293-2386, SPIN-код 6223-6720

Абдурашитова Э.Р., научный сотрудник; ORCID 0000-0003-4867-3186, SPIN-код 5955-5783

AUTHOR INFORMATION

✉ **Suleiman F. Abdurashytov**, Laboratory Head, Candidate of Science in Biology; ORCID 0000-0003-1631-4840, SPIN-code 9957-9049; **address:** 150, Kievskaya St., Simferopol, Republic of Crimea, 295043, Russia; e-mail: asuleyman83@rambler.ru

Kirill S. Gritsevich, Junior Researcher; ORCID 0000-0002-4640-0902, SPIN-code 8410-3110

Alena I. Alekseeva, Junior Researcher; ORCID 0000-0001-8293-2386, SPIN-code 6223-6720

Elvina R. Abdurashytova, Researcher; ORCID 0000-0003-4867-3186, SPIN-code 5955-5783

Дата поступления статьи / Received by the editors 12.11.2024
Дата принятия к публикации / Accepted for publication 06.12.2024
Дата публикации / Published 14.02.2025