

Влияние ассоциаций *Funneliformis mosseae* на растения огурца обыкновенного в модельных условиях

С. Ф. Абдурашитов¹✉, Ф. С. Беялова², А. В. Ивашов², Э. Р. Абдурашитова¹, А. И. Алексеева¹

¹ Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма, Симферополь, Россия

² Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского, Симферополь, Россия

✉ E-mail: asuleyman83@rambler.ru

Аннотация. Цель – изучить влияние новых ассоциаций грибов арбускулярной микоризы (АМ) на особенности развития симбиоза у огурца обыкновенного с разными штаммами и на рост и развитие растений. **Методы.** Эксперимент проводили в горшечной культуре с неорганическим субстратом с добавлением в качестве единственного источника фосфора ортофосфата кальция. В работе использовали ассоциации грибов АМ *Funneliformis mosseae* S1-4, *F. mosseae* 1-16 и *F. mosseae* 5-16, а также *Cucumis sativus* L. сорта Бьерн F1. **Результаты.** Отмечено, что огурец к формированию АМ подходит избирательно, так как по сравнению с ассоциациями *F. mosseae* S1-4 и 5-16, ассоциация 1-16 интенсивнее колонизировала корни (частота встречаемости микоризной колонизации – 68,9 %, обилие арбускул – 44,2 %). Исследование показало, что колонизация корней *C. sativus* новыми ассоциациями грибов АМ положительно действует на продуктивность растений, увеличивая массу корневой системы на 83,3 %, а массу побегов – на 18,0–24,2 % по сравнению с контролем без обработки. Активизация ростовых процессов растений способна повысить биологическую активность в их ризосфере, создав благоприятные условия для развития микроорганизмов, на что указывает возрастание эмиссии углекислого газа на 23,7–43,5 % по сравнению с контролем. **Научная новизна.** Раскрыты особенности формирования АМ у *C. sativus*, зависящие от применяемой ассоциации. Проанализировано агро- и биохимическое состояние огурца, изменяющееся под действием АМ и положительно влияющее на продуктивность растений. Ассоциация *F. mosseae* 1-16 рекомендована для применения в биотехнологии выращивания огурца.

Ключевые слова: огурец посевной, арбускулярная микориза, интенсивность микоризной колонизации, обилие арбускул, эмиссия CO₂, пролин, содержание фосфора, содержание калия, продуктивность растений

Для цитирования: Абдурашитов С. Ф., Беялова Ф. С., Ивашов А. В., Абдурашитова Э. Р., Алексеева А. И. Влияние ассоциаций *Funneliformis mosseae* на растения огурца обыкновенного в модельных условиях // Аграрный вестник Урала. 2025. Т. 25, № 03. С. 402–411. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2025-25-03-402-411>.

Благодарности. Исследование выполнено в рамках государственного задания № FNZW-2022-0006. В работе использовано оборудование НИИ «Молекулярная и клеточная биофизика» Института перспективных исследований Севастопольского государственного университета.

Дата поступления статьи: 25.09.2024, **дата рецензирования:** 26.11.2024, **дата принятия:** 27.01.2025.

Effect of *Funneliformis mosseae* associations on *Cucumis sativus* L. plants under model conditions

S. F. Abdurashitov¹✉, F. S. Belyalova², A. V. Ivashov², E. R. Abdurashitova¹, A. I. Alekseeva¹

¹ Research Institute of Agriculture of Crimea, Simferopol, Russia

² V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia

✉ E-mail: asuleyman83@rambler.ru

Abstract. The purpose. The study aims to investigate the influence of new arbuscular mycorrhiza (AM) fungi associations on the symbiosis development peculiarities in cucumber with different strains and plant growth and development. **Methods.** The experiment was conducted in pot culture with inorganic substrate with addition of calcium orthophosphate as the only source of phosphorus. Associations of AM fungi *Funneliformis mosseae* S1-4, *F. mosseae* 1-16 and *F. mosseae* 5-16, as well as *Cucumis sativus* L. variety Bjorn F1 were used. **Results.** It was

observed that cucumber was selective to AM formation, as association 1-16 colonized roots more intensively with mycorrhizal colonization frequency of 68.9 % and arbuscule abundance of 44.2 % compared to associations *F. mosseae* S1-4 and *F. mosseae* 5-16. The study showed that colonization of *C. sativus* roots by new associations of AM fungi has a positive effect on plant productivity increasing root system mass by 83.3 % and shoot mass by 18.0–24.2 % compared to the control without treatment. Activation of plant growth processes is able to increase biological activity in their rhizosphere, creating favourable conditions for the development of microorganisms, as indicated by the increase in carbon dioxide emission by 23.7–43.5 % compared to the control. **Scientific novelty.** The peculiarities of AM formation in *C. sativus* depending on the applied association have been revealed. Agro- and biochemical state of cucumber changing under the influence of AM and positively affecting plant productivity was analyzed. The association *F. mosseae* 1-16 is recommended for application in biotechnology of cucumber cultivation.

Keywords: cucumber, arbuscular mycorrhiza, intensity of mycorrhizal colonization, abundance of arbuscules, CO₂ emission, proline, phosphorus content, potassium content, plant productivity

Acknowledgements. The research was carried out within the framework of the state assignment No. FNZW-2022-0006. The equipment of the Research Laboratory “Molecular and Cellular Biophysics” of the Institute of Advanced Studies of Sevastopol State University was used in the study.

For citation: Abdurashitov S. F., Belyalova F. S., Ivashov A. V., Abdurashitova E. R., Alekseeva A. I. Effect of *Funneliformis mosseae* associations on *Cucumis sativus* L. plants under model conditions. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2025; 25 (03): 402–411. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2025-25-03-402-411>. (In Russ.)

Date of paper submission: 25.09.2024, **date of review:** 26.11.2024, **date of acceptance:** 27.01.2025.

Постановка проблемы (Introduction)

Биопрепараты признаны альтернативой химическим удобрениям для сохранения плодородия почвы и увеличения урожайности в условиях устойчивого земледелия и развития биотехнологий. В связи с этим обычные способы ведения сельского хозяйства преобразуются в агроэкологические методы, которые лучше учитывают биологические механизмы и предохраняют экосистемы. Агроэкология пропагандирует технологии ведения сельского хозяйства с помощью разнообразных почвенных микроорганизмов, одними из которых являются грибы арбускулярной микоризы (АМ) [1; 2].

Грибы арбускулярной микоризы (АМ) являются широко распространенными симбионтами растений и значительными экологическими партнерами в агроэкосистемах. Образую внутрикорневые симбиотические структуры, они способствуют усвоению минеральных питательных веществ, таких как фосфор, калий, кальций, азот, сера и другие, из почвы и обмену ими с растениями [3]. Согласно исследованиям, грибы АМ разных видов имеют различную способность и направленность к передаче поглощенных элементов питания к растениям-симбионтам, зависящим и от степени микоризации. Арбускулярные микоризные грибы в основном состоят из гиф мицелия, арбускул и везикул в корнях, а также гиф и спор в почве¹. Они могут образовывать огромную сеть гиф в ризосфере растений, что не только способствует их росту, повышению урожайности и качества продукции, но и улучшает

физические и химические свойства почвы, а также усвоение питательных веществ [4].

Калий является одним из наиболее важных питательных элементов растений, составляя от 2 % до 10 % сухой массы растений, и играет роль во многих фундаментальных физиологических и биохимических процессах. Фосфор имеет решающее значение для нормального роста и развития растений. Часто эти вещества присутствуют в почве в относительно больших количествах, но с низкой биодоступностью из-за комплексобразования с металлами. Наземные растения выработали две специализированные стратегии увеличения поглощения неорганического калия и фосфора из почв [5]. Первый заключается в прямом поглощении растворимого фосфора через клетки эпидермиса корня и корневые волоски. Вторая стратегия использует мутуалистические симбионты, такие как микоризы и фосфоролубицирующие бактерии, для увеличения поглощающей поверхности корневой системы [6–8]. Следует отметить, что прямое поглощение фосфора через корни требует большего вложения растительных ресурсов, чем приобретение фосфора симбионтами [8].

Среди овощных культур виды из семейств пасленовые, тыквенные, лилейные и некоторых других легко образуют арбускулярную микоризную ассоциацию, за исключением крестоцветных, маревых и амарантовых, которые не могут или с меньшей вероятностью будут колонизированы. Различными исследователями показано положительное воздействие микоризных грибов на рост и физиологию ряда овощных и других культур. Так, под дей-

¹ Smith S. E., Read D. J. Mycorrhizal symbiosis. 3rd ed. London: Academic Press, 2008. 804 p.

ствием биопрепаратов на основе различных штаммов грибов АМ из родов *Funneliformis*, *Glomus*, *Rhizophagus*, *Claroideoglomus* и *Gigaspora* выявлена прибавка товарного урожая у перца сладкого в условиях органического способа ведения хозяйства, а также лука репчатого и томата при традиционном способе выращивания [9–11]. Дополнительный эффект от микоризации растений – это уменьшение пораженности патогенными заболеваниями, в частности, вершинной гнилью [9]. На растениях из семейства *Cucurbitaceae* микоризацию грибами АМ применяли на дынях, огурцах и других культурах [12; 13]. В литературе инокуляция АМГ различаются не только у разных видов макросимбионтов, но и у штаммов микросимбионтов [14; 15]. Следовательно, необходимо изучение механизмов взаимодействия растений и грибов АМ для извлечения наибольшего обоюдовыгодного сотрудничества между ними.

Цель настоящего исследования – определение влияния новых ассоциаций *Funneliformis mosseae* на формирование микоризной колонизации *Cucumis sativus*, поглощение фосфора и калия и развитие растений в модельных условиях.

Методология и методы исследования (Methods)

В работе использовали ассоциации грибов АМ из Крымской коллекции микроорганизмов ФГБУН НИИСХ Крыма (<http://www.ckp-rf.ru/usu/507484>): ассоциация-референт *Funneliformis mosseae* S1-4², новые перспективные ассоциации *F. mosseae* 1-16 и *F. mosseae* 5-16, выделенные из ризосферы пшеницы озимой на черноземе южном и подсолнечника на лугово-каштановой почве соответственно³. Для выявления наиболее продуктивных ассоциаций использовали наиболее распространенный у товаропроизводителей закрытого грунта огурец сорта Бьёрн F1 (селекции Enza Zaden, Голландия) и анализировали по ряду морфологических и биохимических показателей.

Вегетационный опыт проводили в горшечной культуре в пластиковых сосудах объемом 0,5 л⁴. Субстратом служила стерильная смесь песка и вермикулита (1 : 1 по объему) с добавлением ортофосфата кальция (1 г на 1 кг субстрата). Полив осуществляли питательным раствором Хогланда без дигидрофосфата калия⁵. В каждом сосуде выращивали по одному растению. Инокулюм грибов АМ с

нагрузкой не менее чем 20 колонизирующих единиц на семя вносили в субстрат (на 1 см ниже уровня семян). Растения выращивали в условиях искусственного освещения 20 клк с фотопериодом 16/8 часов (день/ночь). Оценку микоризации и влияния на морфометрические данные растений проводили через 60 суток после получения всходов. Во всех вариантах соблюдали пятикратную повторность.

Визуализацию развития микоризы проводили окрашиванием отрезков корней черными чернилами по Х. Вирхейлигу с соавторами⁶. Окрашивание проводилось строго по методике. Окрашенные отрезки корней (1 см) выкладывались на предметные стекла и оценивали под стереомикроскопом МСП-2 (Ломо, Россия). Количественную оценку микоризации проводили по методике Травло, описанной в методических рекомендациях Н. М. Лабутовой⁷.

Площадь листовой поверхности определяли методом высечек согласно практикуму под редакцией Н. Н. Третьякова⁸. Отбирали среднюю пробу из 10 листьев, делали высечки пробочным сверлом диаметром 10 мм, взвешивали на аналитических весах Pioneer PR224 (Ohaus, Китай).

Дыхание в ризосфере определяли по интенсивности выделения углекислого газа титриметрическим методом в модификации Б. Н. Макарова⁹. Отбирали среднюю пробу ризосферного субстрата (5 г), помещали в стеклянную вialу, которую опускали в стеклянный флакон с 1 М раствора гидроксида натрия (20 мл). Систему сосудов с ризосферой инкубировали при 27 °С. По прошествии 5 суток вialу убрали, а к раствору приливали 50-процентный раствор хлорида бария (5 мл) и несколько капель спиртового раствора фенолфталеина. Накопление углекислого газа детектировали по нейтрализации образовавшегося гидроксида бария 0,1 н соляной кислотой на полуавтоматическом титраторе Biotrate 50 (Sartorius Corporate, Финляндия). Эмиссию CO₂ вычисляли в сравнении с холостой пробой без ризосферы.

Определение содержания свободного пролина в листьях растений проводили по модифицированной методике Г. Н. Шихалеевой¹⁰. Для этого из свежих листьев огурца отбирали среднюю пробу с каждого растения по 200 мг, мелко нарезали и помещали в

² Абдурашитов С. Ф., Волкогон В. В. Вплив способів застосування мікоризних грибів на продуктивність пожнивної сої // Збалансоване природокористування. 2015. № 3. С. 46–50.

³ Абдурашитов С. Ф., Алексеенко Н. В. Развитие арбускулярной микоризы в рисовых чеках в условиях отсутствия орошения // Таврический вестник аграрной науки. 2017. № 1 (9). С. 9–14.

⁴ Лабутова Н. М. Методы исследования арбускулярных микоризных грибов. Санкт-Петербург: Инновационный центр защиты растений ВИЗР, 2000. 24 с.

⁵ Hoagland D. R., Arnon D. I. The water-culture method for growing plants without soil. California Agricultural Experiment Station, 1950. Circular 347. 32 p.

⁶ Vierheilig H., Coughlan A. P., Wyss U., Piché Y. Ink and vinegar, a simple staining technique for arbuscular-mycorrhizal fungi // Applied and Environmental Microbiology. 1998. Vol. 64 (12). Pp. 5004–5007.

⁷ Лабутова Н. М. Методы исследования арбускулярных микоризных грибов. Санкт-Петербург: Инновационный центр защиты растений ВИЗР, 2000. 24 с.

⁸ Практикум по физиологии растений / Под ред. Н. Н. Третьякова. 3-е изд. Москва: Агропромиздат, 1990. 271 с.

⁹ Методические рекомендации по оценке токсического действия пестицидов на микрофлору почвы / Под общим руководством Ю. В. Круглова. Ленинград: Б. и., 1981. 42 с.

¹⁰ Шихалеева Г. Н., Будняк А. К., Шихалеев И. И., Иващенко О. Л. Модифікована методика визначення проліну в рослинних об'єктах // Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія: біологія. 2014. Вип. 21, № 1112. С. 168–172.

пробирки на 20 мл, заливали дистиллированной водой, предварительно нагретой до 100 °С, в количестве 10 мл и выдерживали в течение 10 минут на водяной бане. После выдерживания водный экстракт (2 мл) приливали к заранее приготовленному нингидриновому реактиву (2 мл) и ледяной уксусной кислоте (2 мл) и вновь инкубировали при 100 °С (20 минут). Полученную смесь быстро охлаждали под проточной водой. Изменения оптической плотности измеряли на спектрофотометре FlexA-200 (Allsheng, Китай) при длине волны 520 нм в плоскодонном микропланшете (Greiner, Германия).

Определение фосфора и калия проводили по методу Кьельдаля (ГОСТ 26715 «Удобрения органические. Методы определения общего азота»). Сжигание средней пробы (1 г) проводили на приборе LK-100 (LOIP, Россия) под действием серной кислоты (20 мл) и 33-процентной перекиси водорода (8 мл). Сжигание проводили до полного осветления. Для определения фосфора к выжженной пробе (2 мл) приливали реактив Б (состоящий из молибденовокислого аммония, сурьмяновиннокислого калия, серной кислоты и аскорбиновой кислоты – согласно методике) в количестве 50 мл (ГОСТ 26717-85 «Удобрения органические. Метод определения общего фосфора»). Оптическую плотность полученного раствора определяли на спектрофотометре ПЭ-5300ВИ (Экротим, Россия) с длиной волны 710 нм. Содержание P_2O_5 определяли по стандартному раствору калия фосфорнокислого однозамещенного. Для определения содержания калия разведенный выжженный раствор сжигали (ГОСТ 26718-85 «Удобрения органические. Метод определения общего калия») в пламенном фотометре ФЛАФО-4 (Carl Zeiss Jena, Германия), в качестве стандарта использовали калий фосфорнокислый однозамещенный.

Анализ содержания хлорофиллов *a* и *b* проводили с помощью их спиртовой экстракции из листовых пластинок. Для этого делали среднюю пробу (200 мг): только что сорванные листья нарезами мелкими кусочками и заливали 10 мл 96-процентного этилового спирта¹¹. После экстрагирования в течение 3 суток в темноте при комнатной температуре содержание пигментов определяли спектрофотометрически на приборе FlexA-200 (Allsheng, Китай) при длинах волн 664 нм и 648 нм и рассчитывали по формулам, указанным в патенте.

Постановка вегетационного опыта и статистический анализ полученных результатов проведены по Б. А. Доспехову¹². Все параметры рассчитаны

в виде среднего показателя и стандартной ошибки средней ($\bar{x} \pm m_x$) с выборкой $n = 5 \dots 8$ в зависимости от показателя. Значимость различий определяли с помощью дисперсионного анализа согласно апостериорному тесту Дункана или непараметрическому критерию Краскела – Уоллиса в программе IBM SPSS Statistics (Demo). Корректность применения дисперсионного анализа оценивали по критерию нормальности Колмогорова – Смирнова и тесту Левена на гомогенность дисперсий.

Результаты (Results)

У большинства растений, в том числе и культурных, присутствует арбускулярная микориза, и отдельный вид растений имеет разную степень микоризации. Считается, что специфику, круг хозяев и степень колонизации нелегко исследовать из-за трудности взаимодействия между грибами АМ и корневой системой разных растений [16]. Проведенные исследования показали, что у растений огурца обыкновенного частота встречаемости микоризной колонизации (МК) при внесении ассоциации 1-16 была значительно выше по сравнению с остальными исследуемыми изолятами и составила 68,9 % (таблица 1). Гифы микоризных грибов образуют специальные симбиотические структуры, именуемые арбускулами. В них осуществляется обмен веществами между клетками корня и грибными гифами. При этом арбускулы живут только несколько дней, впоследствии они лизируются, а питательные элементы вновь поступают в растения [1].

В ходе исследования определено, что наибольшее обилие арбускул отмечено при использовании ассоциации 1-16 и составило 44,2 % с интенсивностью колонизации 49,3 %. Ассоциация 5-16 имеет менее значительную развитую сеть гиф в корнях огурца (встречаемость МК – 24,4 %), малое обилие арбускул (5,5 %) и присутствие микоризных апрессориев на корнях, что указывает на начальный этап формирования симбиоза (рис. 1). Ассоциация *F. mosseae* S1-4 показала свою неэффективность симбиотического взаимодействия с огурцом, о чем свидетельствует слабая микоризная колонизация корней.

Эмиссия углекислого газа из ризосферы является важным показателем деятельности микроорганизмов. Данный показатель часто используется при оценке биологической активности почв. В результате проведенного эксперимента наблюдали интенсификацию микробной составляющей ризосферы огурца в виде повышения выделения углекислого газа из ризосферы на 43,9 % при применении ассоциации 1-16 по сравнению с контролем без инокуляции (рис. 2).

Для определения способности ассоциаций микоризных грибов поставлять растворимые и нерастворимые питательные элементы в качестве субстрата использовали песок и вермикулит не содержащие данных веществ. Калий вносили в виде

¹¹ Патент № 2244916 С1 Российская Федерация, МПК G01N 21/25, С09В 61/00. Способ определения хлорофилла в растениях гречихи / В. Т. Лобков, Г. В. Наполова. № 2003120313/04 : заявл. 02.07.2003 : опубл. 20.01.2005 ; заявитель Орловский государственный аграрный университет (ОГАУ).

¹² Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. Москва: Агропромиздат, 1985. 352 с.

растворимой соли (нитрат калия), а фосфор – в виде нерастворимого ортофосфата кальция. В ходе эксперимента определено, что хорошо микоризованные растения при внесении ассоциации 1-16 усваивали дополнительные фосфорные группы, поступающие в побеги, на 0,7 мг (18,4 %) больше, чем в контроле, при поступлении в корни их количество не снизилось (рис. 3). Для ионов калия, напротив, поступление в подземную часть растений увеличилось на 10 мг (16,4 %) под действием *F. mosseae* 1-16, а в надземную – снижалось на 8,0 % по сравнению с контролем.

Под действием биотических и абиотических стрессов в растениях активизируются ферменты оксидоредуктаз, а также увеличивается количество свободного пролина, осуществляющего антиоксидантную, регуляторную и осмопротекторную функции [17]. Под действием ассоциации 1-16 свободного пролина в листьях огурца было накоплено меньше на 35,9 % по отношению к контролю (рис. 4). Это свидетельствует о меньшем уровне стресса, чем у остальных вариантов. Стресс мог быть вызван недостатком растворимого фосфора в субстрате, который не вносили с питательным раствором для установления симбиоза с грибами АМ.

Таблица 1

Уровень колонизации корней огурца обыкновенного с внесением ассоциаций грибов АМ

Вариант опыта	Частота встречаемости МК, %	Интенсивность МК, %	Обилие арбускул, %
Контроль без обработки	0	0	0
<i>F. mosseae</i> S1-4	6,7 ± 0,0	1,2 ± 0,6	0,3 ± 0,3
<i>F. mosseae</i> 1-16	68,9 ± 8,7	49,3 ± 10,9	44,2 ± 10,8
<i>F. mosseae</i> 5-16	24,4 ± 11,1	8,6 ± 6,2	5,5 ± 5,0

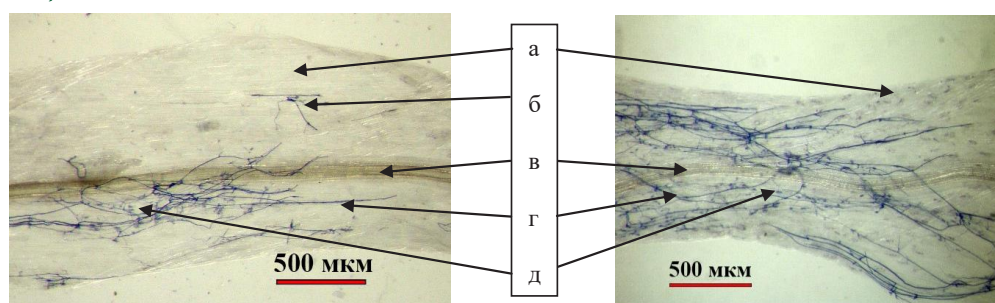
Примечание. МК – микоризная колонизация.

Table 1

Level of colonization of roots of common cucumber with application of AM fungi associations

Treatment	Frequency of MC occurrence, %	Intensity of MC, %	Abundance of arbuscules, %
Control without treatment	0	0	0
<i>F. mosseae</i> S1-4	6.7 ± 0.0	1.2 ± 0.6	0.3 ± 0.3
<i>F. mosseae</i> 1-16	68.9 ± 8.7	49.3 ± 10.9	44.2 ± 10.8
<i>F. mosseae</i> 5-16	24.4 ± 11.1	8.6 ± 6.2	5.5 ± 5.0

Note. MC – mycorrhizal colonization.

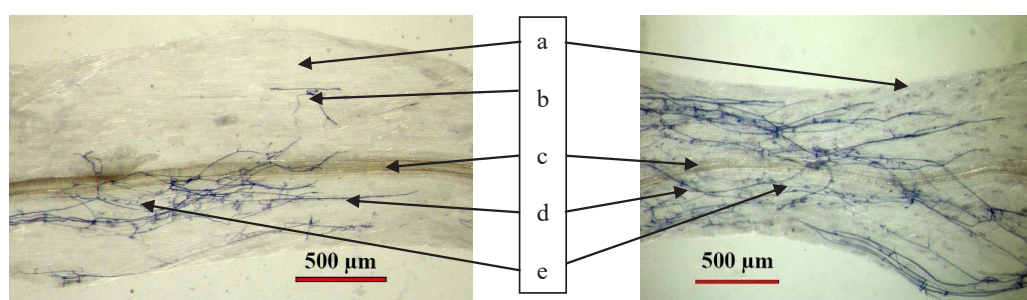


Ассоциация 5-16

Ассоциация 1-16

Рис. 1. Развитие арбускулярной микоризы в корнях *C. sativus*:

- а) клетки паренхимы корня; б) апрессорий грибов АМ и начало формирования новой микоризной сети; в) центральный цилиндр корня; г) внутрикорневые гифы; д) арбускулы



Association 5-16

Association 1-16

Fig. 1. Development of arbuscular mycorrhiza in *C. sativus* roots:

- a) cells of root parenchyma; b) AM fungi appressoria and the beginning of new mycorrhizal network formation; c) central cylinder of the root; d) intra-root hyphae; e) arbuscules.

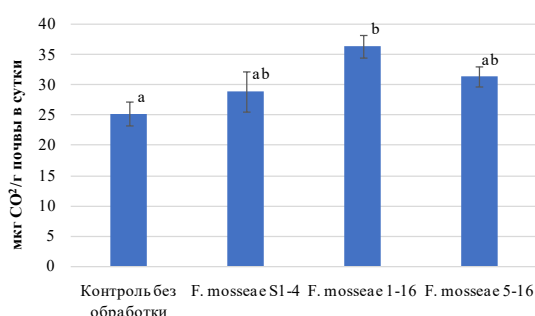


Рис. 2. Зависимость эмиссии углекислого газа в ризосфере огурца обыкновенного от применяемых ассоциаций грибов АМ

Примечание. В столбцах с одинаковым буквенным обозначением не установлено статистически значимых различий при $p > 0,05$ (согласно тесту Дункана)

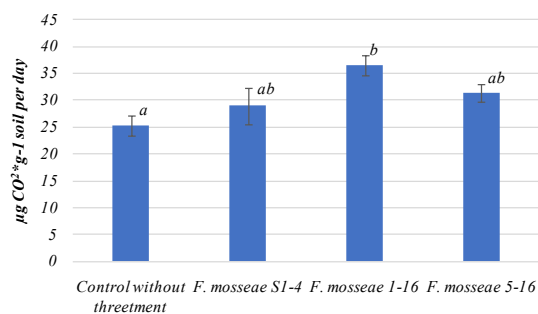


Fig. 2: Dependence of carbon dioxide emission in the rhizosphere of cucumber on applied AM-fungi associations

Note. Columns with the same letter designations have no statistically significant differences at $p > 0.05$ (according to Duncan's test)

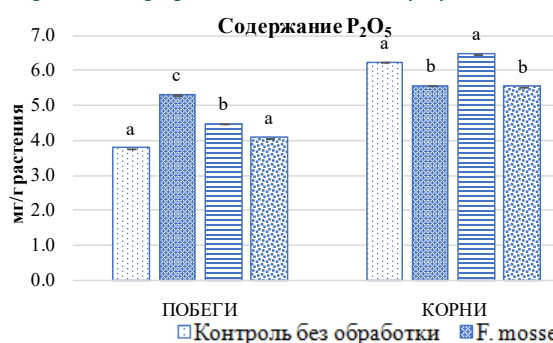


Рис. 3. Влияние новых ассоциаций микоризных грибов на усвоение фосфора и калия растениями *C. sativus*

Примечание. В столбцах с одинаковым буквенным обозначением не установлено статистически значимых различий при $p > 0,05$ (согласно тесту Краскела – Уоллиса)

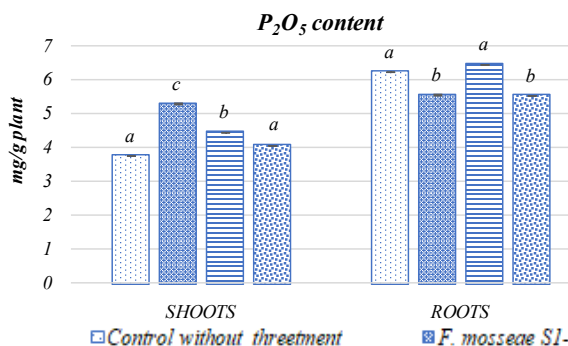
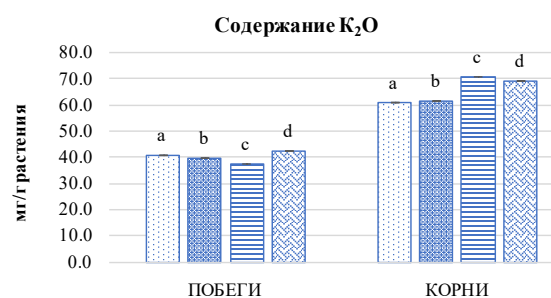


Fig. 3: Effect of new associations of mycorrhizal fungi on phosphorus and potassium uptake by *C. sativus* plants

Note. Columns with the same letter designation did not establish statistically significant differences at $p > 0.05$ (according to the Kruskal – Wallis test)

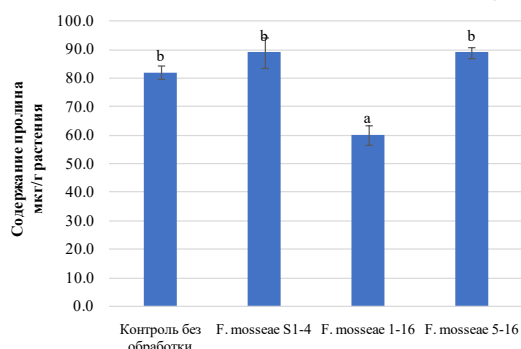
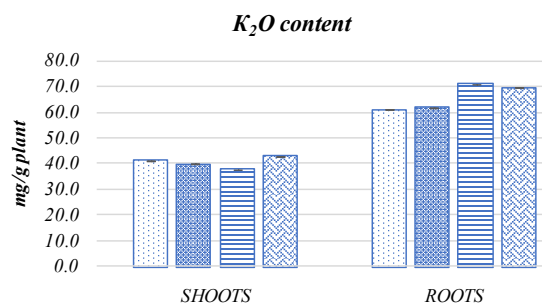


Рис. 4. Зависимость содержания пролина в листьях *C. sativus* от применяемых ассоциаций грибов АМ

Примечание. В столбцах с одинаковым буквенным обозначением не установлено статистически значимых различий при $p > 0,05$ (согласно тесту Дункана)

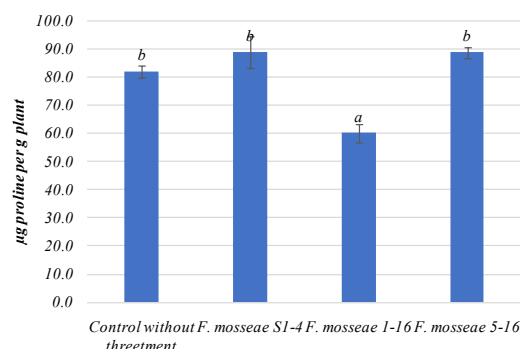


Fig. 4. Dependence of proline content in *C. sativus* leaves on the AM fungi associations used

Note. Columns with the same letter designations have no statistically significant differences at $p > 0.05$ (according to Duncan's test)

Таблица 2

Влияние ассоциаций *F. mosseae* на продуктивность огурца обыкновенного

Вариант опыта	Высота растений, см	Площадь листьев, см ² /растение	Масса корней, г	Масса побегов, г
Контроль без обработки	36,7 ± 1,5 ^a	815,0 ± 56,4 ^a	0,48 ± 0,05 ^a	1,28 ± 0,07 ^a
<i>F. mosseae</i> S1-4	40,9 ± 1,2 ^{ab}	971,2 ± 46,9 ^b	0,61 ± 0,05 ^b	1,50 ± 0,05 ^a
<i>F. mosseae</i> 1-16	42,1 ± 0,8 ^b	977,2 ± 48,9 ^b	0,88 ± 0,05 ^b	1,59 ± 0,08 ^b
<i>F. mosseae</i> 5-16	42,8 ± 1,9 ^b	988,8 ± 0,00 ^b	0,61 ± 0,05 ^b	1,51 ± 0,07 ^a

Примечание. В ячейках с одинаковым буквенным обозначением не установлено статистически значимых различий при $p > 0,05$ (согласно тесту Дункана).

Table 2

Effect of *F. mosseae* associations on productivity of cucumber

Treatment	Plant height, cm	Leaf area, cm ² /plant	Weight of roots, g	Weight of shoots, g
Control without treatment	36.7 ± 1.5 ^a	815.0 ± 56.4 ^a	0.48 ± 0.05 ^a	1.28 ± 0.07 ^a
<i>F. mosseae</i> S1-4	40.9 ± 1.2 ^{ab}	971.2 ± 46.9 ^b	0.61 ± 0.05 ^b	1.50 ± 0.05 ^a
<i>F. mosseae</i> 1-16	42.1 ± 0.8 ^b	977.2 ± 48.9 ^b	0.88 ± 0.05 ^b	1.59 ± 0.08 ^b
<i>F. mosseae</i> 5-16	42.8 ± 1.9 ^b	988.8 ± 0.00 ^b	0.61 ± 0.05 ^b	1.51 ± 0.07 ^a

Note. Columns with the same letter designations have no statistically significant differences at $p > 0.05$ (according to Duncan's test).

Результатом этих взаимодействий является способствование новых ассоциаций грибов АМ ускоренному росту огурца обыкновенного, что привело к увеличению высоты побегов у растений с ассоциациями *F. mosseae* 1-16 и 5-16 от 14,7 до 16,6 % в сравнении с контролем (таблица 2). Основопологающим фактором формирования урожайности и развития растений является фотосинтез. Продуктивность фотосинтеза растений можно определить с помощью такого показателя, как суммарная площадь листьев. Использование грибов АМ обеспечило прирост площади листьев на 21,3 % только в варианте с ассоциацией 5-16. Из-за высоких значений статистических ошибок (дисперсий) в опытном и референсном вариантах с ассоциациями *F. mosseae* 1-16 и *F. mosseae* S1-4 соответственно тенденции к увеличению этого показателя не были статистически доказаны. Также стоит отметить, что в симбиозе ассоциаций АМ грибов с огурцом не выявлено влияния на содержание хлорофиллов, как это показано в экспериментах с сорго зерновым и кориандром [14; 23].

Известно, что арбускулярная микориза оказывает содействие формированию у растений хорошо развитой корневой системы, которая была бы способна в достаточной мере обеспечивать надземную часть влагой и питательными веществами для получения высокого урожая. Поэтому мы исследовали влияние новых ассоциаций на массу корневой системы *C. sativus*. Как видно из данных таблицы 2, достоверное накопление сухой массы корней растениями огурца обыкновенного при использовании грибов АМ отмечено во всех вариантах. Для изучения влияния АМ на продуктивность растений *C. sativus* был проанализирован показатель сухой массы побегов. Применение микоризы способствовало увеличению накопления сухой массы побегов,

причем во всех опытных вариантах. В наибольшей степени (на 24,2 %) оно проявилось в варианте с *F. mosseae* 1-16.

Обсуждение и выводы (Discussion and Conclusion)

Полученные данные еще раз подтвердили имеющиеся в литературных источниках представления о применении грибов арбускулярной микоризы в качестве биоудобрения. При этом рост растений может повышаться как за счет увеличения усвоения элементов питания из субстрата, так и вследствие значительного расширения площади поглощения воды [19] и увеличения площади листовой поверхности. Известно, что микоризные грибы могут увеличивать рост растений даже тогда, когда те страдают от недостатка минеральных веществ, что видно, например, по отставанию в их росте¹³.

Таким образом, определено, что применение новых ассоциаций 1-16 и 5-16 в гидропонной системе выращивания огурца обыкновенного способствует активному формированию микоризы арбускулярного типа. Отмечено, что огурец к формированию симбиоза подходит избирательно, так как по сравнению с ассоциациями *F. mosseae* S1-4 и 5-16 ассоциация 1-16 интенсивнее колонизировала корни (частота встречаемости МК – 68,9 %, обилие арбускул – 44,2 %). Исследование показало, что колонизация корней *C. sativus* новыми ассоциациями грибов АМ положительно действует на физиологическое состояние растений и ризосферы. Отметим активизацию биологической активности в ризосфере, создав благоприятные условия для развития микроорганизмов, на что указывает возрастание эмиссии углекислого газа на 23,7–43,5 % по сравнению с контролем. Под действием ассоциации грибов АМ 1-16 снизилось стрессовое состояние огурца

¹³ Smith S. E., Read D. J. Mycorrhizal symbiosis. 3rd ed. London: Academic Press, 2008. 804 p.

от недостатка растворимого фосфора в субстрате. Недостаток фосфора в побегах и корнях и дополнительное количество калия в подземной части растения восполнили симбиотические грибы, способные поставлять эти элементы из субстрата. При этом значительно увеличилась высота побегов на

14,7–16,6 %, площадь листовой поверхности – на 21,3 %, масса корневой системы – на 83,3 %, масса побегов – на 18,0–24,2 % по сравнению с контролем без обработки. Показанные результаты говорят об эффективности симбиотического взаимодействия, а ассоциация *F. mosseae* 1-16 рекомендуется для биотехнологического растениеводства.

Библиографический список

1. Noceto P. A., Bettenfeld P., Boussageon R., Hériché M., Sportes A., 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.
2. Wahdan S. F. M., Asran A. G. A., Abdellatef M., Atia M. A. M., Ji L. Arbuscular mycorrhizal fungi in organic versus conventional farming // In: Ahammed G. J., Hajiboland R. (eds.) *Arbuscular mycorrhizal fungi and higher plants*. Singapore: Springer, 2024. DOI: 10.1007/978-981-99-8220-2_12.
3. Carrara J. E., Heller W. P. Arbuscular mycorrhizal species vary in their impact on nutrient uptake in sweet corn (*Zea mays*) and butternut squash (*Cucurbita moschata*) // *Frontiers in Agronomy*. 2022. Vol. 4. Article number 1040054. DOI: 10.3389/fagro.2022.1040054.
4. Fall A. F., Nakabonge G., Ssekandi J., Founoune-Mboup H., Apori S. O., Ndiaye A., Badji A., Ngom K. Roles of arbuscular mycorrhizal fungi on soil fertility: contribution in the improvement of physical, chemical, and biological properties of the soil // *Frontiers Fungal Biology*. 2022. Vol. 3. DOI: 10.3389/ffunb.2022.723892.
5. Luo B., Ma P., Nie Z., Zhang X., He X., Ding X., Feng X., Lu Q., Ren Z., Lin H., Wu Y., Shen Y., Zhang S., Wu L., Liu D., Pan G., Rong T., Gao S. Metabolite profiling and genome-wide association studies reveal response mechanisms of phosphorus deficiency in maize seedling // *Plant Journal*. 2019. Vol. 97. Pp. 947–969. DOI: 10.1111/tj.14160.
6. Liu J., Liu J., Liu J., Cui M., Huang Y., Tian Y., Chen A., Xu G. The potassium transporter SIHAK10 is involved in mycorrhizal potassium uptake // *Plant Physiology*. 2019. Vol. 180, No. 1. Pp. 465–479. DOI: 10.1104/pp.18.01533.
7. Han X., Zhou Y., Li Y., Ren W., Liu K., Zhang W., Zhang H., Tang M. LbKAT3 may assist in mycorrhizal potassium uptake, and overexpression of LbKAT3 may promote potassium, phosphorus, and water transport from arbuscular mycorrhizal fungi to the host plant // *Frontiers in Plant Science*. 2023. Vol. 14. DOI: 10.3389/fpls.2023.1161220.
8. 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. DOI: 10.3389/fpls.2022.831654.
9. Buczkowska H., Sałata A. Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and plant irrigation with yield – forming factors in organic sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) cultivation // *Acta Scientiarum Polonorum, Hortorum Cultus*. 2020. Vol. 9, No. 6. Pp. 125–138. DOI: 10.24326/asphc.2020.6.11.
10. Абдурашитов С. Ф., Немтинов В. И., Пузанова Е. В., Грицевич К. С., Белова И. В., Грунина Е. Н., Абдурашитова Э. Р., Климчук А. В. Оценка влияния арбускулярно-микоризных грибов на хозяйственно ценные показатели лука репчатого // *Экосистемы*. 2020. № 21 (51). С. 101–108. DOI: 10.37279/2414-4738-2020-21-101-108.
11. Tran C. T. K., Watts-Williams S. J., Smernik R. J., Cavagnaro T. R. Arbuscular mycorrhizas increased tomato biomass and nutrition but did not affect local soil P availability or 16S bacterial community in the field // *Science of the Total Environment*. 2022. Vol. 819. Article number 152620. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152620.
12. Xiuxiu S., Yansu L., Xianchang Y., Chaoxing H. Effects of arbuscular Mycorrhizal fungi (AMF) inoculums on cucumber seedlings // *Advances in Plants & Agriculture Research*. 2019. Vol. 9 (1). Pp. 127–130.
13. Trinchera A., Testani E., Roccuzzo G., Campanelli G., Ciaccia C. Agroecological service crops drive plant mycorrhization in organic horticultural systems // *Microorganisms*. 2021. Vol. 9, No. 2. Article number 410. DOI: 10.3390/microorganisms9020410.
14. Абдурашитов С. Ф., Грицевич К. С., Алексеева А. И., Сейтаджиева С. Б., Зубоченко А. А., Юрков А. П. Агрохимическая и физиологическая основа симбиотической эффективности ассоциаций грибов арбускулярной микоризы с растениями *Coriandrum sativum* // *Земледелие*. 2024. № 1. С. 23–27. DOI: 10.24412/0044-3913-2024-1-23-27.
15. Zhao Y., Cartabia A., Lalaymia I., Declerck S. Arbuscular mycorrhizal fungi and production of secondary metabolites in medicinal plants // *Mycorrhiza*. 2022. Vol. 32. Pp. 221–256. DOI: 10.1007/s00572-022-01079-0.

16. Ibrahim M. Role of arbuscular mycorrhizal fungi in biological nitrogen fixation and nitrogen transfer from legume to companion species // *Journal of Stress Physiology and Biochemistry*. 2021. Vol. 17 (2). Pp. 121–134.

17. Meena M., Divyanshu K., Kumar S., Swapnil P., Zehra A., Shukla V., Yadav M., Upadhyay R. S. Regulation of L-proline biosynthesis, signal transduction, transport, accumulation and its vital role in plants during variable environmental conditions // *Helion*. 2019. Vol. 5 (12). Article number e02952. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e02952.

18. Абдурашитова Э. Р., Абдурашитов С. Ф., Мельничук Т. Н., Грицевич К. С. Влияние биоагентов микробных препаратов на содержание хлорофиллов в листьях сельскохозяйственных культур // *Современное состояние, проблемы и перспективы развития аграрной науки: сборник материалов VII международной научно-практической конференции*. Симферополь, 2022. С. 183–184.

19. Khan S. W., Yaseen T., Naz F., Abidullah S., Kamil M. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) inoculation on growth and mycorrhizal dependency of (*Lens culinaris* L.) varieties // *International Journal of Bio-organic Chemistry*. 2019. Vol. 4 (1). Pp. 47–52.

Об авторах:

Сулейман Февзиевич Абдурашитов, кандидат биологических наук, заведующий лабораторией, Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма, Симферополь, Россия; ORCID 0000-0003-1631-4840, AuthorID 775657. E-mail: asuleyman83@rambler.ru

Фадме Сейдаметовна Белялова, студент, Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского, Симферополь, Россия; ORCID 0009-0009-5773-0315. E-mail: belyalova.f@mail.ru

Анатолий Васильевич Ивашов, доктор биологических наук, профессор, Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского, Симферополь, Россия; ORCID 0000-0002-8613-7475, AuthorID 772399. E-mail: aivashov@mail.ru

Эльвина Расимовна Абдурашитова, научный сотрудник, Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма, Симферополь, Россия; ORCID 0000-0003-4867-3186, AuthorID 887651. E-mail: elvi-jadore@mail.ru

Алена Ильинична Алексеева, младший научный сотрудник, Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма, Симферополь, Россия; ORCID 0000-0001-8293-2386, AuthorID 1187617. E-mail: alena_crao2000@mail.ru

References

1. Noceto P. A., Bettenfeld P., Boussageon R., et al. 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; 31 (6): 655–669. DOI: 10.1007/s00572-021-01054-1.

2. Arbuscular mycorrhizal fungi in organic versus conventional farming. In: *Ahammed G. J., Hajiboland R. (eds.) Arbuscular mycorrhizal fungi and higher plants*. Singapore: Springer, 2024. DOI: 10.1007/978-981-99-8220-2_12.

3. Carrara J. E., Heller W. P. Arbuscular mycorrhizal species vary in their impact on nutrient uptake in sweet corn (*Zea mays*) and butternut squash (*Cucurbita moschata*). *Frontiers in Agronomy*. 2022; 4: 1040054. DOI: 10.3389/fagro.2022.1040054.

4. Fall A. F., Nakabonge G., Ssekandi J., Founoune-Mboup H., Apori S. O., Ndiaye A., Badji A., Ngom K. Roles of arbuscular mycorrhizal fungi on soil fertility: contribution in the improvement of physical, chemical, and biological properties of the soil. *Frontiers Fungal Biology*. 2022; 3. DOI: 10.3389/ffunb.2022.723892.

5. Luo B., Ma P., Nie Z., Zhang X., He X., Ding X., Feng X., Lu Q., Ren Z., Lin H., Wu Y., Shen Y., Zhang S., Wu L., Liu D., Pan G., Rong T., Gao S. Metabolite profiling and genome-wide association studies reveal response mechanisms of phosphorus deficiency in maize seedling. *Plant Journal*. 2019; 97: 947–969. DOI: 10.1111/tbj.14160.

6. Liu J., Liu J., Liu J., Cui M., Huang Y., Tian Y., Chen A., Xu G. The Potassium transporter SIHAK10 is involved in mycorrhizal potassium uptake. *Plant Physiology*. 2019; 180 (1): 465–479. DOI: 10.1104/pp.18.01533.

7. Han X., Zhou Y., Li Y., Ren W., Liu K., Zhang W., Zhang H., Tang M. LbKAT3 may assist in mycorrhizal potassium uptake, and overexpression of LbKAT3 may promote potassium, phosphorus, and water transport from arbuscular mycorrhizal fungi to the host plant. *Frontiers in Plant Science*. 2023; 14. DOI: 10.3389/fpls.2023.1161220.

8. 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; 13. DOI: 10.3389/fpls.2022.831654

9. Buczkowska H., Sałata A. Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and plant irrigation with yield – forming factors in organic sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) cultivation. *Acta Scientiarum Polonorum, Hortorum Cultus*. 2020; 9 (6): 125–138. DOI: 10.24326/asphc.2020.6.11.
10. Abdurashytov S. F., Nemtinov V. I., Puzanova E. V., Gritsevich K. S., Belova I. V., Grunina E. N., Abdurashytova E. R., Klimchuk A. V. Assessment of the impact of arbuscular-mycorrhizal fungi on economically valuable indicators of onions. *Ecosystems*. 2020; 21 (51): 101–108. DOI: 10.37279/2414-4738-2020-21-101-108. (In Russ.)
11. Tran C. T. K., Watts-Williams S. J., Smernik R. J., Cavagnaro T. R. Arbuscular mycorrhizas increased tomato biomass and nutrition but did not affect local soil P availability or 16S bacterial community in the field. *Science of the Total Environment*. 2022; 819: 152620. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152620.
12. Xiuxiu S., Yansu L., Xianchang Y., Chaoping H. Effects of arbuscular Mycorrhizal fungi (AMF) inoculums on cucumber seedlings. *Advances in Plants & Agriculture Research*. 2019; 9 (1): 127–130.
13. Trinchera A., Testani E., Roccuzzo G., Campanelli G., Ciaccia C. Agroecological service crops drive plant mycorrhization in organic horticultural systems. *Microorganisms*. 2021; 9 (2): 410. DOI: 10.3390/microorganisms9020410.
14. Abdurashytov S. F., Gricevich K. S., Alekseeva A. I., Seitadzhieva S. B., Zubochenko A. A., Yurkov A. P. Agrochemical and physiological basis of the symbiotic effectiveness of arbuscular mycorrhizal fungi associations with *Coriandrum sativum* plants. *Zemledelie*. 2024; 1: 23–27. DOI: 10.24412/0044-3913-2024-1-23-27. (In Russ.)
15. Zhao Y., Cartabia A., Lalaymia I., Declerck S. Arbuscular mycorrhizal fungi and production of secondary metabolites in medicinal plants. *Mycorrhiza*. 2022; 32: 221–256. DOI: 10.1007/s00572-022-01079-0.
16. Ibrahim M. Role of arbuscular mycorrhizal fungi in biological nitrogen fixation and nitrogen transfer from legume to companion species/journal of stress. *Physiology and Biochemistry*. 2021; 17 (2): 121–134.
17. Meena M., Divyanshu K., Kumar S., Swapnil P., Zehra A., Shukla V., Yadav M., Upadhyay R. S. Regulation of L-proline biosynthesis, signal transduction, transport, accumulation and its vital role in plants during variable environmental conditions. *Helion*. 2019; 5 (12): e02952. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e02952.
18. Abdurashytova E. R., Abdurashytov S. F., Melnichuk T. N., Gritsevich K. S. Effect of microbial bioagents on chlorophyll content in crop leaves. *Current state, problems and prospects of the development of agrarian science: proceedings of vii international scientific conference*. Simferopol, 2022. Pp. 183–184. (In Russ.)
19. Khan S. W., Yaseen T., Naz F., Abidullah S., Kamil M. Influence of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) inoculation on growth and mycorrhizal dependency of (*Lens culinaris* L.) varieties. *International Journal of Bio-organic Chemistry*. 2019; 4 (1): 47–52.

Authors' information:

Suleyman F. Abdurashitov, candidate of biological sciences, head of laboratory, Research Institute of Agriculture of Crimea, Simferopol, Russia; ORCID 0000-0003-1631-4840, AuthorID 775657.

E-mail: asuleyman83@rambler.ru

Fadme S. Belyalova, student, V. I. Vernadsky Federal University of Crimea, Simferopol, Russia;

ORCID 0009-0009-5773-0315. E-mail: belyalova.f@mail.ru.

Anatoliy V. Ivashov, doctor of biological sciences, professor, V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia; ORCID 0002-8613-7475, AuthorID 772399. E-mail: aivashov@mail.ru

Elvina R. Abdurashitova, research associate, Research Institute of Agriculture of Crimea, Simferopol, Russia; ORCID 0000-0000-0003-4867-3186, AuthorID 887651. E-mail: elvi-jadore@mail.ru

Alena I. Alekseeva, junior researcher, Research Institute of Agriculture of Crimea, Simferopol, Russia; ORCID 0000-0001-8293-2386 AuthorID 1187617. E-mail: alena_crao2000@mail.ru