

Поиск эффективных штаммов грибов арбускулярной микоризы для нужд сельского хозяйства

А. П. Юрков¹, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории № 4 экологии симбиотических и ассоциативных ризобактерий

А. А. Крюков¹, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Лаборатории № 4 экологии симбиотических и ассоциативных ризобактерий

С. Н. Никитин^{2✉}, доктор сельскохозяйственных наук, главный научный сотрудник отдела земледелия и технологий возделывания сельскохозяйственных культур

¹ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной микробиологии»

196608, г. Санкт-Петербург, г. Пушкин, ш. Подбельского, 3

²Самарский федеральный исследовательский центр РАН, Ульяновский научно-исследовательский институт сельского хозяйства имени Н.С. Немцева

433315, Ульяновская область, пос. Тимирязевский, ул. Институтская, 19

✉ s_nikitin@mail.ru

Резюме. Широко известна роль грибов арбускулярной микоризы в повышении продуктивности растений и усилении их адаптации к абиотическим стрессам. В связи с этим поиск эффективных штаммов грибов арбускулярной микоризы для нужд сельского хозяйства является одной из наиболее актуальных задач. Способы отбора эффективных грибов ранее не были стандартизированы. В работе использован недавно запатентованный вегетационный способ оценки симбиотической эффективности грибов и их активности в корне с применением модельного растения-хозяина в условиях низкого для питания растений уровня доступного фосфора в почве. В лабораторных и вегетационных опытах проведена оценка симбиотической эффективности и активности одиннадцати грибов арбускулярной микоризы, которая показала значительный полиморфизм по этим параметрам. При анализе четырех параметров продуктивности (сырой массы и сухого вещества в надземных частях, числа листьев и высоты главного стебля) выявлены не только четыре эффективных изолята (включая тестовый штамм RCAM00320), но также четыре неэффективных изолята, которые наряду с первыми могут использоваться для исследования механизмов развития эффективного взаимодействия грибов и растений. Выявлен полиморфизм по симбиотической эффективности, рассчитанной по прибавке сырой массы и массы сухого вещества в надземных частях, которая варьировала у эффективных грибов в широком диапазоне 46-314% и 60-304% соответственно. По результатам микроскопии корней показатели микоризации изолятов имели достоверную ($p < 0.01$) положительную линейную связь с параметрами продуктивности, исключая показатель А (обилие арбускул в корне). Наиболее эффективные изоляты (115Te, 121Te, 184.1Te) и штамм RCAM00320 рекомендуются к наработке в лабораторных условиях и оценке эффективности в полевых условиях.

Ключевые слова: тестирование эффективности грибов, симбиотическая эффективность, микоризация, инокуляция грибом, люцерна хмелевидная.

Для цитирования: Юрков А. П., Крюков А. А., Никитин С.Н. Поиск эффективных штаммов грибов арбускулярной микоризы для нужд сельского хозяйства // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2026. № 1 (73). С. 71-76. doi:10.18286/1816-4501-2026-1-71-76

The search for effective strains of arbuscular mycorrhizal fungi for agricultural use

Yurkov A.P.¹, **Kryukov A.A.**¹, **Nikitin S.N.**^{2✉}

¹Federal State Budget Scientific Institution "All-Russia Research Institute for Agricultural Microbiology"

196608, St.Petersburg, Pushkin, Podbelsky chaussee, 3

²Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Ulyanovsk Research Institute of Agriculture named after N.S. Nemtsev

433315, Ulyanovsk region, Timiryazevsky settlement, Institutskaya St., 19

✉ s_nikitin@mail.ru

Abstract. The role of arbuscular mycorrhizal fungi in increasing plant productivity and enhancing their adaptation to abiotic stresses is widely known. In this regard, the search for effective strains of arbuscular mycorrhizal fungi for agricultural use is one of the most urgent tasks. The methods of selecting effective fungi have not been standardized before. In this study we use a recently patented vegetative method for evaluating the symbiotic efficiency of fungi and their activity in the roots using a model host plant in conditions of low level of available phosphorus in the soil for plant nutrition. In laboratory and vegetation experiments the symbiotic efficiency and activity of eleven arbuscular mycorrhizal fungi were evaluated, which showed significant polymorphism in these parameters. The analysis of four productivity parameters (fresh weight and dry matter in aboveground parts, the number of leaves and the height of the main stem) revealed not only four effective isolates (including the test strain RCAM00320), but also four ineffective isolates, which, along with ones, can be used to

study the mechanisms of development of effective interaction between fungi and plants. The polymorphism in symbiotic efficiency was revealed, calculated by the increase in fresh weight and dry mass of the aboveground parts, which varied in effective fungi in a wide range of 46-314% and 60-304%, respectively. According to the results of root microscopy, the indicators of mycorrhization of isolates had a significant ($p < 0.01$) positive linear correlation with productivity parameters, excluding A (abundance of arbuscules in the root). The most effective isolates (115Te, 121Te, 184.1Te) and strain RCAM00320 are recommended for use in the laboratory experiments and evaluation of effectiveness in the field. The research was carried out with support of the Russian Science Foundation (RSF) No. 22-16-00064-п.

Keywords: fungal efficiency testing, symbiotic efficiency, mycorrhization, fungal inoculation, black medic.

For citation: Yurkov A.P., Kryukov A.A., Nikitin S.N. The search for effective strains of arbuscular mycorrhizal fungi for agricultural use // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2026.1 (73): 71-76 doi:10.18286/1816-4501-2026-1-71-76

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда № 22-16-00064-П.

Введение

Развитие сельского хозяйства требует новых подходов для повышения урожайности сельскохозяйственных культур и их адаптации к стресс-факторам среды. Одним из подходов является применение биопрепаратов на основе грибов арбускулярной микоризы (АМ). Грибы АМ относятся к классу Glomeromycetes, обладают широким спектром действия, усиливая питание растений, особенно фосфорное и стимулируя процессы фотосинтеза [1-3]. Они характеризуются отсутствием специфичности по отношению к растению-хозяину и формируют симбиоз с большинством наземных растений, исключая лишь некоторые семейства – гречишные, крестоцветные, маревые, осоковые, гвоздичные, ситниковые, в семействе бобовых – люпин. Показана значительная роль грибов АМ в защите растений от абиотических стрессов: засухи, засоления, токсичности тяжелых металлов и др. [2-3], но усиление иммунитета растений при микоризации во многом зависит от видоспецифических взаимодействий партнеров симбиоза [4]. Имеется значительный опыт применения микоризных биопрепаратов в сельском хозяйстве за рубежом [5, 6], но внедрение в России находится на начальном этапе развития в связи с отсутствием крупных коллекций штаммов, а также биопрепаратов с высокой эффективностью. Тем не менее, недавно опубликованные данные показали значительное повышение рентабельности возделывания сорго зернового при использовании микоризного инокулянта на основе штамма RCAM00320 *Rhizophagus irregularis* – на 15% при прибавке урожайности зерна на 10 % [7].

Применение микробных препаратов ограничивает высокая изменчивость симбиоза в зависимости от условий. Так, в частности полезный микроорганизм редко, но способен перейти от мутуализма к паразитизму [5]. Имеются и обратные эффекты снижения показателей микоризации в условиях появления растительных видов-интродуцентов [8-9]. Таким образом, для промышленного применения микоризных инокулянтов требуется найти компромисс между максимальной эффективностью и гарантированной безопасностью взаимодействия. В этой связи совершенствование техники поиска эффективных штаммов грибов арбускулярной микоризы является весьма актуальной проблемой современного сельского хозяйства, в основе которого лежат принципы

почвозащитного и ресурсосберегающего земледелия. Коллективом разработан и запатентован способ экспресс-оценки эффективности и активности штаммов [10]. Для формирования первой в России коллекции грибов АМ под руководством Юркова А.П. проведен ряд экспедиций в горы Кавказа и Алтая, а также на Европейской территории России в рамках ряда проектов в 2015-2018 гг. (РФФИ-офи_м №15-29-02753), в 2019-2021 гг. (РФФИ-мк №19-29-05275) и в 2022-2026 гг. (РНФ №22-16-00064/№22-16-00064-П). Выявлен первый в России центр биоразнообразия грибов АМ в долине реки Теберда на Северном Кавказе (43°25'12.0" N 41°43'45.0" E), насчитывающий не менее 50 видов [11]. Представляется целесообразным анализ ряда выделенных изолятов грибов АМ из данного региона. Целью исследования является оценка симбиотической эффективности и показателей микоризации изолятов грибов АМ, выделенных на Северном Кавказе, и рекомендация эффективных грибов для нужд сельского хозяйства.

Материалы и методы

Растительный и грибной материал. В качестве модельного объекта использовали линию MIS-1 *Medicago lupulina* L. [12]. Люцерна хмелевидная используется при рекультивации нарушенных земель в качестве кормовой культуры и сидерата [13]. В качестве микросимбионтов взяты 10 изолятов грибов АМ из коллекции ФГБНУ ВНИИСХМ (табл. 1), выделенных с Северного Кавказа, формирующие внутрикорневые структуры (арбускулы, везикулы и мицелий), а также тестовый эффективный штамм гриба АМ RCAM00320 *Rhizophagus irregularis*, который показал высокую симбиотическую эффективность на более чем 30 видах культурных растений. Грибы поддерживались на растении-хозяине (*Plectranthus australis* R.Br.). Чтобы инокулировать растения люцерны, в эксперименте использовали фрагменты корней, содержащие в среднем 100 везикул на один проросток люцерны.

Таблица 1. Изоляты грибов АМ, место их изоляции, высота

№ изолята / штамма	Географические координаты	Высота над уровнем моря, м
189.1Te	43°51'38.0"N 41°54'22.0"E	795
129.1Te	43°25'51.0"N 41°42'55.0"E	2186
174Te	43°39'37.0"N 41°53'12.0"E	1026
161.3Te	43°25'48.0"N 41°42'31.0"E	2401
172Te	43°39'35.0"N 41°53'13.0"E	1028

155Te	43°18'05.0"N 41°33'49.0"E	1957
115Te	43°17'42.0"N 41°39'12.0"E	2540
121Te	43°25'50.0"N 41°42'20.0"E	2437
RCAM00320	59°27'18.0"N 30°05'24.0"E	77
159Te	43°39'35.0"N 41°53'13.0"E	1028
184.1Te	43°51'38.0"N 41°54'22.0"E	795

Схема эксперимента. Опыт проведен на базе ФГБНУ ВНИИСХМ (г. Санкт-Петербург) в лабораторных и вегетационных условиях [12]. Растения выращивали в контролируемых стерильных условиях при фотопериоде 18/6 ч, температуре воздуха 24...26 °С, относительной влажности воздуха ~60 %, фотосинтетически активной радиации 150 мкмоль/м²/с и поливе через день для поддержания 0,6 полной влагоемкости почвы. Для выращивания использовали автоклавированный субстрат – песок и почва 1:2 по весу (дерново-подзолистая суглинистая с низким содержанием доступного фосфора – 1,7 мг на 100 г; калий – 6,5 мг на 100 г; Сорг – 3,6 %; рН_{KCl} – 6,4, рН_{H2O} – 7,3). Семена люцерны скарифицировали (5 мин в концентрированной серной кислоте), стратифицировали (в течение 24 ч) и после проращивали (в течение 48 ч). В каждый сосуд, содержащий по 210 г субстрата, высевали по 2 проростка, которые инокулировали одним из штаммов грибов АМ или оставляли без инокуляции (контроль). Учёт продуктивности (сырой массы и массы сухого вещества в надземных частях, числа листьев, высоты главного стебля) и микроскопический анализ проводили на 36-й день в фазу бокового ветвления. Симбиотическую эффективность рассчитывали по формуле Ю. Одума как прибавку показателя продуктивности при микоризации против контроля без инокуляции грибом АМ.

Оценка параметров микоризации. Для оценки развития симбиоза использовали препараты корней, окрашенные трипановым синим [14]. С помощью световой микроскопии на микроскопе CX43 (Olympus, Япония) и специализированного ПО –

Программы вычисления индексов микоризации корней растений [15] определяли стандартные индексы микоризации: встречаемость АМ-инфекции (F), интенсивность микоризации в корне (M), обилие арбускул (A) и везикул (B) в корне [16].

Статистический анализ. Рассчитывали средние значения и ошибку средней (биологическая повторность – 10). Статистическую обработку данных проводили с использованием дисперсионного анализа (ANOVA) и апостериорного теста Тьюки в программе STATISTICA v.12.0 (StatSoft, США). Различия средних показателей продуктивности считали статистически значимыми при $p < 0.01$.

Результаты

В результате анализа показателей продуктивности, сырой массы и массы сухого вещества в надземных частях (НЧ) одного растения, числа листьев, высоты главного стебля был выявлен полиморфизм грибов АМ, изолированных из разных экосистем Северного Кавказа, по симбиотической эффективности взаимодействия с растением-хозяином – линией MIS-1 люцерны хмелевидной. Так, были выявлены четыре изолята, показавшие симбиотическую эффективность по всем 4 параметрам продуктивности (115Te, 121Te, 184.1Te, RCAM00320; табл. 2) и три изолята, характеризующиеся отсутствием АМ-эффективности по всем 4 параметрам (189.1Te, 129.1Te, 174Te, 161.3Te). Эти данные свидетельствуют о наличии контрастных по исследуемому признаку генотипам грибов АМ. Наибольшей эффективностью по массе надземных частей (как сырой, так и сухой) обладал изолят 184.1Te, причем он имел характеристики даже выше тестового штамма RCAM00320 R. irregularis. Между тем, наименьшими показателями продуктивности характеризовались растения, инокулируемые изолятом 189.1Te. Эти контрастные изоляты были собраны из одного местообитания (табл. 1).

Таблица 2. Показатели продуктивности люцерны хмелевидной при инокуляции изолятами грибов АМ и симбиотическая эффективность, рассчитанная по ним

№ изолята / штамма	Сырая масса НЧ 1 растения, мг	Масса сухого вещества НЧ 1 растения, мг	Число листьев	Высота, см	Симбиотическая эффективность (%), рассчитанная по:			
					сырой массе НЧ	массе сухого вещества НЧ	числу листьев	высоте стебля
безМ	171,6	25,6	3,8	3,0	0	0	0	0
189.1Te	162,6	25,2	3,9	2,6	-5,2	-13,4	0,5	-13,3
129.1Te	172,8	24,4	4,0	2,4	0,7	-4,6	4,3	-20,0
174Te	184,8	27,5	4,0	1,8	7,7	22,9	4,3	-40,0
161.3Te	227,4	35,3	5,1	2,0	32,5	37,9	33	-32,0
172Te	250,2	40,9	5,6	2,1	45,8*	59,7*	46,7*	-30,0
155Te	292,5	46,3	6,3	2,8	70,5*	80,8*	63,0*	-6,0
115Te	523,8	92,3	7,8	5,4	205,2*	260,5*	102,2*	80,0*
121Te	562,2	101,0	9,3	5,4	227,6*	271,2*	141,3*	78,3*
RCAM00320	573,6	102,0	8,9	6,1	234,3*	298,5*	131,5*	101,7*
159Te	581,4	100,3	8,8	4,1	238,8*	323,0*	128,3*	35,0
184.1Te	709,8	123,3	9,8	6,2	313,6*	303,5*	154,3*	105,0*

Примечание: “НЧ” – надземные части, * – значение показателя продуктивности статистически достоверно ($p < 0,01$) отличается от значения в варианте “безМ” (контроль без инокуляции грибом АМ), достоверная эффективность гриба АМ. Образцы с инокуляцией изолятами грибов ранжированы по возрастанию сырой массы НЧ.

4.1.3. Агрехимия, агропочвоведение, защита и карантин растений (сельскохозяйственные науки)

Анализ показателей активности микоризации, встречаемости АМ-инфекции (F), интенсивности микоризации в корне (M), обилия арбускул (A) и везикул (B) в корне показал, что изоляты характеризовались значительным размахом индексов микоризации. Тестовый штамм RCAM00320 еще не полностью развился (мицелий занимает лишь около половины

корней, F) в отличие от изолята 121Te, инокуляция которым уже в фазу бокового ветвления люцерны привела к активному развитию мицелия в корнях растения ($F > 90\%$). Интенсивность микоризации, M , обилие арбускул, A и обилие везикул, B , при инокуляции изолятом 121Te также были наивысшими.

Таблица 3. Показатели микоризации люцерны хмелевидной при инокуляции изолятами грибов АМ

№ изолята / штамма	$F, \%$			$M, \%$			$A, \%$			$B, \%$		
		\pm			\pm			\pm			\pm	
189.1Te	50,0	\pm	5,2	28,5	\pm	3,5	12,3*	\pm	1,3	0,2*	\pm	0,1
129.1Te	27,8*	\pm	2,0	14,3*	\pm	1,7	11,6*	\pm	1,0	0,1*	\pm	0,1
174Te	14,5*	\pm	0,8	5,6*	\pm	0,8	12,7*	\pm	1,9	1,4*	\pm	0,9
161.3Te	27,8*	\pm	2,3	11,2*	\pm	1,2	12,5*	\pm	1,7	2,8*	\pm	0,6
172Te	28,2*	\pm	5,2	9,9*	\pm	1,8	3,9*	\pm	1,5	0,1*	\pm	0,1
155Te	52,2	\pm	6,8	25,3	\pm	2,8	19,1	\pm	5,2	5,1	\pm	1,3
115Te	37,5*	\pm	2,5	34,1	\pm	6,4	7,6*	\pm	1,4	2,3*	\pm	0,6
121Te	93,8	\pm	8,2	40,9	\pm	5,4	30,2	\pm	3,2	15,3	\pm	5,3
RCAM00320	53,8	\pm	5,8	29,9	\pm	4,1	20,5	\pm	3,0	6,5	\pm	1,9
159Te	45,0	\pm	3,0	28,2	\pm	5,2	18,2	\pm	2,6	7,7	\pm	2,5
184.1Te	78,8	\pm	10,5	43,6	\pm	7,4	23,0	\pm	5,3	10,8	\pm	2,9

Примечание: "*" – значение показателя микоризации достоверно ($p < 0,01$) ниже, чем у тестового штамма RCAM00320.

Не все изоляты из группы неэффективных (189.1Te, 129.1Te, 174Te, 161.3Te) имели показатели активности ниже, чем при инокуляции тестовым штаммом RCAM00320. Несмотря на это, была выявлена линейная корреляционная взаимосвязь между показателями продуктивности и микоризации.

Линейный коэффициент корреляции Пирсона (r) между массой сухого вещества и показателями M и B был достоверным ($p < 0,01$), а достоверная корреляция между всеми показателями продуктивности с обилием арбускул, A , отсутствовала (табл. 4).

Таблица 4. Корреляция между параметрами продуктивности и активностью гриба АМ в корне растения-хозяина

Параметры продуктивности и микоризации	Сырая масса НЧ 1 растения	Масса сухого вещества НЧ 1 растения	Число листьев	Высота
F	0,72*	0,66	0,77*	0,68
M	0,87*	0,83*	0,87*	0,84*
A	0,65	0,62	0,70	0,56
B	0,81*	0,78*	0,85*	0,71*

Примечание: "*" – достоверно ($p < 0,01$) значимая величина r .

Обсуждение

В результате исследования выявлены как эффективные генотипы грибов АМ, обладающие достоверной симбиотической эффективностью (изоляты 115Te, 121Te, 184.1Te и штамм RCAM00320), так и неэффективные (189.1Te, 129.1Te, 174Te, 161.3Te; табл. 2). Показано наличие полиморфизма изолятов грибов АМ по показателям симбиотической эффективности, рассчитанным по таким параметрам продуктивности растения-хозяина, как сырая масса, сухое вещество в надземных частях, число листьев и высота главного стебля. Выявлено, что эффективность АМ не всегда связана с высокой активностью гриба в корне растения, о чем свидетельствует наличие высоких показателей F и M у неэффективного изолята 189.1Te (табл. 3), выделенного из той же экосистемы, что и эффективный изолят 184.1Te (табл. 1). На взаимосвязи показателей продуктивности (и эффективности АМ) с показателями активности грибов АМ в корне могут оказывать влияние ряд неучтенных факторов, хотя корреляция между этими параметрами может

быть достаточно значимой (до $r < 0,87$; табл. 4). Аналогично положительная взаимосвязь была показана ранее, например, в растительно-микробной системе "*Berkheya coddii* + *Rhizophagus intraradices*" между показателем сухого веса надземных частей с F , M и A ($r = 0,68-0,76$, $0,71-0,76$ и $0,71-0,77$, соответственно, в зависимости от способа оценки микоризации) [17]. На основании вышесказанного следует расширить исследования, связанные с охватом большего числа факторов, от которых зависит взаимодействие гриба АМ с растением-хозяином. Это позволит более детально выяснить условия формирования наиболее эффективного взаимодействия, что особенно важно в условиях засухи [18]. С другой стороны, эффективность зависит от способа инокуляции растения. Существуют три основные формы препаратов на основе грибов АМ – полусухие твердые, жидкие инокулянты и инокулянты для покрытия семян [6]. Предложенные нами штаммы могут использоваться в составе твердых инокулянтов, включающих ризосферную почву с мицелием, спорами и спорокарпами грибов

АМ, а также резаные микоризованные корни, заполненные в значительной степени грибными структурами – арбускулами, мицелием и везикулами. Среди последних к симбиотическим структурам относятся арбускулы и внутрикорневой мицелий, через которые идет наиболее активный транспорт питательных веществ между партнерами симбиоза. На российском рынке представлены единичные препараты АМ, еще не прошедшие полный цикл государственной регистрации. Между тем, известно значительное число зарубежных АМ-инокулянтов, например, Ctospor (Biofabrica, Мексика), Rhizophor, Micorrifafer, Rhibio m+ (INIFAP, Мексика), Micosat F (Centro Colture Sperimentali, Италия), Муке Pro SG2 (Premier Tech Biotechnologies, Канада), Муке Pro (Кот-д’Ивуар) и др. [5]. Разработка российского биопрепарата на основе создаваемой коллекции грибов АМ во ФГБНУ ВНИИСХМ является перспективным прикладным направлением исследований.

Заключение

В результате исследования показан существенный полиморфизм грибов АМ по симбиотической эффективности на линии MIS-1 *Medicago lupulina*. Выявлены 3 новых эффективных изолята (115Te, 121Te, 184.1Te) и 4 неэффективных (189.1Te, 129.1Te, 174Te, 161.3Te). Взаимосвязь показателей активности грибов АМ с их симбиотической эффективностью требует дальнейших исследований.

Литература

1. Co-application of arbuscular mycorrhizae via seed coating and phosphorus fertilizer for enhancing growth, yield, and nutrient uptake in ultisols for maize / M. Marwanto, H. Bustamam, M. Handajaningih, et al. // TERRA: Journal of Land Restoration. 2024. No. 7. P. 8-13. doi:10.31186/terra.7.1.8-13
2. Elucidating the mechanisms underlying enhanced drought tolerance in plants mediated by arbuscular mycorrhizal fungi / S. Cheng, Y.-N. Zou, K. Kuča, et al. // Frontiers in Microbiology. 2021. No. 12. P. 809473. doi:10.3389/fmicb.2021.809473
3. Roles of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth and disease management for sustainable agriculture / M. Umer, N. Anwar, M. Mubeen, et al. // Front. Microbiol. 2025. No. 16. P. 1616273. doi:10.3389/fmicb.2025.1616273
4. Kaur S., Suseela V. Unraveling arbuscular mycorrhiza-induced changes in plant primary and secondary metabolome // Metabolites. 2020. Vol. 10 No. 8. P. 335. doi:10.3390/metabo10080335
5. Ghorui M., Chowdhury S., Burla S. Recent advances in the commercial formulation of arbuscular mycorrhizal inoculants // Frontiers in Industrial Microbiology. 2025. No. 3. P. 1553472. doi:10.3389/finmi.2025.1553472
6. Arbuscular Mycorrhizal Fungi as Core Engineers in Synthetic Microbial Communities: Boosting Plant Growth and Soil Health for Sustainable Agriculture / Y. Zeng, Y. Wang, X. Wang, et al. // Journal of Fungi. 2025. No. 11. P. 769. doi:10.3390/jof11110769
7. Сравнительная оценка применения современных биопрепаратов ФГБНУ ВНИИСХМ на продуктивность кукурузы и сорго зернового в условиях южной природно-сельскохозяйственной зоны Ростовской области / С. А. Васильченко, Г. В. Метлина, А. П. Юрков и др. // Зерновое хозяйство России. 2025. № 17(4). С. 77-83. DOI: 10.31367/2079-8725-2025-99-4-77-83
8. Веселкин Д.В., Бетехтина А.А., Гусев А.П. У микоризных чужеродных растений белорусского поля снижена интенсивность формирования арбускул. // Экология. 2022. Т. 60 № 3. С. 161-170. doi:10.31857/S036705972203012X
9. Веселкин Д. В., Дубровин Д. И., Рафикова О. С. В сообществах с доминированием инвазионного дерева *Acer negundo* избирательно снижается встречаемость арбускулярно-микоризных трав. // Доклады Российской Академии Наук. Науки о жизни. 2024. Т. 518. № 1. С. 31–35 doi:10.31857/S2686738924050063
10. Способ оценки качества биопрепаратов на основе грибов арбускулярной микоризы; пат. 2776652 Рос. Федерация: МПК C12Q 1/00 (2006.01) / А. П. Юрков; заявитель и патентообладатель ФГБНУ ВНИИСХМ. - № 2021136951; заявл. 14.12.21; опубл. 22.07.22, Бюл. № 21, 2 с.: ил
11. The biodiversity of arbuscular mycorrhizal fungi in some ecosystems of the North Caucasus temperate hotspot / A. P. Yurkov, A. A. Kryukov, A. O. Gorbunova, et al. // Journal of Fungi. 2024. Vol. 10 No. 1. P. 11. doi:10.3390/jof10010011
12. The effect of arbuscular mycorrhizal fungus and phosphorus treatment on root metabolome of *Medicago lupulina* during key stages of development / A. P. Yurkov, R. K. Puzanskiy, A. A. Kryukov, et al. // Plants. 2025. No. 14. P. 2685. doi:10.3390/plants14172685
13. Особенности биохимического состава жизненных форм люцерны хмелевидной (*Medicago lupulina* L.) / Н. Ю. Малышева, Т. В. Шеленга, А. Е. Соловьева и др. // Экологическая генетика. 2022. Т. 20 № 3. С. 231-242. doi:10.17816/ecogen109231
14. Phillips J.M., Hayman D.S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection // Transactions of the British Mycological Society. 1970. No. 55. P. 158-161. doi:10.1016/s0007-1536(70)80110-3
15. Свидетельство №2016612112 от 12.02.2016 о регистрации программы ЭВМ “Программа вычисления индексов микоризации корней растений”. / Н. И. Воробьев, А. П. Юрков, Н. А. Проворов. – Москва: ФИПС. 2016.
16. Mesure du taux de mycorrhization VA d’un système racinaire. Recherche de méthodes ayant une signification fonctionnelle. / A. Trouvelot, J. L. Kough, V. Gianinazzi-Pearson // In: les Mycorrhizes: physiologie et génétique. Eds. V. Gianinazzi-Pearson, S. Gianinazzi. – Paris: INRA-Press. 1986. P. 217-221.
17. The effect of mycorrhiza on the growth and elemental composition of Ni-hyperaccumulating plant *Berkheya coddii* Roessler / E. Orłowska, W. Przybyłowicz, D.

Orlowski, et al. // *Environmental Pollution*. 2011. Vol. 159 No. 12. P. 3730-3738. doi:10.1016/j.envpol.2011.07.008

18. Аквапорины и их роль в растительно-микробных системах / Т. Р. Кудряшова, А. А. Крюков, А. И. Горенкова и др. // *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2025. Т. 29. № 2. С. 238-247. doi:10.18699/vjgb-25-27

References

1. Co-application of arbuscular mycorrhizae via seed coating and phosphorus fertilizer for enhancing growth, yield, and nutrient uptake in ultisols for maize / M. Marwanto, H. Bustamam, M. Handajaningih, et al. // *TERRA: Journal of Land Restoration*. 2024. No. 7. P. 8-13. doi:10.31186/terra.7.1.8-13

2. Elucidating the mechanisms underlying enhanced drought tolerance in plants mediated by arbuscular mycorrhizal fungi / S. Cheng, Y.-N. Zou, K. Kuča, et al. // *Frontiers in Microbiology*. 2021. No. 12. P. 809473. doi:10.3389/fmicb.2021.809473

3. Roles of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth and disease management for sustainable agriculture / M. Umer, N. Anwar, M. Mubeen, et al. // *Front. Microbiol.* 2025. No. 16. P. 1616273. doi:10.3389/fmicb.2025.1616273

4. Kaur S., Suseela V. Unraveling arbuscular mycorrhiza-induced changes in plant primary and secondary metabolome // *Metabolites*. 2020. Vol. 10 No. 8. P. 335. doi:10.3390/metabo10080335

5. Ghorui M., Chowdhury S., Burla S. Recent advances in the commercial formulation of arbuscular mycorrhizal inoculants // *Frontiers in Industrial Microbiology*. 2025. No. 3. P. 1553472. doi:10.3389/finmi.2025.1553472

6. Arbuscular Mycorrhizal Fungi as Core Engineers in Synthetic Microbial Communities: Boosting Plant Growth and Soil Health for Sustainable Agriculture / Y. Zeng, Y. Wang, X. Wang, et al. // *Journal of Fungi*. 2025. No. 11. P. 769. doi:10.3390/jof11110769

7. Comparative assessment of the use of modern biopreparations of the All-Russian Research Institute of Agricultural Microbiology on the productivity of corn and grain sorghum in the conditions of the southern natural and agricultural zone of the Rostov Region / S. A. Vasilchenko, G. V. Metlina, A. P. Yurkov, et al. // *Grain Economy of Russia*. 2025. No. 17(4). P. 77-83. DOI: 10.31367/2079-8725-2025-99-4-77-83

8. Veselkin D. V., Betekhtina A. A., Gusev A. P. The intensity of arbuscule formation is reduced in mycorrhizal alien plants of the Belarusian Polesie. // *Ecology*. 2022. Vol. 60, No. 3, pp. 161–170. doi:10.31857/S036705972203012X

9. Veselkin D.V., Dubrovin D.I., Rafikova O.S. In communities dominated by the invasive tree *Acer negundo*,

the occurrence of arbuscular mycorrhizal grasses selectively decreases. // *Reports of the Russian Academy of Sciences. Life Sciences*. 2024. Vol. 518, No. 1, pp. 31–35. doi:10.31857/S2686738924050063

10. Method for assessing the quality of biopreparations based on arbuscular mycorrhiza fungi; patent. 2776652 Russian Federation: IPC C12Q 1/00 (2006.01) / A. P. Yurkov; applicant and patent holder FGBNU VNIISKHM. - No. 2021136951; declared 14.12.21; published 22.07.22, Bulletin No. 21, 2 p.: ill

11. The biodiversity of arbuscular mycorrhizal fungi in some ecosystems of the North Caucasus temperate hotspot / A. P. Yurkov, A. A. Kryukov, A. O. Gorbunova, et al. // *Journal of Fungi*. 2024. Vol. 10 No. 1. P. 11. doi:10.3390/jof10010011

12. The effect of arbuscular mycorrhizal fungus and phosphorus treatment on the root metabolome of *Medicago lupulina* during key stages of development / A. P. Yurkov, R. K. Puzanskiy, A. A. Kryukov, et al. // *Plants*. 2025. No. 14. P. 2685. doi:10.3390/plants14172685

13. Features of the biochemical composition of life forms of alfalfa (*Medicago lupulina* L.) / N. Yu. Malysheva, T. V. Shelenga, A. E. Solovieva, et al. // *Ecological Genetics*. 2022. Vol. 20 No. 3. P. 231-242. doi:10.17816/ecogen109231

14. Phillips J.M., Hayman D.S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection // *Transactions of the British Mycological Society*. 1970. No. 55. P. 158-161. doi:10.1016/s0007-1536(70)80110-3

15. Certificate No. 2016612112 dated 12.02.2016 on registration of the computer program "Program for calculating mycorrhization indices of plant roots" / N. I. Vorobyov, A. P. Yurkov, N. A. Provorov. - Moscow: FIPS. 2016.

16. Mesure du taux de mycorrhization VA d'un système racinaire. Recherche de méthodes ayant une signification fonctionnelle. / A. Trouvelot, J. L. Kough, V. Gianinazzi-Pearson // In: *les Mycorrhizes: physiologie et génétique*. Eds. V. Gianinazzi-Pearson, S. Gianinazzi. - Paris: INRA-Press. 1986. P. 217-221.

17. The effect of mycorrhiza on the growth and elemental composition of Ni-hyperaccumulating plant *Berkeheyia coddii* Roessler / E. Orłowska, W. Przybyłowicz, D. Orłowski, et al. // *Environmental Pollution*. 2011. Vol. 159 No. 12. P. 3730-3738. doi:10.1016/j.envpol.2011.07.008

18. Aquaporins and their role in plant-microbial systems / T. R. Kudryashova, A. A. Kryukov, A. I. Gorenkova, et al. // *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2025. Vol. 29. No. 2. P. 238-247. doi:10.18699/vjgb-25-27