

ЛЕСОЗАЩИТА И САДОВО-ПАРКОВОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО FOREST PROTECTION AND LANDSCAPING

УДК: 579.64:579.69:576.533:604.2:630*181.351

**М. Я. Острикова, О. А. Разумова, А. В. Константинов,
С. В. Пантелеев, И. А. Хархасова**
Институт леса Национальной академии наук Беларуси

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ НАРАБОТКИ МИЦЕЛИЯ МИКОРИЗООБРАЗУЮЩИХ ГРИБОВ ДЛЯ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ИНОКУЛЯЦИИ В ПОЧВЕННЫЕ СУБСТРАТЫ

Изучены некоторые морфолого-культуральные особенности роста и определен диапазон их изменчивости для некоторых представителей микоризообразующих грибов при выращивании на питательных средах различного состава, обеспечивающих высокую ростовую активность и жизнеспособность мицелия в ходе периодического культивирования и при инокуляции на органические носители. У изученных штаммов выявлена различная способность к росту на модифицированных минеральных питательных средах. На основе макро- и микросолей по прописи MS, дополненной 10% пивного суслу, разработана среда смешанного состава, являющаяся универсальной для культивирования изученных видов грибов с целью наработки биологического материала. Установлена возможность твердофазного выращивания мицелиальных культур на органических субстратах. Показано, что стерильное культивирование на листовом опаде и его смеси с верховым торфом позволяет получать мицелий целевых штаммов. Данный субстрат осваивался апробированными микоризообразующими грибами в течение 15–30 суток, являясь наиболее подходящим для получения мицелия. Разработаны приемы накопления биомассы почвенных грибов, перспективных для последующего использования в приготовлении почвенных субстратов в лесных теплично-питомнических комплексах для выращивания сеянцев лесных древесных пород, нуждающихся в микоризации.

Ключевые слова: микоризообразующие грибы, чистые культуры, культивирование *in vitro*, наработка мицелия, субстраты.

Для цитирования: Острикова М. Я., Разумова О. А., Константинов А. В., Пантелеев С. В., Хархасова И. А. Разработка методики наработки мицелия микоризообразующих грибов для последующей инокуляции в почвенные субстраты // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2024. № 2 (282). С. 88–94.

DOI: 10.52065/2519-402X-2024-282-11.

**M. Ya. Ostriкова, O. A. Razumova, A. V. Konstantinov,
S. V. Panteleev, I. A. Kharkhasova**
Forest Institute of the National Academy of Sciences of Belarus

THE DEVELOPMENT OF A METHOD FOR MYCORRHIZAL FUNGI MYCELIA PRODUCING FOR INOCULATION INTO SOIL SUBSTRATES

Morphological and cultural characteristics of mycorrhizal fungi representatives during growing on nutrient media of various compositions and organic carriers were studied. Nutrient media ensuring high growth activity and viability of the mycelium during periodic *in vitro* cultivation were selected. Based on macro- and microsalts according to the MS recipe, supplemented with 10% wort, a mixed composition medium has been developed, which is universal for cultivating the studied species of fungi in order to produce their biological material. The range of variability in morphological and cultural characteristics of various species of mycorrhizal fungi pure cultures was determined depending on the composition of the medium used for cultivation and the biological characteristics of the strains. The possibility of solid-phase cultivation of mycelial cultures on organic substrates has been studied. It has been shown that

cultivation on sterile leaf litter or its mixture with high-moor peat allows the production of mycelium of target strains. Leaf litter has been identified as the most suitable substrate for mycelium of almost all tested mycorrhizal fungi obtaining. The methods for biomass of promising mycorrhizal fungi obtaining have been developed. This biological material will be used in nurseries as an addition to soil substrates in order to activate mycorrhization process in forest tree seedlings that require it.

Keywords: mycorrhizal fungi, pure cultures, *in vitro* cultivation, mycelium production, substrates.

For citation: Ostriкова М. Я., Разумова О. А., Константинов А. В., Пантелеев С. В., Хархасова И. А. The development of a method for mycorrhizal fungi mycelia producing for inoculation into soil substrates. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2024, no. 2 (282), pp. 88–94 (In Russian).

DOI: 10.52065/2519-402X-2024-282-11.

Введение. Ассоциации корней растений с комплексом почвенных грибов широко распространены в природе. Они способствуют улучшению корневого питания и водного обмена растений, принимают участие в обеспечении устойчивости к засухе, засолению, тяжелым металлам, подавлению патогенной микрофлоры. Основная функция грибов в микробном сообществе почв сводится к интенсивному разложению органических остатков и обеспечению круговорота биогенных элементов [1–7]. Особое значение формирование симбиотических эктомикориз (оплетения корней гифами гриба) имеет для древесных пород, являясь условием их нормального роста и развития. Древесные породы семейств *Pinaceae* и *Fagaceae*, включая основные виды сосен, елей и дубов, должны быть микоризированы для нормальной приживаемости и роста в естественных условиях [8–10].

С учетом интенсивного развития тенденций по экологизации лесного и сельского хозяйства, природоохранной деятельности наиболее перспективным выступает применение микробных биотехнологий для создания интегрированных растительно-микробных систем. Наиболее перспективным является способ выращивания лесных саженцев с применением микробиологических препаратов, улучшающих микробиоценоз почв, включая бедные и антропогеннонарушенные земли [11–13]. Наибольший эффект от искусственной микоризации наблюдается при создании лесных культур на землях бывшего сельхозпользования и плантационном лесовыращивании [14, 15].

В мировой практике разработаны технологии для производства, в том числе в промышленных масштабах, микоризирующих инокулятов, действие которых не является универсальным [16–18]. При этом большинство разработок направлены на применение эндомикориз в сельском хозяйстве, при выращивании зерновых и бобовых культур [19]. На рынке имеется ряд биологических препаратов для садовых и лесных древесных растений, содержащих симбиотические грибы. Однако при использовании указанных средств следует учитывать видовую

принадлежность действующего начала, что указывает на необходимость создания отечественных разработок на основе почвенных грибов, типичных для условий нашей страны.

Целью данного исследования явилась разработка методики наработки мицелия микоризообразующих грибов для последующей инокуляции в почвенные субстраты.

Основная часть. Объектами исследования являлись чистые культуры микоризообразующих грибов: дождевик грушевидный *Lycoperdon pyriforme*, гриб-зонтик пестрый *Macrolepiota procera*, сморчок *Morchella importuna*, навозник домашний *Coprinellus domesticus*.

Чистые культуры грибов были взяты из Коллекции штаммов грибов ГНУ «Институт леса НАН Беларуси» или выделены из отмытых в проточной воде и стерилизованных 96%-ным этиловым спиртом и 0,1%-ной сулемой фрагментов корневых окончаний на плотных питательных средах различного состава.

Приготовление питательных сред проводилось согласно общепринятым подходам. Водородный показатель (рН) сред доводили до 5,7.

Сусло-агар (СА) – естественный субстрат, включающий в себя неохмеленное пивное сусло в концентрации 4% (4% СА) и 10% (10% СА) и агар-агар – 20,0 г для приготовления 1 л питательной среды. Стерилизация среды – автоклавирование (0,5 атм, 30 мин).

Среда Murashige-Skoog (MS). Концентрация макролей (мг/л): KNO_3 – 1900, NH_4NO_3 – 1650, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – 440, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 370, KH_2PO_4 – 170, EDTA – 37,3, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 27,8. Содержание микролей и витаминов в среде следующее (мг/л): H_3BO_3 – 6,2; $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ – 22,3; $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 8,6; KI – 0,75; $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – 0,25; $\text{Cu}_2\text{SO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ – 0,25; $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – 0,02; миоинозитол – 100; тиамин – 1,0; никотиновая кислота – 0,5; пиридоксин – 0,5; глицин – 2,0. В качестве источника углерода использовалась сахароза или глюкоза в концентрации 20,0 или 30,0 г/л, в качестве уплотнителя – микробиологический агар в концентрации 7,0 г/л. Кроме того, в исследовании применяли среду MS с половинной концентрацией макролей

($\frac{1}{2}$ MS), среду $\frac{1}{2}$ MS с полуторной концентрацией микросолей железа и витаминов ($\frac{1}{2}$ MSm), а также среду $\frac{1}{2}$ MS, дополненную 10% пивного сусла ($\frac{1}{2}$ MS + 10% C).

Среда Сабуро (СС), (г/л): пептон ферментативный сухой – 7,0; гидролизат соевой муки ферментативный – 3,0; глюкоза кристаллическая гидратная – 40; экстракт автолизированных дрожжей осветленный – 4,0; агар микробиологический (для плотной среды) – 12. Стерилизация среды – автоклавирувание при 1 атм (121°C) в течение 20 мин.

Картофельно-глюкозный агар (КГА), (г/л): картофель – 200; глюкоза – 20; агар-агар – 20. Стерилизация автоклавируванием (1 атм, 30 мин).

Среда Чапека (СЧ), г/л: KCl – 0,5; MgSO₄ – 0,5; K₂HPO₄ – 1,0; FeSO₄ – 0,01; NaNO₃ – 2,0; сахароза – 30,0; агар-агар – 20,0. pH имеет слабощелочное значение. Стерилизация среды – автоклавирувание при 1 атм (15 мин).

Полученные чистые культуры грибов идентифицированы с помощью молекулярно-генетического метода. В качестве маркерных регионов использованы видоспецифические ITS1 и ITS2. Визуализация и интерпретация результатов осуществлялась с помощью специального программного обеспечения Sequencing Analysis 5.1.1.

Сравнительный анализ секвенированных последовательностей в базе данных NCBI BLAST показал принадлежность полученных штаммов к следующим видам: *Lycoperdon pyriforme* (депозит NCBI OR506239), *Macrolepiota procera* (депозит NCBI OR506238), *Morchella importuna* (депозит NCBI OQ694816), *Coprinellus domesticus* (депозит NCBI OQ694595).

Вегетативный рост штаммов изучали на питательной среде сусло-агар, оценивая морфолого-культуральные особенности микоризообразующих грибов. Инокулированные чашки Петри плотно оборачивали полиэтиленовой пленкой для предотвращения пересыхания и культивировали в течение 2–4 недель при температуре 25°C.

Lycoperdon pyriforme растет в виде беловато-кремового, нитчатого, воздушного мицелия. Форма колоний круглая, край цельный. Профиль колоний плоский с валообразным краем. Инверсум без признаков изменений окраски и структуры питательной среды. Плотность колонии 3 балла, высота колонии 2 мм, ростовой коэффициент на 7-е сутки 46,4. Время инкубации 27 суток.

Macrolepiota procera: мицелий паутинистой волокнистой структуры с радиальными тяжами серовато-бурого цвета. Форма колонии круглая, ровная с куполообразной центральной частью. Инверсум с явными признаками ферментации, проявляющимися в виде зоны желтого цвета в центральной части колонии и очагов медного цвета, неравномерно располагающихся в окру-

ности этого пятна. Плотность колонии 4 балла, высота колонии 3 мм, ростовой коэффициент на 7-е сутки 41,6.

Morchella importuna: мицелий желтовато-белый войлочный. Рост колоний интенсивный, диаметр колоний до 100 мм к 7-м суткам. Профиль колоний плоский с каплевидным центром. Реверзум колоний темноокрашенный. На чашках Петри: сусло-агаровая питательная среда (на 1 л пивного сусла 6–8 по Баллингу 20 г агара); pH 5,5–6,5; температура выращивания 25°C. Плотность колонии 4 балла, высота колонии 2 мм, ростовой коэффициент на 7-е сутки 48. Время инкубации 12 суток.

Coprinellus domesticus: мицелий ватообразный, воздушный, молочно-белого цвета. Колония войлочная; поверхность колонии ровная; форма колонии по характеру развития воздушного мицелия неравномерная со вздутием в центре; зона роста однородная; край колонии прижатый; внешняя линия колонии гладкая; реверзум неизменный; плотность колонии 3 балла, высота колонии 2 мм, ростовой коэффициент на 7-е сутки 52. Время инкубации 12 суток.

Также был изучен показатель диаметра мицелия при выращивании грибов на агаризованных средах, который является важной характеристикой при скрининге штаммов, определяющей как скорость накопления биомассы за счет быстрого поглощения нутриентов различной степени доступности, так и интенсивность освоения доступного субстрата, что играет особую роль при конкурентном взаимодействии.

В исследовании использованы искусственные минеральные питательные среды и среды на основе естественных компонентов. Чистые культуры грибов проявляли признаки роста мицелия только на 5–6 сутки после посева агарового блока, в то же время культуры *Morchella importuna* и *Coprinellus domesticus* характеризовались менее продолжительной лаг-фазой (начало роста уже в первые и третьи сутки соответственно). На минеральных средах (MS, $\frac{1}{2}$ MS, $\frac{1}{2}$ MSm) рост *C. domesticus* не наблюдался.

Таким образом, полученные показатели диаметра колоний существенно различались в зависимости от таксономической принадлежности изучаемых штаммов грибов и состава питательных сред (табл. 1).

Для изучения интенсивности накопления биомассы штаммами изучаемых грибов была проведена серия взвешиваний мицелиев колоний, полученных на агаризованных питательных средах различного состава. Проводился расчет соотношения сырой и сухой массы для оценки влияния присутствия минеральных компонентов и сахаристости на формирование колоний.

Таблица 1

Показатели диаметра колоний макромицетов на 30-е сутки культивирования в зависимости от состава плотной питательной среды, мм ± σ

Вид	Питательная среда								
	MS	½MS	½MSm	½MS + 10% С	10% СА	4% СА	КГА	СС	СЧ
<i>Coprinellus domesticus</i>	–	–	–	51,1 ± 4,3*	92,5 ± 12,5	100,0*	79,4 ± 6,4	83,4 ± 9,6	100,0
<i>Morchella importuna</i>	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0*	73,2 ± 9,9	78,3 ± 8,5	59,6 ± 6,6*
<i>Macrolepiota procera</i>	100,0	100,0	100,0	100,0	92,3 ± 7,1	98,5 ± 13,6	84,3 ± 4,3	87,4 ± 10,2	92,3 ± 4,4
<i>Lycoperdon pyriforme</i>	100,0	100,0	100,0	100,0	98,7 ± 5,4	92,4 ± 11,8	100,0	100,0	90,2 ± 9,5

Примечание: σ – стандартное отклонение; *различия статистически достоверны при уровне значимости $p < 0,05$.

Мицелий, полученный в конце пассажа, отделяли от питательной среды путем нагрева закрытых чашек Петри в микроволновой печи до начала расплавления агара, после чего тонким шпателем аккуратно снимали колонию, удалив излишки влаги фильтровальной бумагой, и взвешивали. Затем размещали исследуемый материал на листе пергаменты с известной массой, высушивали при комнатной температуре несколько суток и повторно взвешивали по достижении мицелием воздушно-сухого состояния (табл. 2).

В качестве примера важности данных о средней массе мицелия при поверхностном культивировании грибов на питательных средах можно привести следующее. На среде 4% СА при почти одинаковых показателях скорости обрастания чашек Петри мицелием накопление сухой массы различалось. Было отмечено, что для грибов *Morchella importuna* и *Macrolepiota procera* оно достигало $0,17 \pm 0,02$ г и $0,19 \pm 0,04$ г соответственно, при этом в первом случае соотношение сырой и сухой массы 11,3 говорит о более интенсивном накоплении органического вещества, в то время как показатель 13,6 во втором случае свидетельствует об оводненности мицелия. Мицелий указанных штаммов на среде ½MS + 10% С содержал соответственно до $0,24 \pm 0,04$ и $0,14 \pm 0,02$ г сухого вещества, а соотношение сырой массы к сухой достигало 10,9 и 22,3, т. е. при сходной интенсивности роста мицелий *Macrolepiota procera* накапливал сухое вещество в 2 раза медленнее.

Для выращивания плодовых тел различных грибов в искусственных условиях часто используются твердые сыпучие субстраты, включающие зерно, отруби, опилки, солому. В случае необходимости наработки мицелия для целей создания микоризованных компостов указанные субстраты пригодны не в полной мере. В связи с этим нами был поставлен эксперимент по культивированию отдельных штаммов грибов на субстратах из листового опада и его смеси с верховым торфом в соотношении 1:1.

В качестве субстрата для твердо-фазного культивирования использовали листовой опад и его смесь с торфом.

Инокуляцию мицелия на субстраты в культуральные сосуды (банки объемом 300 мл) проводили стерильно, перенося агаровые блоки при помощи скальпеля. Культивирование, продолжительностью 15 суток проводили в термостате при температуре 24°C. Все опытные варианты включали три повторности.

Для оценки ростовых показателей мицелия микоризообразующих грибов при твердофазном культивировании на различных субстратах на 20-е сутки от начала инкубации после посева маточного мицелия на субстраты проводили оценку индекса, выражаемого в баллах, по предлагаемой нами шкале: 1 балл – мицелий занимал до 20% объема субстрата, 2 балла – от 20 до 40%, 3 балла – от 40 до 60%, 4 балла – от 60 до 80%, 5 баллов – от 80 до 100% (табл. 3).

Таблица 2

Средние показатели сырой и сухой биомассы микоризообразующих грибов в зависимости от состава питательной среды при культивировании на чашках Петри, г ± σ

Вид	4% СА			½MS + 10% С		
	Масса сырая	Масса сухая	Соотношение	Масса сырая	Масса сухая	Соотношение
<i>Coprinellus domesticus</i>	1,45 ± 0,21*	0,23 ± 0,05	6,3	0,36 ± 0,08*	0,09 ± 0,01	4,0
<i>Morchella importuna</i>	1,92 ± 0,35*	0,17 ± 0,02	11,3	2,61 ± 0,19*	0,24 ± 0,04*	10,9
<i>Macrolepiota procera</i>	2,58 ± 0,31	0,19 ± 0,04	13,6	3,12 ± 0,21	0,14 ± 0,02	22,3
<i>Lycoperdon pyriforme</i>	2,26 ± 0,34	0,13 ± 0,02*	17,4	3,43 ± 0,51	0,21 ± 0,02	16,3

Примечание: σ – стандартное отклонение; *различия статистически достоверны при уровне значимости $p < 0,05$.

Результаты наработки мицелия микоризообразующих грибов на различных органических субстратах

Вид гриба	Листовой опад	Листовой опад и торф	Морфологические особенности мицелия
<i>Coprinellus domesticus</i>	5	5	Белый ватообразный мицелий
<i>Morchella importuna</i>	5	5	Серовато-белый плотный
<i>Macrolepiota procera</i>	4	1	Белый нитчатый мицелий, тонко оплетающий фрагменты субстрата
<i>Lycoperdon pyriforme</i>	3	1	Серый воздушный мицелий с рассеянными уплотнениями

В результате работы было выявлено, что на субстратах из листового опада мицелий большинства апробированных штаммов развивался интенсивнее, чем в случае смешивания листового опада с торфом. Это может быть связано как с меньшей влажностью субстрата, так и с меньшей доступностью питательных веществ в указанном субстрате в результате неподходящей реакции среды или иного химического состава.

Интенсивность роста мицелия ряда видов грибов на субстрате из листового опада различалась. Так, мицелий *Macrolepiota procera* и *Lycoperdon pyriforme* развивался на листовом опаде в разы интенсивнее. В то же время штаммы *Coprinellus domesticus* и *Morchella importuna* характеризовались сходными высокими показателями роста вне зависимости от состава апробированных субстратов, достигая в конце периода культивирования 85 и 100% объема субстрата соответственно.

После 3–4 недель выращивания на питательных субстратах отмечен ряд признаков, свидетельствующих о старении культур грибов и изменении их биохимического потенциала. Так, наблюдались изменения цвета и структуры мицелия и его уплотнения, наличие характерной желтовато-бурой окраски говорило о появлении вторичных метаболитов и накоплении продуктов обмена.

Таким образом, штаммы *Coprinellus domesticus* и *Morchella importuna* являются наименее требовательными к виду естественного субстрата, демонстрируя устойчивый рост, в том числе в ходе последовательных субкультивирований.

Листовой опад определен как наиболее подходящий субстрат для получения мицелия практически всех апробированных микоризообразующих

грибов, что делает данные виды перспективными для дальнейшего практического применения.

Измерение водородного показателя органического носителя после цикла культивирования изученных штаммов показало значение pH в пределах 4,2–5,2, что позволяет использовать его в приготовлении субстратов, предназначенных для выращивания лесного посадочного материала хвойных пород.

Заключение. В результате проведенных исследований изучены морфолого-культуральные особенности роста мицелия ряда штаммов микоризообразующих грибов на плотных питательных средах. Выявлено, что колонии *Morchella importuna*, *Macrolepiota procera*, *Lycoperdon pyriforme* интенсивно развиваются на минеральной среде MS в различных модификациях, включая вариант с добавлением 4% сусла, в то время как штамм *Coprinellus domesticus* формирует колонии только на средах с добавлением естественных компонентов.

На основе макро- и микросолей по прописи MS, дополненной 10% пивного сусла, разработана среда смешанного состава, являющаяся универсальной для культивирования изученных видов грибов с целью наработки биологического материала.

Были оптимизированы способы наработки биомассы мицелия микоризообразующих грибов, апробирована методика стерильного культивирования на органических субстратах, приготовленных с использованием листового опада и верхового торфа.

Изучение возможности твердофазного культивирования мицелиальных культур позволяет использовать их в приготовлении почвенных субстратов для выращивания посадочного материала древесных пород в лесных питомниках.

Список литературы

1. Коваленко А. Е. Эктомикоризные грибы: ценологический аспект // Микология и фитопатология. 1994. Т. 28, № 3. С. 81–91.
2. Smith S. E., Read D. J. Mycorrhizal Symbiosis. London: Academic Press Limited, 1997. 514 p.
3. Agerer R. Fungal relationships and structural identity of their ectomycorrhizae // Mycol Progress. 2006. Vol. 5, no. 2. P. 67–107. DOI: 10.1007/s11557-006-0505-x.
4. Шубин В. И. Макромицеты лесных фитоценозов таежной зоны и их использование. Л.: Наука, 1990. 197 с.
5. Andy F., Taylor A. F. S. Fungal diversity in ectomycorrhizal communities: sampling effort and species detection // Plant Soil. 2002. Vol. 244, no. 1 (2). P. 19–28. DOI: 10.1023/A:1020279815472.

6. Hutchinson L. J. Description and identification of cultures of ectomycorrhizal fungi found in North America // *Mycotaxon*. 1991. Vol. 42. P. 387–504.
7. Tichelen van K. K., Colpaert J. V., Vangronsveld J. Ectomycorrhizal protection of *Pinus sylvestris* against copper toxicity // *New Phytol*. 2001. Vol. 150. P. 203–213. DOI: 10.1046/j.1469-8137.2001.00081-x.
8. Heijden van der M. G. A., Horton T. R. Socialism in soil? The importance of mycorrhizal fungal networks for facilitation in natural ecosystems // *Journal of ecology*. 2009. Vol. 97. P. 1139–1150. DOI: 10.1111/j.1365-2745.2009.01570.
9. Finlay R. D. Mycorrhizal fungi and their multifunctional roles // *Mycologist*. 2004. Vol. 18. P. 91–96. DOI: 10.1017/S0269915X04002058.
10. Шемаханова Н. М. Микотрофия древесных пород. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 374 с.
11. Ashkannejhad S., Horton T. R. Ectomycorrhizal ecology under primary succession on coastal sand dunes: interactions involving *Pinus contorta*, suilloid fungi and deer // *New Phytol*. 2006. Vol. 169. P. 345–354. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2005.01593-x.
12. Cornelissen J. H. C., Aert R., Cerabolini B., Werger M. J. A. Carbon cycling traits of plant species are linked with mycorrhizal strategy // *Oecologia*. 2001. Vol. 129 (4). P. 611–619. DOI: 10.1007/s004420100752.
13. Соколов М. С., Глинушкин А. П., Торопова Е. Ю. Средообразующие функции здоровой почвы – фитосанитарные и социальные аспекты // *Агрохимия*. 2015. № 8. С. 81–94.
14. Amaranthus M. P., Perry D. A. Effect of soil transfer on ectomycorrhiza formation and the survival and growth of conifer seedlings on old, nonreforested clear-cuts // *Canadian Journal of Forest Research*. 1987. Vol. 17 (8). P. 944–950. DOI: 10.1139/x87-147.
15. Muthukumar T., Udaiyan K., Shanmughavel P. Mycorrhiza in sedges – an overview // *Mycorrhiza*. 2004. Vol. 14. P. 65–77. DOI: 10.1007/s00572-004-0296-3.
16. Carbon cycling traits of plant species are linked with mycorrhizal strategy / J. H. C. Cornelissen [et al.] // *Oecologia*. 2001. Vol. 129, no. 4. P. 611–619. DOI: 10.1007/s004420100752.
17. Frank B. On the nutritional dependence of certain trees on the root symbiosis with belowground fungi // *Mycorrhiza*. 2005. No. 15. P. 267–275. DOI: 10.1007/s00572-004-0329-y.
18. Flykt E., Timonen S., Pennanen T. Variation of ectomycorrhizal colonisation in Norway spruce seedlings in finnish forest nurseries // *Silva Fennica*. 2008. Vol. 42, no. 4. P. 571–585. DOI: 10.14214/sf.234.
19. Berruti A. AMF components from a microbial inoculum fail to colonize roots and lack soil persistence in an arable maize field // *Symbiosis*. 2016. Vol. 72, no. 1. P. 73–80. DOI: 10.1007/s13199-016-0442-7.

References

1. Kovalenko A. E. Ectomycorrhizal fungi: cenological aspect. *Mikologiya i fitopatologiya* [Mycology and phytopathology]. 1994, vol. 28, no. 3, pp. 81–91 (In Russian).
2. Smith S. E., Read D. J. *Mycorrhizal Symbiosis*. London: Academic Press Limited, 1997. 514 p.
3. Agerer R. Fungal relationships and structural identity of their ectomycorrhizae. *Mycol. Progress*, 2006, vol. 5, no. 2, pp. 67–107. DOI: 10.1007/s11557-006-0505-x.
4. Shubin V. I. *Makromitsety lesnykh fitotsenozov tayezhnoy zony i ikh ispol'zovaniye* [Macromycetes of forest phytocenoses of the taiga zone and their use]. Leningrad, Nauka Publ., 1990. 197 p. (In Russian).
5. Andy F., Taylor A. F. S. Fungal diversity in ectomycorrhizal communities: sampling effort and species detection. *Plant & Soil*. 2002, vol. 244, no. 1 (2), pp. 19–28. DOI: 10.1023/A:1020279815472.
6. Hutchinson L. J. Description and identification of cultures of ectomycorrhizal fungi found in North America. *Mycotaxon*, 1991, vol. 42, pp. 387–504.
7. Tichelen van K. K., Colpaert J. V., Vangronsveld J. Ectomycorrhizal protection of *Pinus sylvestris* against copper toxicity. *New Phytol*, 2001, vol. 150, pp. 203–213. DOI: 10.1046/j.1469-8137.2001.00081-x.
8. Heijden van der M. G. A., Horton T. R. Socialism in soil? The importance of mycorrhizal fungal networks for facilitation in natural ecosystems. *Journal of ecology*, 2009, vol. 97, pp. 1139–1150. DOI: 10.1111/j.1365-2745.2009.01570.
9. Finlay R. D. Mycorrhizal fungi and their multifunctional roles. *Mycologist*, 2004, vol. 18, pp. 91–96. DOI: 10.1017/S0269915X04002058.
10. Shemakhanova N. M. *Mikotrofiya drevesnykh porod* [Mycotrophy of tree species]. Moscow, AN SSSR Publ., 1962. 374 p. (In Russian).
11. Ashkannejhad S., Horton T. R. Ectomycorrhizal ecology under primary succession on coastal sand dunes: interactions involving *Pinus contorta*, suilloid fungi and deer. *New Phytol*, 2006, vol. 169, pp. 345–354. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2005.01593-x.
12. Cornelissen J. H. C., Aert R., Cerabolini B., Werger M. J. A. Carbon cycling traits of plant species are linked with mycorrhizal strategy. *Oecologia*, 2001, vol. 129 (4), pp. 611–619. DOI: 10.1007/s004420100752.

13. Sokolov M. S., Glinushkin A. P., Toropova Ye. Yu. Environment-forming functions of healthy soil – phytosanitary and social aspects. *Agrokhimiya* [Agrochemistry], 2015, no. 8, pp. 81–94 (In Russian).

14. Amaranthus M. P., Perry D. A. Effect of soil transfer on ectomycorrhiza formation and the survival and growth of conifer seedlings on old, nonreforested clear-cuts. *Canadian Journal of Forest Research*, 1987, vol. 17 (8), pp. 944–950. DOI: 10.1139/x87-147.

15. Muthukumar T., Udaiyan K., Shanmughavel P. Mycorrhiza in sedges – an overview. *Mycorrhiza*, 2004, vol. 14, pp. 65–77. DOI: 10.1007/s00572-004-0296-3.

16. Cornelissen J. H. C., Aert R., Cerabolini B., Werger M. J. A. Carbon cycling traits of plant species are linked with mycorrhizal strategy. *Oecologia*, 2001, vol. 129, no. 4, pp. 611–619. DOI: 10.1007/s004420100752.

17. Frank B. On the nutritional dependence of certain trees on the root symbiosis with belowground fungi. *Mycorrhiza*, 2005, no. 15, pp. 267–275. DOI: 10.1007/s00572-004-0329-y.

18. Flykt E., Timonen S., Pennanen T. Variation of ectomycorrhizal colonisation in Norway spruce seedlings in finnish forest nurseries. *Silva Fennica*, 2008, vol. 42, no. 4, pp. 571–585. DOI: 10.14214/sf.234.

19. Berruti A. AMF components from a microbial inoculum fail to colonize roots and lack soil persistence in an arable maize field. *Symbiosis*, 2016, vol. 72, no. 1, pp. 73–80. DOI: 10.1007/s13199-016-0442-7.

Информация об авторах

Острикова Марина Яковлевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела генетики, селекции и биотехнологии. Институт леса Национальной академии наук Беларуси (246050, г. Гомель, ул. Пролетарская, 71, Республика Беларусь). E-mail: heterobasidion@mail.ru

Разумова Ольга Александровна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геномных исследований и биоинформатики. Институт леса Национальной академии наук Беларуси (246050, г. Гомель, ул. Пролетарская, 71, Республика Беларусь). E-mail: o-kovalevich@mail.ru

Константинов Андрей Вячеславович – магистр биологических наук, научный сотрудник лаборатории геномных исследований и биоинформатики. Институт леса Национальной академии наук Беларуси (246050, г. Гомель, ул. Пролетарская, 71, Республика Беларусь). E-mail: avkonstantinof@mail.ru

Пантелеев Станислав Викторович – кандидат биологических наук, доцент, заведующий лабораторией геномных исследований и биоинформатики. Институт леса Национальной академии наук Беларуси (246050, г. Гомель, ул. Пролетарская, 71, Республика Беларусь). E-mail: stasikdesu@mail.ru

Хархасова Ирина Алексеевна – аспирант лаборатории геномных исследований и биоинформатики. Институт леса Национальной академии наук Беларуси (246050, г. Гомель, ул. Пролетарская, 71, Республика Беларусь). E-mail: harhasova18@mail.ru

Information about the authors

Ostrikova Marina Yakovlevna – PhD (Biology), Senior Researcher, the Research Department of Genetics, Breeding and Biotechnology. Forest Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (71, Proletarskaya str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: heterobasidion@mail.ru

Razumova Olga Aleksandrovna – PhD (Biology), Leading Researcher, the Laboratory of Genomic Research and Bioinformatics. Forest Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (71, Proletarskaya str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: kovalevich@mail.ru

Konstantinov Andrey Vyacheslavovich – Master of Biology, Researcher, the Laboratory of Genomic Research and Bioinformatics. Forest Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (71, Proletarskaya str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: avkonstantinof@mail.ru

Panteleev Stanislav Viktorovich – PhD (Biology), Associate Professor, Head of the Laboratory of Genomic Research and Bioinformatics. Forest Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (71, Proletarskaya str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: stasikdesu@mail.ru

Kharkhasova Irina Alekseevna – PhD student, the Laboratory of Genomic Research and Bioinformatics. Forest Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (71, Proletarskaya str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: harhasova18@mail.ru

Поступила 15.03.2024