

## Характеристика нового штамма гриба *Schizophyllum commune* EO22 и его способности разлагать полиэтилен

© 2024. А. А. Широких<sup>1,2</sup>, д. б. н., профессор,  
И. Г. Широких<sup>1,2,3</sup>, д. б. н., профессор, в. н. с.,

<sup>1</sup>Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого,  
610007, Россия, г. Киров, ул. Ленина, д. 166а,

<sup>2</sup>Вятский государственный университет,  
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,

<sup>3</sup>Институт биологии Коми научного центра  
Уральского отделения Российской академии наук,  
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,  
e-mail: irgenal@mail.ru

Широко распространённый и обладающий обширным биотехнологическим потенциалом ксилотрофный базидиомицет *Schizophyllum commune* Fr. характеризуется значительной генетической вариабельностью, что актуализирует исследование различных штаммов этого гриба для решения комплекса экологических проблем, связанных, в числе прочих, с утилизацией пластиковых отходов. Использованный в работе штамм *S. commune* EO22 изолирован с гниющей древесины *Acer negundo* в подзоне южной тайги европейского Северо-Востока (58°35' с. ш., 49°69' в. д., окрестности г. Кирова) и поддерживается в мицелиальной культуре в лабораторных условиях. Видовая идентификация выполнена на основании морфологии и результата секвенирования нуклеотидной последовательности фрагмента ITS1–5.8S–ITS2. Описаны особенности роста и плодообразования грибной культуры EO22 на плотных средах. В эксперименте по культивированию мицелия *S. commune* EO22 совместно с полиэтиленовой плёнкой низкого давления (ПНД) – одного из самых распространённых (64% от общего объёма производства пластиков) загрязнителей окружающей среды, установлен деградативный потенциал штамма. Процесс биодegradации ПНД осуществлялся мицелием исключительно дикариотического типа и сопровождался формированием плодовых тел гриба, что представляет интерес в связи с развитием технологий получения пищевого белка в процессе утилизации пластиковых отходов.

**Ключевые слова:** пластиковые отходы, полиэтилен, биодegradация, базидиомицеты.

## Characteristics of the *Schizophyllum commune* new strain EO22 and its ability to degrade polyethylene

© 2024 A. A. Shirokikh<sup>1,2</sup>, ORCID: 0000-0002-7808-0376<sup>1</sup>

I. G. Shirokikh<sup>1,2,3</sup>, ORCID: 0000-0002-3319-2729<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Federal Agricultural Research Center of North-East named N. V. Rudnitsky,  
166a, Lenina St., Kirov, Russia, 610007,

<sup>2</sup>Vyatka State University,  
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

<sup>3</sup>Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch  
of the Russian Academy of Sciences,  
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,  
e-mail: irgenal@mail.ru

The widespread and possessing extensive biotechnological potential xylo-trophic basidiomycete *Schizophyllum commune* Fr. has a significant genetic variability. This actualizes the study of the fungus various strains to solve a complex of environmental problems, in particular, the disposal of plastic waste. The *S. commune* strain EO22 used in the work was isolated from rotting *Acer negundo* wood in the southern taiga subzone of the European Northeast (N58°35', E49°69', vicinity of Kirov). It is maintained in mycelial culture in laboratory conditions. The species identification was performed

based on the morphology and sequencing result of the ITS1–5.8S–ITS2 fragment nucleotide sequence. The features of the growth and fruiting of mycelial culture EO22 on potato-sucrose and malt agar are described. The degradation potential of the *S. commune* strain EO22 was established in the experiment on co-incubation with low-pressure polyethylene (HDPE) film. HDPE is one of the most common environmental pollutants (64% of the total plastics production). The process of HDPE biodegradation was carried out exclusively by the dikaryotic type of mycelium and was accompanied by the forming of the fungus fruiting bodies. The results obtained are of interest in connection with the development of technologies for food protein production in the process of plastic waste utilization.

**Keywords:** plastic waste, polyethylene, biodegradation, basidiomycetes.

Щелелистник обыкновенный (*Schizophyllum commune* Fr.) – широко распространённый на всех континентах, кроме Антарктиды, ксилотрофный базидиомицет, вызывающий белую гниль древесины. Многие авторы отмечают биотехнологическую универсальность шизофиллума. Вид способен синтезировать широкий спектр хозяйственно ценных метаболитов, таких как лигноцеллюлолитические ферменты, шизофиллан, этанол, биосурфактанты [1]. В составе *S. commune* обнаружены фенольные и терпеноидные соединения, эргостерин, а также несколько веществ, обладающих антиоксидантными свойствами: гидроксibenзойная кислота, протокатехиновая кислота и токоферол. Сообщалось, что *S. commune* продуцирует липазу, фитазу, литические полисахаридмонооксигеназы и белки-экспансины, повышающие доступность полисахаридов [2, 3], иминолактоны, способные подавлять рост раковых клеток [3, 4].

Наиболее известный полисахарид шизофиллума – шизофиллан, демонстрирует сразу несколько биологических активностей: иммуномодулирующую, противоопухолевую, противовоспалительную и антиоксидантную [5, 6]. В странах Африки и Азии кожистые плодовые тела *S. commune* считаются съедобными, их используют в пищу и для изготовления лекарственных средств [7, 8]. Значительный метаболический потенциал *S. commune* является базисом к широкому спектру его применения в здравоохранении, переработке лигноцеллюлозного сырья для производства биоэтанола, экобиотехнологиях [9].

Среди глобальных экологических проблем на первый план в последнее время выходит загрязнение окружающей среды (ОС) отходами пластических масс, накопление которых увеличивается с каждым годом. В повседневной жизни в качестве пластика в основном используется полиэтилен высокого (ПВД) и низкого (ПНД) давления. На долю полиэтилена приходится 64% от общего объёма производства синтетических пластмасс [10]. Полиэтилен низкого давления используется для производства бутылок, пластиковых пакетов,

полиэтиленовой плёнки, упаковочных материалов, одноразовых изделий, контейнеров для мусора, водопроводных труб и т. д. Использование полиэтилена во всём мире ежегодно увеличивается на 12% [11].

Многие лигноцеллюлитические ферменты (лигнинпероксидазы, Mn-пероксидазы, полифункциональные пероксидазы, лакказы), обладают широкой субстратной специфичностью, что позволяет им разлагать не только органические вещества природного происхождения, но и синтетические полимеры [12]. Несмотря на то, что пластики по структуре существенно отличаются от лигноцеллюлозы и обладают большей устойчивостью к биodeградации, между этими классами соединений существует очевидное сходство, поскольку те и другие представляют собой смеси гидрофобных полимеров с аморфными и кристаллическими участками, деградация которых осуществляется с участием гидролаз и оксидоредуктаз [13]. Рядом авторов была установлена связь между лигнолитической активностью грибов белой гнили и деградацией полиэтилена [14, 15], которая происходила с помощью внеклеточных лакказ, расщепляющих сложные полимеры до короткоцепочечных или более мелких молекул, способных к мембранному транспорту [16]. По сравнению с лакказами растений и бактерий, грибные лакказы обладают более высоким окислительно-восстановительным потенциалом и разнообразными каталитическими свойствами. В настоящее время грибные лакказы рассматриваются как многофункциональные биокатализаторы, способные разрушать полиэтилен и обесцвечивать промышленные красители [17, 18].

*Schizophyllum commune* – первый из базидиальных грибов, для которого в 2010 г. было осуществлено полногеномное секвенирование [19]. Результаты показали, что шизофиллум обладает потенциалом разрушения всех компонентов лигноцеллюлозной биомассы, поскольку в его геноме закодированы 366 углеводов-активных ферментов (Carbohydrate-Active enZYmes – CAZy) из имеющихся в базе данных CAZy (<http://www.cazy.org/>). Благо-

даря обширному набору ферментов, разрушающих и модифицирующих клеточную стенку растений, *S. commune* представляется одним из лучших кандидатов для использования не только в промышленных процессах (производство биоэтанола из лигноцеллюлозного сырья, биоконверсия побочных продуктов сельского хозяйства), но и в биодegradации ксенобиотиков и загрязняющих веществ.

Исследование различных штаммов *S. commune*, их метаболизма и ферментного аппарата могут послужить основой для создания природоподобной технологии переработки пластиковых отходов, что позволит приблизиться к решению комплекса экологических проблем, связанных с пластиковым загрязнением.

Целью работы являлось изучение культурально-морфологических свойств природного изолята *Schizophyllum commune* EO22 и его влияния на биодegradацию полиэтилена в условиях двухфазной культуры.

### Объекты и методы исследования

Объектом исследования служил штамм *S. commune* EO22, выделенный в мицелиальную культуру на агаризированном пивном сусле (4° Баллинга) с гниющей древесины клёна ясенелистного (*Acer negundo* L.). Образец древесины был отобран в весенний период в подзоне южной тайги европейского Северо-Востока (58°35'59" с. ш., 49°69'00" в. д., окрестность г. Кирова). Видовую идентификацию проводили с использованием морфологических признаков плодового тела гриба (<http://www.indexfungorum.org/Names/NamesRecord.asp?RecordID=208403>), а также на основании результата секвенирования в ООО «Синтол» (г. Москва) нуклеотидной последовательности фрагмента ITS1–5.8S–ITS2. Идентификацию секвенированной последовательности осуществляли с применением геномной и программной базы BLAST (<http://blast.ncbi.nlm.nih.gov/>). Для описания культуральных и морфологических свойств культуры гриба его выращивали на картофельно-сахарозном и солодовом агаре [20] при комнатной температуре (20±2 °C) и естественном освещении. Особенности роста и плодообразования культуры EO22 на плотных средах отмечали на 10 и 20 сут роста. Чашки с мицелиальными культурами просматривали под микроскопом Leica DM 2500 при увеличении ×200 и ×400.

В эксперименте по изучению способности штамма разлагать ПНД гриб выращивали

в двухфазной культуре (твёрдый субстрат/жидкость). Прекультивацию гриба проводили на агаризированном пивном сусле при 22 °C в течение 7 сут до появления сплошного газона. Из ПНД-плёнки толщиной 22 мкм вырезали полоски площадью 20×90 мм, взвешивали, фиксировали их массу, стерилизовали в 70% этаноле в течение 2 ч, затем трижды промывали стерильной дистиллированной водой и асептически размещали в чашках Петри (диаметром 9 см), содержащих каждая по 25 мл жидкой среды Чапека [20], по одной на поверхности среды. На каждую полоску в опытном варианте помещали по три агаровых блока с мицелием гриба, которые вырезали из мицелиального газона пробочным сверлом диаметром 8 мм. В контроле гриб на полоски не наносили. Всего закладывали по 9 полосок в опытном и контрольном вариантах. Чашки с полосками ПНД инкубировали при 20±2 °C в течение 60 сут. После инкубации с грибом полоски механически очищали от биомассы гриба, промывали 70% этанолом для удаления остатков мицелия, трижды промывали стерильной дистиллированной водой и высушивали на воздухе с последующим досушиванием в эксикаторе над силикагелем в течение 24 ч. Массу полосок ПНД после инкубации с грибом и без гриба определяли гравиметрически. Далее полоски микроскопировали для сравнения с контролем и выявления возможных повреждений. Видеофиксацию изображений осуществляли с помощью системы Image Scope M.

Обработку результатов осуществляли методами непараметрической статистики [21]. Значимость различий между вариантами оценивали с помощью T-критерия Вилкоксона (уровень значимости  $p=0,01$ ).

### Результаты и обсуждение

В природе *S. commune* формирует веерообразные плодовые тела размером 1–6 см, пластинчатой структуры, от беловато-серых до розовато-бежевых, ворсистые, без ножки или с короткой напоминающей ножку структурой (рис. 1а, б, см. цв. вкладку VI). Плодовые тела часто расположены на субстрате группами, расщеплены продольно на две части и скручиваются при недостатке влаги, чтобы защитить споры на спорообразующем слое – гимении. При наступлении благоприятных условий они способны к регидратации и выделению базидиоспор, которые образуются на базидиях. Каждая базидия содержит 4 цилиндриче-

ские базидиоспоры, размером 3–4×1–1,5 мкм, с гладкими стенками и боковым рубцом на нижнем конце.

Из базидиоспоры гриба, собранного с гниющей древесины клёна ясенелистного, и соответствующего по морфологии приведённому выше описанию, была получена на солодовом агаре мицелиальная культура *S. commune* – штамм EO22. При культивировании на картофельно-сахарозном (рис. 1с, см. цв. вкладку VI) и солодовом агаре (рис. 1d, см. цв. вкладку VI) колонии гриба, от белого до бледно-розовато-серого цвета, разрастались, становились шерстистыми, и вскоре образовывали макроскопически видимые базидиокарпы (плодовые тела) – сидячие, почковидные, лопастные, с «пластинками», радиально расходящимися от точки прикрепления (рис. 1е, см. цв. вкладку VI). Базидиокарпы с расщеплёнными пластинками – наиболее характерная особенность этого вида (рис. 1f, см. цв. вкладку VI).

При микроскопировании колоний наблюдали гиалиновые (бесцветные, полупрозрачные) гифы (рис. 2а, см. цв. вкладку VII), часто с боковыми выростами, или спикулами (шипиками) (рис. 2b, см. цв. вкладку VII), что характерно для монокариотического мицелия, не способного к формированию базидиокарпов.

Образование плодовых тел у *S. commune* происходит после дикаризации (рис. 2b, см. цв. вкладку VII) и инициируется агрегацией воздушных гифов дикариотического мицелия (рис. 2с, см. цв. вкладку VII). Эти агрегаты образуют зачатки плодовых тел, которые в дальнейшем развиваются в зрелые базидиокарпы. Кариогамия и мейоз происходят в базидиях зрелого плодового тела, и образующиеся

в результате базидиоспоры могут давать начало новому монокариотическому мицелию. Дикариотический мицелий, способный давать базидиокарпы, отличался наличием пряжек у большинства септ (рис. 2d, см. цв. вкладку VII).

Молекулярная идентификация культуры гриба на основе результатов секвенирования региона, включающего внутренний транскрибируемый спейсер (Internal transcribed spacer) ITS1, ген 5.8S рРНК и ITS2, подтвердила, что природный изолят EO22 является представителем вида *Schizophyllum commune* Fr., семейства Schizophyllaceae, порядка Agaricales, класса Agaricomycetes, отдела Basidiomycota.

Известны примеры, когда при культивировании грибов белой гнили с пластмассами наблюдали деполимеризацию и/или биодеградацию пластика. Так, вид *Phanerochaete chrysosporium*, вызывающий белую гниль древесины, в условиях ограниченного содержания азота и углерода разлагал полиэтилен [22]. Признаки разрушения пластика грибом проявлялись в снижении массы полимера и различных деформациях поверхности, наблюдаемых при микроскопии. При сравнении *S. commune* с грибом *Ph. chrysosporium* и другими представителями белой гнили *Ceriporiopsis subvermispora* и *Gloeophyllum trabeum*, у шизофиллума было выявлено большее разнообразие ферментов, гидролизующих углеводы, по сравнению с тремя другими ксилотрофными видами. В процессе гидролиза лигноцеллюлозной биомассы эффективность гриба *S. commune* превосходила эффективность коммерческого ферментного препарата, полученного из *Trichoderma longibrachiatum* [2]. Эти результаты послужили предиктором к выяснению деградативного потенциала штамма EO22 в отношении ПНД.

Изменение массы ПНД за 60 сут совместной инкубации с *S. commune* EO22  
Change in HDPE mass over 60 days of co-incubation with *S. commune* EO22

№ повторения No. repetitions	Масса исходная, г Initial weight, g	Масса после инкубации, г Weight after incubation, g	Убыль массы / Loss of mass	
			г/г	%
1	0,1539	0,1528	0,0011	0,7
2	0,1610	0,1603	0,0007	0,4
3	0,1527	0,1521	0,0006	0,4
4	0,1572	0,1566	0,0006	0,4
5	0,1509	0,1494	0,0015	1,0
6	0,1596	0,1591	0,0005	0,3
7	0,1599	0,1596	0,0003	0,2
8	0,1411	0,1392	0,0019	1,3
9	0,1416	0,1413	0,0003	0,2
Среднее / Average	0,1531±0,0074	0,1523±0,0078	0,0008±0,0005	0,5

А. А. Широких, И. Г. Широких  
«Характеристика нового штамма гриба *Schizophyllum commune* EO22  
и его способности разлагать полиэтилен». С. 185.

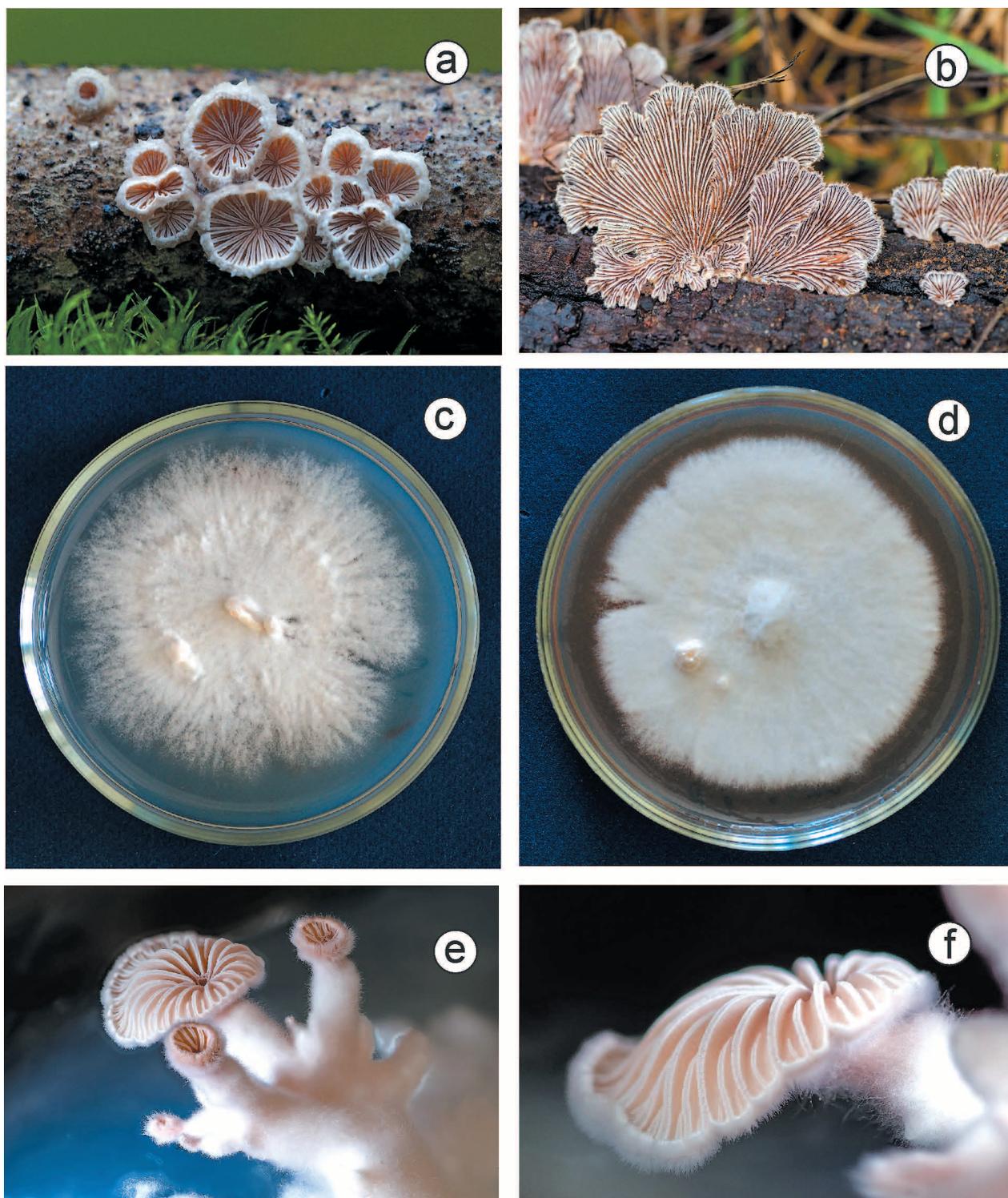
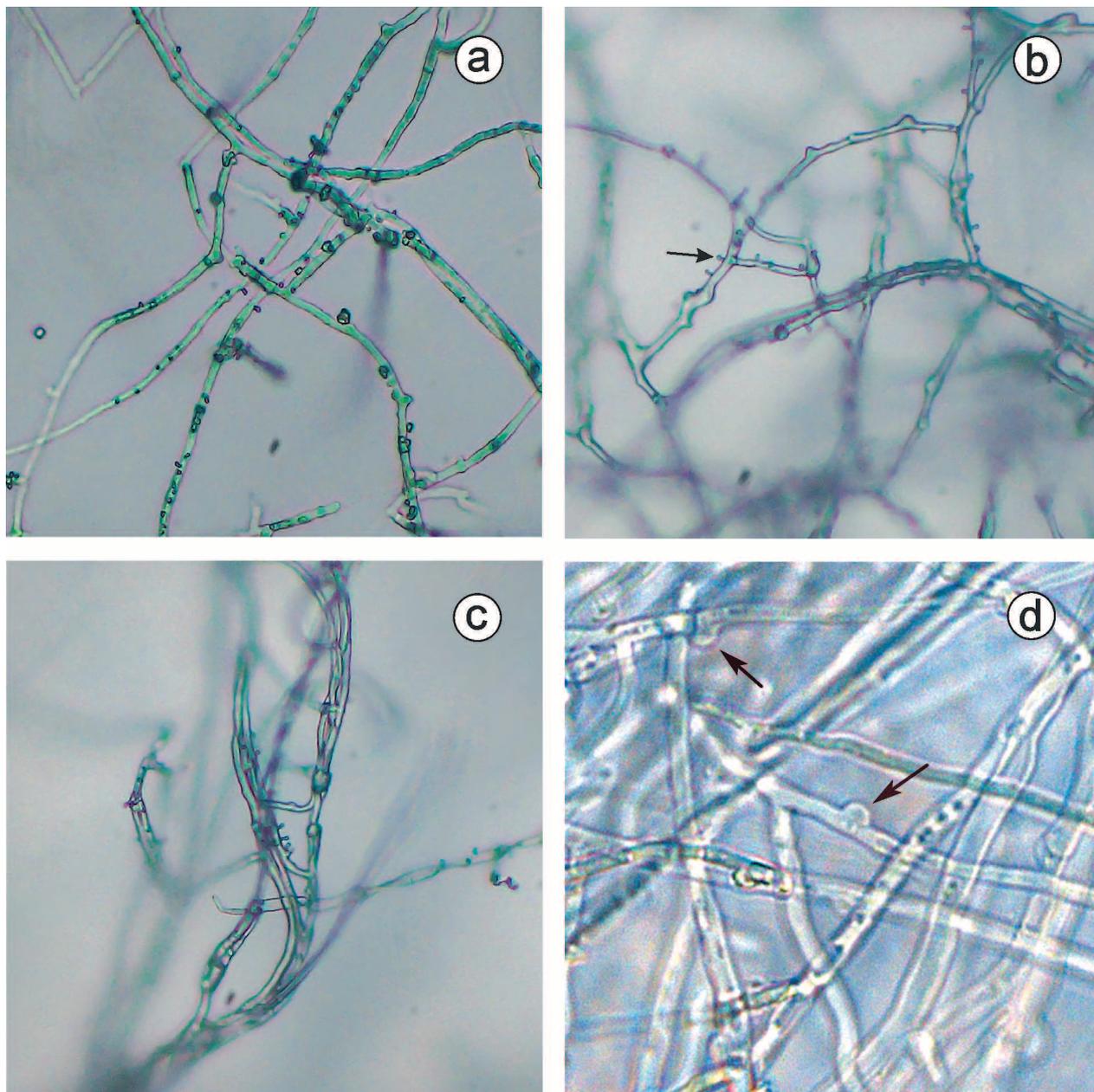


Рис. 1. Плодовые тела *S. commune* на природных субстратах (a, b); колонии и базидиокарпы штамма EO22 на картофельно-сахарозном (c, e) и солодовом агаре (d, f)  
Fig. 1. *S. commune* fruiting bodies on natural substrates (a, b); colonies and basidiocarps of the strain EO22 on potato-sucrose (c, e) and malt agar (d and f)

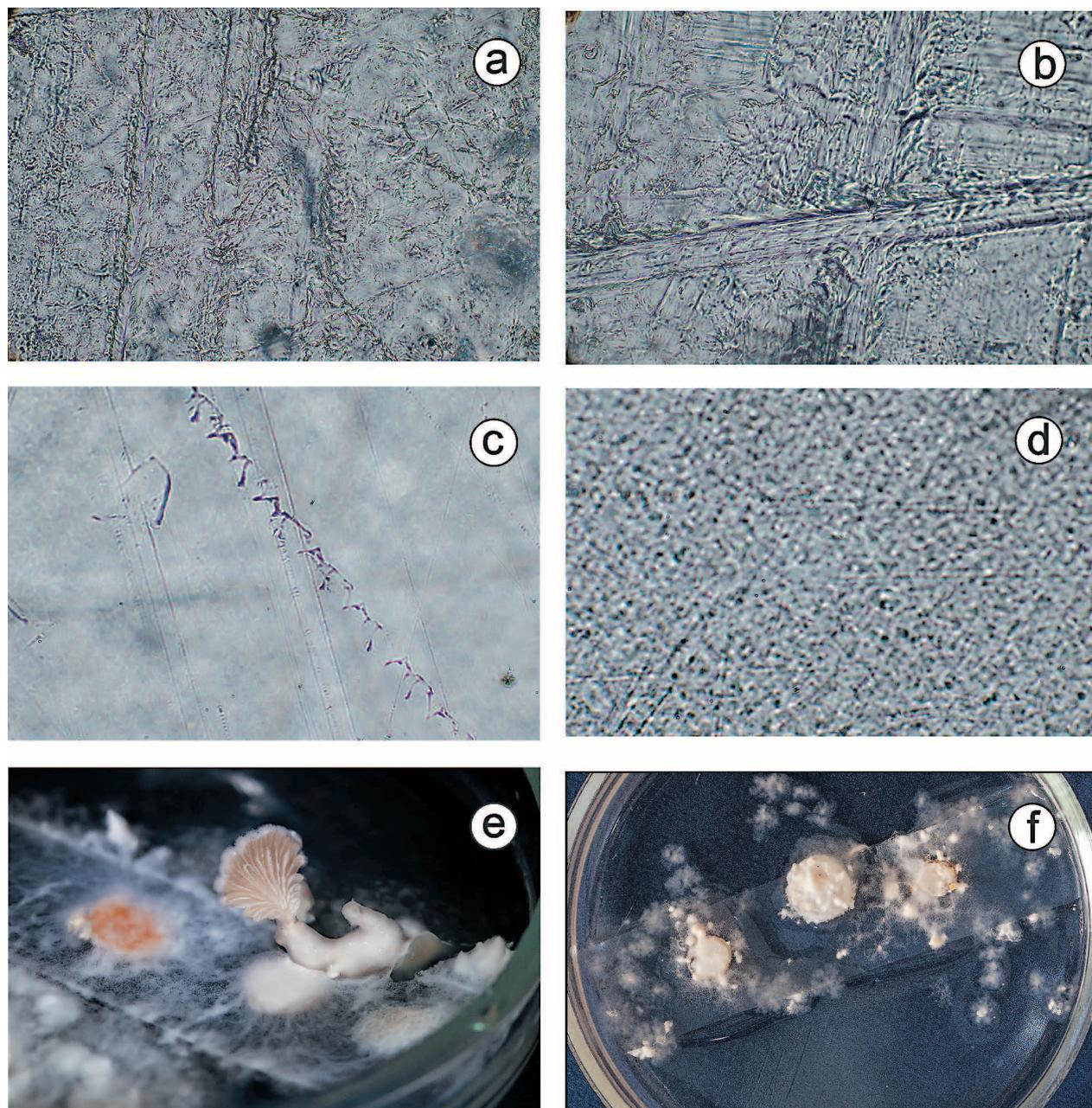
А. А. Широких, И. Г. Широких  
«Характеристика нового штамма гриба *Schizophyllum commune* EO22  
и его способности разлагать полиэтилен». С. 185.



**Рис. 2.** Штамм *S. commune* EO22 при микроскопии: монокариотический мицелий (а), спикеры (указано стрелкой) (b), дикаризация мицелия (с), дикариотический мицелий с пряжками (указаны стрелками) (d),  $\times 400$

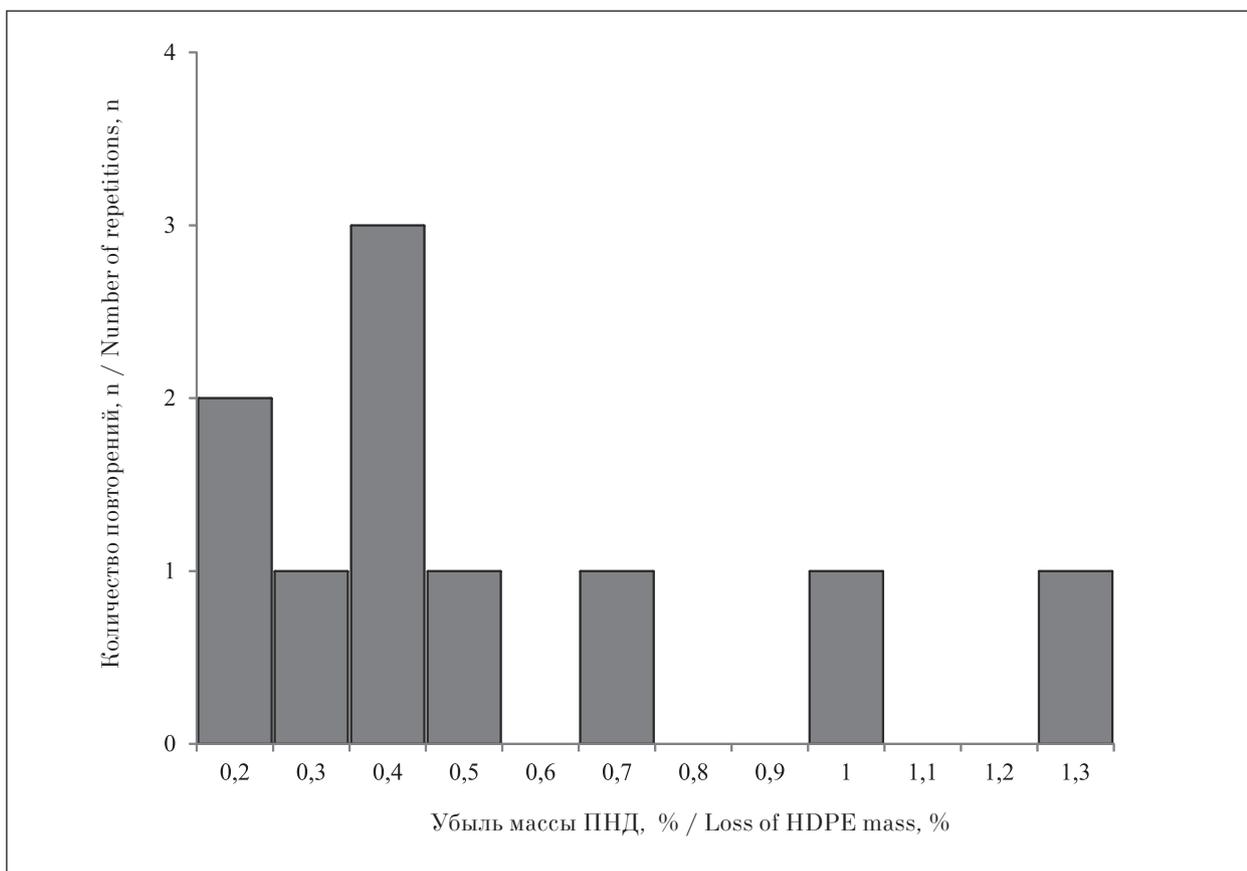
**Fig. 2.** Microscopy of the *S. commune* strain EO22: monokaryotic mycelium (a), spicules (cursor) (b), forming of dicaryotic mycelium (dicarization) (c), dicaryotic mycelium with clamp connection (cursors) (d),  $\times 400$

А. А. Широких, И. Г. Широких  
«Характеристика нового штамма гриба *Schizophyllum commune* EO22  
и его способности разлагать полиэтилен». С. 185.



**Рис. 4.** Микроскопическая картина рельефа поверхности плёнки ПНД после инкубации с культурой *S. commune* EO22 в повторениях 5 (a), 8 (b), 9 (c) и в контроле (d). Формирование на плёнках ПНД макроскопических плодовых тел *S. commune* EO22 дикариотическим мицелием (e); не способный формировать плодовые тела монокариотический мицелий (f)

**Fig. 4.** Microscopy of the HDPE film surface after incubation with *S. commune* EO22 culture in repetitions 5 (a), 8 (b), 9 (c) and in control (d). Forming of *S. commune* EO22 macroscopic fruiting bodies on HDPE films by dicaryotic mycelium (e); monokaryotic mycelium unable to form fruit bodies (f)



**Рис. 3.** Частотное распределение значений убыли массы ПНД по повторениям (n)  
**Fig. 3.** Frequency distribution of HDPE mass loss values by repeats (n)

Экспериментальное выращивание мицелия *S. commune* EO22 в двухфазной культуре совместно с плёнкой ПНД показало, что гриб способен подвергать пластик биодegradации. Если в контроле, спустя 60 сут от начала инкубации, масса полосок ПНД не претерпела никаких изменений, составив в среднем 0,1360 г, то в опытном варианте при инкубации с грибом масса ПНД снизилась в среднем на 0,5% по сравнению с исходной (табл.).

Коэффициент вариации убыли массы ПНД в зависимости от повторения составил 66,5%. Анализ распределения по повторениям частот величин убыли массы ПНД выявил характер распределения, отличный от нормального (рис. 3), в силу чего для статистической оценки значимости различий был использован метод непараметрической статистики.

Статистическую значимость различий между исходной массой полосок ПНД и массой тех же полосок после инкубации с грибом оценивали с помощью Т-критерия Вилкоксона. Для числа пар сравнений, равному 9, табличный W-критерий при 1% уровне значимости составляет 1, а при 5% – 2. Полученное

значение ( $W=0$ ) меньше табличного, следовательно, различия между рассматриваемыми рядами величин статистически значимы при  $p=0,01$ .

При микроскопии плёнок ПНД после инкубации отмечали в повторениях опытного варианта с грибом характерные изменения структуры поверхности – образование микротрещин, отверстий, перепадов высоты рельефа (рис. 4a, b, c, см. цв. вкладку VIII), отсутствующие в контроле (рис. 4d, см. цв. вкладку VIII).

Необходимо отметить, что наиболее выраженные структурные дефекты поверхности инкубированных с грибом плёнок имели место в повторениях 5 и 8, выделившихся среди остальных наиболее значительной потерей массы ПНД по сравнению с исходными значениями – 1,0 и 1,3% соответственно (табл. 1). В повторениях 7 и 9, отличающихся среди других минимальной (0,2%) убылью массы ПНД за время инкубации с грибом, деформации поверхности плёнки были выражены слабо.

Причина варибельности выявленной картины разложения плёнки ПНД штаммом *S. commune* EO22 связана, очевидно, с различным соотношением в его популяционной

структуре монокариотического и дикариотического мицелия.

Наибольшему повреждению плёнки и более значительным количественным потерям массы способствовало развитие мицелия дикариотического типа, сопровождавшееся в опыте (повторения 1, 5, 8) формированием базидиокарпов с характерно расщеплёнными пластинками (рис. 4е, см. цв. вкладку VIII). В меньшей степени деградирующий эффект гриба в отношении ПНД проявился на монокариотической стадии роста (рис. 4ф, см. цв. вкладку VIII), когда плодовые тела не образовывались, а при микроскопии грибные гифы с пряжками не обнаруживались.

### Заключение

Таким образом, полученный из природной среды новый штамм гриба *S. commune* EO22 проявил в лабораторных условиях способность разлагать плёнку ПНД, что выразилось в снижении исходной массы полимера за 60 сут на 0,5% и различных, микроскопически детектируемых, деформациях его поверхности. Процесс разложения ПНД происходил под воздействием роста мицелия исключительно дикариотического типа и сопровождался формированием базидиокарпов гриба. Способность штамма *S. commune* EO22 к росту на ПНД с формированием съедобных плодовых тел может представлять интерес в связи с развитием технологий получения пищевого белка в процессе утилизации пластиковых отходов.

*Работа выполнена в рамках государственного задания FNWE-2022-0005 Программы фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021-2030 годы) и государственного задания Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме «Структура и состояние компонентов техногенных экосистем подзоны южной тайги» (государственная регистрация в ЕГИСУ № 122040100032-5).*

### References

1. Alizadeh V., Shojaosadati S.A., Zamir S.M. Enhancement of schizophyllan production in *Schizophyllum commune* using microparticles in medium // *Bioprocess Biosyst. Eng.* 2021. V. 44. No. 2. P. 317–328. doi: 10.1007/s00449-020-02444-z
2. Zhu N., Liu J., Yang J., Lin Y., Yang Y., Ji L., Li M., Yuan H. Comparative analysis of the secretomes of *Schizophyllum commune* and other wood-decay basidiomycetes

- during solid-state fermentation reveals its unique lignocellulose-degrading enzyme system // *Biotechnol. Biofuels.* 2016. V. 9. Article No. 42. doi: 10.1186/s13068-016-0461-x
3. Basso V., Schiavenin C., Mendonça S., de Siqueira F.G., Salvador M., Camassola M. Chemical features and antioxidant profile by *Schizophyllum commune* produced on different agroindustrial wastes and byproducts of biodiesel production // *Food Chem.* 2020. V. 329. Article No. 127089. doi: 10.1016/j.foodchem.2020.127089
4. Mayakrishnan V., Abdullah N., Abidin M.H.Z., Fadzil N.H.M., Johari N.M.K., Aminudin N., Abidin N.Z. Investigation of the antioxidative potential of various solvent fractions from fruiting bodies of *Schizophyllum commune* (Fr.) mushrooms and characterization of phytoconstituents // *J. Agric. Sci.* 2013. V. 5. No. 6. P. 58–68. doi: 10.5539/jas.v5n6p58
5. Yelithao K., Surayot U., Lee C., Palanisamy S., Prabhu N. M., Lee J., You S. Studies on structural properties and immune-enhancing activities of glycomannans from *Schizophyllum commune* // *Carbohydr. Polym.* 2019. V. 218. P. 37–45. doi: 10.1016/j.carbpol.2019.04.057
6. Chen Z., Yin C., Fan X., Ma K., Yao F., Zhou R., Shi D., Cheng W., Gao H. Characterization of physicochemical and biological properties of *Schizophyllum commune* polysaccharide extracted with different methods // *Int. J. Biol. Macromol.* 2020. V. 156. P. 1425–1434. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2019.11.183
7. Arun G., Eyini M., Gunasekaran P. Characterization and biological activities of extracellular melanin produced by *Schizophyllum commune* (Fries) // *Indian J. Exp. Biol.* 2015. V. 53. No. 6. P. 380–387.
8. Kumar A., Bharti A.K., Bezie Y. *Schizophyllum commune*: A fungal cell-factory for production of valuable metabolites and enzymes // *BioResources.* 2022. V. 17. No. 3. P. 5420–5436. doi: 10.15376/biores.17.3.Kumar
9. Tovar-Herrera O.E., Martha-Paz A.M., Pérez-LLano Y., Aranda E., Tacoronte-Morales J.E., Pedrosa-Cabrera M.T., Arévalo-Niño K., Folch-Mallol J.L., Batista-García R.A. *Schizophyllum commune*: An unexploited source for lignocellulose degrading enzymes // *MicrobiologyOpen.* 2018. V. 7. No. 3. Article No. e00637. doi: 10.1002/mbo3.637
10. Banerjee D., Patel C., Patel K. Degradation of plastic beads containing low density polyethylene (LDPE) by sequential photolysis, hydrolysis and bacterial isolates // *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 2024. V. 112. No. 3. Article No. 41. doi: 10.1007/s00128-024-03853-6
11. Srikanth M., Sandeep T.S.R.S., Sucharitha K., Godi S. Biodegradation of plastic polymers by fungi: a brief review // *Bioresour. Bioprocess.* 2022. V. 9. No. 1. Article No. 42. doi: 10.1186/s40643-022-00532-4
12. Pathak V.M., Navneet. Review on the current status of polymer degradation: a microbial approach // *Bioresour. Bioprocess.* 2017. V. 4. Article No. 15. doi: 10.1186/s40643-017-0145-9
13. Daly P., Cai F., Kubicek C.P., Jiang S., Grujic M., Rahimi M.J., Sheteiwy M.S., Giles R., Riaz A., de Vries R.P.,

Akcapinar G.B., Wei L., Druzhinina I.S. From lignocellulose to plastics: Knowledge transfer on the degradation approaches by fungi // *Biotechnol. Adv.* 2021. V. 50. Article No. 107770. doi: 10.1016/j.biotechadv.2021.107770

14. Iiyoshi Y., Tsutsumi Y., Nishida T. Polyethylene degradation by lignin-degrading fungi and manganese peroxidase // *J. Wood Sci.* 1998. V. 44. P. 222–229. doi: 10.1007/bf00521967

15. Krueger M.C., Hofmann U., Moeder M., Schlosser D. Potential of wood-rotting fungi to attack polystyrene sulfonate and its depolymerisation by *Gloeophyllum trabeum* via hydroquinone-driven fenton chemistry // *PloS One.* 2015. V. 10. No. 7. Article No. e0131773. doi: 10.1371/journal.pone.0131773

16. Gu J.D. Microbiological deterioration and degradation of synthetic polymeric materials: recent research advances // *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 2003. V. 52. No. 2. P. 69–91. doi: 10.1016/S0964-8305(02)00177-4

17. Mate D.M., Alcalde M. Laccase: A multi-purpose biocatalyst at the forefront of biotechnology // *Microb. Biotechnol.* 2016. V. 10. No. 6. P. 1457–1467. doi: 10.1111/1751-7915.12422

18. Han M.L., An Q., Ma K.Y., An W.N., Hao W.Y., Liu M.Y., Shi W.Y., Yang J., Bian L.S. A comparative study

on the laccase activity of four Basidiomycete fungi with different lignocellulosic residues *via* solid-state fermentation // *BioResources.* 2021. V. 16. No. 2. P. 3017–3031. doi: 10.15376/biores.16.2.3017-3031

19. Ohm R.A., de Jong J.F., Lugones L.G., Aerts A., Kothe E., Stajich J.E., de Vries R.P., Record E., Levasseur A., Baker S.E., Bartholomew K.A., Coutinho P.M., Erdmann S., Fowler T.J., Gathman A.C., Lombard V., Henrissat B., Knabe N., Kues U., Lilly W.W., Lindquist E., Lucas S., Magnuson J.K., Piumi F., Raudaskoski M., Salamov A., Schmutz J., Schwarze F.W.M.R., vanKuyk P.A., Horton J.S., Grigoriev I.V., Wösten H.A.B. Genome sequence of the model mushroom *Schizophyllum commune* // *Nat. Biotechnol.* 2010. V. 28. No. 9. P. 957–963. doi: 10.1038/nbt.1643

20. Netrusov A.I., Egorova M.A., Zakharchuk L.M. Practical training in microbiology. Moskva: Academy. 2005. 608 p. (in Russian).

21. Glantz S.A. Primer of biostatistics. Moskva: Praktika, 1998. 459 p. (in Russian).

22. Shimao M. Biodegradation of plastics // *Curr. Opin. Biotechnol.* 2001. V. 12. No. 3. P. 242–247. doi: 10.1016/s0958-1669(00)00206-8