ЭКОБИОТЕХ
ISSN 2618-964X http://ecobiotech-journal.ru
УДК 579.222 UDC 579.222

НОВЫЙ ШТАММ *SCHIZOPHYLLUM COMMUNE* – АКТИВНЫЙ ДЕСТРУКТОР ОПАСНЫХ ПОЛЛЮТАНТОВ И ПРОДУЦЕНТ ЛИГНИНОЛИТИЧЕСКИХ ФЕРМЕНТОВ

Позднякова Н.Н.*, Щербакова Е.В., Дубровская Е.В., Гринев В.С., Турковская О.В., Муратова А.Ю.

Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов Федерального исследовательского центра «Саратовский научный центр Российской академии наук», Саратов, Россия

*E-mail: pozdnyakova_n@ibppm.ru

Аннотация

Исследована способность нового штамма ксилотрофного базидиомицета *Schizophyllum commune* IBPPM 541 утилизировать широкий спектр поллютантов и продуцировать внеклеточные ферменты. Деградация составляла 49.5% для антрацена, 37% – фенантрена, 72% – флуорена, 48% – неонола AF9-12, 61% – изононилфенола, 92% – для нефти. Для синтетических красителей антрахинонового типа Acid Blue 62 и Reactive Blue 4 обесцвечивание составляло 60 и 100% соответственно. Идентифицированы основные метаболиты деградации ПАУ: 9,10-антрахинон, фенантрен-9,10-хинон, 9-флуоренон и фталевая кислота. Наличие последней свидетельствует о возможной минерализации исходных соединений. Показано, что деградация гидрофобных поллютантов сопровождалась продукцией эмульгирующих веществ; наибольшие значения эмульгирующей активности (E_{48}) были получены для флуорена (23.3%), изононилфенола (28.4%) и нефти (29.1%). В условиях погруженного культивирования выявлены внеклеточные лакказа и Mn-пероксидаза, активность которых существенно снижалась в присутствии поллютантов. Разработана полупогруженная система культивирования гриба, позволяющая многократно (до 32 раз) увеличить продукцию внеклеточной лакказы, и которая может быть непрерывно (до 7 циклов при одном посеве) использована для получения этого фермента.

Ключевые слова

Schizophyllum commune ◆ деградация ◆ полициклические ароматические углеводороды ◆ синтетические красители ◆ поверхностно активные вещества ◆ нефть ◆ эмульгирующая активность ◆ лакказа ◆ Mn-пероксидаза

Поступила в редакцию: 08.09.2025
Принято в печать: 30.09.2025

NOVEL STRAIN OF *SCHIZOPHYLLUM COMMUNE* IS AN ACTIVE DEGRADER OF HAZARDOUS POLLUTANTS AND PRODUCER OF LIGNINOLYTIC ENZYMES

Pozdnyakova N.N.*, Shcherbakova E.V., Dubrovskaya E.V., Grinev V.S., Turkovskaya O.V., Muratova A.Yu.

Institute of Biochemistry and Physiology of Plants and Microorganisms, Saratov Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences (IBPPM RAS), Saratov, Russia

*E-mail: pozdnyakova_n@ibppm.ru

Abstract

The ability of a novel strain of xylotrophic basidiomycete *Schizophyllum commune* IBPPM 541 to utilize a wide variety of contaminants and create extracellular enzymes was studied. Anthracene degraded at 49.5%, phenanthrene at 37%, fluorene at 72%, neonol AF9-12 at 48%, isononylphenol at 61%, and oil at 92%. The synthetic anthraquinone-type dyes Acid Blue 62 and Reactive Blue 4 degraded at 60 and 100%, respectively. The primary metabolites of PAH degradation were identified as 9,10-anthraquinone, phenanthrene-9, 10-quinone, 9-fluorenone, and phthalic acid. The existence of the latter (phthalic acid) suggests that the original compounds may have mineralized. It was demonstrated that the degradation of hydrophobic pollutants was accompanied by the formation of emulsifying substances. Fluorene (23.3%), isononylphenol (28.4%), and oil (29.1%) showed the highest emulsifying activity (E_{48}) values. Under submerged cultivation conditions, extracellular laccase and Mn-peroxidase were found, but their activity was drastically decreased in the presence of pollutants. A semi-submerged fungus cultivation technique was devised that allows for a large (up to 32-fold) increase in extracellular laccase synthesis and may be used to produce this enzyme continuously (up to 7 cycles in one seeding).

Keywords

Schizophyllum commune ◆ degradation ◆ polycyclic aromatic hydrocarbons ◆ synthetic dyes ◆ surfactants ◆ oil ◆ emulsifying activity ◆ laccase ◆ Mn-peroxidase

Received: 08.09.2025
Accepted: 30.09.2025

Цитировать | Cite as

DOI: 10.31163/2618-964X/2025-33 EDN: VRTLEL

ВВЕДЕНИЕ

Грибы, утилизирующие в природе лигнин, являются важнейшим компонентом функционирования и саморегулирования экосистем. Способность к деградации полимерной молекулы лигнина связана у этих грибов с продукцией внеклеточного пула неспецифических окислительных ферментов, включающих лигнин пероксидазу, Mn-пероксидазу, лакказу и ряд вспомогательных ферментов [Janusz *et al.* 2017; Civzele *et al.* 2023]. Высокая каталитическая активность и неспецифичность этих ферментов позволяет лигнинолитическим грибам деградировать и трансформировать широкий спектр поллютантов, включая ароматические амины, фенольные соединения (в том числе хлорфенолы), вторичные алифатические многоатомные спирты, полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), гербициды, пестициды, пластики и т.д. [Wang *et al.* 2018]. Перечисленные свойства делают лигнинолитические грибы перспективными кандидатами для разработки на их основе биотехнологий. Одна из широко обсуждаемых биотехнологий – микоремедиация представляет собой процесс грибной деградации или трансформации опасных органических соединений в менее токсичные и является простым и недорогим методом очистки почвы и поверхности воды, загрязненных промышленными и сельскохозяйственными отходами [Akpasi *et al.* 2023]. Еще одним перспективным направлением разработки технологий является использование грибных ферментов для делигнификации лигноцеллюлозы, для органического синтеза, в пищевой и косметической промышленности, для производства синтетических моющих средств, для деградации поллютантов разной природы, в том числе обесцвечивания сточных вод текстильной промышленности [Kantharaj *et al.* 2017]. Для разработки и эффективного использования «грибных» технологий актуальным является поиск и изучение новых видов и штаммов грибов, обладающих не только высокой деструктивной активностью, но и продуцирующих значительные количества лигнинолитических ферментов.

Одним из кандидатов для разработки подобных технологий является ксилотрофный базидиомицет щелелистник обыкновенный (*Schizophyllum commune*), который встречается повсеместно, колонизирует твердую древесину и продуцирует широкий спектр ферментов, разлагающих и модифицирующих клеточную стенку растения, таких как ксиланазы и эндоглюканазы, которые экспрессируются на широком спектре субстратов. Кроме того, большое количество генов, кодирующих гликозидгидролазы и оксидоредуктазы (такие как лакказы), делает *S. commune* перспективным объектом для разработки различных биотехнологий, таких как получение лигноцеллюлозного этанола, биоконверсия побочных продуктов сельского хозяйства, биодеградация широкого спектра поллютантов [Tovar-Herrera *et al.* 2018]. Кроме эффективной делигнификации растительного сырья [Kumar *et al.* 2015; Asgher *et al.* 2016] была описана деструктивная активность *S. commune* к ряду синтетических красителей [Bhatti *et al.* 2008; Li, Jia 2008; Asgher *et al.* 2013; Choi *et al.* 2020; van Brenk, Wösten 2021; Xu *et al.* 2024] и бисфенолу А [Shin *et al.* 2007]. Показано, что грибы этого вида продуцируют три лигнинолитических фермента: лакказу [Kumar *et al.* 2015; Kirtzel *et al.* 2019], лигнин пероксидазу [Asgher *et al.* 2013] и Mn-пероксидазу [Cheng *et al.* 2007].

Целью представленного исследования было выявление деградативной активности нового штамма *Schizophyllum commune* IBPPM 541 по отношению к ряду поллютантов и продукции внеклеточных лигнинолитических ферментов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использовали *Schizophyllum commune* IBPPM 541 из Коллекции ризосферных микроорганизмов ИБФРМ РАН (http://collection.ibppm.ru, accessed on 23.07.2022). Для поддержания и культивирования гриба использовали богатую среду для базидиомицетов [Bezalel *et al.* 1997]. ПАУ (антрацен, фенантрен или флуорен) и антрахиноновые красители (Acid Blue 62, Reactive Blue 4) вносили до конечной концентрации 50 мг/л, неонол AF9-12 и изононилфенол – 200 мг/л, нефть – 5 г/л. Экспериментальные и контрольные (без поллютанта) колбы засевали 5 мл инокулята гриба (200 мг по сырому весу), культивировали в течение 14 сут при 25°C и перемешивании 130 об/мин на термостатируемом шейкере-инкубаторе New Brunswick™ Excella® E24/E24R Shaker (Eppendorf, Nürtingen, Germany). В конце эксперимента поллютанты (за исключением красителей) экстрагировали трижды по 5 мл хлороформа, экстракты объединяли, упаривали досуха и анализировали как описано далее.

В конце эксперимента при росте с поллютантами оценивали массу сухого мицелия. Для этого культуральную жидкость и мицелий разделяли фильтрованием через предварительно взвешенные бумажные фильтры. Мицелий высушивали до постоянной массы.

В качестве природных ростовых субстратов использовали солому сорго, лузгу подсолнечника и древесные опилки (сосновые, дубовые). Навески природного субстрата (5 г) помещали в колбы, увлажняли 20 мл водопроводной воды, стерилизовали 0.5 ч при 1 атм дважды с интервалом сутки. Подготовленные субстраты засевали внесением 5 мл инокулята гриба (примерно 200 мг по сырому весу). После обрастания субстрата мицелием (5-7 сут) в колбы вносили 20 мл богатой среды для базидиомицетов и культивировали при 25°C в течение 7 сут, затем культуральную жидкость собирали и использовали в качестве грубого ферментного препарата. В колбы снова вносили 20 мл богатой среды для базидиомицетов и культивировали далее в этих же условиях. Полученная система может быть использована для получения ферментов до 7 раз.

Определение активности ферментов проводили по стандартной методике на спектрофотометре Evolution 60 (Thermo Scientific, США) в кварцевых кюветах с длиной оптического пути 1 см. Активность лакказы определяли по образованию продукта окисления АБТС (2,2'-азино-бис(3-этилбензотиазолин-6-сульфонат) при 436 нм согласно Niku-Paavola с соавт. [Niku-Paavola *et al.* 1988], Mn-пероксидазы – продукта окисления 2,6-диметоксифенола при 468 нм [Heinfling *et al.* 1998], лигнин пероксидазы – продукта окисления вератрилового спирта при 310 нм [Tien, Kirk 1984]. За единицу активности принимали количество фермента, катализирующего образование 1 мкмоль продукта реакции в минуту, и выражали в Ед/мл ферментного препарата.

Эмульгирующую активность (продукцию биоПАВ) культуральной жидкости тестировали методом Купера. Культуральную жидкость после выращивания грибов, как с поллютантами, так и без них, смешивали с керосином в соотношении 2:3, встряхивали в течение 20 минут и оставляли при комнатной температуре на 48 часов. Эмульгирующую активность (E_{48}) рассчитывали как отношение объёма эмульсии к общему объёму жидкости и выражали в процентах [Cooper, Goldenberg 1987].

Убыль ПАУ и образование соответствующих метаболитов анализировали методом ВЭЖХ на хроматографе Agilent Technologies 1220 Infinity II LC (Agilent Technology, Waldbronn, Germany) с 254-nm UV-детектором на колонке 4.6×150-mm ZORBAX Eclipse PAH 5-Micron. ПАУ и их метаболиты идентифицировали, сравнивая время удерживания с таковыми стандартных соединений: фенантрен – 9.414 мин, антрацен – 9.922 мин, флуорен – 8.928 мин, 9,10-антрахинон – 7.419 мин, фенантрен-9,10-хинон – 5.145 мин, 9-флуоренон – 6.984 мин, фталевая кислота – 2.823 мин.

Обесцвечивание красителей тестировали спектрофотометрически на спектрофотометре Evolution 60 (Thermo Scientific, США) в кварцевых кюветах с длиной оптического пути 1 см в диапазоне 280-750 нм.

Убыль ПАВ определяли спектрофотометрическим методом с фосфорномолибденовой кислотой согласно методу Клименко с соавт. [Клименко, Панченко 1971]. Разложение ароматического кольца неонола АФ9-12 и изононилфенола определяли спектрофотометрически при длине волны 277 нм [Wang *et al.* 2011]. ИК-спектры были записаны на ИК-фурье спектрометре Nicolet 6700 (Thermo Scientific, USA) в таблетках KBr (FT-IR grade, ≥99%, Sigma-Aldrich) в режиме пропускания в диапазоне 4000-400 $см^{-1}$. Спектральное разрешение – 4 $см^{-1}$, количество сканов пробы и образца сравнения – 32.

Убыль нефти определяли методом адсорбционной хроматографии с последующим гравиметрическим анализом по методике, модифицированной нами ранее [Позднякова *и др.* 2008].

Все варианты описанных экспериментов и анализов имели не менее, чем трёхкратную повторность. Каждый эксперимент повторяли не менее трёх раз. Статистическую обработку полученных результатов проводили с помощью Microsoft Excel 2019. Данные на рисунках представлены как среднее значение по всем повторностям, «±» − стандартное отклонение.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Несмотря на то, что деградативная активность базидиомицетов по отношению разного рода поллютантам хорошо известна, сведений о подобной активности представителей *S. commune* не так много. Так, например, описана способность этого гриба обрастать и трансформировать линейный полиэтилен низкой плотности [Aiduang *et al.* 2025] и деградировать бисфенол А [Shin *et al.* 2007]. Основная часть исследований касается обесцвечивания текстильных красителей [Bhatti *et al.* 2008; Li, Jia 2008; Asgher *et al.* 2013; Choi *et al.* 2020; van Brenk, Wösten 2021; Xu *et al.* 2024].

Использованный в наших исследованиях гриб *S. commune* IBPPM 541был выделен из плодовых тел, собранных на старых пропитанных креозотом шпалах, что позволило нам предположить наличие у него деструктивной активности по отношению к ряду поллютантов.

Интерес к механизмам биодеградации и «судьбе» ПАУ в окружающей среде связан с их широким распространением, устойчивостью к деградации, накоплению в почве и осадках, токсичными, мутагенными и канцерогенными свойствами. В настоящее время на эту тему опубликовано много обзоров, которые рассматривают соответствующие хиноны (9,10-антрахинон, фенантрен-9,10-хинон, бенз[а]антрацен-7,12-хинон и т.д.) как основные метаболиты грибной деградации этих соединений [Ghosal *et al.* 2016]. Известны единичные сообщения о деградации ПАУ представителями *S. commune.* Например, Santos с соавт. показали, что штамм *S. commune* LAMAI 2452 на богатой среде способен кометаболизировать до 41.9% антрацена при стартовой концентрации 100 мг/л [Santos *et al.* 2025].

В наших экспериментах были использованы трех-кольцевые ПАУ: антрацен, фенантрен и флуорен. Наиболее доступным оказался флуорен, убыль которого составила около 72% (рис. 1). Использование ВЭЖХ позволило идентифицировать 9,10-антрахинон, фенантрен-9,10-хинон и 9-флуоренон как основные метаболиты деградации антрацена, фенантрена и флуорена, соответственно. Увеличение времени культивирования до 21 сут приводило к образованию продукта более глубокой деградации ПАУ – фталевой кислоте. Накопление и последующая утилизация этого метаболита, который, как известно, у грибов включается в основной обмен, позволяет предположить минерализацию исследуемых ПАУ *S. commune.*

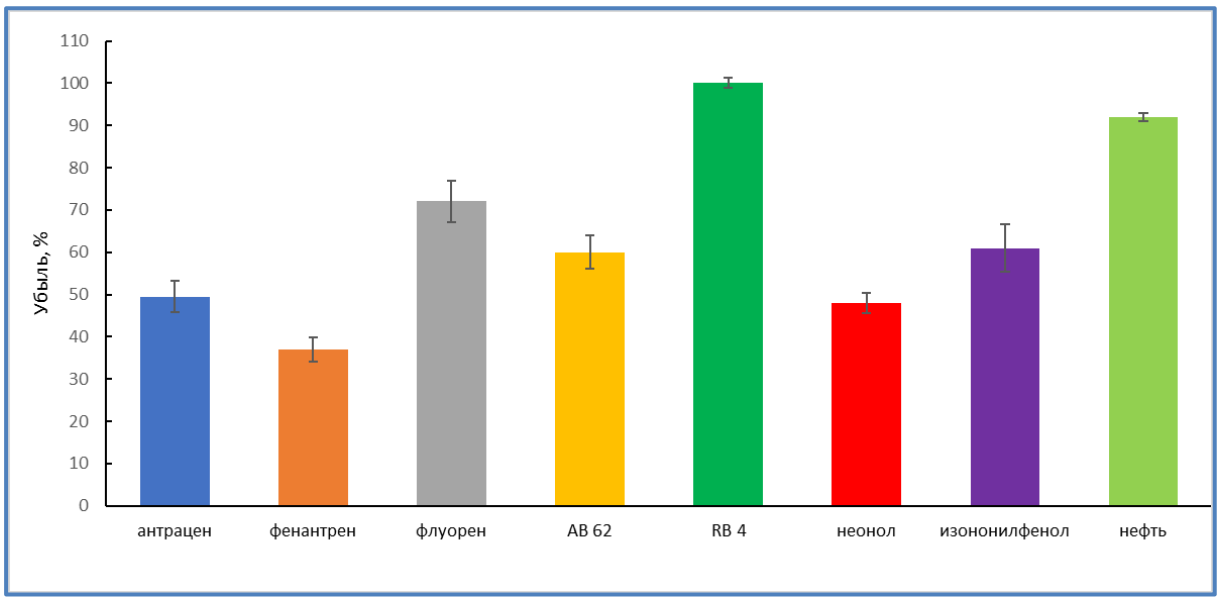

Рис. 1. Деструктивная активность *S. commune* по отношению к поллютантам.

Как уже упоминалось выше, основная часть исследований деградативной активности *S. commune* проводится с текстильными красителями. Так в результате скрининга 124 изолятов *S. commune* способность активно обесцвечивать красители разной природы: трифенилметановые (Crystal Violet, Malachite Green), азо- (Orange G), ксантеновый (Bengal Rose) и антрахиноновый (Remazol Brilliant Blue R) выявлена у 10 штаммов [van Brenk, Wösten 2021]. В другом исследовании способность обесцвечивать азо- (Congo Red), антрахиноновый (Remazol Brilliant Blue R), тиазиновый (Methylene Blue) и трифенилметановый (Crystal Violet) красители выявлена у 75 штаммов *S. commune*. Скорость обесцвечивания отличалась в зависимости от штамма, типа хромофора и условий культивирования [Choi *et al.* 2020]. Показано, что среди ряда исследуемых базидиомицетов *S. commune* наиболее активно (на 96%) обесцвечивал азокраситель (Methyl Red) [Xu *et al.* 2024].

Структура антрахиноновых красителей включает три конденсированных кольца антрахинона, что делает эти красители устойчивыми к биодеградации. Чаще всего для исследования деградации этого типа красителей используют Remazol Brilliant Blue R [Choi *et al.* 2020; van Brenk, Wösten 2021]. В наших исследованиях были использованы два других красителя, содержащих структуру антрахинона: Acid Blue 62, Reactive Blue 4. Оба красителя активно обесцвечивались грибом на 60 и почти 100% соответственно (рис. 1). При этом деградация затрагивала и ароматическую, и хромофорную части молекул, о чем свидетельствует снижение поглощения в ультрафиолетовой области спектра и при 590 нм (в максимуме поглощения этих красителей).

Поверхностно активные вещества (ПАВ), в том числе оксиэтилированные алкилфенолы, характеризуются уникальными свойствами, сочетающими способность снижать поверхностное натяжение жидкостей в широком диапазоне pH и температур. В связи с этим они находят широкое применение в промышленности и быту. Они характеризуются слабой антимикробной активностью, однако их биодеградация происходит с большим трудом, зачастую приводя к образованию устойчивых и токсичных алкилфенолов в качестве конечных продуктов. В наших исследованиях использовался оксиэтилированный нонилфенол – неонол АФ9-12. Группа алкилфенолов, являющаяся продуктами неполной деградации оксиэтилированных нонилфенолов, в нашем исследовании представлена изононилфенолом. Проведенные исследования показали, что оба вещества были доступны для деградации *S.*

commune. Убыль составила 48 и 61% для неонола и изононилфенола соответственно. Анализ ИК-спектров образцов после деградации изононилфенола *S. commune* показал, что интенсивность полос, характерных для деформационных колебаний алкильных фрагментов при 1379-1456 $см^{-1}$, а также колебаний ароматических колец вблизи 1500, 1600 $см^{-1}$, существенно снижается. Интенсивная полоса поглощения при 830 $см^{-1}$, которую относят к колебаниям дизамещенных бензольных колец, полностью исчезает. Одновременно происходит существенное уменьшение интенсивности антисимметричных и симметричных колебаний как алифатических, так и ароматических фрагментов CH в области 2960-2853 $см^{-1}$. Все это свидетельствует о разрушении в значительной степени структуры как ароматических колец, так и алкильных заместителей изононилфенола. Окислительная деструкция ароматических колец изононилфенола подтверждается появлением слабых полос поглощения при 1727-1739 $см^{-1}$, характерных для карбонильных групп карбоксильного фрагмента.

Нефть является одним из наиболее опасных поллютантов. Использование лигнинолитических грибов для микоремедиации нефтезагрязненных почв широко обсуждается [Treu, Falandysz 2017; Dickson *et al.* 2019; Antón-Herrero *et al.* 2023]. В наших исследованиях было показано, что *S. commune* мог использовать нефть как в качестве единственного источника углерода, так и в присутствии косубстрата (глюкозы). Убыль составила 56 и 92% соответственно.

Деградация исследуемых поллютантов сопровождалась образованием пены, что может указывать на продукцию грибом эмульгирующих веществ. Следует отметить, что в контрольном варианте (без поллютантов) и в присутствии гидрофильных соединений образования пены не наблюдалось. Нами определена эмульгирующая активность (E_{48}) среды культивирования после роста *S. commune* в присутствии ПАУ, изононилфенола и нефти (рис. 2). Наибольшие значения E_{48} были получены для флуорена (23.3%), изононилфенола (28.4%) и нефти (29.1%).

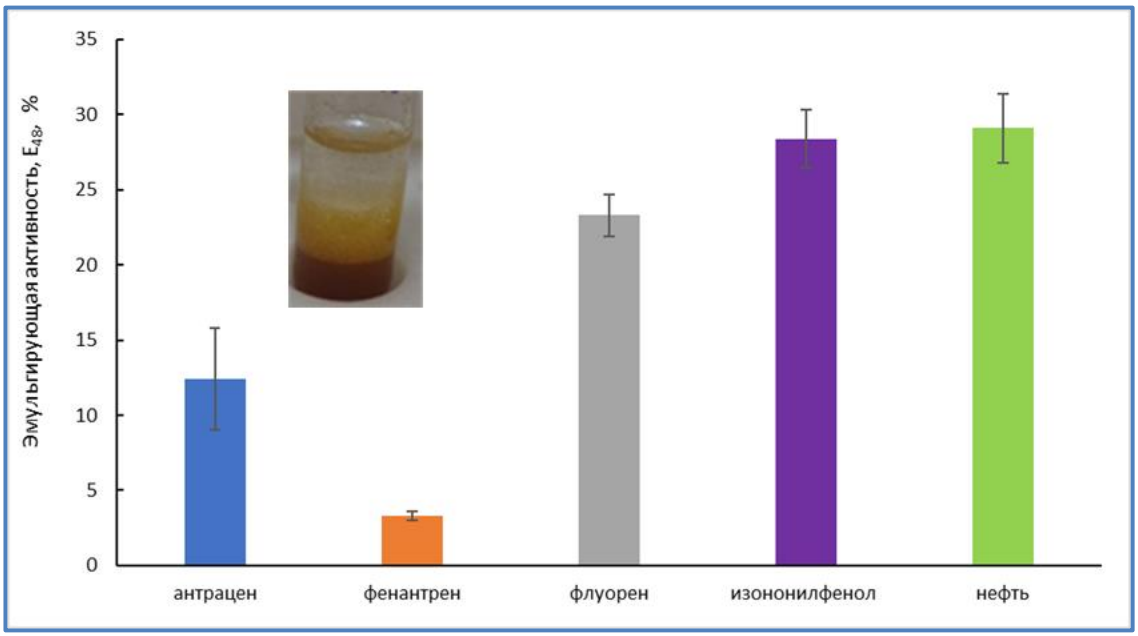

Рис. 2. Эмульгирующая активность среды культивирования после роста *S. commune* в присутствии поллютантов. На фото представлена эмульсия через 48 ч после проведения теста на эмульгирующую активность.

Известно, что *S. commune* является активным продуцентом белка – гидрофобина, позволяющего грибу прикрепляться к твердой поверхности и обладающего эмульгирующей

активностью [Wessels *et al.* 1991; Kenward *et al.* 2020]. Можно предположить, что исследуемый нами штамм *S. commune* продуцирует подобный белок в присутствии гидрофобных поллютантов. Косвенным подтверждением этого предположения является увеличение концентрации внеклеточного белка в присутствии поллютантов, коррелирующее с увеличением E_{48}. Природа обнаруженного эмульгирующего соединения и его роль в деградации поллютантов будет предметом дальнейших исследований.

Деградацию разного рода поллютантов лигнинолитическими грибами связывают с продукцией ими внеклеточных неспецифических ферментов. Как уже упоминалось выше, у представителей *S. commune* обнаруживаются лакказа [Kumar et al. 2015, 2023; Kirtzel et al. 2019; Aiduang et al. 2025], Mn-пероксидаза [Cheng *et al.* 2007; Kumar *et al.* 2023; Aiduang *et al.* 2025] и лигнин пероксидаза [Asgher *et al.* 2013]. При этом какой/какие именно из этих ферментов будут продуцироваться определяется как исследуемым штаммом, так и условиями его культивирования. Например, продукция Mn-пероксидазы в процессе обесцвечивания диазокрасителя (Congo red) была отмечена у *Schizophyllum* sp. F17 [Li, Jia 2008]. Mn-пероксидаза также была основным ферментом, продуцируемым в процессе обесцвечивания триазонового красителя (Cibacron Red) *S. commune* IBL-6 [Bhatti *et al.* 2008]. В процессе обесцвечивания Solar brilliant red 80 этим же грибом основным ферментом была лигнин пероксидаза [Asgher *et al.* 2013].

Известно, что эти ферменты катализируют начальную атаку молекул ПАУ с образованием соответствующих хинонов и окисление красителей различной природы, в том числе антрахиноновых. В наших исследованиях обнаружено, что гриб продуцировал лакказу и Mn-пероксидазу независимо от наличия поллютанта в среде культивирования. Наибольшая активность обоих ферментов обнаружена в контрольном варианте (без поллютантов): лакказа – 26.8 Ед/мл, Mn-пероксидаза – 46.3 Ед/мл (рис. 3). При этом Mn-пероксидаза оказалась более подвержена влиянию поллютантов: в присутствии неонола, изононилфенола и нефти активность этого фермента ингибировалась в 30-100 раз. На активность лакказы присутствие поллютантов влияло в меньшей степени: этот показатель снижался от 1.7 (флуорен, неонол) до 5 (изононилфенол) раз (рис. 3). Активность лигнин пероксидазы выявлялась только в присутствии изононилфенола и была невысокой (12.1 Ед/мл).

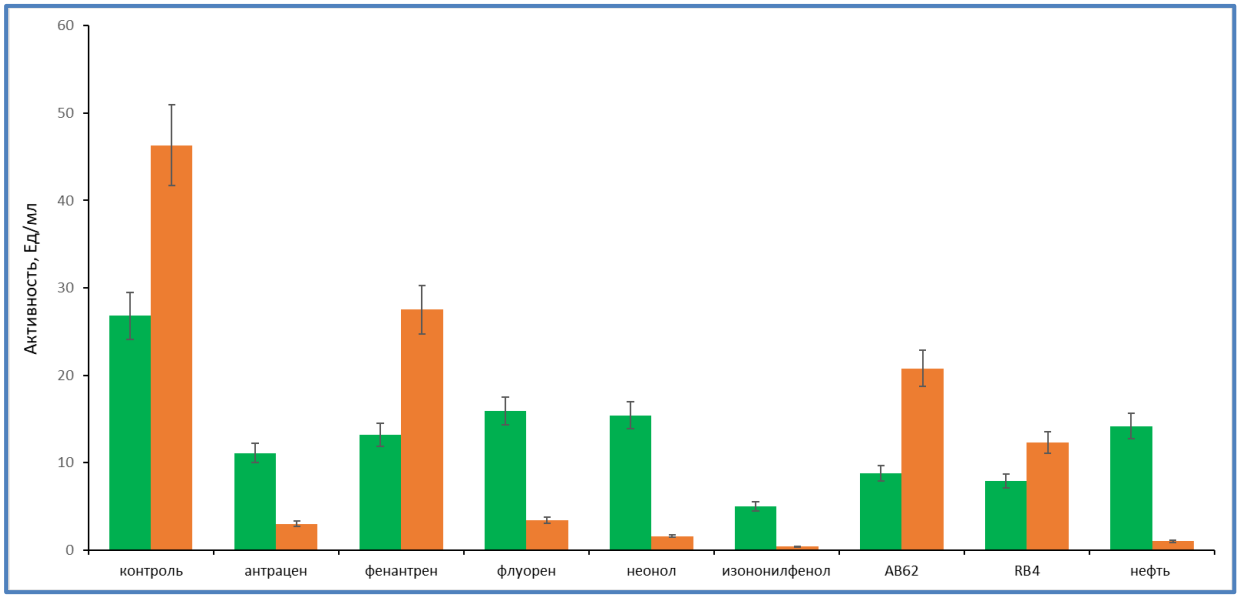

Рис. 3. Продукция лакказы (■) и Mn-пероксидазы (■) после роста *S. commune* в присутствии поллютантов.

Обнаружено, что присутствие поллютантов в среде культивирования не оказывало заметного влияния на прирост биомассы. Масса сухого мицелия в конце эксперимента составляла 450-478±28 мг. Эти данные позволяют нам считать, что наличие поллютанта в среде культивирования снижает продукцию ферментов.

Таким образом, нами показано, что *S. commune* в условиях погруженного культивирования продуцирует в основном два лигнинолитических фермента: лакказу и Mn-пероксидазу, но их активность низкая. Поэтому на следующем этапе исследований нами были подобраны условия культивирования гриба для повышения продукции этих ферментов. В работах других авторов описаны несколько приемов, повышающих продукцию лигнинолитических ферментов. Например, показано, что в условиях лимита по источникам азота гриб продуцировал до 99.3 Ед/мл лакказы и 68.5 Ед/мл Mn-пероксидазы [Kumar *et al.* 2023]. Продукция лакказы в условиях погруженного культивирования *S. commune* NI-07 увеличивалась в 3 раза при иммобилизации гриба на полиуретане [Kumar *et al.* 2015]. Для получения этих ферментов также используют твердофазное культивирование на природных субстратах таких как солома проса, пшеницы и риса [Kumar *et al.* 2022], стебли банана [Irshad *et al.* 2011], сосновые опилки [Cheng *et al.* 2007], рисовая солома [Asgher *et al.* 2016].

В наших исследованиях гриб культивировали на природных субстратах: солома сорго, лузга подсолнечника, сосновые или дубовые опилки. Несмотря не то, что гриб активно обрастал субстраты, активность лакказы по-прежнему была низкой, не превышая 25 Ед/мл, активности Mn-пероксидазы в этих условиях обнаружено не было. Далее нами была разработана полупогруженная система культивирования *S. commune*: гриб культивировали на природном субстрате до полного обрастания, затем в колбы добавляли богатую среду для базидиомицетов и культивировали 7 сут, затем культуральную жидкость собирали и в колбы добавляли свежую порцию этой же среды и культивировали далее. Обнаружено многократное увеличение активности лакказы, в отдельных случаях (сосновые опилки, II цикл) до 32 раз (рис. 4).

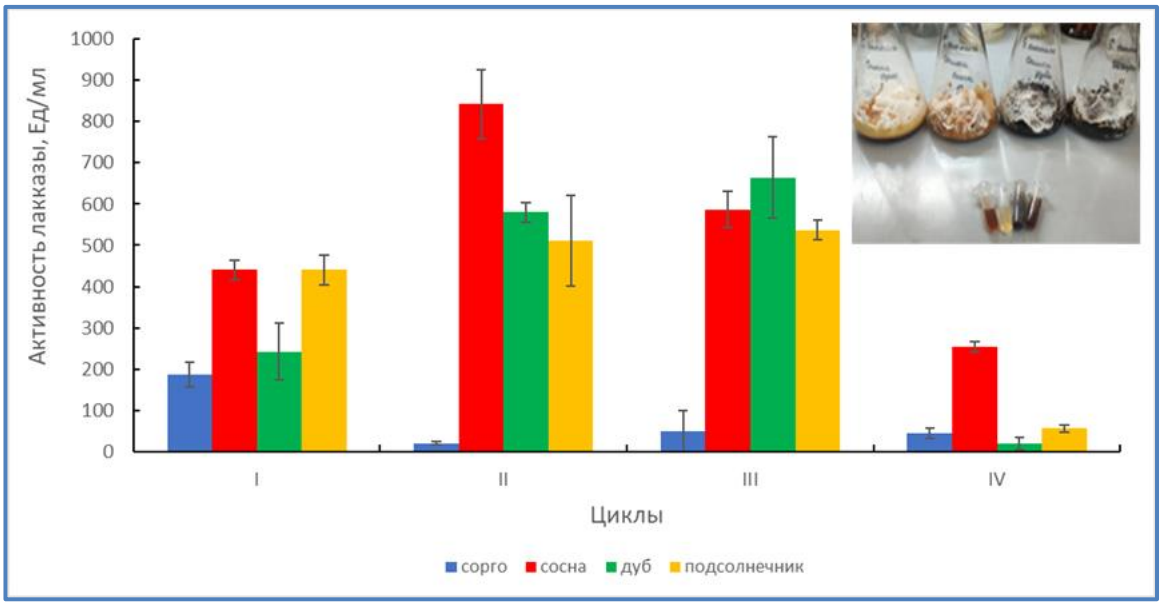

Рис. 4. Продукция лакказы в процессе полупогруженного культивирования *S. commune* на соломе сорго (■), сосновых опилках (■), дубовых опилках (■), лузге подсолнечника (■). На фото представлен рост гриба в полупогруженной культуре (колбы) и культуральная жидкость после роста гриба (пробирки).

Подобная система может быть использована до 7 циклов, что позволяет при однократном посеве непрерывно получать грубый ферментный препарат лакказы. Следует отметить, что культуральная жидкость после роста гриба на сосновых опилках была светло-жёлтого цвета, в отличие от темноокрашенных после роста на других субстратах. Это позволит избежать этапа отделения от продуктов деградации лигнина при последующей очистке лакказы. Культуральная жидкость после роста гриба в условиях полупогруженного культивирования была окрашена, что не позволило достоверно оценить концентрацию белка. На фото (рис.4) видно, что гриб более активно колонизировал солому сорго и сосновые опилки. При этом на сосновых опилках активность лакказы была выше, чем на соломе сорго. Кроме того, на дубовых опилках гриб рос хуже, чем на соломе сорго, однако активность лакказы была выше (рис. 4). По-видимому, в этих случаях происходит увеличение продукции лакказы не связанное с увеличением количества грибной биомассы.

Активности Mn-пероксидазы в условиях полупогруженного культивирования гриба обнаружено не было. Вместе с тем, Irshad с соавт. [Irshad *et al.* 2011] также выявляли только лакказу при культивировании *S. commune* IBL-06 на стеблях банана. Cheng с соавт. [Cheng *et al.* 2007] показали, что *Schizophyllum* sp. F17 при культивировании на сосновых опилках продуцирует в основном Mn-пероксидазу, тогда как остальные ферменты продуцировались в незначительных количествах. Все три фермента (лигнин пероксидаза, Mn-пероксидаза и лакказа) были выявлены при культивировании *S. commune* на рисовой соломе [Asgher *et al.* 2016]. По-видимому, продукция того или иного фермента также определяется не только используемым субстратом, но и штаммом гриба.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенные исследования показали, что новый штамм *Schizophyllum commune* IBPPM 541 является активным деструктором широкого спектра поллютантов, включая ПАУ, синтетические красители антрахинонового типа, неонол АФ9-12, изононилфенол и нефть. В процессе деградации этих поллютантов гриб продуцирует внеклеточные лакказу и Mn-пероксидазу, а также эмульгирующие вещества. Разработана полупогруженная система культивирования гриба на природных субстратах, позволяющая многократно увеличить продукцию лакказы для ее последующей очистки и исследования. Перечисленные свойства делают *S. commune* IBPPM 541 перспективным объектом для биотехнологического использования.

Конфликт интересов (Conflicts of Interest)

У авторов отсутствует конфликт интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Клименко Н.А., Панченко Н.П. (**1971**) Определение НПАВ в сточных водах. *Текстильная промышленность*. (2): 85–86.

Позднякова Н.Н., Никитина В.Е., Турковская О.В. (**2008**) Биоремедиация нефтезагрязнанной почвы комплексом гриб *Pleurotus ostreatus* почвенная микрофлора. *Прикладная биохимия и микробиология*. **44**(1): 69–75.

Aiduang W., Jatuwong K., Ratanapong K., Promjaidee T., Xayyavong O., Hongsanan S., Lumyong S. (**2025**) Breaking Down Linear Low-Density Polyethylene (LLDPE) Using Fungal Mycelium (Part A): A Path Towards Sustainable Waste Management and Its Possible Economic Impacts. *Life*. **15**(5): 755. https://doi.org/10.3390/life15050755

Akpasi S.O., Anekwe I.M.S., Tetteh E.K., Amune U.O., Shoyiga H.O., Mahlangu T.P., Kiambi S.L. (**2023**) Mycoremediation as a Potentially Promising Technology: Current Status and Prospects—A Review. *Applied Sciences*. **13**(8): 4978. https://doi.org/10.3390/app13084978

Antón-Herrero R., Chicca I., García-Delgado C. *et al.* (**2023**) Main Factors Determining the Scale-Up Effectiveness of Mycoremediation for the Decontamination of Aliphatic Hydrocarbons in Soil. *Journal of Fungi*. **9**(12): 1205. https://doi.org/10.3390/jof9121205

Asgher M., Wahab A., Bilal M., Nasir Iqbal H.M. (**2016**) Lignocellulose degradation and production of lignin modifying enzymes by *Schizophyllum commune* IBL-06 in solid-state fermentation. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. **6**: 195–201. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2016.04.003

Asgher M., Yasmeen Q., Iqbal H.M.N. (**2013**) Enhanced decolorization of Solar brilliant red 80 textile dye by an indigenous white rot fungus *Schizophyllum commun*e IBL-06. *Saudi Journal of Biological Sciences*. **20**(4): 347–352. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2013.03.004

Bezalel L., Hadar Y., Cerniglia C.E. (**1997**) Enzymatic Mechanisms Involved in Phenanthrene Degradation by the White Rot Fungus Pleurotus ostreatus. *Applied and Environmental Microbiology*. **63**(7): 2495–2501. https://doi.org/10.1128/aem.63.7.2495-2501.1997

Bhatti H.N., Akram N., Asgher M. (**2008**) Optimization of Culture Conditions for Enhanced Decolorization of Cibacron Red FN-2BL by *Schizophyllum commun*e IBL-6. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. **149**(3): 255–264. https://doi.org/10.1007/s12010-007-8123-x

Cheng X., Jia R., Li P., Tu S., Zhu Q., Tang W., Li X. (**2007**) Purification of a new manganese peroxidase of the white-rot fungus Schizophyllum sp. F17, and decolorization of azo dyes by the enzyme. *Enzyme and Microbial Technology*. **41**(3): 258–264. https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2007.01.020

Choi Y., Nguyen H.T.K., Lee T.S., Kim J.K., Choi J. (**2020**) Genetic Diversity and Dye-Decolorizing Spectrum of *Schizophyllum commune* Population. *Journal of Microbiology and Biotechnology*. **30**(10): 1525–1535. https://doi.org/10.4014/jmb.2006.06049

Civzele A., Stipniece-Jekimova A.A., Mezule L. (**2023**) Fungal Ligninolytic Enzymes and Their Application in Biomass Lignin Pretreatment. *Journal of Fungi*. **9**(7): 780. https://doi.org/10.3390/jof9070780

Cooper D.G., Goldenberg B.G. (**1987**) Surface-Active Agents from Two *Bacillus* Species. *Applied and Environmental Microbiology*. **53**(2): 224–229. https://doi.org/10.1128/aem.53.2.224-229.1987

Dickson U.J., Coffey M., Mortimer R.J.G., Di Bonito M., Ray N. (**2019**) Mycoremediation of petroleum contaminated soils: progress, prospects and perspectives. *Environmental Science: Processes & Impacts*. **21**(9): 1446–1458. https://doi.org/10.1039/C9EM00101H

Ghosal D., Ghosh S., Dutta T.K., Ahn Y. (**2016**) Current State of Knowledge in Microbial Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs): A Review. *Frontiers in Microbiology*. **7** https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01369

Heinfling A., Martínez M.J., Martínez A.T., Bergbauer M., Szewzyk U. (**1998**) Purification and characterization of peroxidases from the dye-decolorizing fungus *Bjerkandera adusta*. *FEMS Microbiology Letters*. **165**(1): 43–50. https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.1998.tb13125.x

Irshad M., Asgher M., Sheikh M.A., Nawaz H. (**2011**) Purification and characterization of laccase produced by *Schyzophylum commune* IBL-06 in solid state culture of banana stalks. *BioResources*. **6**(3): 2861–2873.

Janusz G., Pawlik A., Sulej J., Świderska-Burek U., Jarosz-Wilkołazka A., Paszczyński A. (**2017**) Lignin degradation: microorganisms, enzymes involved, genomes analysis and evolution. *FEMS Microbiology Reviews*. **41**(6): 941–962. https://doi.org/10.1093/femsre/fux049

Kantharaj P., Boobalan B., Sooriamuthu S., Mani R. (**2017**) Lignocellulose Degrading Enzymes from Fungi and Their Industrial Applications. *International Journal of Current Research and Review*. **9**(21): 1–12. https://doi.org/10.7324/IJCRR.2017.9211

Kenward C., Vergunst K.L., Langelaan D.N. (**2020**) Expression, purification, and refolding of diverse class IB hydrophobins. *Protein Expression and Purification*. **176**: 105732. https://doi.org/10.1016/j.pep.2020.105732

Kirtzel J., Scherwietes E.L., Merten D., Krause K., Kothe E. (**2019**) Metal release and sequestration from black slate mediated by a laccase of *Schizophyllum commune*. *Environmental Science and Pollution Research*. **26**(1): 5–13. https://doi.org/10.1007/s11356-018-2568-z

Kumar V.P., Naik C., Sridhar M. (**2015**) Production, purification and characterization of novel laccase produced by *Schizophyllum commune* NI-07 with potential for delignification of crop residues. *Applied Biochemistry and Microbiology*. **51**(4): 432–441. https://doi.org/10.1134/S0003683815040080

Kumar V.P., Sridhar M., Kumar S.A., Bhatta R. (**2023**) Elucidating the role of media nitrogen in augmenting the production of lignin-depolymerizing enzymes by white-rot fungi. *Microbiology Spectrum*. **11**(5) https://doi.org/10.1128/spectrum.01419-23

Kumar V.P., Sridhar M., Rao R.G. (**2022**) Biological depolimerization of lignin using laccase harvested from the autochtonous fungus *Schizophyllum commune* employing various production methods and its efficacy in augmenting in vitro digestibility in ruminants. *Scientific Reports*. 12: 11170. http://doi.org/10.1038/s41598-022-15211-9

Li X., Jia R. (**2008**) Decolorization and biosorption for Congo red by system rice hull- Schizophyllum sp. F17 under solid-state condition in a continuous flow packed-bed bioreactor. *Bioresource Technology*. **99**(15): 6885–6892. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.01.049

Niku-Paavola M.L., Karhunen E., Salola P., Raunio V. (**1988**) Ligninolytic enzymes of the white-rot fungus *Phlebia radiata*. *Biochemical Journal*. **254**(3): 877–884. https://doi.org/10.1042/bj2540877

Santos A. dos, Birolli W.G., Souza F.O., Giovanella P., Cabral L., Santana de Farias G., Pilau E.J., Sette L.D., Rodrigues-Filho E. (**2025**) Leveraging Antarctic psychrotolerant fungi for PAH biodegradation, unveiling key factors influencing the process. *Chemosphere*. **373**: 144138. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144138

Shin E.-H., Choi H.T., Song H.-G. (**2007**) Biodegradation of endocrine-disrupting bisphenol A by white rot fungus *Irpex lacteus*. *Journal of microbiology and biotechnology*. **17**(7): 1147.

Tien M., Kirk T.K. (**1984**) Lignin-degrading enzyme from *Phanerochaete chrysosporium*: Purification, characterization, and catalytic properties of a unique H_2O_2 – requiring oxygenase. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. **81**(8): 2280–2284. https://doi.org/10.1073/pnas.81.8.2280

Tovar-Herrera O.E., Martha-Paz A.M., Pérez-LLano Y., Aranda E., Tacoronte-Morales J.E., Pedroso-Cabrera M.T., Arévalo-Niño K., Folch-Mallol J.L., Batista-García R.A. (**2018**) *Schizophyllum commune*: An unexploited source for lignocellulose degrading enzymes. *MicrobiologyOpen*. **7**(3) https://doi.org/10.1002/mbo3.637

Treu R., Falandysz J. (**2017**) Mycoremediation of hydrocarbons with basidiomycetes—a review. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*. **52**(3): 148–155. https://doi.org/10.1080/03601234.2017.1261536

van Brenk B., Wösten H.A.B. (**2021**) A screening method for decoloration of xenobiotic dyes by fungi. *Journal of Microbiological Methods*. **188**: 106301. https://doi.org/10.1016/j.mimet.2021.106301

Wang P., Nong X.-H., Ge J.-H. (**2011**) Aerobic biodegradation of nonylphenol ethoxylates in shaking-flask test. *Electronic Journal of Biotechnology*. **14**(4) https://doi.org/10.2225/vol14-issue4-fulltext-1

Wang X., Yao B., Su X. (**2018**) Linking Enzymatic Oxidative Degradation of Lignin to Organics Detoxification. *International Journal of Molecular Sciences*. **19**(11): 3373. https://doi.org/10.3390/ijms19113373

Wessels J.G.H., De Vries O.M.H., Asgeirsdottir S.A., Schuren FHJ. (**1991**) Hydrophobin genes involved in formation of aerial hyphae and fruit bodies in *Schizophyllum*. *The Plant Cell*. **3**(8): 793–799. https://doi.org/10.1105/tpc.3.8.793

Xu H., Zheng H.-Y., Liu C.-H. (**2024**) Methyl Red degradation by a subseafloor fungus *Schizophyllum* commune 15R-5-F01: efficiency, pathway, and product toxicity. *3 Biotech*. **14**(9): 202. https://doi.org/10.1007/s13205-024-04037-z

REFERENCES

Klimenko N.A., Panchenko N.P. (**1971**) Determination of non-ionic surfactants in waster waters. *Textile industry*. (2): 85–86. (In Rus.)

Pozdnyakova N.N., Nikitina V.E., Turkovskaya O.V. (**2008**) Bioremediation of oil-polluted soil by the complex fungus *Pleurotus ostreatus* – soil microflora. *Applied Biochemistry and Microbiology*. **44**(1): 69–75. (In Rus.)

Aiduang W., Jatuwong K., Ratanapong K., Promjaidee T., Xayyavong O., Hongsanan S., Lumyong S. (**2025**) Breaking Down Linear Low-Density Polyethylene (LLDPE) Using Fungal Mycelium (Part A): A Path Towards Sustainable Waste Management and Its Possible Economic Impacts. *Life*. **15**(5): 755. https://doi.org/10.3390/life15050755

Akpasi S.O., Anekwe I.M.S., Tetteh E.K., Amune U.O., Shoyiga H.O., Mahlangu T.P., Kiambi S.L. (**2023**) Mycoremediation as a Potentially Promising Technology: Current Status and Prospects—A Review. *Applied Sciences*. **13**(8): 4978. https://doi.org/10.3390/app13084978

Antón-Herrero R., Chicca I., García-Delgado C. *et al.* (**2023**) Main Factors Determining the Scale-Up Effectiveness of Mycoremediation for the Decontamination of Aliphatic Hydrocarbons in Soil. *Journal of Fungi*. **9**(12): 1205. https://doi.org/10.3390/jof9121205

Asgher M., Wahab A., Bilal M., Nasir Iqbal H.M. (**2016**) Lignocellulose degradation and production of lignin modifying enzymes by *Schizophyllum commune* IBL-06 in solid-state fermentation. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. **6**: 195–201. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2016.04.003

Asgher M., Yasmeen Q., Iqbal H.M.N. (**2013**) Enhanced decolorization of Solar brilliant red 80 textile dye by an indigenous white rot fungus *Schizophyllum commune* IBL-06. *Saudi Journal of Biological Sciences*. **20**(4): 347–352. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2013.03.004

Bezalel L., Hadar Y., Cerniglia C.E. (**1997**) Enzymatic Mechanisms Involved in Phenanthrene Degradation by the White Rot Fungus Pleurotus ostreatus. *Applied and Environmental Microbiology*. **63**(7): 2495–2501. https://doi.org/10.1128/aem.63.7.2495-2501.1997

Bhatti H.N., Akram N., Asgher M. (**2008**) Optimization of Culture Conditions for Enhanced Decolorization of Cibacron Red FN-2BL by *Schizophyllum commune* IBL-6. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. **149**(3): 255–264. https://doi.org/10.1007/s12010-007-8123-x

Cheng X., Jia R., Li P., Tu S., Zhu Q., Tang W., Li X. (**2007**) Purification of a new manganese peroxidase of the white-rot fungus Schizophyllum sp. F17, and decolorization of azo dyes by the enzyme. *Enzyme and Microbial Technology*. **41**(3): 258–264. https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2007.01.020

Choi Y., Nguyen H.T.K., Lee T.S., Kim J.K., Choi J. (**2020**) Genetic Diversity and Dye-Decolorizing Spectrum of *Schizophyllum commune* Population. *Journal of Microbiology and Biotechnology*. **30**(10): 1525–1535. https://doi.org/10.4014/jmb.2006.06049

Civzele A., Stipniece-Jekimova A.A., Mezule L. (**2023**) Fungal Ligninolytic Enzymes and Their Application in Biomass Lignin Pretreatment. *Journal of Fungi*. **9**(7): 780. https://doi.org/10.3390/jof9070780

Cooper D.G., Goldenberg B.G. (**1987**) Surface-Active Agents from Two *Bacillus* Species. *Applied and Environmental Microbiology*. **53**(2): 224–229. https://doi.org/10.1128/aem.53.2.224-229.1987

Dickson U.J., Coffey M., Mortimer R.J.G., Di Bonito M., Ray N. (**2019**) Mycoremediation of petroleum contaminated soils: progress, prospects and perspectives. *Environmental Science: Processes & Impacts*. **21**(9): 1446–1458. https://doi.org/10.1039/C9EM00101H

Ghosal D., Ghosh S., Dutta T.K., Ahn Y. (**2016**) Current State of Knowledge in Microbial Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs): A Review. *Frontiers in Microbiology*. **7** https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01369

Heinfling A., Martínez M.J., Martínez A.T., Bergbauer M., Szewzyk U. (**1998**) Purification and characterization of peroxidases from the dye-decolorizing fungus *Bjerkandera adusta*. *FEMS Microbiology Letters*. **165**(1): 43–50. https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.1998.tb13125.x

Irshad M., Asgher M., Sheikh M.A., Nawaz H. (**2011**) Purification and characterization of laccase produced by *Schyzophylum commune* IBL-06 in solid state culture of banana stalks. *BioResources*. **6**(3): 2861–2873.

Janusz G., Pawlik A., Sulej J., Świderska-Burek U., Jarosz-Wilkołazka A., Paszczyński A. (**2017**) Lignin degradation: microorganisms, enzymes involved, genomes analysis and evolution. *FEMS Microbiology Reviews*. **41**(6): 941–962. https://doi.org/10.1093/femsre/fux049

Kantharaj P., Boobalan B., Sooriamuthu S., Mani R. (**2017**) Lignocellulose Degrading Enzymes from Fungi and Their Industrial Applications. *International Journal of Current Research and Review*. **9**(21): 1–12. https://doi.org/10.7324/IJCRR.2017.9211

Kenward C., Vergunst K.L., Langelaan D.N. (**2020**) Expression, purification, and refolding of diverse class IB hydrophobins. *Protein Expression and Purification*. **176**: 105732. https://doi.org/10.1016/j.pep.2020.105732

Kirtzel J., Scherwietes E.L., Merten D., Krause K., Kothe E. (**2019**) Metal release and sequestration from black slate mediated by a laccase of *Schizophyllum commune*. *Environmental Science and Pollution Research*. **26**(1): 5–13. https://doi.org/10.1007/s11356-018-2568-z

Kumar V.P., Naik C., Sridhar M. (**2015**) Production, purification and characterization of novel laccase produced by *Schizophyllum commune* NI-07 with potential for delignification of crop residues. *Applied Biochemistry and Microbiology*. **51**(4): 432–441. https://doi.org/10.1134/S0003683815040080

Kumar V.P., Sridhar M., Kumar S.A., Bhatta R. (**2023**) Elucidating the role of media nitrogen in augmenting the production of lignin-depolymerizing enzymes by white-rot fungi. *Microbiology Spectrum*. **11**(5) https://doi.org/10.1128/spectrum.01419-23

Kumar V.P., Sridhar M., Rao R.G. (**2022**) Biological depolimerization of lignin using laccase harvested from the autochtonous fungus *Schizophyllum commune* employing various production methods and its efficacy in augmenting in vitro digestibility in ruminants. *Scientific Reports*. 12: 11170. http://doi.org/10.1038/s41598-022-15211-9

Li X., Jia R. (**2008**) Decolorization and biosorption for Congo red by system rice hull- Schizophyllum sp. F17 under solid-state condition in a continuous flow packed-bed bioreactor. *Bioresource Technology*. **99**(15): 6885–6892. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.01.049

Niku-Paavola M.L., Karhunen E., Salola P., Raunio V. (**1988**) Ligninolytic enzymes of the white-rot fungus *Phlebia radiata*. *Biochemical Journal*. **254**(3): 877–884. https://doi.org/10.1042/bj2540877

Santos A. dos, Birolli W.G., Souza F.O., Giovanella P., Cabral L., Santana de Farias G., Pilau E.J., Sette L.D., Rodrigues-Filho E. (**2025**) Leveraging Antarctic psychrotolerant fungi for PAH biodegradation, unveiling key factors influencing the process. *Chemosphere*. **373**: 144138. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144138

Shin E.-H., Choi H.T., Song H.-G. (**2007**) Biodegradation of endocrine-disrupting bisphenol A by white rot fungus *Irpex lacteus*. *Journal of microbiology and biotechnology*. **17**(7): 1147.

Tien M., Kirk T.K. (**1984**) Lignin-degrading enzyme from *Phanerochaete chrysosporium*: Purification, characterization, and catalytic properties of a unique H_2O_2 – requiring oxygenase. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. **81**(8): 2280–2284. https://doi.org/10.1073/pnas.81.8.2280

Tovar-Herrera O.E., Martha-Paz A.M., Pérez-LLano Y., Aranda E., Tacoronte-Morales J.E., Pedroso-Cabrera M.T., Arévalo-Niño K., Folch-Mallol J.L., Batista-García R.A. (**2018**) *Schizophyllum commune*: An unexploited source for lignocellulose degrading enzymes. *MicrobiologyOpen*. **7**(3) https://doi.org/10.1002/mbo3.637

Treu R., Falandysz J. (**2017**) Mycoremediation of hydrocarbons with basidiomycetes—a review. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*. **52**(3): 148–155. https://doi.org/10.1080/03601234.2017.1261536

van Brenk B., Wösten H.A.B. (**2021**) A screening method for decoloration of xenobiotic dyes by fungi. *Journal of Microbiological Methods*. **188**: 106301. https://doi.org/10.1016/j.mimet.2021.106301

Wang P., Nong X.-H., Ge J.-H. (**2011**) Aerobic biodegradation of nonylphenol ethoxylates in shaking-flask test. *Electronic Journal of Biotechnology*. **14**(4) https://doi.org/10.2225/vol14-issue4-fulltext-1

Wang X., Yao B., Su X. (**2018**) Linking Enzymatic Oxidative Degradation of Lignin to Organics Detoxification. *International Journal of Molecular Sciences*. **19**(11): 3373. https://doi.org/10.3390/ijms19113373

Wessels J.G.H., De Vries O.M.H., Asgeirsdottir S.A., Schuren FHJ. (**1991**) Hydrophobin genes involved in formation of aerial hyphae and fruit bodies in *Schizophyllum*. *The Plant Cell*. **3**(8): 793–799. https://doi.org/10.1105/tpc.3.8.793

Xu H., Zheng H.-Y., Liu C.-H. (**2024**) Methyl Red degradation by a subseafloor fungus *Schizophyllum* commune 15R-5-F01: efficiency, pathway, and product toxicity. *3 Biotech*. **14**(9): 202. https://doi.org/10.1007/s13205-024-04037-z

Цитировать как

Позднякова Н.Н., Щербакова Е.В., Дубровская Е.В., Гринев В.С., Турковская О.В., Муратова А.Ю. (**2025**). Новый штамм *Schizophyllum commune* – активный деструктор опасных поллютантов и продуцент лигнинолитических ферментов. *Экобиотех*. **8**(4): 462-476. DOI: 10.31163/2618-964X/2025-33 EDN: VRTLEL

Cited as

Pozdnyakova N.N., Shcherbakova E.V., Dubrovskaya E.V., Grinev V.S., Turkovskaya O.V., Muratova A.Yu. (**2025**). Novel strain of *Schizophyllum commune* is an active degrader of hazardous pollutants and producer of ligninolytic enzymes. *Ecobiotech*. **8**(4): 462-476. DOI: 10.31163/2618-964X/2025-33 EDN: VRTLEL

Сведения об авторе/ах

Наталия Николаевна Позднякова, д.б.н., Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов ФИЦ «Саратовский научный центр Российской академии наук», Саратов, Россия. E-mail: pozdnyakova_n@ibppm.ru. SPIN-код: 7987-1377, ORCID: 0000-0002-0505-4628, Scopus Author ID: 6701662285, WoS Research ID: J-8604-2018.

Елизавета Вадимовна Щербакова, Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов ФИЦ «Саратовский научный центр Российской академии наук», Саратов, Россия. E-mail: elizaveta-sch@mail.ru, SPIN-код: 5710-5124.

Екатерина Викторовна Дубровская, к.б.н., Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов ФИЦ «Саратовский научный центр Российской академии наук», Саратов, Россия. E-mail: dubrovskaya_e@ibppm.ru, SPIN-код: 8657-3030, ORCID: 0000-0001-7944-6483, Scopus Author ID: 9132499900, WoS Research ID: K-1001-2018.

Вячеслав Сергеевич Гринёв, д.х.н., Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов ФИЦ «Саратовский научный центр Российской академии наук», Саратов, Россия. E-mail: grinev_v@ibppm.ru, SPIN-код: 7405-3683, ORCID: 0000-0002-0627-6804, Scopus Author ID: 36598427200, WoS ResearcherID: C-5419-2014.

Ольга Викторовна Турковская, д.б.н., Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов ФИЦ «Саратовский научный центр Российской академии наук», Саратов, Россия. E-mail: turkovskaya_o@ibppm.ru, SPIN-код: 4751-2086, ORCID: 0000-0003-4501-4046; Scopus Author ID: 6603954418, WoS Research ID: R-5793-2016.

Анна Юрьевна Муратова, д.б.н., Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов ФИЦ «Саратовский научный центр Российской академии наук», Саратов, Россия. E-mail: muratova_a@ibppm.ru, SPIN-код: 6418-9153, ORCID: 0000-0003-1927-918X, Scopus Author ID: 6601923461, WoS Research ID: O-8854-2015.

Information About the Author(s)

Natalia N. Pozdnyakova, Doctor in Biology, Institute of Biochemistry and Physiology of Plants and Microorganisms, Saratov Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences (IBPPM RAS), Saratov, Russia, E-mail: pozdnyakova_n@ibppm.ru. SPIN-код: 7987-1377, ORCID: 0000-0002-0505-4628, Scopus Author ID: 6701662285, WoS Research ID: J-8604-2018.

Elizaveta V. Shcherbakova, Institute of Biochemistry and Physiology of Plants and Microorganisms, Saratov Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences (IBPPM RAS), Saratov, Russia. E-mail: elizaveta-sch@mail.ru, SPIN-код: 5710-5124.

Ekaterina V. Dubrovskaya, PhD, Institute of Biochemistry and Physiology of Plants and Microorganisms, Saratov Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences (IBPPM RAS), Saratov, Russia. E-mail: dubrovskaya_e@ibppm.ru, SPIN-код: 8657-3030, ORCID: 0000-0001-7944-6483, Scopus Author ID: 9132499900, WoS Research ID: K-1001-2018.

Vyacheslav S. Grinev, Doctor in Chemistry, Institute of Biochemistry and Physiology of Plants and Microorganisms, Saratov Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences (IBPPM RAS), Saratov, Russia. E-mail: grinev_v@ibppm.ru, SPIN-код: 7405-3683, ORCID: 0000-0002-0627-6804, Scopus Author ID: 36598427200, WoS ResearcherID: C-5419-2014.

Olga V. Turkovskaya, Doctor in Biology, Institute of Biochemistry and Physiology of Plants and Microorganisms, Saratov Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences (IBPPM RAS), Saratov, Russia. E-mail: turkovskaya_o@ibppm.ru, SPIN-код: 4751-2086, ORCID: 0000-0003-4501-4046; Scopus Author ID: 6603954418, WoS Research ID: R-5793-2016.

Anna Yu. Muratova, Doctor in Biology, Institute of Biochemistry and Physiology of Plants and Microorganisms, Saratov Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences (IBPPM RAS), Saratov, Russia. E-mail: muratova_a@ibppm.ru, SPIN-код: 6418-9153, ORCID: 0000-0003-1927-918X, Scopus Author ID: 6601923461, WoS Research ID: O-8854-2015.