УДК 677.112:665.947.4:582.284

Д. Д. Захарчук, В. С. Болтовский
Белорусский государственный технологический университет

ИЗМЕНЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ОСНОВНЫХ БИОПОЛИМЕРНЫХ КОМПОНЕНТОВ В КОРОТКОМ ВОЛОКНЕ ЛЬНА-ДОЛГУНЦА ПОД ДЕЙСТВИЕМ БАЗИДИАЛЬНОГО ГРИБА *SPOROTRICHUM PULVERULENTUM* БИМ F-111

В работе представлены результаты исследований по изучению влияния базидиального гриба *Sporotrichum pulverulentum* БИМ F-111 (анаморфная форма *Phanerochaete chrysosporium*) на химический состав короткого волокна льна-долгунца, предоставленного РУПТП «Оршанский льнокомбинат». Исходное содержание альфа-целлюлозы и лигнина в волокне составило 83,97 и 5,88% соответственно. В течение 23-суточного культивирования культуры этого штамма наблюдалось снижение содержания лигнина (до 3,31%), что свидетельствует о делигнифицирующей способности гриба, являющегося продуцентом лигнолитических ферментов. При этом содержание альфа-целлюлозы снижалось до 68,64% под действием целлюлазных ферментов. Анализ физико-химических изменений волокна показал значительное осветление материала, что свидетельствует о разрушении лигнина и изменениях структуры клеточных стенок. С помощью метода инфракрасной спектроскопии показано снижение интенсивности пиков в областях 1735 см$^{-1}$, 1600–1650 см$^{-1}$, 1510–1520 см$^{-1}$, 1220–1240 см$^{-1}$ и 830–850 см$^{-1}$, что также подтверждает деструкцию лигнина. Полученные данные свидетельствуют о перспективности использования штамма базидиального гриба *Sporotrichum pulverulentum* для экологически чистой модификации растительных волокон и выделения из него лигнолитических ферментов.

Ключевые слова: лен-долгунец, волокно, базидиальные грибы, ферменты, лигнин, альфа-целлюлоза.

Для цитирования: Захарчук Д. Д., Болтовский В. С. Изменение содержания основных биополимерных компонентов в коротком волокне льна-долгунца под действием базидиального гриба *Sporotrichum pulverulentum* БИМ F-111 // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2025. № 2 (295). С. 79–86.
DOI: 10.52065/2520-2669-2025-295-11.

D. D. Zakharchuk, V. S. Boltovsky
Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus

CHANGES IN THE CONTENT OF THE MAIN POLYMER COMPONENTS IN THE SHORT FLAX FIBER UNDER THE ACTION OF THE BASIDIAL FUNGUS *SPOROTRICHUM PULVERULENTUM* BIM F-111

This article presents the results of studies on the effect of the basidial fungus *Sporotrichum pulverulentum* BIM F-111 (anamorphic form of *Phanerochaete chrysosporium*) on the chemical composition of a short flax fiber provided by the Orsha Flax Processing Plant. The initial content of alpha-cellulose and lignin in the fiber was 83.97% and 5.88%, respectively. During the 23-day cultivation of the culture of this strain, a decrease in the lignin content (up to 3.31%) was observed, which indicates the delignifying ability of the fungus, which is a producer of lignolytic enzymes, presumably such as laccase, manganese peroxidase and lignin peroxidase. At the same time, the alpha-cellulose content decreased to 68.64% under the action of cellulose enzymes. The analysis of morphological changes in the fiber showed a significant lightening of the material, which indicates the destruction of lignin and changes in the structure of the cell walls. Infrared spectroscopy has shown a decrease in peak intensity in the regions of 1735 cm^{-1}, 1600–1650 cm^{-1}, 1510–1520 cm^{-1}, 1220–1240 cm^{-1} and 830–850 cm^{-1}, which also confirms the destruction of lignin. The data obtained indicate the prospects of using a strain of the basidial fungus *Sporotrichum pulverulentum* for environmentally friendly modification of plant fibers and isolation of lignolytic enzymes from it.

Keywords: flax, fiber, basidial fungi, enzymes, lignin, alpha cellulose.

For citation: Zakharchuk D. D., Boltovsky V. S. Changes in the content of the main polymer components in the short flax fiber under the action of the basidial fungus *Sporotrichum pulverulentum* BIM F-111. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2025, no. 2 (295), pp. 79–86 (In Russian).
DOI: 10.52065/2520-2669-2025-295-11.

Введение. В последние десятилетия наблюдается значительный рост спроса на целлюлозу и продукты ее химической переработки в различных отраслях промышленности, что стимулирует разработку эффективных, экономически целесообразных и экологически безопасных методов ее получения. Традиционно промышленное производство целлюлозы базируется на древесном сырье, преимущественно с использованием сульфатного процесса варки, который широко применяется в Республике Беларусь [1, 2].

Однако в последние годы возрастает интерес к альтернативным источникам производства целлюлозы – однолетним недревесным растениям, обладающим высоким содержанием целлюлозы, таким как волокна льна и конопли. В связи с тем, что в Республике Беларусь конопля не культивируется, представляет интерес короткое льняное волокно, являющееся отходом переработки льна. По химическому составу оно не уступает длинному волокну, которое преимущественно используется в текстильной промышленности, что обусловливает возможность использования короткого волокна в качестве сырья для целлюлозного производства [3].

При получении целлюлозы одной из основных задач является делигнификация растительной биомассы. Традиционно данный процесс осуществляется с применением агрессивных химических реагентов и высоких температур, что сопровождается значительным образованием газообразных выбросов, содержащих токсичные вещества, негативно влияющих на окружающую среду. Одним из перспективных направлений разработки экологически безопасных методов получения целлюлозы является применение биотехнологических подходов, в частности обработка ферментными препаратами или микроорганизмами, продуцирующими ферменты лигнолитического действия. При этом процесс осуществляется в более мягких условиях (невысокие температуры и без применения химически активных реагентов), что минимизирует энергозатраты и снижает негативное воздействие на окружающую среду.

Одним из наиболее эффективных деструкторов лигнина являются базидиальные грибы – продуценты окислительных ферментов, перспективных для биотехнологической переработки растительных отходов, очистки сточных вод и модификации природных материалов [4–10], в том числе получения целлюлозы [11–14].

Основными деструкторами лигнина выступают лакказы – гликозилированные медьсодержащие белки, способные окислять как фенольные, так и неароматические соединения. Продуцирование лакказ характерно для представителей более чем 50 родов базидиальных грибов отдела *Basidiomycetes*, а также некоторых групп аскомицетов и несовершенных грибов [15, 16].

Лакказы обладают способностью к биодеградации лигнина, модификации целлюлозосодержащих материалов и рассматриваются для применения в текстильной, бумажной и деревоперерабатывающей промышленности [12, 17–20] в качестве ключевого элемента концепции «зеленой химии» [21].

Один из наиболее известных продуцентов окислительных ферментов – гриб *Sporotrichum pulverulentum*, относящийся к отделу *Basidiomycota*, классу *Agaricomycetes*, порядку *Polyporales* и семейству *Phanerochaetaceae* [22].

Basidiomycota – второй по численности отдел в царстве грибов, насчитывающий более 40 тыс. видов, характеризуется способностью к деградации сложных органических соединений, таких как лигнин, целлюлоза и гемицеллюлозы [23].

Гриб *Sporotrichum pulverulentum* является анаморфной формой гриба *Phanerochaete chrysosporium* [24], что подтверждается молекулярно-генетическими исследованиями идентичности ДНК обоих организмов [25].

Phanerochaete chrysosporium – гриб, вызывающий белую гниль, известен как активный деструктор лигнина и других компонентов растительных клеточных стенок, что делает его ценным объектом для биотехнологических исследований [13, 26–29]. Он продуцирует три основных типа лигнолитических ферментов: лакказу (LAC), марганцевую пероксидазу (MnP) и лигнинпероксидазу (LiP), которые обеспечивают его высокую эффективность в процессах делигнификации [30].

Особый интерес представляет изучение влияния культуры *Sporotrichum pulverulentum* БИМ F-111 на химический состав короткого волокна льна-долгунца.

Лен-долгунец (Linum usitatissimum) является важным источником натуральных волокон, однако при его переработке для получения целлюлозы и высококачественной альфа-целлюлозы необходимо удаление лигнина. Ферментативный метод делигнификации, реализуемый с использованием *Sporotrichum pulverulentum*, представляет собой экологически чистую и экономически выгодную альтернативу традиционным химическим методам.

Целью данной работы является изучение закономерностей изменения содержания лигнина и альфа-целлюлозы в коротком волокне льна-долгунца под воздействием *Sporotrichum pulverulentum* БИМ F-111.

Основная часть. Эксперимент проводили с использованием короткого волокна льна-долгунца,

предоставленного РУПТП «Оршанский льнокомбинат», предварительно обработанного автоклавированием при температуре 121°С в течение 40 мин, с исходным содержанием альфа-целлюлозы и лигнина 83,97 и 5,88%, соответственно. Культивирование осуществляли в термостате при температуре 25°С и постоянной влажности, обеспечивающих оптимальные условия для роста микроорганизмов на субстрате с внесенной питательной средой и посевным материалом. Биодеструкцию лигнина изучали в динамике через каждые сутки в течение 3 недель до достижения полного визуального отбеливания субстрата, свидетельствующего о завершении активной фазы биологической обработки. По окончании культивирования и высушивания субстрата оценивали изменения структуры волокна и определяли содержание лигнина и альфа-целлюлозы [31]. Погрешность определения составила ±5%.

На рис. 1 приведено изображение базидиального гриба *Sporotrichum pulverulentum* БИМ F-111 на коротком волокне льна под микроскопом Альтами БИО 2 (увеличение ×100).

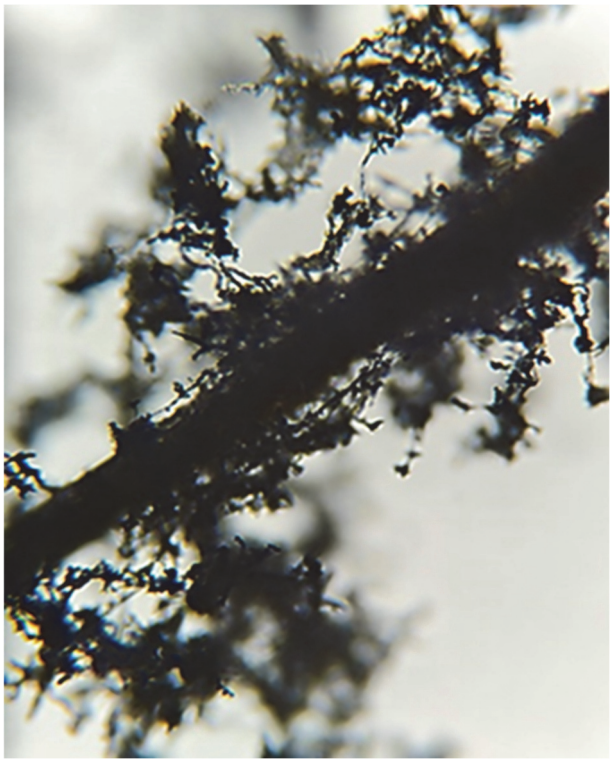
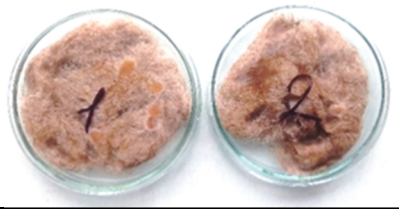
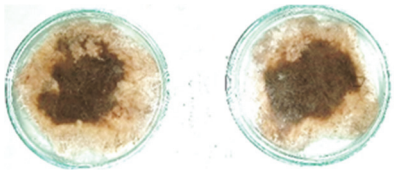


Рис. 1. Гифы базидиального гриба *Sporotrichum pulverulentum* на волокне льна

Sporotrichum pulverulentum имеет тонкие длинные и ветвящиеся гифы, которые образуют септированную гифальную массу, что позволяет эффективно колонизировать субстрат. Колонии базидиальных грибов белой гнили имеют плотную структуру и обычно серовато-белого цвета с гладкой поверхностью на ранних стадиях роста.

В таблице на фотографиях представлена динамика отбеливания льняного волокна от продолжительности обработки (1–26 сут).

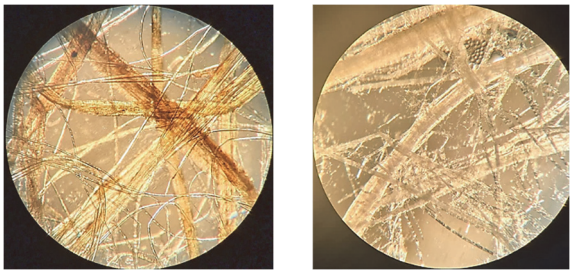
Структурные изменения волокна льна-долгунца при отбелке под действием *Sporotrichum pulverulentum* БИМ F-111 в динамике (в течение 4 недель культивирования)

Продолжительность культивирования	Цвет субстрата
1 сут (после внесения культуральной жидкости)	
5 сут	
12 сут	
19 сут	
26 сут	

После 1 сут культивирования волокно оставалось темным, без видимых изменений, что указывает на начальную стадию адаптации гриба к субстрату. После 5 сут наблюдалась активная колонизация волокна гифами, сопровождающаяся его постепенным осветлением, что свидетельствует о начале процесса биодеструкции. После 12 сут площадь осветления увеличилась, что связано с дальнейшим разрастанием мицелия и усилением воздействия лигнолитических ферментов на субстрат.

После 20 сут эксперимента произошла практически полная отбелка субстрата, что свидетельствует о его делигнификации.

На рис. 2 приведено изображение структуры льняного волокна до и после воздействия *Sporotrichum pulverulentum* (увеличение ×100).



а *б*

Рис. 2. Изменение структуры льняного волокна до (*а*) и после (*б*) воздействия *Sporotrichum pulverulentum*

Как видно из рис. 2, *а* и *б*, до и после воздействия *Sporotrichum pulverulentum* происходит изменение в структуре и цветовых характеристиках. Исходное состояние волокна (рис. 2, *а*) характеризуется темным оттенком, обусловленным естественным содержанием лигнина, который обеспечивает прочность и устойчивость клеточной стенки. Волокно имеет упорядоченную структуру с плотно упакованными фибриллами, параллельной ориентацией и гладкой поверхностью, что указывает на сохранность лигно-углеводного комплекса. После воздействия ферментов (рис. 2, *б*) наблюдается значительное отбеливание, что говорит о деструкции лигнина. Поверхность волокна становится шероховатой, с множественными микротрещинами, участками деструкции и деформацией фибриллярной структуры. Такие изменения могут быть объяснены удалением связующего компонента – лигнина и частичной деградацией целлюлозы, что приводит к потере упорядоченности структуры и увеличению пористости волокн.

На рис. 3 показано изменение содержания лигнина в субстрате в зависимости от продолжительности воздействия базидиального гриба.

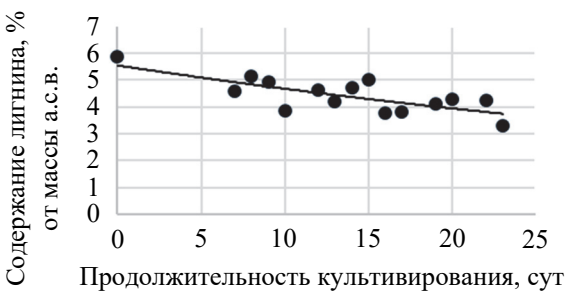


Рис. 3. Изменение содержания лигнина в субстрате в зависимости от продолжительности воздействия базидиального гриба

Как видно из рис. 3, при культивировании *Sporotrichum pulverulentum* в течение 23 сут происходит стабильное снижение содержания лигнина в коротком волокне до 3,31%, что на 43,7% ниже по сравнению с исходным волокном (5,88%).

Изменение содержания альфа-целлюлозы в волокне льна в зависимости от продолжительности воздействия базидиального гриба продемонстрировано на рис. 4.

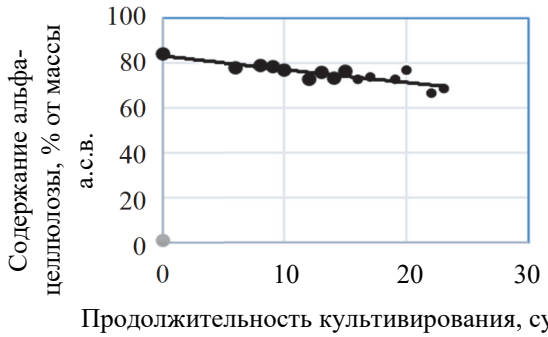


Рис. 4. Изменение содержания альфа-целлюлозы в волокне льна в зависимости от продолжительности воздействия базидиального гриба

После 23 сут культивирования содержание альфа-целлюлозы снижается на 18,2% (с 83,97 до 68,64%). Это можно объяснить тем, что в грибе белой гнили, помимо лигнолитических ферментов, содержатся целлюлазные [32].

Методом инфракрасной спектроскопии образцов на аппарате ИК-Фурье спектрометре NEXUS E.S.P. (Thermo Scientific, США) исходного льняного волокна и после воздействия гриба *Sporotrichum pulverulentum* установлено (рис. 5), что происходит изменение полос поглощения на ИК-спектрах в областях 1735 $см^{-1}$ (карбонильные группы), 1600–1650 $см^{-1}$ (ароматические C=C-связи), 1510–1520 $см^{-1}$ (внутрисистемные колебания ароматических колец), 1220–1240 $см^{-1}$ (C–O-растяжение) и 830–850 $см^{-1}$ (C–H-деформация в бензойной группе). Эти изменения согласуются с количественными данными и указывают на делигнификацию волокон льна под действием гриба.

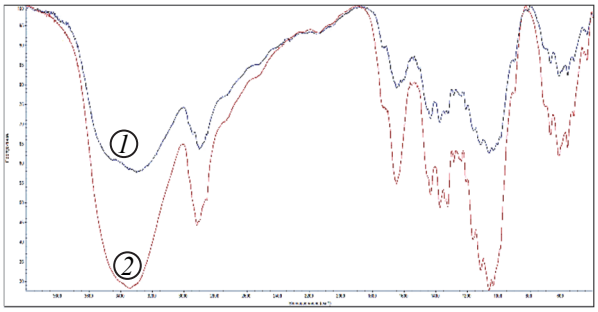


Рис. 5. ИК-спектры образцов:
1-й спектр – исходное льняное волокно; 2-й – волокно после воздействия *Sporotrichum pulverulentum*

Результаты свидетельствуют о возможности использования *Sporotrichum pulverulentum* для разработки экологически чистой модификации растительных волокон.

Заключение. Проведенные исследования показали, что под действием базидиального гриба *Sporotrichum pulverulentum* БИМ F-111 на короткое волокно льна в течение 23 сут содержание лигнина уменьшилось с 5,88 до 3,31% в результате действия лигнолитических ферментов. Одновременно наблюдалось снижение содержания альфа-целлюлозы с 83,97 до 68,64%.

Микроскопический анализ подтвердил значительные изменения структуры волокна льна-долгунца под воздействием гриба. Начальное состояние волокна характеризовалось темным цветом и упорядоченной структурой, обусловленной высоким содержанием лигнина. После воздействия гриба наблюдалось осветление волокна и увеличение его пористости, что свидетельствует о разрушении лигнина. Результаты ИК-спектроскопии также указывают на деструкцию лигнина под действием гриба, что согласуется с количественными данными.

Таким образом, *Sporotrichum pulverulentum* представляет интерес для экологически безопасной и менее энергоемкой делигнификации натуральных волокон, заменяя традиционные химические методы. Однако в связи с длительностью процесса более перспективным является использование выделенных из культуры лигнолитических ферментов.

Результаты могут быть применены в текстильной, целлюлозно-бумажной и деревообрабатывающей промышленности для получения материалов с улучшенными технологическими свойствами.

Список литературы

1. Henriksson G., Germgård U., Lindström M. E. A review on chemical mechanisms of kraft pulping // Nordic Pulp & Paper Research Journal. 2024. Vol. 39, no. 3. P. 297–311. https://doi.org/10.1515/npprj-2023-0015.

2. Mboowa D. A review of the traditional pulping methods and the recent improvements in the pulping processes // Biomass Conv. Bioref. 2021. Vol. 14. P. 1–12. https://doi.org/10.1007/s13399-020-01243-6.

3. Захарчук Д. Д., Болтовский В. С. Комплексная переработка льна с получением инновационной продукции (обзор) // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2024. № 2 (283). С. 77–91.

4. Перспективы использования отходов зерноперерабатывающей промышленности и микроскопических грибов для получения древеснонаполненных композиционных материалов / Е. В. Левин [и др.] // Известия ОГАУ. 2015. № 1 (51). С. 143–144.

5. Enhanced bioremediation of pulp effluents through improved enzymatic treatment strategies: A greener approach / M. Dixit [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021. Vol. 152. P. 111664. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111664.

6. Metagenomic and enzymatic mechanisms underpinning efficient water treatment of 2-ethylhexyl diphenyl phosphate (EHDPP) by the microbial consortium 8-ZY / Y. Yu [et al.] // Water Research. 2025. Vol. 275. P. 123178. DOI:10.1016/j.watres.2025.123178.

7. Голикова В. И., Гордеева Т. А., Алферов С. В. Биокатоды на основе лакказ в биотопливных элементах (мини-обзор) // Известия ТулГУ. Естественные науки. 2020. № 2. С. 3–11.

8. Improving the Quality and Nutritional Value of a Mixture of Sago Pith and Indigofera Leaves Fermented with Rhizopus oligosporus / A. Djulardi [et al.] // WVJ. 2023. Vol. 13, no. 4. P. 580–586. DOI:10.54203/scil.2023.wvj62.

9. Булаев А. Г. Новые направления в развитии биогидрометаллургии // ГИАБ. 2021. № 3–1. С. 56–87. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_31_0_56.

10. Lobregas M. O. S., Buniao E. V. D., Leaño Jr. J. L. Alkali-enzymatic treatment of Bambusa blumeana textile fibers for natural fiber-based textile material production // Industrial Crops and Products. 2023. Vol. 194. P. 116268. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116268.

11. Биодеградация лигнина соломы культурой гриба *Schizophyllum commune*, выделенной с поверхности дерева / А. Б. Алтекей [и др.] // Микробиология және вирусология. 2023. № 1 (40). С. 127–138. DOI:10.53729/MV-AS.2023.01.08.

12. Александрова Г. П., Медведева С. А. Биоотбелка сульфатной целлюлозы оксидазными ферментами гриба *Daedaleopsis confragosa* // Химия растительного сырья. 1999, № 2. С. 81–84.

13. Казарцев И. А. Изменения химического состава древесины под действием лигнинразрушающего гриба *Phanerochaete sanguinea* // Санкт-Петербургская государственная лесотехническая академия. 2009. № 188. С. 253–259.

14. Болотова К. С., Новожилов Е. В. Применение ферментных технологий для повышения экологической безопасности целлюлозно-бумажного производства // Химия растительного сырья. 2015. № 3. С. 5–23.

15. Белова Н. В., Псурцева Н. В., Кияшко А. А. Факторы регуляции лакказной активности базидиомицетов // Микология и фитопатология. 2008. Т. 42, вып. 6. С. 505–515.

16. Baldrian P. Fungal laccases: occurrence and properties // FEMS Microbiology Reviews. 2006. Vol. 30, no. 2. P. 215–242. DOI: 10.1111/j.1574-4976.2005.00010.x.

17. Шубаков А. А., Михайлова Е. А., Мартынов В. В. Биоконверсия целлюлозосодержащего сырья. Ферментативный гидролиз целлюлозы (обзор литературы) // Известия Коми НЦ УрО РАН. 2022. № 4 (56). С. 27–37.

18. Role of laccase in the pulp and paper industry / A. Hussain [et al.] // Nanotechnology in paper and wood engineering. 2022. P. 35–60. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85835-9.00006-4.

19. Apriyanti D., Matsushita Y., Nakagawa-Izumi A. Comparison of Pulp Properties and Bleachability between *Acacia crassicarpa* and *Eucalyptus grandis* × *pellita* hybrid Kraft Pulps // Japan tappi journal. 2025. Vol. 79, no. 2. P. 154–162.

20. Depolymerization of Lignin and Mediators for Laccase / A. M. S. Hossain [et al.] // Depolymerization: Concept, Progress, and Challenges. 2025. Vol. 2, Advances and Breakthroughs. P. 69–90. DOI:10.1021/bk-2025-1500.ch005.

21. Anastas P., Eghbali N. Green chemistry: principles and practice // Chemical Society Reviews. 2010. Vol. 39. P. 301–312. DOI: 10.1039/b918763b.

22. Biodecomposition with *Phanerochaete chrysosporium*: A review / D. Konan [et al.] // AIMS Microbiol. 2024. Vol. 10 (4). P.1068–1101. doi: 10.3934/microbiol.2024046. eCollection 2024.

23. Kersten P., Cullen D. Extracellular oxidative systems of the lignin-degrading basidiomycete *Phanerochaete chrysosporium* // Fungal Genetics and Biology. 2007. Vol. 44 (2). P. 77–87. DOI: 10.1016/j.fgb.2006.07.007.

24. Harold H., Burdsall Jr. The Taxonomy of *Sporotrichum pruinosum* and *Sporotrichum pulverulentum* / *Phanerochaete chrysosporium* // Mycologia. 1981. Vol. 73, no. 4. P. 675–680. https://doi.org/10.2307/3759493 https://www.jstor.org/stable/3759493.

25. Raeder U., Broda P. Comparison of the lignin-degrading white rot fungi *Phanerochaete chrysosporium* and *Sporotrichum pulverulentum* at the DNA level // Curr Genet. 1984. Vol. 8 (7). P. 499–506. DOI: 10.1007/BF00410436.

26. Kersten P., Cullen D. Extracellular oxidative systems of the lignin-degrading Basidiomycete *Phanerochaete chrysosporium* // Fungal Genetics and Biology. 2007. Vol. 44 (2). P. 77–87. DOI:10.1016/j.fgb.2006.07.007.

27. Leonowicz A. Biodegradation of Lignin by White Rot Fungi // Fungal Genetics and Biology. 1999. Vol. 27 (2–3). P. 175–185. DOI:10.1006/fgbi.1999.1150.

28. Activities of ligninolytic enzymes of the white rot fungus*, Phanerochaete chrysosporium* and its recalcitrant substance degradability / F. Wu [et al.] // Water Science and Technology. 1996. Vol. 34, no. 7–8. P. 69–78. https://doi.org/10.1016/S0273-1223(96)00726-3.

29. Aly A. B. A., Shanmugaraj B., Ramalingam S. Industrial applications of *Phanerochaete chrysosporium* lignin-degrading enzymes: current status, production challenges, and future directions // World J Microbiol Biotechnol. 2025.Vol. 41, no. 171. https://doi.org/10.1007/s11274-025-04388-6.

30. Singh D., Chen S. The white-rot fungus *Phanerochaete chrysosporium*: conditions for the production of lignin-degrading enzymes // Appl Microbiol Biotechnol. 2008. Vol. 81. P. 399–417. DOI: 10.1007/s00253-008-1706-9.

31. Оболенская А. В., Ельницкая З. П., Леонович А. А. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы. Минск: Экология, 1991. 320 с.

32. Effect of Different Inducer Sources on Cellulase Enzyme Production by White-Rot Basidiomycetes *Pleurotus ostreatus* and *Phanerochaete chrysosporium* under Submerged Fermentation / O. Datsomor [et al.] // Fermentation. 2022. Vol. 8. P. 561. https://doi.org/10.3390/fermentation8100561.

References

1. Henriksson G., Germgård U., Lindström M. E. A review on chemical mechanisms of kraft pulping. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, 2024, vol. 39, no. 3, pp. 297–311. DOI: https://doi.org/10.1515/npprj-2023-0015.

2. Mboowa D. A review of the traditional pulping methods and the recent improvements in the pulping processes. *Biomass Conv. Bioref*, 2021, vol. 14, pp. 1–12. https://doi.org/10.1007/s13399-020-01243-6.

3. Zaharchuk D. D., Boltovskij V. S. Promising areas of complex flax processing with the production of innovative products (review). *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2024, no. 2 (283): Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology, pp. 77–91 (In Russian).

4. Levin E. V., Sagitov R. F., Fedorov E. A., Alyamov I. D., Akhmetova Z. A. Prospects for the use of grain processing industry waste and microscopic fungi for the production of wood-filled composite materials. *Izvestiya OGAU* [Izvestiya of Orenburg State Agrarian University], 2015, vol. 1 (51), pp. 143–144 (In Russian).

5. Dixit M., Gupta G. K., Usmani Z., Sharma M., Shukla P. Enhanced bioremediation of pulp effluents through improved enzymatic treatment strategies: a greener approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, vol. 152. P. 111664. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111664.

6. Yu Y., Huang W., Tang S., Xiang Y., Yuan L., Zhu X., Yin H., Dang Z., Niu J. Metagenomic and enzymatic mechanisms underpinning efficient water treatment of 2-ethylhexyl diphenyl phos phate (EHDPP) by the microbial consortium 8-ZY. *Water Research*, 2025, vol. 275. P. 123178. DOI: 10.1016/j.watres.2025.123178.

7. Golikova V. I., Gordeeva T. A., Alferov S. V. Bio-cathodes based on laccases in biofuel cells: a mini-review. *Izvestiya TulGU. Estestvennyye nauki* [Izvestiya of Tula State University. Natural Sciences], 2020, vol. 2 (2), pp. 3–11 (In Russian).

8. Djulardi A., Mirnawati M., Ciptaan G., Kurnia R., Srifani A., Adriani L., Makmur M. Improving the Quality and Nutritional Value of a Mixture of Sago Pith and Indigofera Leaves Fermented with *Rhizopus oligosporus*. *WVJ*, 2023, vol. 13, no. 4, pp. 580–586. DOI: 10.5203/scil. 2023.wvj62.

9. Bulaev A. G. New directions in the development of biohydrometallurgy. *GIAB* [Mining Infological and Analytical Bulletin], 2021, no. 3–1, pp. 56–87. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_31_0_56 (In Russian).

10. Lobregas M. O. S., Buniao E. V. D., Leaño Jr. J. L. Alkali-enzymatic treatment of *Bambusa blumeana* textile fibers for natural fiber-based textile material production. *Industrial Crops and Products,* 2023, vol. 194. P. 116268. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116268.

11. Altekey A. B., Saparbekova A. A., Oleinikova E. A., Seytmagzimov A. A., Mambayeva A. Sh. Biodegradation of wheat straw lignin by the fungus *Schizophyllum commune* isolated from tree surface. *Mikrobiologiya i virusologiya* [Microbiology and Virology], 2023, no. 1 (40), pp. 127–138. DOI: 10.53729/MV-AS.2023.01.08 (In Russian).

12. Aleksandrova G. P., Medvedeva S. A. Bio-bleaching of sulfate pulp using oxidase enzymes from the fungus *Daedaleopsis confragosa*. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant raw materials], 1999, no. 2, pp. 81–84 (In Russian).

13. Kazartsev I. A. Changes in the chemical composition of wood under the influence of the lignin-degrading fungus *Phanerochaete sanguinea*. *Sankt-Peterburgskaya gosudarstvennaya lesotekhnicheskaya akademiya* [St. Petersburg State Forestry Academy], 2009, no. 188, pp. 253–259 (In Russian).

14. Bolotova K. S., Novozhilov E. V. Application of enzyme technologies to improve environmental safety in pulp and paper production. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant raw materials], 2015, no. 3, pp. 5–23 (In Russian).

15. Belova N. V., Psurtseva N. V., Kiyashko A. A. Regulation factors of laccase activity in *Basidiomycetes*. *Mikologiya i fitopatologiya* [Mycology and phytopathology], 2008, vol. 42, issue 6, pp. 505–515 (In Russian).

16. Baldrian P. Fungal laccases: occurrence and properties. *FEMS Microbiology Reviews*, 2006, vol. 30, no. 2, pp. 215–242. DOI: 10.1111/j.1574-4976.2005.00010.x.

17. Shubakov A. A., Mikhailova E. A., Martynov V. V. Bioconversion of cellulose-containing raw materials: enzymatic hydrolysis of cellulose (literature review). *Izvestiya Komi NTs UrO RAN* [Proceedings of the Komi Scientific Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences], 2022, no. 4 (56), pp. 27–37 (In Russian).

18. Hussain A., Bilal M., Rafeeq H., Jabeen Z., Afsheen N., Sher F., Kumar V., Bharagava R. N., Ferreira L. F. R., Iqbal H. M. N. Role of laccase in the pulp and paper industry. *Nanotechnology in Paper and Wood Engineering*, 2022, pp. 35–60. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85835-9.00006-4.

19. Apriyanti D., Matsushita Y., Nakagawa-Izumi A. Comparison of pulp properties and bleachability between *Acacia crassicarpa* and *Eucalyptus grandis* × *pellita* hybrid kraft pulps. *Japan Tappi Journal*, 2025, vol. 79, no. 2, pp. 154–162.

20. Hossain A. M. S., et al. Depolymerization of lignin and mediators for laccase. *Depolymerization: Concept, Progress, and Challenges*, 2025, vol. 2, Advances and Breakthroughs, 2025, pp. 69–90. DOI: 10.1021/bk-2025-1500.ch005.

21. Anastas P., Eghbali N. Green chemistry: principles and practice. *Chemical Society Reviews*, 2010, vol. 39, pp. 301–312. DOI: 10.1039/b918763b.

22. Konan D., Ndao A., Koffi E., Elkoun S., Robert M., Rodrigue D., Adjallé K. Biodecomposition with *Phanerochaete chrysosporium*: a review. *AIMS Microbiology*, 2024, vol. 10, no. 4, pp. 1068–1101. DOI: 10.3934/microbiol.2024046. eCollection 2024.

23. Kersten P., Cullen D. Extracellular oxidative systems of the lignin-degrading basidiomycete *Phanerochaete chrysosporium*. *Fungal Genetics and Biology*, 2007, vol. 44 (2), pp. 77–87. DOI: 10.1016/j.fgb.2006.07.007.

24. Harold H. Burdsall, Jr. The Taxonomy of *Sporotrichum pruinosum* and *Sporotrichum pulverulentum / Phanerochaete chrysosporium*. *Mycologia*, 1981, vol. 73, no. 4, pp. 675–680. https://doi.org/10.2307/3759493. https://www.jstor.org/stable/3759493.

25. Raeder U., Broda P. Comparison of the lignin-degrading white rot fungi *Phanerochaete chrysosporium* and *Sporotrichum pulverulentum* at the DNA level. *Curr Genet*, 1984, vol. 8 (7), pp. 499–506. DOI: 10.1007/BF00410436.

26. Kersten P., Cullen D. Extracellular oxidative systems of the lignin-degrading *Basidiomycete Phanerochaete chrysosporium*. *Fungal Genetics and Biology*, 2007, vol. 44 (2), pp. 77–87. DOI: 10.1016/j.fgb.2006.07.007.

27. Leonowicz A. Biodegradation of Lignin by White Rot Fungi. *Fungal Genetics and Biology*, 1999, vol. 27 (2–3), pp. 175–185. DOI:10.1006/fgbi.1999.1150.

28. Wu F., Ozaki H., Terashima Y., Imada T., Ohkouchi Y. Activities of ligninolytic enzymes of the white rot fungus, *Phanerochaete chrysosporium* and its recalcitrant substance degradability. *Water Science and Technology*, 1996, vol. 34, no. 7–8, pp. 69–78. https://doi.org/10.1016/S0273-1223(96)00726-329.

29. Aly A. B. A., Shanmugaraj B., Ramalingam S. Industrial applications of *Phanerochaete chrysosporium* lignin-degrading enzymes: current status, production challenges, and future directions. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2025, vol. 41, no. 171. https://doi.org/10.1007/s11274-025-04388-6.

30. Singh D., Chen S. The white-rot fungus *Phanerochaete chrysosporium*: conditions for the production of lignin-degrading enzymes. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2008, vol. 81, pp. 399–417. DOI: 10.1007/s00253-008-1706-9.

31. Obolenskaia A. V., Elnitskaia Z. P., Leonovich A. A. *Laboratornyye raboty po khimii drevesiny i tsellyulozy* [Laboratory work on wood and pulp chemistry]. Minsk, Ecologya Publ., 1991. 320 p. (In Russian).

32. Datsomor O., Yan Q., Opoku-Mensah L., Zhao G., Miao L. Effect of different inducer sources on cellulase enzyme production by white-rot *Basidiomycetes Pleurotus ostreatus* and *Phanerochaete chrysosporium* under submerged fermentation. *Fermentation*, 2022, vol. 8. P. 561. https://doi.org/10.3-390/fermentation8100561.

Информация об авторах

Захарчук Дарья Дмитриевна – аспирант кафедры химической переработки древесины. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail:bekzarichya@gmail.com

Болтовский Валерий Станиславович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры химической переработки древесины. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: v-boltovsky@rambler.ru

Information about the authors

Zakharchuk Daria Dmitriyevna – PhD student, the Department of Chemical Processing of Wood. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bekzarichya@gmail.com

Boltovsky Valery Stanislavovich – DSc (Engineering), Professor, Professor, the Department of Chemical Processing of Wood. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: v-boltovsky@rambler.ru

Поступила 16.06.2025