

УДК 663.11:582.28

ДИНАМИКА ДЕСТРУКЦИИ ОСНОВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ЛИГНОЦЕЛЛЮЛОЗНОГО КОМПЛЕКСА РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ МИЦЕЛИЯ ГРИБА *PLEUROTUS OSTREATUS*

© *О.Г. Пleshkova¹, Т.В. Теплякова², Д.Н. Щербаков^{2,3}, П.В. Колосов^{3,4}, Н.Г. Базарнова³*

¹ АО «Генериум», п. Вольгинский, Владимирская область, 601125 (Россия),
e-mail: o.pleshkova@generium.ru

² ФБУН ГНЦ ВБ «Вектор» Роспотребнадзора, р.п. Кольцово, Новосибирская
область, 630559 (Россия)

³ Алтайский государственный университет, пр. Ленина, 61, Барнаул,
656049 (Россия)

⁴ ООО «ВакБиоЛаб», ул. Технопарковая, 1/26, р.п. Кольцово, Новосибирская
область, 630559 (Россия)

В статье приведены результаты исследований по биодеструкции компонентов лигноцеллюлозных субстратов при культивировании мицелия грибов *Pleurotus ostreatus*. Цель исследования – изучение влияния базидиальных грибов *P. ostreatus* на ароматическую и углеводную составляющую растительного сырья. Для достижения этой цели в работе исследован компонентный состав растительного сырья на содержание лигнина, целлюлозы, легко- и трудногидролизуемых полисахаридов. Анализ структурных компонентов проводился по общепринятым в химии растительного сырья методикам в пересчете на абсолютно сухое сырье.

Химический анализ субстратов показал, что в первую очередь биоконверсии подвергаются трудногидролизуемые полисахариды растительного сырья (для соломы пшеницы – на 15.25%, для лузги подсолнечника – на 10.55%, для осины древесины – на 17.54%). На основании этих данных можно предположить, что на однолетних растениях лигнин полностью не деструктурирует, вследствие чего скорость роста грибов увеличивается на 2.5%.

Ключевые слова: лигноцеллюлозное сырье, биоконверсия, базидиальные грибы, *Pleurotus ostreatus*, лигнин, целлюлоза, полисахариды, лузга, солома, опилки древесины.

Введение

Проблема утилизации отходов сельского хозяйства и деревоперерабатывающей промышленности в настоящее время является важной экологической проблемой. Россия располагает большими (около 25% мировых запасов), ежегодно восполняемыми видами лигноцеллюлозного сырья, и 40% из них находится в Сибири [1]. Большинство российских предприятий, работающих в сфере сельского хозяйства и деревоперерабатывающей промышленности, сталкиваются с проблемой утилизации отходов. Ежегодно образуется огромное количество отходов древесины [2], соломы зерновых культур [3], стеблей, шелухи семян, костры лубяных культур [4–7], которые зачастую не используются, сжигаются или гниют в отвалах.

Пleshkova Ольга Геннадьевна – технолог отдела молекулярной биологии и биохимии, e-mail: plolga93@mail.ru, o.pleshkova@generium.ru

Теплякова Тамара Владимировна – доктор биологических наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела биофизики и экологических исследований, e-mail: teplyakova@vector.nsc.ru

Щербаков Дмитрий Николаевич – кандидат биологических наук, заведующий лабораторией, e-mail: scherbakov_dn@vector.nsc.ru

Колосов Петр Владимирович – кандидат химических наук, старший научный сотрудник, e-mail: petro.kolosov@gmail.com

Базарнова Наталья Григорьевна – доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой органической химии, e-mail: bazarnova@chem.asu.ru

столкуются с проблемой утилизации отходов. Ежегодно образуется огромное количество отходов древесины [2], соломы зерновых культур [3], стеблей, шелухи семян, костры лубяных культур [4–7], которые зачастую не используются, сжигаются или гниют в отвалах.

Одним из самых простых и доступных способов утилизации растительных отходов является биоконверсия с использованием высших грибов – базидиомицетов. Преимуществом биоконверсии как способа утилизации является то, что биохимическому или микробиологическому воздействию

* Автор, с которым следует вести переписку.

подвергается самый устойчивый биополимер – лигнин. Лигнин – сложное полимерное соединение ароматической природы, содержащееся практически во всех жизненных формах растений [8].

Грибы рода *Pleurotus* являются активными деструкторами лигноцеллюлозного комплекса субстратов [9–12]. В процессе биодеструкции эти грибы выделяют комплекс ферментов, наиболее важными из которых являются гидролитические и окислительно-восстановительные, способные гидролизовать полисахариды и деструктировать лигнин [13]. Во многом на степень деградации компонентов растительного сырья влияет тип субстрата, вид и штамм грибов, а также продолжительность культивирования и количество снимаемых волн плодоношения [9].

Цель исследования – изучить влияние базидиальных грибов на ароматическую и углеводную составляющую растительного сырья под воздействием мицелия гриба *P. ostreatus*. Для достижения этой цели в работе провели компонентный анализ исходного растительного сырья и сырья после воздействия мицелием базидиального гриба.

Экспериментальная часть

Растительное сырье. В работе в качестве субстрата использовали околоплодную оболочку подсолнечника (лузгу), опилки древесины осины и солому пшеницы. Сырье было предварительно высушено до воздушно-сухого состояния при комнатной температуре.

В сырье определяли влажность, а также проводили анализ содержания: лигнина, целлюлозы, легко- и трудногидролизуемых полисахаридов. Количественный анализ структурных компонентов растительного сырья проводился по общепринятым в химии растительного сырья методам [14] в пересчете на абсолютно сухое сырье. Все определения проводили в трех повторностях.

Культивирование грибов. Культивирование мицелия грибов в чашках Петри осуществляли на питательной среде, состоящей из овсяного отвара и агара (15 г/л). Перед засевом мицелия питательные среды стерилизовали при 121 °С, (1,2 атм.) в течение 30 мин в автоклаве фирмы «Тюмень-МедиКо» ВК 75-01 (Россия).

Для получения посевного мицелия *P. ostreatus* мицелий культивировали на зерне пшеницы в течение 14 суток в термостате (ТСО-1/80 СПУ мод. 1005, «Смоленское СКТБ», Россия) при температуре +20...+22 °С. Стерилизацию зерна осуществляли при 121 °С, (1,2 атм.) в течение 45 мин.

Солому измельчали до отрезков длиной 2–5 см. Растительные субстраты стерилизовали в пластиковых ведрах объемом 500 мл при 121 °С, (1,2 атм.) в течение 45 мин.

В охлажденный до комнатной температуры растительный субстрат (влажность – 70–75%) вносили готовый посевной мицелий из колбы Эрленмейера в объеме 5% от общей массы субстрата и перемешивали в стерильных условиях ламинар-бокса [15]. Подготовленные образцы помещали в термостат при температуре 16±0,5 °С до полного зарастания субстрата мицелием. Пробы отбирали через 7, 15, 30, 45, 60 и 90 дней, которые анализировали на содержание лигнина, целлюлозы, легко- и трудногидролизуемых полисахаридов.

Обсуждение результатов

Биодеструкция лигноуглеводного комплекса, осуществляемая мицелием грибов, является многоступенчатым полиферментным процессом. Одной из наиболее трудных мишеней для деструкции является лигнин, его разрушение осуществляется по окислительному механизму с непрерывным участием активного кислорода [16, 17]. Сложность ассимиляции лигнина для ферментативных систем микроорганизмов связана с его своеобразным химическим строением, высокомолекулярной массой и низкой растворимостью, в то же время для разных растительных субстратов строение лигнина может различаться. В нашем эксперименте под воздействием мицелия гриба *P. ostreatus* наибольшей деструкции подвергается лигнин древесных опилок осины (уменьшение на 38,7%). Меньшее снижение содержания лигнина наблюдали для соломы пшеницы (–21,8%) и лузги подсолнечника (–20,0%). Полученный результат может свидетельствовать о более конденсированной структуре и меньшей доступности этого биополимера в этих видах растительного сырья (рис. 1). Возможно, наблюдаемая картина обусловлена особенностями предобработки субстрата. Опилки древесины осины – это результат механического воздействия на древесину, в процессе которого происходит частичное разрушение надмолекулярной структуры клеточной стенки. Для соломы пшеницы и лузги подсолнечника такое воздействие отсутствовало. Для углеводной составляющей, а именно для целлюлозы наблюдали обратную картину. В наибольшей степени произошла убыль содержания целлюлозы для лузги подсолнечника (–21,1%), а наименьшее – древесных опилок осины (–10,7%).

В процессе биодеструкции источником углеводов может выступать не только целлюлоза, но и другие полисахариды, входящие в группу гемицеллюлоз. По всей видимости, именно этим объясняется относительно низкое снижение содержания целлюлозы в случае опилок осины. Для проверки этой гипотезы был проведен анализ изменения содержания легко- и трудногидролизуемых полисахаридов (ЛГП и ТГП).

Спустя 90 суток содержание ЛГП в растительном сырье соломы пшеницы уменьшилось с 16.4 до 11.7%, в древесных опилках осины – с 15.8 до 10.5%, а в лузге подсолнечника – с 11.8 до 7.3% (рис. 2). В то же время содержание ТГП в растительных субстратах уменьшалось следующим образом: на 15.25% (44.9% по отношению к исходному содержанию) – для соломы пшеницы, на 10.55% (47% по отношению к исходному содержанию) – для лузги подсолнечника и на 17.54% (58.5% по отношению к исходному содержанию) – для древесины осины (рис. 2). Наблюдаемые изменения подтверждают, что в случае опилок осины более интенсивной ассимиляции подвергались углеводы из группы гемицеллюлоз.

Интересно отметить, что в случае лузги подсолнечника наблюдалось наибольшее нарастание массы плодовых тел, при этом убыль лигнина и гемицеллюлоз была ниже, чем на других субстратах. Возможно, большая масса плодовых тел для этого субстрата связана с относительно высоким потреблением целлюлозы, которая является более простым в ассимиляции источником углерода.

По литературным данным [12, 18] разложению подвергаются сначала гемицеллюлозы, а затем целлюлоза, вплоть до ее полного разрушения. В нашем исследовании полного разрушения целлюлозы не произошло и можно говорить лишь о частичной деструкции.

Для дополнительной оценки влияния мицелия гриба *Pleurotus ostreatus* на целлюлозу провели анализ величины степени полимеризации (СП) целлюлозы, которая по данным таблицы зависит от длительности культивирования. Полученные значения показывают, что деструкция целлюлозы происходит равномерно, с постепенным снижением СП в течение всего времени культивирования (табл.).

Особый интерес представляет динамика изменения содержания различных компонентов растительных субстратов в процессе культивирования. В силу особенностей строения лигонуглеводной матрицы процесс деструкции может протекать неравномерно [19–22]. Для оценки динамики проводили анализ содержания лигнина, целлюлозы, а также ЛГП и ТГП спустя 7, 15, 30, 45, 60 и 90 суток (рис. 3). Снижение содержания всех анализируемых компонентов происходило монотонно, что отражает процесс прорастания мицелия гриба в субстрат и его постепенную деструкцию. Стоит, однако, отметить некоторые особенности. Так, для соломы пшеницы после 45 суток наблюдается уменьшение скорости утилизации лигнина, его содержание практически не меняется, в то же время с 45-х суток ускоряется утилизация целлюлозы (рис. 3 А и Б). По всей видимости, с уменьшением фракции легкодоступного лигнина происходит переключение ферментных систем гриба на утилизацию углеводной части.

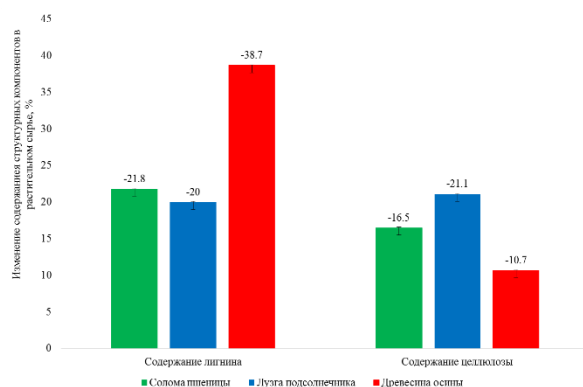


Рис. 1. Изменение содержания структурных компонентов субстратов в процессе их деструкции при культивировании гриба *Pleurotus ostreatus* в течение 90 суток

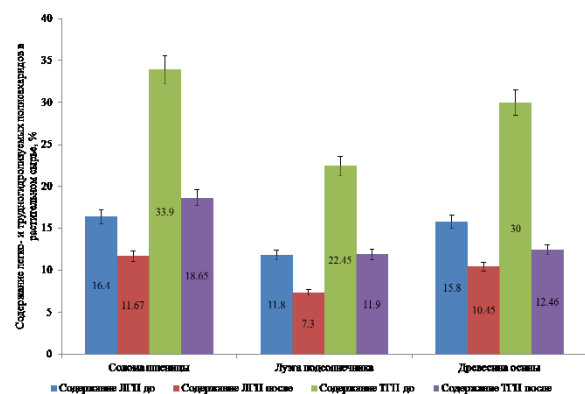


Рис. 2. Содержание легко- и трудногидролизуемых полисахаридов до и после биотехнологического воздействия мицелия гриба *Pleurotus ostreatus*

Изменение степени полимеризации целлюлозы после биотехнологической обработки мицелием гриба *Pleurotus ostreatus* в течение 90 суток, % а.с.в.

Продолжительность культивирования, сутки	Степень полимеризации, % а.с.в.		
	Лузга подсолнечника	Солома пшеницы	Древесина осины
Исходное сырье	920	1250	1050
7	720	920	820
15	620	820	720
30	620	720	720
45	620	620	720
60	520	520	620
90	520	520	620

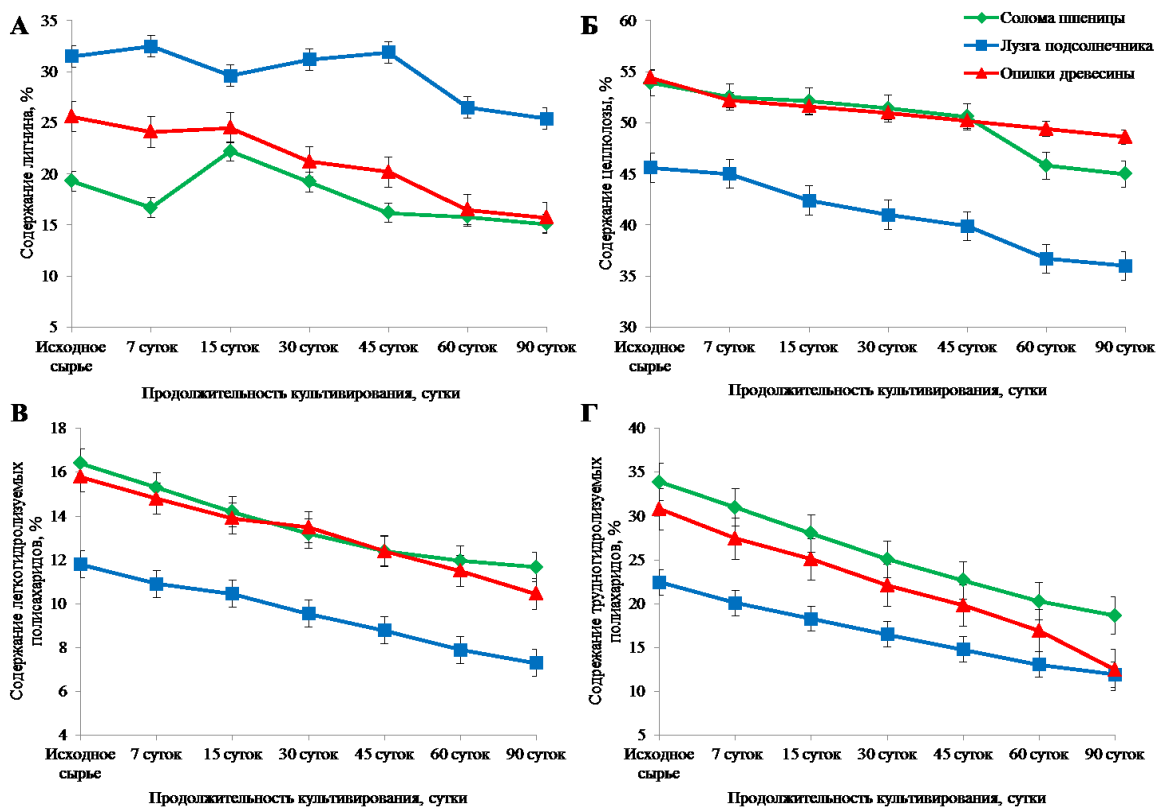


Рис. 3. Изменение содержания лигнина (А), целлюлозы (Б), легко- (В) и трудногидролизующих полисахаридов (Г) в динамике культивирования мицелия гриба *Pleurotus ostreatus* на растительных субстратах

Заключение

Таким образом, химический анализ субстратов показал, что в первую очередь в большей степени биоконверсии подвергаются трудногидролизующие полисахариды. Выявлено, что содержание ЛПП и ТПП монотонно уменьшалось в течение всего периода биотехнологической обработки. Количественное содержание целлюлозы в растительных субстратах в процессе биотехнологической обработки наиболее заметно изменилось в субстрате шелухи подсолнечника (на 21.1%). Содержание лигнина в наибольшей степени затронуло древесные опилки осины (на 38.7%). В данном субстрате лигнин больше подвергался биоконверсии по сравнению с лузгой подсолнечника (на 20%) и соломой пшеницы (на 21.8%). Однако наибольший рост грибов наблюдался именно на субстратах лузги подсолнечника и соломы пшеницы. Таким образом, можно сделать вывод, что на однолетних растениях лигнин полностью не деструктурирует, вследствие чего скорость роста грибов и урожайность увеличивается.

Список литературы

1. Кузнецов Б.Н., Кузнецова С.А., Тарабанько В.Е. Новые методы получения химических продуктов из биомассы деревьев сибирских пород // Российский химический журнал. 2004. Т. 48. №3. С. 4–19.
2. Анненков Б.Г., Азарова В.А. Биотехнология производства и применения посевного мицелия вешенок // Дальневосточный аграрный вестник. 2014. №1(29). С. 29–32.
3. Вдовенко С.А. Культивирование вешенки обыкновенной на соломенных субстратах при интенсивном способе выращивания // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2013. №4(42). С. 75–77.
4. Alemu F. Cultivation of *Pleurotus ostreatus* mushrooms on *Coffea arabica* and *Ficus sycomorus* leaves in Dilla University, Ethiopia // Journal of Yeast and Fungal Research. 2013. Vol. 4(7). Pp. 103–108. DOI: 10.5897/JYFR2013.0123.
5. Amunike E.H., Dike K.S., Ogbulie J.N. Cultivation of *Pleurotus ostreatus*: An edible mushroom from agro base waste products // J. Microbiol. Biotech. Res. 2011. Vol. 1(3). Pp. 1–14.
6. Pineda-Insusti J.A., Ramos-Sánchez L.B., Soto-Arroyave C.P., Freitas-Fragata A., Pereira-Cruz L. Growth of *Pleurotus ostreatus* on non-supplemented agro-industrial wastes // Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia. 2015. Vol. 38. N1. Pp. 41–49.
7. Salem M.F.M., Salem K.F.M., Hanna E.T., Nouh N.E. Effect of Nutrient Sources and Environmental Factors on the Biomass Production of Oyster Mushroom (*Pleurotus ostreatus*) // J. Chem. Bio. Phy. Sci. 2014. Vol. 4. N4. Pp. 3413–3420.
8. Карманов А.П. Лигнин. Структурная организация и самоорганизация // Химия растительного сырья. 1999. №1. С. 65–74.
9. Беккер З.Э. Физиология и биохимия грибов. М., 1988. 230 с.
10. Adamović M. et al. The biodegradation of wheat straw by *Pleurotus ostreatus* mushrooms and its use in cattle feeding // Animal Feed Science and Technology. 1998. Vol. 71. N3–4. Pp. 357–362. DOI: 10.1016/S0377-8401(97)00150-8.
11. Nadar Y., Kerem Z., Gorodecki B. Biodegradation of lignocellulosic agricultural wastes by *Pleurotus ostreatus* // Journal of Biotechnology. 1993. Vol. 30. N1. Pp. 133–139. DOI: 10.1016/0168-1656(93)90034-K.
12. Pandey V.K. et al. Biodegradation of wheat straw by *Pleurotus ostreatus* // Cell Mol. Biol. 2014. Vol. 60. N5. Pp. 29–34.
13. Алексеенко Е.Н., Полишко Т.М., Винников А.И. Пищевая, лечебная и экологическая ценность грибов *Pleurotus ostreatus* // Вісник Дніпропетровського університету. Біологія. Екологія. 2010. Т. 1, вып. 18. С. 3–9.
14. Оболенская А.В. Лабораторные работы по химии древесины и целлюлозы: учебное пособие для вузов. М., 1991. 320 с.
15. Чепрасова М.Ю., Плешкова О.Г., Базарнова Н.Г. и др. Биотехнологическая переработка растительного сырья: лабораторный практикум. Барнаул, 2019. 29 с.
16. Плешкова О.Г., Неведина Н.В., Теплякова Т.В., Щербаков Д.Н. Биодеструкция лигнина растительного сырья под воздействием базидиального гриба *Pleurotus ostreatus* // Химия и технология новых веществ и материалов: тезисы докладов VI Всероссийской молодежной научной конференции. Сыктывкар, 2016. С. 155–157.
17. Плешкова О.Г., Неведина Н.В., Черникова Л.И., Теплякова Т.В., Щербаков Д.Н. Изменение химического состава растительного сырья в процессе культивирования базидиального гриба *Pleurotus ostreatus* // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: материалы IX Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. 2016. С. 381–384.
18. Alfaro M. Comparative and transcriptional analysis of the predicted secretome in the lignocellulose-degrading basidiomycete fungus *Pleurotus ostreatus* // Environ. Microbiol. 2016. Vol. 18. N12. Pp. 4710–4726. DOI: 10.1111/1462-2920.13360.
19. Плешкова О.Г., Базарнова Н.Г., Микушина И.В., Теплякова Т.В., Щербаков Д.Н. Изменение содержания лигнина и целлюлозы под воздействием базидиального гриба *Pleurotus ostreatus* // Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья: материалы VIII Всероссийской конференции с международным участием. Барнаул, 2020. С. 317–318.
20. Sánchez C. Lignocellulosic residues: biodegradation and bioconversion by fungi // Biotechnology advances. 2009. Vol. 27. N2. Pp. 185–194. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2008.11.001.
21. Рабинович М.Л. Теоретические основы биотехнологии древесных композитов. М., 2001. Т. 1. 264 с.
22. Martínez A.T. Molecular biology and structure-function of lignin-degrading heme peroxidases // Enzyme and microbial technology. 2002. Vol. 30. N4. Pp. 425–444. DOI: 10.1016/S0141-0229(01)00521-X.

Поступила в редакцию 1 июля 2021 г.

После переработки 5 мая 2022 г.

Принята к публикации 6 мая 2022 г.

Для цитирования: Плешкова О.Г., Теплякова Т.В., Щербаков Д.Н., Колосов П.В., Базарнова Н.Г. Динамика деструкции основных компонентов лигноцеллюлозного комплекса растительного сырья под действием мицелия гриба *Pleurotus ostreatus* // Химия растительного сырья. 2022. №3. С. 277–282. DOI: 10.14258/jcprm.2022039786.

Pleshkova O.G.^{1*}, Teplyakova T.V.², Shcherbakov D.N.^{2,3}, Kolosov P.V.^{3,4}, Bazarnova N.G.³ DYNAMICS OF DESTRUCTION OF THE MAIN COMPONENTS OF THE LIGNOCELLULOSE COMPLEX OF ASPEN WOOD SAWDUST, WHEAT STRAW, AND SUNFLOWER CASING UNDER THE ACTION OF FUNGUS MYCELIUM *PLEUROTUS OSTREATUS*

¹JSC "Generium", Volginsky village, Vladimir region, 601125 (Russia), e-mail: o.pleshkova@generium.ru

²FBUN SSC VB "Vector", Rospotrebnadzor, r.p. Koltsovo, Novosibirsk region, 630559 (Russia)

³Altai State University, pr. Lenina, 61, Barnaul, 656049 (Russia), e-mail: plolga93@mail.ru

⁴VakBioLab LLC, st. Technoparkovaya, 1/26, Koltsovo, Novosibirsk region, 630559 (Russia)

The aim of the study was to study the effect of basidiomycetes on the aromatic and carbohydrate components of plant materials under the influence of the mycelium of the *Pleurotus ostreatus* fungus. To achieve this goal, we carried out a component analysis of the initial plant raw materials and raw materials after exposure to the mycelium of the basidiomycete.

The moisture content in the raw material was determined, and the analysis of the content of: lignin, cellulose, easily and difficultly hydrolysable polysaccharides was carried out. The quantitative analysis of the structural components of plant raw materials was carried out according to the methods generally accepted in the chemistry of plant raw materials, in terms of absolutely dry raw materials.

Chemical analysis of substrates showed that polysaccharides undergo bioconversion in the first place; difficultly hydrolyzable polysaccharides underwent biodegradation to a greater extent. It can be concluded that lignin does not completely destroy lignin on annual plants, as a result of which the growth and productivity of mushrooms increases.

Keywords: lignocellulosic raw materials, bioconversion, basidiomycetes, *Pleurotus ostreatus*, lignin, cellulose, polysaccharides, husk, straw, wood sawdust.

References

1. Kuznetsov B.N., Kuznetsova S.A., Taraban'ko V.Ye. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2004, vol. 48, no. 3, pp. 4–19. (in Russ.).
2. Annenkov B.G., Azarova V.A. *Dal'nevostochnyy agrarnyy vestnik*, 2014, no. 1(29), pp. 29–32. (in Russ.).
3. Vdovenko S.A. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2013, no. 4(42), pp. 75–77. (in Russ.).
4. Alemu F. *Journal of Yeast and Fungal Research*, 2013, vol. 4(7), pp. 103–108. DOI: 10.5897/JYFR2013.0123.
5. Amunike E.H., Dike K.S., Ogbulie J.N. *J. Microbiol. Biotech. Res.*, 2011, vol. 1(3), pp. 1–14.
6. Pineda-Insusti J.A., Ramos-Sánchez L.B., Soto-Arroyave C.P., Freitas-Fragata A., Pereira-Cruz L. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*, 2015, vol. 38, no. 1, pp. 41–49.
7. Salem M.F.M., Salem K.F.M., Hanna E.T., Nouh N.E. *J. Chem. Bio. Phy. Sci.*, 2014, vol. 4, no. 4, pp. 3413–3420.
8. Karmanov A.P. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 1999, no. 1, pp. 65–74. (in Russ.).
9. Bekker Z.E. *Fiziologiya i biokhimiya gribov*. [Physiology and biochemistry of fungi]. Moscow, 1988, 230 p. (in Russ.).
10. Adamović M. et al. *Animal Feed Science and Technology*, 1998, vol. 71, no. 3–4, pp. 357–362. DOI: 10.1016/S0377-8401(97)00150-8.
11. Hadar Y., Kerem Z., Gorodecki B. *Journal of Biotechnology*, 1993, vol. 30, no. 1, pp. 133–139. DOI: 10.1016/0168-1656(93)90034-K.
12. Pandey V.K. et al. *Cell Mol. Biol.*, 2014, vol. 60, no. 5, pp. 29–34.
13. Alekseyenko Ye.N., Polishko T.M., Vinnikov A.I. *Visnik Dnipropetrovs'kogo universitetu. Biologiya. Ekologiya*, 2010, vol. 1, no. 18, pp. 3–9. (in Russ.).
14. Obolenskaya A.V. *Laboratornyye raboty po khimii drevesiny i tsellyulozy: Uchebnoye posobiye dlya vuzov*. [Laboratory work on the chemistry of wood and cellulose: textbook for universities]. Moscow, 1991, 320 p. (in Russ.).
15. Cheprasova M.Yu., Pleshkova O.G. etc. *Biotehnologicheskaya pererabotka rastitel'nogo syr'ya: laboratornyy praktikum*. [Biotechnological processing of plant raw materials: laboratory practice]. Barnaul, 2019, 29 p. (in Russ.).
16. Pleshkova O.G., Nevedina N.V., Teplyakova T.V., Shcherbakov D.N. *Khimiya i tekhnologiya novykh veshchestv i materialov: tezisy dokladov VI Vserossiyskoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii*. [Chemistry and technology of new substances and materials: abstracts of the VI All-Russian Youth Scientific Conference]. Syktyvkar, 2016, pp. 155–157. (in Russ.).
17. Pleshkova O.G., Nevedina N.V., Chernikova L.I., Teplyakova T.V., Shcherbakov D.N. *Tekhnologii i oborudovaniye khimicheskoy, biotehnologicheskoy i pishchevoy promyshlennosti: materialy IX Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiyem*. [Technologies and equipment for the chemical, biotechnological and food industries: materials of the IX All-Russian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists with International Participation]. 2016, pp. 381–384. (in Russ.).
18. Alfaro M. *Environ. Microbiol.*, 2016, vol. 18, no. 12, pp. 4710–4726. DOI: 10.1111/1462-2920.13360.
19. Pleshkova O.G., Bazarnova N.G., Mikushina I.V., Teplyakova T.V., Shcherbakov D.N. *Novyye dostizheniya v khimii i khimicheskoy tekhnologii rastitel'nogo syr'ya: materialy VIII Vserossiyskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem*. [New achievements in chemistry and chemical technology of plant raw materials: materials of the VIII All-Russian Conference with international participation]. Barnaul, 2020, pp. 317–318. (in Russ.).
20. Sánchez C. *Biotechnology advances*, 2009, vol. 27, no. 2, pp. 185–194. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2008.11.001.
21. Rabinovich M.L. *Teoreticheskiye osnovy biotehnologii drevesnykh kompozitov*. [Theoretical bases of biotechnology of wood composites]. Moscow, 2001, vol. 1, 264 p. (in Russ.).
22. Martínez A.T. *Enzyme and microbial technology*, 2002, vol. 30, no. 4, pp. 425–444. DOI: 10.1016/S0141-0229(01)00521-X.

Received July 1, 2021

Revised May 5, 2022

Accepted May 6, 2022

For citing: Pleshkova O.G., Teplyakova T.V., Shcherbakov D.N., Kolosov P.V., Bazarnova N.G. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2022, no. 3, pp. 277–282. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.2022039786.

* Corresponding author.