



Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
УДК577.11

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.04.031

 EDN: YVDBMC

БИОПОЛИМЕРЫ – ПЕРСПЕКТИВНЫЙ СУБСТРАТ ДЛЯ БИОКОНВЕРСИИ СЫРЬЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Наталья Юрьевна Демиденко ¹, Мария Евгеньевна Арканова ²,
Гульнара Заляльтыновна Ягудина ³, Оксана Николаевна Еременко ⁴,
Вероника Валентиновна Тарнопольская ⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнева, Красноярск Россия

¹ natalie.demid@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6245-8426>

² littlestranger@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1734-0709>

³ gulka13020@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6245-8426>

⁴ oks.eriomenko@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8740-0642>

⁵ veronichkat@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1142-4488>

Аннотация. Актуальность настоящих исследований заключается в изучении перспектив использования растительных биополимеров путем биоконверсии базидиальными грибами.

Проведенные исследования показали, что биотрансформацию растительных биополимеров костры технической конопля и древесных отходов эффективно проводить дереворазрушающими базидиомицетами рода *Pleurotus*.

Ключевые слова: растительные биополимеры, техническая конопля, костра, древесные отходы, биоконверсия, базидиальные грибы.

Для цитирования: Биополимеры – перспективный субстрат для биоконверсии сырья растительного происхождения / Н. Ю. Демиденко [и др.] // Ползуновский вестник. 2024. № 4. С. 208–212. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.04.031, EDN: <https://elibrary.ru/YVDBMC>.

Original article

BIOPOLYMERS ARE A PROMISING SUBSTRATE FOR BIOCONVERSION OF RAW MATERIALS OF PLANT ORIGIN

Natalia Yu. Demidenko ¹, Maria E. Arkanova ², Gulnara Z. Yagudina ³,
Oksana N. Eremenko ⁴, Veronika V. Tarnopolskaya ⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia

¹ natalie.demid@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6245-8426>

² littlestranger@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1734-0709>

³ gulka13020@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6245-8426>

⁴ oks.eriomenko@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8740-0642>

⁵ veronichkat@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1142-4488>

Abstract. The relevance of these studies lies in the study of the prospects for the use of plant biopolymers by bioconversion with basidial fungi.

The conducted studies have shown that the biotransformation of plant biofields from industrial hemp fires and wood waste is effectively carried out by tree-destroying basidiomycetes of the genus *Pleurotus*.

Keywords: plant biopolymers, technical hemp, bonfires, wood waste, bioconversion, basidial fungi.

For citation: Demidenko, N.Yu., Arkanova, M.E., Yagudina, G.Z., Eremenko, O.N. & Tarnopolskaya, V.V. (2024). Biopolymers are a promising substrate for bioconversion of raw materials of plant origin. *Polzunovskiy vestnik*. (4), 208-212. (In Russ). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.04.031, EDN: <https://elibrary.ru/YVDBMC>.

БИОПОЛИМЕРЫ – ПЕРСПЕКТИВНЫЙ СУБСТРАТ ДЛЯ БИОКОНВЕРСИИ СЫРЬЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

ВВЕДЕНИЕ

Биополимеры растительного происхождения привлекают внимание многих исследователей. Большой интерес представляют биополимеры древесного и недревесного происхождения. К числу наиболее часто изучаемых макромолекулярных соединений растительного происхождения относятся углеводные (полисахариды) и фенольные биополимеры (лигнин и экстрактивные вещества).

На долю Российской Федерации приходится больше 20 % мировых запасов древесной породы, при этом большая доля лесов (около 80 %) сконцентрирована на Европейском Севере (Архангельская область, Карелия и Коми) и Восточной Сибири (Иркутская область и Красноярский край) [1, 2].

Главным отходом деревообрабатывающих компаний в процессе механической обработки древесной породы считаются опилки хвойных пород, общий объем которых порой достигает 20 % от всего обрабатываемого сырья [3]. При этом в настоящее время технологий действенной переработки опилок недостаточно, поэтому, в основном, они складываются и представляют собой не утилизируемый отход производства, который нередко несет, кроме экологической, ещё и пожарную угрозу.

В настоящее время работа исследователей направлена на решение вопросов, связанных с безопасной и экологичной утилизацией подобных крупнотоннажных отходов. В связи с этим перспективным является применение методов биотехнологии, в частности процессов биоконверсии, для трансформации растительного сырья с получением ценных, востребованных на рынке продуктов природного происхождения [4].

Для эффективной биоконверсии необходим отбор и исследование свойств продуцентов, способных ассимилировать основные компоненты предлагаемого субстрата. Известно, что базидиальные грибы обладают оксидоредуктазной и целлюлазной активностью, которые способствуют использованию целлюлозы и других углеводов, а также лигнина, поэтому они являются наиболее перспективными для биотрансформации древесных полимеров, в которых содержание лигноуглеводного комплекса составляет не менее 70 % [4, 5].

Среди базидиомицетов особое внимание привлекают грибы рода *Pleurotus*; они нетоксичны, непатогенны, богаты белками и другими биологически значимыми веществами, обладают хорошо развитой ферментативной системой и имеют высокую скорость роста в условиях твердофазной и жидкофазной ферментации [5, 6].

Цель данной работы заключается в оценке перспектив использования растительных биополимеров в процессе биоконверсии культурой рода *Pleurotus* с получением обогащенных белком кормовых продуктов.

МЕТОДЫ

Объектами исследования являлись:

- древесные опилки хвойных пород смешанного состава с открытого полигона в окрестностях г. Лесосибирска Красноярского края. Для биотрансформации использовали фракцию с размером частиц 5–10 мм;
- костра технической конопля.

В качестве продуцентов были выбраны грибы рода *Pleurotus* (*Pleurotus ostreatus* PO-4.1 и *Pleurotus columbinus* PC-2.4). Культивирование на растительных биополимерах проводили твердофазным методом при температуре 27 °С. Посевной материал вносили в виде агаризованных блоков.

Для определения химического состава древесных отходов и костры технической конопля использовали методы, принятые в химии растительного сырья. Содержание полисахаридов устанавливали с использованием метода Кизеля и Семигановского. Содержание веществ лигниновой природы определяли по методу Кеннига с использованием 72 % серной кислоты [7].

Содержание белка в биомассе растительного сырья определяли с помощью красителя амидо-черного 10 В по методу Г.А. Бузуна [8].

Перевариваемость определяли по методике Жукова [9].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исходное растительное сырье перед проведением исследования химического состава и биодеструкцией механически измельчали. В работе использовали фракцию с размером частиц не более 10–20 мм.

Чистую культуру *Pleurotus* выращивали на агаризованной среде сусло-агар в чашках Петри. Мицелии *P. Ostreatus* P.O.-4.1 и *P. Columbinus* P.C.-2.4 в поверхностной культуре представлены на рисунках 1 и 2.

В ходе роста штаммы формировали колонии, которые характеризуются следующими признаками: округлой формой с ярко выраженной концентрической зональностью. Край колонии ворсинчатый, плоский профиль, структура волокнистая. Мицелий с трудом отделяется от субстрата, на колонии четко выражены радиальные кольца.

Вегетативный мицелий *P. columbinus* представленный на рисунке 3, как и мицелий *P. ostreatus*, представленный на рисунке 4, состоит из тонкостенных, септированных и ветвящихся гиф с множественными пряжками. Диаметр генеративной гифы составляет 1,5–3,0 мкм, также отмечается образование многочисленных мицелиальных тяжей. На мицелии зафиксировано формирование шаровидных головчатых структур, что характерно для видов рода *Pleurotus*. Отмечают, что экскреторные конидии выделяют капли токсина, который оказывает подавляющее действие на бактерии, дрожжи и некоторые микроскопические грибы.

Для изучения процесса трансформации

растительных биополимеров грибами рода *Pleurotus* были сформированы различные соотношения опилок и костры конопли.

Субстратные композиции были взяты в соотношениях 80/20, 60/40, 50/50, 40/60 и 20/80 соответственно (костра конопли / хвойные опилки).

Биотрансформацию растительных полимеров проводили поверхностным способом, используя в качестве посевного материала агаровые блоки, вырезанные из краевой зоны роста семисуточной культуры.

Агаровые блоки вносили по одной штуке на пять грамм воздушно сухого субстрата, увлажненного до 80 %.

На двенадцатые сутки грибы рода *Pleurotus* полностью освоили субстрат. Наибо-

лее интенсивный рост наблюдался на седьмые сутки культивирования (рисунок 1).

Влияние степени подготовки на процесс биодеструкции оценивали по значению скорости роста и ростовому коэффициенту, которые представлены в таблице 1.

Также была рассчитана убыль массы. Значения убыли массы субстратных композиций представлены в таблице 2.

Для изучения процесса биоконверсии был изучен химический состав до и после культивирования базидиальных грибов.

Результаты исследований представлены в таблице 3.



Рисунок 1 – Мицелий *P. ostreatus* P.O.-4.1 в поверхностной культуре

Figure 1 – Mycelium of *P. ostreatus* P.O.-4.1 in surface culture



Рисунок 2 – Мицелий *P. columbinus* P.C.-2.4 в поверхностной культуре

Figure 2 – Mycelium of *P. columbinus* P.C.-2.4 in surface culture

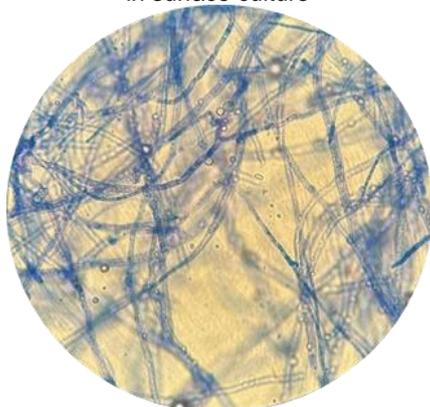


Рисунок 3 – Микроморфологические особенности штамма *Pleurotus ostreatus* PO-4.1.

Figure 3 – Micromorphological features of *Pleurotus ostreatus* PO-4.1 strains

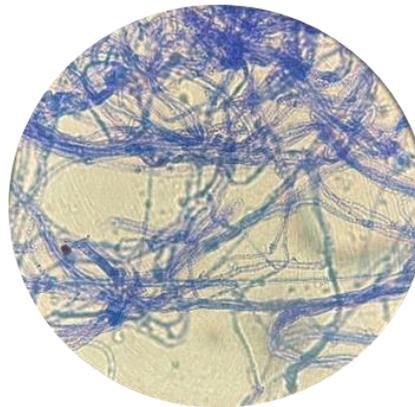


Рисунок 4 – Микроморфологические особенности штамма *Pleurotus columbinus* PC-2.4

Figure 4 – Micromorphological features of the strain *Pleurotus columbinus* PC-2.4

ОБСУЖДЕНИЕ

Изученный химический состав субстратных композиций характеризуется высоким содержанием лигноуглеводного комплекса (полимеров углеводной и фенольной природы). Это свидетельствует о потенциальной пригодности всех видов рассматриваемого сырья для биоконверсии.

Высокие ростовые показатели базидиомицетов рода *Pleurotus* при культивировании на растительных биополимерах, таких как костра конопли и смесь хвойных опилок, позволяют рекомендовать данный продуцент для получения продуктов биоконверсии.

БИОПОЛИМЕРЫ – ПЕРСПЕКТИВНЫЙ СУБСТРАТ ДЛЯ БИОКОНВЕРСИИ СЫРЬЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Таблица 1 – Среднесуточная скорость роста и ростовой коэффициент мицелиальных колоний *Pleurotus* в зависимости от среды культивирования

Table 1 – Average daily growth rate and growth coefficient of *Pleurotus* mycelial colonies depending on the cultivation medium

Наименование показателя	Компонентный состав субстрата (костра конопли / хвойные опилки)				
	80/20	60/40	50/50	40/60	20/80
<i>Гриб Pleurotostreatus</i> PO-4.1					
Скорость роста	4,2	4,2	4,2	4,2	3,3
Ростовой коэффициент	63,3	63,3	63,3	63,3	53,3
<i>Гриб Pleurotuscolumbinus</i> PC-2.4					
Скорость роста	4,2	3,6	3,6	3,3	2,7
Ростовой коэффициент	95	86	84	80	70

Таблица 2 – Убыли массы субстратных композиций при биоконверсии

Table 2 – Weight loss of substrate compositions during bioconversion

Показатель	Вид растительного биополимера				
	80/20	60/40	50/50	40/60	20/80
Костра конопли/хвойные опилки <i>Pleurotostreatus</i> PO-4.1					
Убыль массы	8,64	8,14	7,21	4,34	4,06
Костра конопли/хвойные опилки <i>Pleurotuscolumbinus</i> PC-2.4					
Убыль массы	14,96	10,5	7,01	5,82	4,27

Таблица 3 – Компонентный состав основных веществ в исходном сырье и продуктах биоконверсии грибами рода *Pleurotus*

% a.c.m.

Table 3 – The component composition of the main substances in the feedstock and bioconversion products by fungi of the genus *Pleurotus*

% a.d.m.

Наименование компонента	Субстратная композиция (костра конопли / опилки)				
	80/20	60/40	50/50	40/60	20/80
Минеральные вещества	5,05	4,52	3,69	3,27	3,07
	3,44*	3,36*	2,52*	2,03*	2,00*
Экстрактивные вещества	8,17	7,82	7,03	6,85	5,81
	4,35*	4,74*	5,24*	5,04*	5,00*
Легкогидролизуемые полисахариды (ЛГП)	17,53	17,42	16,47	16,58	16,38
	15,65*	15,02*	14,82*	15,87*	15,44*
Трудногидролизуемые полисахариды (ТГП)	36,76	36,52	34,39	33,34	29,77
	30,84*	31,24*	32,97*	32,41*	28,01*
Негидролизуемый остаток	27,57	25,12	24,71	23,94	22,05
	25,11*	23,01*	23,15*	22,23*	18,99*
Азотсодержащие соединения	0,13	0,09	0,08	0,06	0,04
	5,07*	3,33*	2,96*	2,22*	1,48*

* Значения после проведения биоконверсии с учетом убыли массы

В процессе культивирования изменяется количественное соотношение компонентов лигно-углеводного комплекса. Как видно из результатов исследования химического состава субстратных композиций растительных биополимеров до и после культивирования, в значительной степени утилизируется углеводная часть. Для более эффективной биотрансформации базидиальными грибами методом твердофазной ферментации рекомендуется использовать соотношение костры технической конопли и хвойных опилок – 50/50 или 60/40.

Продукты биоконверсии после культивирования имеют степень перевариваемости 27–34 %, что позволяет рекомендовать полученный продукт в качестве кормовой добавки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, по результатам проведенных исследований наиболее благоприятным субстратом для биоконверсии с получением обогащенных белком кормовых продуктов можно считать субстратные композиции на основе хвойных опилок и соломы, содержание белка в таком

продукте превышает 13 %. Экспериментально установлено, что использование в качестве инокулята агарового блока *Pleurotus ostreatus* P.O.-4.1 и *Pleurotus columbinus* PC-2.4 позволяет вести процесс биоконверсии с достаточной эффективностью, способствует быстрой колонизации субстрата мицелием и накоплению значительного количества белка в культуре. По полученным значениям белка и перевариваемости данные субстратные композиции на основе растительных биополимеров можно рекомендовать в качестве кормового продукта при выращивании сельскохозяйственных животных и птиц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Финансовые новости. – <https://zaimisrochno.ru/articles/5455-zapasy-lesa-v-rossii-reyting-stran>-2021.
2. Гелес И.С. Древесное сырье – стратегическая основа и резерв цивилизации. Петрозаводск : Карельский научный центр РАН, 2007. 499 с.
3. Баяндин М.А., Ермолин В.Н., Елисеев С.Г. Влияние механоактивации на аутогеионные свойства древесины. Хвойные boreальной зоны. 2013. Т. 31. № 1–2. С. 159–163.
4. Тарнопольская В.В., Алаудинова Е.В., Саволайнен А.С., Роптопуло С.И. Химический состав глубокой культуры ксилотрофных базидиомицетов рода *Pleurotus*. Хвойные boreальной зоны. 2014. № 1–2. С. 78–80.
5. Заикина Н.В. Основы биотехнологии высших грибов : учеб. пособие для студентов, обучающихся по направлению «Биология». Москва : Проспект науки, 2007. 336 с.
6. Ягудина Г.З., Садаева А.С., Тарнопольская В.В. Древесные отходы хвойных пород как субстрат для биоконверсии. Решетневские чтения. Красноярск : СибГУ имени М.Ф. Решетнева, 2022. С. 859–861.
7. Рязанова Т.В., Чупрова Н.А., Исаева Е.В. Химия древесины. Ч. 2 : Основные компоненты древесины : учеб. пособие для студентов вузов. Красноярск : СибГТУ. 2011. 229 с.
8. Бузун Г.А. Определение белка в растениях с помощью амидочерного. Физиология растений. 1982. № 6. С. 198–204.
9. Жуков А.П. Метод определения перевариваемости кормов in vitro. Труды Саратовского зооветинститута. 1961. Т. 10. С. 109–124.

Информация об авторах

Н. Ю. Демиденко – к.т.н., доцент кафедры «Химической технологии древесины и биотехнологии» Сибирского государственного университета им. М.Ф. Решетнева, тел.89029820570.

М. Е. Арканова – аспирант кафедры «Химической технологии древесины и биотехнологии» Сибирского государственного университета им. М.Ф. Решетнева.

Г. З. Ягудина – магистр кафедры «Химической технологии древесины и биотехнологии» Сибирского государственного университета им. М.Ф. Решетнева.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 15 февраля 2024; одобрена после рецензирования 20 ноября 2024; принята к публикации 04 декабря 2024.

The article was received by the editorial board on 15 Feb 2024; approved after editing on 20 Nov 2024; accepted for publication on 04 Dec 2024.

О.Н. Еременко – к.т.н., доцент кафедры «Химической технологии древесины и биотехнологии» Сибирского государственного университета им. М.Ф. Решетнева.

В. В. Тарнопольская – к.т.н., доцент кафедры «Химической технологии древесины и биотехнологии» Сибирского государственного университета им. М.Ф. Решетнева.

REFERENCES

1. Financial news. (2021). <https://zaimisrochno.ru/articles/5455-zapasy-lesa-v-rossii-reyting-stran> (In Russ.).
2. Geles, I.S. (2007). Wood raw materials - the strategic basis and reserve of civilization. Petrozavodsk : Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (In Russ.).
3. Bayandin, M.A., Ermolin, V.N., Eliseev, S.G. (2013). The effect of mechanical activation on the autogenic properties of wood. Coniferous trees of the boreal zone. Vol. 31 No. 1-2. pp. 159-163. (in Russ.).
4. Tamopolskaya, V.V., Alaudinova, E.V., Savolainen, A.S., Roptopulo, S.I. (2014). Chemical composition of deep culture of xylophilic basidiomycetes of the genus *Pleurotus*. Coniferous trees of the boreal zone. No. 1-2. pp. 78-80. (in Russ.).
5. Zaikina, N.V. (2007). Fundamentals of biotechnology of higher fungi : a textbook for students studying in the field of Biology. Moscow : Prospekt nauki, 336 p. (In Russ.).
6. Yagudina, G.Z. Sadaeva, A.S., Tamopolskaya, V.V. (2022). Wood waste of coniferous species as a substrate for bioconversion. Reshetnev readings. Krasnoyarsk: SibGU named after M.F. Reshetnev, pp. 859-861. (In Russ.).
7. Ryzanova, T.V., Chuprova, N.A., Isaeva, E.V. (2011). Chemistry of wood Ch. 2: The main components of wood.: a textbook for university students. Krasnoyarsk : SibSTU. 229 p. (In Russ.).
8. Buzun, G.A. (1982). Determination of protein in plants using amidochemistry. Physiology of plants. No. 6. pp. 198-204. (In Russ.).
9. Zhukov, A.P. (1961). Method for determining the digestibility of feed in vitro. Proceedings of the Saratov Veterinary Institute. Vol. 10. pp. 109-124. (In Russ.).

Information about the authors

N.Y. Demidenko - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of "Chemical Technology of Wood and Biotechnology" of the M.F. Reshetnev Siberian State University, tel.89029820570.

M.E. Arkanova - postgraduate student of the Department of "Chemical Technology of Wood and Bio-technology" of the M.F. Reshetnev Siberian State University.

G.Z. Yagudin - Master of the Department of "Chemical Technology of Wood and Biotechnology" of the Siberian State University named after M.F. Reshetnev.

O.N. Eremenko - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of "Chemical Technology of Wood and Biotechnology" of the Siberian State University named after M.F. Reshetnev.

V.V. Tamopolskaya - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of "Chemical Technology of Wood and Biotechnology" of the Siberian State University named after M.F. Reshetnev.