



Серия «Биология. Экология»  
2025. Т. 53. С. 3–16  
Онлайн-доступ к журналу:  
<http://izvestiabiou.isu.ru/ru>

ИЗВЕСТИЯ  
Иркутского  
государственного  
университета

Научная статья

УДК 630.839:54.056  
<https://doi.org/10.26516/2073-3372.2025.53.3>

## Твердофазная ферментация древесных отходов базидиомицетом *Fomitopsis officinalis*: изменение состава и биологической активности экстрактов

А. В. Новиков, Д. А. Ярыгин, В. Л. Михайленко, К. С. Вздорова,  
А. С. Казакова, М. С. Пермякова, Г. В. Юринова, В. П. Саловарова\*

Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия  
E-mail: [artem.ru88@mail.ru](mailto:artem.ru88@mail.ru)

**Аннотация.** Изучена биотрансформация отходов деревопереработки (опилки сосны) базидиомицетом *Fomitopsis officinalis* в условиях твердофазного культивирования. Анализируются показатели ферментативного профиля гриба, свидетельствующие о степени биодеградации лигноцеллюлозного комплекса древесины. Выполнена оценка результатов биотрансформации с применением фитотестов. Обсуждается перспективность использования контролируемой ферментации для конверсии древесных отходов в экологически безопасные биостимуляторы растительного роста и индукторы ферментативной активности.

**Ключевые слова:** экстрактивные вещества, лигноцеллюлозные отходы, *Fomitopsis officinalis*, *Laricifomes officinalis*, фитотоксичность, лигноцеллюлазная активность, биотрансформация, метод главных компонент, алгоритм нелинейного снижения размерности.

**Для цитирования:** Твердофазная ферментация древесных отходов базидиомицетом *Fomitopsis officinalis*: изменение состава и биологической активности экстрактов / А. В. Новиков, Д. А. Ярыгин, В. Л. Михайленко, К. С. Вздорова, А. С. Казакова, М. С. Пермякова, Г. В. Юринова, В. П. Саловарова // Известия Иркутского государственного университета. Серия Биология. Экология. 2025. Т. 53. С. 3–16. <https://doi.org/10.26516/2073-3372.2025.53.3>

Research article

## Solid-State Fermentation of Wood Waste by the Basidiomycete *Fomitopsis officinalis*: Change in the Composition and Biological Activity of Extracts

A. V. Novikov, D. A. Yarygin, V. L. Mikhailenko, K. S. Vzdorova,  
A. S. Kazakova, M. S. Permyakova, G. V. Yurina, V. P. Salovarova\*

Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

**Abstract.** This study investigates the composition and properties of extractive substances from *Pinus sylvestris* sawdust to develop strategies for their biotechnological valorization. We evaluated the efficiency of extracting biologically active compounds using both organic solvents and water under

© Новиков А. В., Ярыгин Д. А., Михайленко В. Л., Вздорова К. С., Казакова А. С., Пермякова М. С., Юринова Г. В., Саловарова В. П., 2025

\*Полные сведения об авторах см. на последней странице статьи.  
For complete information about the authors, see the last page of the article.

varied conditions. The yield of water-soluble extractives significantly depended on temperature, time, and particle size. Increasing the water temperature from 20°C to 85°C raised the concentration of extractives by 3–4 times, while extraction at 124°C increased it by 7–8 times, with the highest yield obtained from the smallest particle fraction (0.25 mm). Thin-layer chromatography revealed a reduction in the number of extractable components after solid-state fermentation with *Fomitopsis officinalis*, decreasing to nine after 6 months and to six after 10 months. Analysis of the substrate composition confirmed progressive biodegradation: over 10 months, lignin content decreased by 34%, whereas cellulose decreased by 16%. The enzymatic profile of *F. officinalis* indicated a sequential degradation strategy: after 6 months, phenoloxidase (3.51 U/mL) and lignin peroxidase (6.50 U/mL) activities were detected in the absence of cellulase activity, suggesting preferential lignin degradation. By the 10th month, only cellulase activity (2.09 IU/mL) was observed, marking a shift toward cellulose utilization after partial delignification. Phytotesting on garden cress (*Lepidium sativum*) seeds demonstrated that 10-month fermentation completely eliminated the phytotoxicity of aqueous extracts, while extracts from 6-month-fermented sawdust retained toxicity. Moreover, extracts from the 10-month fermentation stimulated seedling development, resulting in a 19.6% increase in stem length compared to the control. In parallel, these extracts acted as inducers of the lignocellulase complex in *F. officinalis*. Our results highlight the potential of controlled fungal fermentation to specifically modify the properties of wood waste extracts, transforming them into plant growth biostimulants for agriculture and enzymatic activity inducers for biotechnology.

**Keywords:** extractive substances, lignocellulosic waste, *Fomitopsis officinalis*, *Laricifomes officinalis*, phytotoxicity, lignocellulase activity, biotransformation, principal component analysis (PCA), Uniform Manifold Approximation and Projection (UMAP).

---

**For citation:** Novikov A.V., Yarygin D.A., Mikhailenko V.L., Vzdrova K.S., Kazakova A.S., Permyakova M.S., Yurina G.V., Salovarova V.P. Solid-State Fermentation of Wood Waste by the Basidiomycete *Fomitopsis officinalis*: Change in the Composition and Biological Activity of Extracts. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Biology. Ecology*, 2025, vol. 53, pp. 3-16. <https://doi.org/10.26516/2073-3372.2025.53.3> (in Russian)

---

## Введение

Интенсивное накопление отходов растительного происхождения, основу которых составляет лигноцеллюлоза, создаёт серьёзные экологические риски, связанные с их медленным естественным разложением [Lignocellulosic ... , 2023]. В условиях перехода к экономике замкнутого цикла разработка технологий их глубокой переработки в продукты с высокой добавленной стоимостью приобретает ключевое значение [Lignocellulose ... , 2017]. Особый интерес представляют экстрактивные вещества древесины – комплекс низкомолекулярных вторичных метаболитов, включающих лигнаны, флавоноиды, стильбены, терпеноиды и фенольные соединения [Wood ... , 2023]. Эти вещества обладают выраженной биологической активностью и могут найти применение в фармацевтике, косметологии, пищевой промышленности и сельском хозяйстве [Metsämuuronen, Sirén, 2019; Comprehensive ... , 2022].

Существующие стратегии, направленные на оптимизацию параметров экстракции (температура, время, степень измельчения), в основном позволяют управлять выходом целевых соединений. Однако возможности таких подходов для целенаправленной модификации качественного состава и функциональных свойств экстрактов остаются ограниченными [Effects ... , 2013; Pressurized ... , 2014; Ravber, Knez, Škerget, 2015]. В качестве перспективной альтернативы рассматриваются биотехнологические подходы, использующие ферментативный потенциал ксилотрофных базидиомицетов. Биоконверсия древесных отходов с помощью этих грибов способна не толь-

ко увеличить доступность целевых фракций, но и качественно преобразовать экстрактивные вещества, что может привести к снижению фитотоксичности или усилению биостимулирующих свойств [Solid ... , 2013; Fungal ... , 2019; Fungal ... , 2023 ].

Особый интерес для решения таких задач представляет листовенничная губка *Fomitopsis officinalis* (актуальный таксономический статус *Laricifomes officinalis*<sup>1</sup>). В то время как способность данного вида к синтезу ряда биологически активных вторичных метаболитов (например, тритерпеноидов и поликетидов, в частности, хлорированных кумаринов) в некоторой степени охарактеризована [Girometta, 2019], сведения о его воздействии на лигноцеллюлозный матрикс древесины и, что особенно важно, на состав и свойства нативных экстрактивных веществ остаются крайне скудными и разрозненными.

Целью исследования является установление закономерностей изменения состава и биологических свойств экстрактивных веществ сосновых опилок в процессе их биотрансформации ксилотрофным базидиомицетом *Fomitopsis officinalis* для разработки научных основ направленной биоконверсии древесных отходов в продукты с заданными функциональными характеристиками.

### ***Материалы и методы***

В работе использовались опилки сосны сибирской *Pinus sylvestris*, предоставленные деревоперерабатывающим предприятием «Мануфактура Велес» (Иркутская область).

Для оценки влияния дисперсности сырья фракционировали с получением пяти фракций:  $\leq 0,25$ , 1, 2, 3, 5 мм. Опилки фракции 2–3 мм подвергали твердофазной ферментации ксилотрофным базидиомицетом *F. officinalis* из коллекции кафедры физико-химической биологии, биоинженерии и биоинформатики ИГУ. Перед инокуляцией сырьё экстрагировали водой (85 °С, 1 ч) для удаления легкодоступных экстрактивных веществ и стерилизовали автоклавированием (120 °С, 1 атм, 30 мин). Инокуляцию проводили суспензией мицелия, выращенного в течение 2 мес. на жидкой среде Сабуро. В стерильных условиях вносили 3 мл мицелиальной суспензии на 8 г стерилизованных влажных опилок 65 % (W/V). Ферментацию проводили при комнатной температуре в течение 6 и 10 мес. (рис. 1).

Для изучения влияния технологических параметров на выход водорастворимых веществ проводили экстракцию нативных опилок дистиллированной водой при постоянном соотношении сырьё/вода 1:10 (масса/объём). Варьирующими факторами выступали температура, время экстракции и размер частиц сырья. Экстракцию выполняли при температурах 20, 40, 60 и 85 °С в водяной бане (в течение 1 и 6 ч), а также при 120 °С в автоклаве (1 ч). Экстракты получали для всех пяти фракций опилок (0,25, 1, 2, 3 и 5 мм). После экстракции жидкую фазу отделяли центрифугированием (13 000 об/мин, 2 мин), а выход экстрактивных веществ оценивали по оптической плотности супернатанта при 280 нм на спектрофотометре NanoPhotometer (Implen, Германия).

<sup>1</sup> MYCOBANK Database. Fungal Databases, Nomenclature & Species Banks. URL: <https://www.mycobank.org/>

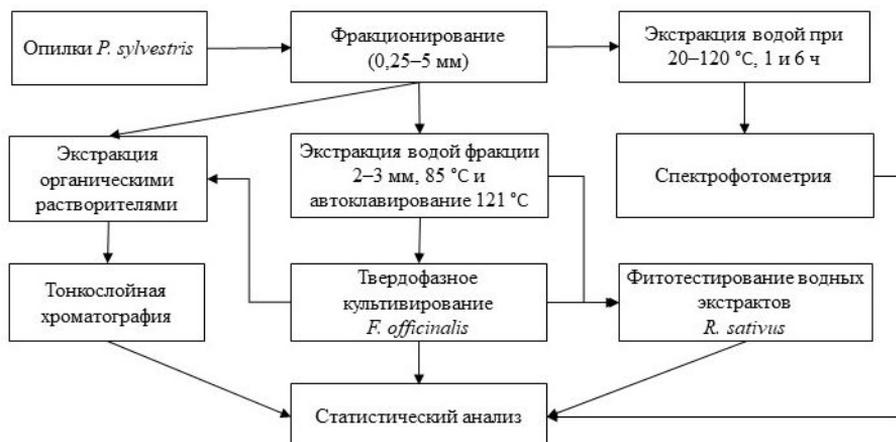


Рис. 1. Блок-схема исследования

Водные экстракты для фитотестирования (Е6, Е10) и экстракты для хроматографического анализа получали в сходных условиях: соотношение масса опилок (в пересчёте на абсолютно сухое вещество)/растворитель составило 1:10, температура экстракции 25 °С. На начальном этапе экстракции образцы перемешивали в течение часа в растворителе (180 об/мин), после чего выдерживали стационарно еще 23 ч. Фитотестирование проводили с использованием водных экстрактов нативных и ферментированных опилок, экстрактивные вещества, извлеченные из тех же образцов органическими растворителями (хлороформ, изопропанол), анализировали методом тонкослойной хроматографии (ТСХ).

ТСХ выполнена на пластинках Silufol (Kavalier, Чехия), в качестве подвижной фазы использовали систему растворителей толуол : этилацетат : муравьиная кислота в объёмном соотношении 9:3:0,6 [Solvent ... , 1982]. Соединения детектировали с помощью УФ-лампы (254/312 нм). Для проявления пятен, невидимых в УФ-свете, хроматограмму обрабатывали 1,5%-ным раствором серной кислоты и нагревали.

Общая целлюлазная активность определялась по скорости образования восстанавливающих сахаров из фильтровальной бумаги с использованием динитросалицилового реагента [Ghose, 1987]. Фенолоксидазную активность (преимущественно лакказы) оценивали по скорости окисления пирокатехина [Purification ... , 2020], лигнинпероксидазную активность – по окислению вератрового спирта [Tien, Kirk, 1984].

Содержание целлюлозы и лигнина в исходных и ферментированных опилках определяли стандартными методами: целлюлозу – щелочным методом, лигнин – гидролизом концентрированной серной кислотой<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Alpha-, beta- and gamma-cellulose in pulp. TAPPI T 203 cm-99 Classical Method. Atlanta, Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 1999. 5 p. ; Determination of structural carbohydrates and lignin in biomass / A. Sluiter, B. Hames, R. Ruiz, C. Scarlata, J. Sluiter, D. Templeton, D. Crocker // Laboratory Analytical Procedure. National Renewable Energy Laboratory, 2008. 16 p.

Биологическую активность водных экстрактов оценивали в эксперименте фитотестирования с применением семян кресс-салата *Lepidium sativum*. Семена помещали в чашки Петри на фильтровальную бумагу, пропитанную исследуемым раствором, полученным разведением исходного водного экстракта в концентрациях 1:50, 1:100, 1:200, а также водные экстракты Е6 и Е10. Контролем служила дистиллированная вода. Проращивание проводили при 24 °С. Всхожесть, определяемую как процент проросших семян от их общего количества, фиксировали в течение трёх суток через каждые 24 ч. Через 72 ч измеряли среднюю длину корешков и побегов проростков [Mañas, De Las Heras, 2018].

Статистическую обработку и визуализацию данных проводили в среде Python 3.9. Для проверки значимости факторов использовали однофакторный ANOVA. Многомерный анализ данных выполняли методами главных компонент (PCA) и с помощью алгоритма нелинейного снижения размерности UMAP (Uniform Manifold Approximation and Projection) [McInnes, Healy, Melville, 2018]. Графическое представление результатов выполнено с применением библиотек matplotlib и seaborn. Уровень статистической значимости принимали  $p < 0,05$ .

### **Результаты и обсуждение**

На первом этапе была исследована зависимость выхода водорастворимых веществ из опилок сосны от физических параметров процесса экстракции. Как и ожидалось, уровень выхода, определяемый по интенсивности УФ-поглощения при 280 нм, демонстрировал зависимость от температуры, времени и размера частиц. Повышение температуры водной экстракции с 20 до 85 °С увеличивало светопоглощение исследуемых растворов в 3–4 раза, а экстракция при 124 °С – в 7–8 раз. Наиболее значительный рост наблюдался для растворов, полученных при 60–85 °С (рис. 2). Увеличение времени экстракции с 1 до 6 ч и уменьшение размера частиц до 0,25 мм также способствовали росту выхода экстрактивных веществ (ЭВ). Результаты многомерного статистического анализа (PCA, UMAP) показали чёткое разделение образцов на две дискретные группы, соответствующие времени экстракции 1 и 6 ч, что подтверждает значимое влияние этого параметра на количественный состав экстрактивных веществ (рис. 3, *a, b*).

Однако, как показал последующий хроматографический анализ, изменения, вызванные варьированием физических условий, носят преимущественно количественный характер. В то же время биотрансформация опилок базидиомицетом *F. officinalis* привела к качественным изменениям в профиле ЭВ. ТСХ выявила значительную модификацию состава после ферментации. В экстрактах неферментированного сырья (как нативного, так и автоклавируемого) детектировались до 14 хроматографических зон, тогда как после ферментации в течение 6 мес. их число сократилось до девяти зон, а после 10 мес. ферментирования – до шести зон.

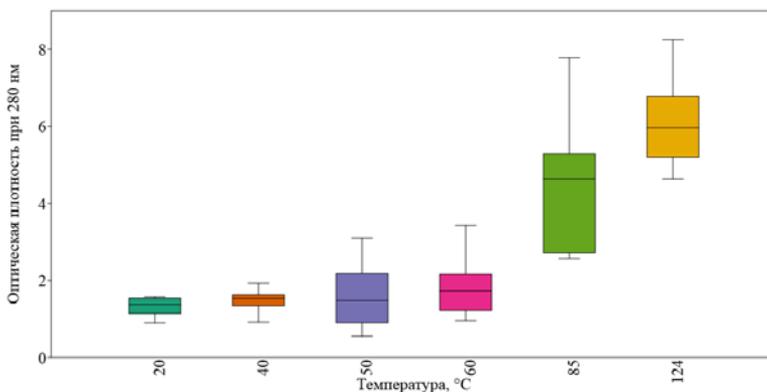


Рис. 2. Зависимость оптической плотности экстрактов (измерено при длине волны 280 нм) от температуры экстракции

Многомерный анализ хроматографических профилей (РСА и UMAP) продемонстрировал систематическое разделение образцов на три основные группы, соответствующие нативному, автоклавированному и ферментированному сырью (рис. 3, *в*, *е*). Для УФ-детекции на проекции РСА ферментированные образцы обособляются от нативных и автоклавированных (рис. 3, *с*, *д*), что указывает на специфическую трансформацию хромофорных соединений. На UMAP их перекрытие со всеми группами, однако, говорит о частичном сохранении общего ароматического профиля. Для детекции серной кислоты выраженное обособление ферментированных образцов от перекрывающихся групп нативных и автоклавированных на РСА свидетельствует об изменении общего состава органических веществ в результате биотрансформации (рис. 3, *е-ф*). Таким образом, если физические параметры экстракции в основном влияют на общий выход ЭВ, то в результате ферментации грибом *F. officinalis* направленно трансформируется качественный состав экстрактов, что является ключевым для изменения их биологических свойств.

Следовательно, составом экстрактов можно целенаправленно управлять как физико-химическими методами (через выход), так и биотехнологически (через качественную трансформацию). Реализация потенциала второго подхода для создания продуктов с заданными свойствами требует углублённых исследований. Ключевыми задачами являются идентификация целевых метаболитов гриба и установление причинно-следственных связей между хемографическим профилем экстрактов и их биологической активностью с использованием комплекса современных аналитических и хемометрических методов.

На следующем этапе исследования оценивали динамику ферментативной активности, а также степень биодegradации компонентов древесины. Анализ ферментативной активности *F. officinalis* в процессе твердофазной ферментации опилок позволил выявить изменения в метаболической активности гриба в зависимости от продолжительности культивирования. Динамика активности лигноцеллюлазного комплекса указывает на смену приоритетов в деструкции компонентов древесины.

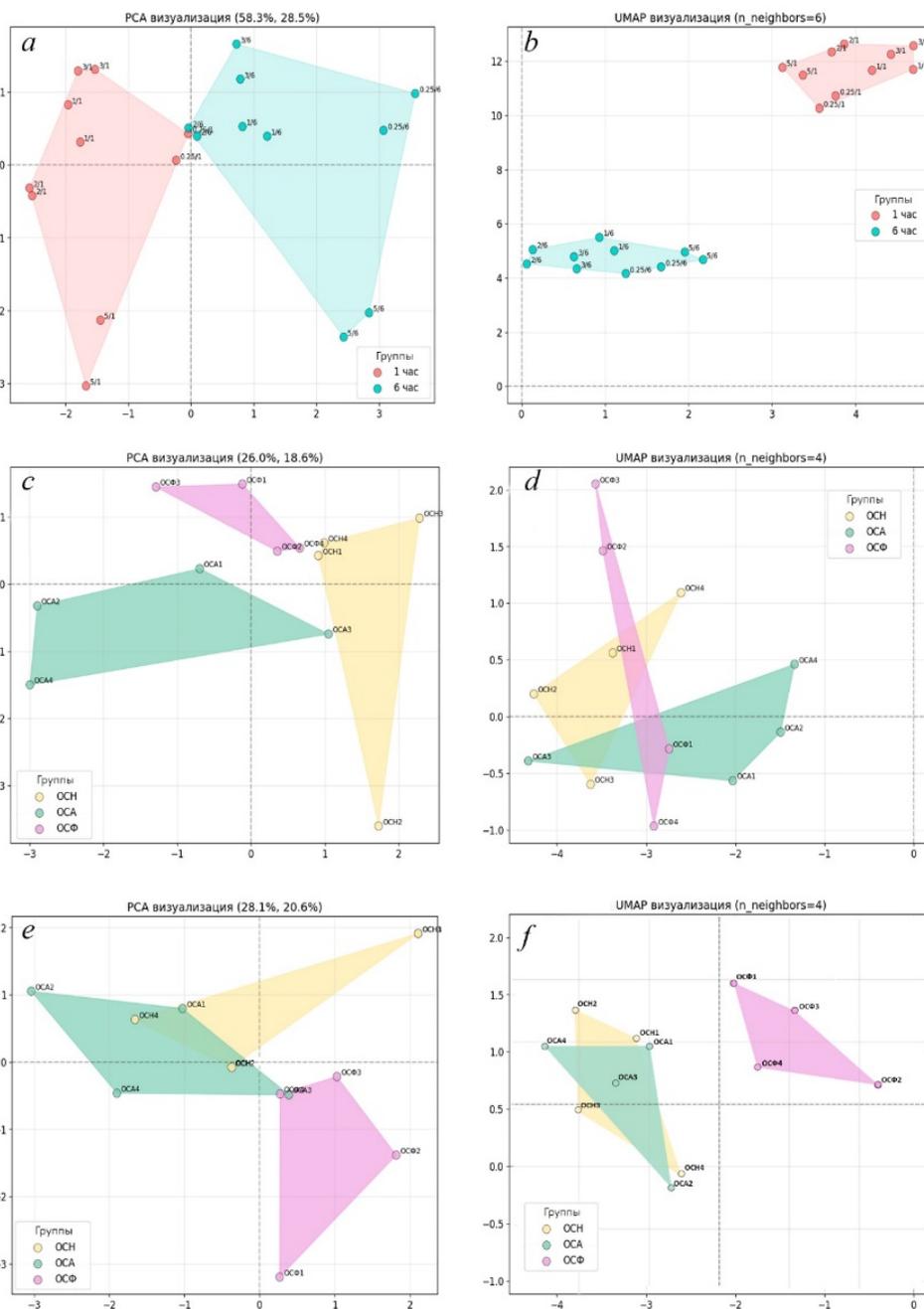


Рис. 3. Результаты многомерного анализа данных экстракции и хроматографических профилей: *a, b* – проекции образцов в пространствах главных компонент (PCA, *a*) и UMAP (*b*), построенные на основании данных оптической плотности водных экстрактов при 280 нм, полученных в различных условиях. Условия экстракции: размер частиц (мм)/время (ч); *c–f* – результаты многомерного анализа хроматографических профилей (значения Rf), выявленных с применением УФ-детекции (*c, d*) и проявления серной кислотой (*e, f*) в координатах PCA (*c, e*) и UMAP (*d, f*)

Спустя 6 мес. ферментации была зарегистрирована активность оксидазных ферментов: фенолоксидазная активность достигала 3,51 Ед/мл, лигнинпероксидазная – 6,50 Ед/мл, при этом целлюлазная активность не детектировалась (табл.). Полученные данные позволяют предположить, что на этой стадии гриб в основном потребляет лигниновый компонент древесины. После 10 мес. культивирования наблюдалось изменение ферментативного профиля: обнаружена исключительно целлюлазная активность (2,09 МЕ/мл) при отсутствии детектируемой пероксидазной активности. Это может свидетельствовать о переходе к деградации целлюлозного компонента после частичного разрушения лигниновой матрицы.

Наблюдаемый сдвиг в ферментативном профиле, при котором активность окислительных пероксидаз сменяется активностью гидролитической целлюлазы, может служить индикатором глубокой перестройки физиологического состояния гриба в ходе длительной ферментации и позволяет предположить смену его метаболической стратегии. Хотя прямое сравнение абсолютных значений активности на 6-й и 10-й мес. требует осторожности из-за возможного влияния длительного эксперимента на стабильность ферментов в среде, всё вышеизложенное позволяет считать вывод о смене приоритетов вероятным. Он подкрепляется независимыми данными химического анализа твёрдой фазы субстрата, показавшими, что к 10-му мес. ферментации относительная убыль лигнина (34 %) существенно превысила убыль целлюлозы (16 %). Наблюдаемая временная пластичность метаболизма дополняет современные представления о вариабельности и «тонкой настройке» механизмов биодеградации у дереворазрушающих базидиомицетов, в том числе внутри рода *Fomitopsis* [Shah, Mali, Lundell, 2018]. Для более глубокого понимания регуляторных механизмов, лежащих в основе этой смены ферментативных стратегий, требуются дальнейшие исследования.

Таблица

Динамика активности лигноцеллюлазного комплекса *F. officinalis* и изменения состава древесных отходов в процессе ферментации

Параметры	Длительность ферментации	
	6 мес.	10 мес.
Ферментативная активность		
Фенолоксидазная активность, ед/мл	3,51±0,42*	не обнаружена
Лигнинпероксидазная активность, ед/мл	6,5±0,78*	не обнаружена
Целлюлазная активность, МЕ/мл	не обнаружена	2,09±0,35*
Изменение состава субстрата		
Содержание целлюлозы, % от исходного	100	84 (убыль 16±1,8 %*)
Содержание лигнина, % от исходного	100	66 (убыль 34±2,4 %*)

Примечание: \* – среднее значение ± стандартное отклонение.

Влияние экстрактов на прорастание семян и рост проростков оценивали в фитотесте с использованием кресс-салата. Результаты фитотестирования демонстрируют выраженное дозозависимое и временное влияние экстрактивных веществ на прорастание семян и развитие проростков кресс-салата. Экстракты из неферментированных опилок проявляли значительную фитотоксичность, степень которой напрямую зависела от концентрации. При

максимальной концентрации (1:10) наблюдалось полное ингибирование прорастания в течение первых 24 ч и существенное отставание в последующие сроки (70 и 75 % всхожести (к 48-му и 72-му ч соответственно) против 100 % в контроле). Разбавление экстракта до 1:200 частично нивелировало токсический эффект: зарегистрирована полная всхожесть к исходу 72 ч, что указывает на пороговый характер действия ингибирующих компонентов.

Биотрансформация субстрата грибом *F. officinalis* кардинально изменила биологическую активность экстрактов. Экстракт после 6 мес. ферментации (Е6) сохранял выраженные фитотоксические свойства: всхожесть к 72 ч эксперимента составила лишь 35 %, а развитие проростков было резко угнетено. Это, вероятно, связано с активной деструкцией лигнина на данной стадии и возможным накоплением промежуточных фенольных соединений. Напротив, ферментация в течение 10 мес. (Е10) привела не только к полному устранению фитотоксичности, но и к проявлению небольшого биостимулирующего эффекта. Длина побега проростков в варианте Е10 превысила контроль на 19,6 %, демонстрируя позитивное влияние на ростовые процессы. Небольшое снижение длины корня (на 22,5 % относительно контроля) может указывать на изменённый баланс регуляторов роста в экстракте (рис. 4).

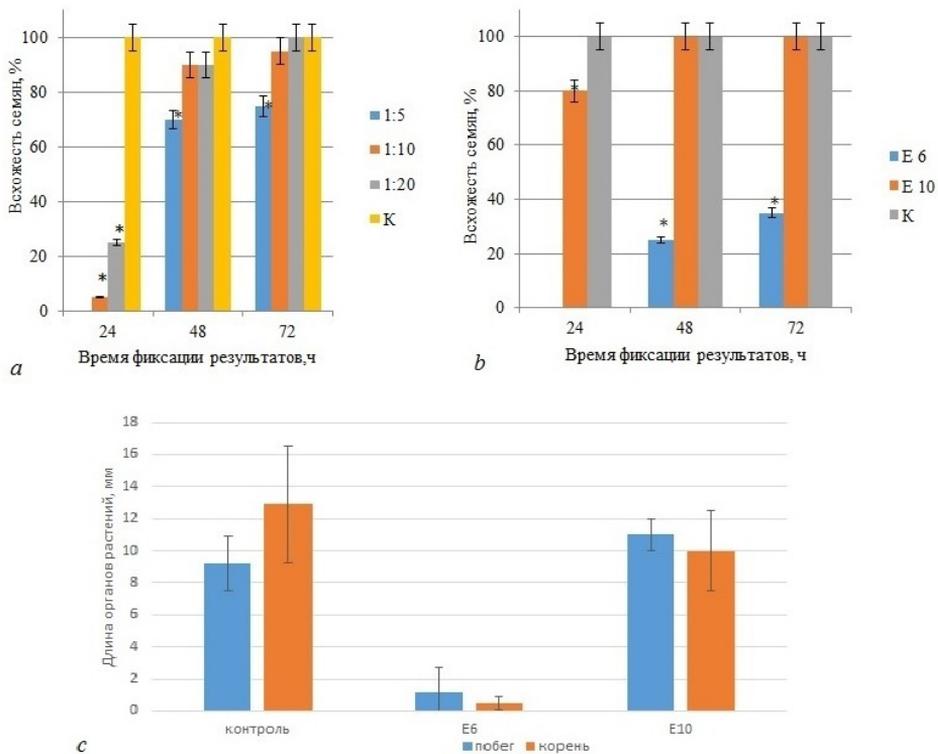


Рис. 4. Влияние экстрактов из нативных и ферментированных опилок на прорастание семян и рост проростков *L. sativum*: а – всхожесть семян в зависимости от концентрации экстракта из неферментированных древесных отходов; б – всхожесть семян под действием экстрактов спустя шесть (Е6) и десять месяцев (Е10) ферментации; с – длина побегов и корней проростков при воздействии экстрактов Е6 и Е10

Результаты фитотестирования выявили двойственную природу действия экстрактивных веществ: концентрированные экстракты из нативного сырья проявляли фитотоксичность, в то время как после длительной ферментации они не только утрачивали ингибирующие свойства, но и приобретали способность стимулировать рост растений, а также индуцировать синтез лигноцеллюлазных ферментов у продуцента. Это указывает на перспективность направленной биотрансформации для конверсии древесных отходов в ценные биостимуляторы и индукторы ферментативной активности.

### **Заключение**

Результаты исследования демонстрируют высокий биотехнологический потенциал применения базидиомицета *Fomitopsis officinalis* для глубокой переработки лигноцеллюлозных отходов. Установлено, что длительная твердофазная ферментация сосновых опилок приводит к направленной трансформации комплекса экстрактивных веществ: число детектируемых хроматографических зон сокращается с 14 до 6, что отражает селективную биодеградацию компонентов древесины.

Ключевым результатом работы является полное устранение фитотоксичности водных экстрактов после 10 мес. ферментации и приобретение ими биостимулирующих свойств, проявляющихся в увеличении длины побегов проростков кресс-салата на 19,6 %. Динамика ферментативной активности продуцента – переход от преимущественной лигнинпероксидазной активности (6,50 Ед/мл на 6-м месяце) к целлюлазной (2,09 МЕ/мл на 10-м месяце) – коррелирует с данными химического анализа субстрата, показавшими опережающую деградацию лигнина (34 %) по сравнению с целлюлозой (16 %).

Полученные данные указывают на возможность биотехнологического управления составом и свойствами экстрактов древесных отходов путём контролируемой ферментации базидиомицетами. В отличие от традиционных физико-химических методов, варьирование которых обеспечивает преимущественно количественные изменения выхода экстрактивных веществ, микробиологическая обработка позволяет качественно преобразовывать их профиль. Это открывает перспективы создания безотходных технологий переработки лигноцеллюлозного сырья с получением экологически безопасных биостимуляторов для растениеводства, индукторов ферментативной активности и других продуктов с высокой добавленной стоимостью.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на идентификацию индивидуальных соединений, элиминируемых или синтезируемых грибом в ходе ферментации, установление количественных закономерностей их трансформации и оптимизацию параметров процесса для масштабирования биотехнологии.

### **Список литературы**

Comprehensive characterization of chemical composition and antioxidant activity of lignan-rich coniferous knotwood extractives / N. V. Ulyanovskii, A. A. Onuchina, A. V. Faleva, N. S. Gorbova, D. S. Kosyakov // *Antioxidants*. 2022. Vol. 11, N 12. 2338. <https://doi.org/10.3390/antiox11122338>

Effects of pressurized hot water extraction on the nanoscale structure of birch sawdust / P. A. Penttilä, P. Kilpeläinen, L. Tolonen, J. P. Suuronen, H. Sixta, S. Willför, R. Serimaa // *Cellulose*. 2013. Vol. 20, N 5. P. 2335–2347. <https://doi.org/10.1007/s10570-013-0001-9>

Fungal biotransformation of hazardous organic compounds in wood waste / M. Komorowicz, D. Janiszewska-Latterini, A. Przybylska-Balcerek, K. Stuper-Szablewska // *Molecules*. 2023. Vol. 28, N 12. 4823. <https://doi.org/10.3390/molecules28124823>

Fungal transformation and reduction of phytotoxicity of grape pomace waste / M. I. Troncozo, M. Lješević, V. P. Beškoski, B. Anđelković, P. A. Balatti, M. C. N. Saparrat // *Chemosphere*. 2019. Vol. 237. P. 124458. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124458>

Ghose T. K. Measurement of cellulase activities // *Pure Appl. Chem.* 1987. Vol. 59, N 2. P. 257–268.

Girometta C. Antimicrobial properties of *Fomitopsis officinalis* in the light of its bioactive metabolites: a review // *Mycology*. 2019. Vol. 10, N 1. P. 32–39. <https://doi.org/10.1080/21501203.2018.1536680>

Lignocellulose: A sustainable material to produce value-added products with a zero waste approach / A. Arevalo-Gallegos, Z. Ahmad, M. Asgher, R. Parra-Saldivar, H. M. N. Iqbal // *Int. J. Biol. Macromol.* 2017. Vol. 99. P. 308–318. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.02.097>

Lignocellulosic Agricultural Waste Valorization to Obtain Valuable Products: An Overview / A. Blasi, A. Verardi, C. G. Lopresto, S. Siciliano, P. Sangiorgio // *Recycling*. 2023. Vol. 8, N 4. Art. 61. <https://doi.org/10.3390/recycling8040061>

Mañas P., De Las Heras J. Phytotoxicity test applied to sewage sludge using *Lactuca sativa* L. and *Lepidium sativum* L. seeds // *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 2018. Vol. 15, N 2. P. 273–280. <https://doi.org/10.1007/s13762-017-1386-z>

McInnes L., Healy J., Melville J. UMAP: Uniform Manifold Approximation and Projection for Dimension Reduction // *arXiv*. 2018. arXiv:1802.03426. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1802.03426>

Metsämuuronen S., Sirén H. Bioactive phenolic compounds, metabolism and properties: A review on valuable chemical compounds in Scots pine and Norway spruce // *Phytochem. Rev.* 2019. Vol. 18, N 3. P. 623–664. <https://doi.org/10.1007/s11101-019-09630-2>

Pressurized hot water flow-through extraction of birch sawdust – Effects on sawdust density and sawdust size / P. Kilpeläinen, V. Kitunen, H. Ilvesniemi, J. Hemming, A. Pranovich, S. Willför // *Nordic Pulp & Paper Res. J.* 2014. Vol. 29, N 4. P. 547–556. <https://doi.org/10.3183/npprj-2014-29-04-p547-556>

Purification and Characterization of Two Novel Laccases from *Peniophora lycii* / O. A. Glazunova, K. V. Moiseenko, O. S. Savinova, T. V. Fedorova // *Journal of Fungi*. 2020. Vol. 6, N 4. 340. <https://doi.org/10.3390/jof6040340>

Ravber M., Knez Ž., Škerget M. Isolation of phenolic compounds from larch wood waste using pressurized hot water: extraction, analysis and economic evaluation // *Cellulose*. 2015. Vol. 22, N 5. P. 3359–3375. <https://doi.org/10.1007/s10570-015-0719-7>

Solid state fermentation of olive mill residues by wood-and dung-dwelling Agaricomycetes: Effects on peroxidase production, biomass development and phenol phytotoxicity / R. Reina, C. Liers, J. A. Ocampo, I. García-Romera, E. Aranda // *Chemosphere*. 2013. Vol. 93, N 7. P. 1406–1412. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.07.006>

Shah F., Mali T., Lundell T. K. Polyporales Brown Rot Species *Fomitopsis pinicola*: Enzyme Activity Profiles, Oxalic Acid Production, and Fe<sup>3+</sup>-Reducing Metabolite Secretion // *Appl. Environ. Microbiol.* 2018. Vol. 84, N 8. P. e02662-17. <https://doi.org/10.1128/AEM.02662-17>

Solvent systems for improved isolation and separation of termitremes A and B / K. H. Ling, C. K. Yang, C. A. Kuo, M. D. Kuo // *Appl. Environ. Microbiol.* 1982. Vol. 44, N 4. P. 860–863. <https://doi.org/10.1128/aem.44.4.860-863.1982>

Tien M., Kirk T. K. Lignin-degrading enzyme from *Phanerochaete chrysosporium*: Purification, characterization, and catalytic properties of a unique H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-requiring oxygenase // *PNAS*. 1984. Vol. 81, N 8. P. 2280–2284. <https://doi.org/10.1073/pnas.81.8.2280>

Wood extractives: main families, functional properties, fields of application and interest of wood waste / J. L. L. N'Guessan, F. B. Niamké, N. J. C. Yao, N. Amusant // *Forest Products Journal*. 2023. Vol. 73, N 3. P. 194–208. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-23-00015>

## References

- Ulyanovskii N.V., Onuchina A.A., Faleva A.V., Gorbova N.S., Kosyakov D.S. Comprehensive Characterization of Chemical Composition and Antioxidant Activity of Lignan-Rich Coniferous Knot-wood Extractives. *Antioxidants*, 2022, vol. 11, no. 12, 2338. <https://doi.org/10.3390/antiox11122338>
- Penttilä P.A., Kilpeläinen P., Tolonen L., Suuronen J.P., Sixta H., Willför S., Serimaa R. Effects of pressurized hot water extraction on the nanoscale structure of birch sawdust. *Cellulose*, 2013, vol. 20, no. 5, pp. 2335-2347. <https://doi.org/10.1007/s10570-013-0001-9>
- Komorowicz M., Janiszewska-Latterini D., Przybylska-Balcerek A., Stuper-Szablewska K. Fungal biotransformation of hazardous organic compounds in wood waste. *Molecules*, 2023, vol. 28, no. 12, 4823. <https://doi.org/10.3390/molecules28124823>
- Troncozo M.I., Lješević M., Beškoski V.P., Anđelković B., Balatti P.A., M.C.N. Saparrat Fungal transformation and reduction of phytotoxicity of grape pomace waste. *Chemosphere*, 2019, vol. 237, pp. 124458.
- Ghose T.K. Measurement of cellulase activities. *Pure Appl. Chem.*, 1987, vol. 59, no. 2, pp. 257-268.
- Girometta C. Antimicrobial properties of *Fomitopsis officinalis* in the light of its bioactive metabolites: a review. *Mycology*, 2019, vol. 10, no. 1, pp. 32-39. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124458>
- Arevalo-Gallegos A., Ahmad Z., Asgher M., Parra-Saldivar R., Iqbal H.M.N. Lignocellulose: A sustainable material to produce value-added products with a zero waste approach. *Int. J. Biol. Macromol.*, 2017, vol. 99, pp. 308-318. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.02.097>
- Blasi A., Verardi A., Lopresto C.G., Siciliano S., P. Sangiorgio Lignocellulosic Agricultural Waste Valorization to Obtain Valuable Products: An Overview. *Recycling*, 2023, vol. 8, no. 4, 61. <https://doi.org/10.3390/recycling8040061>
- Mañas P., De Las Heras J. Phytotoxicity test applied to sewage sludge using *Lactuca sativa* L. and *Lepidium sativum* L. seeds. *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 2018, vol. 15, no. 2, pp. 273-280. <https://doi.org/10.1007/s13762-017-1386-z>
- McInnes L., Healy J., Melville J. UMAP: Uniform Manifold Approximation and Projection for Dimension Reduction // *arXiv*, 2018, arXiv:1802.03426. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1802.03426>
- Metsämuuronen S., Sirén H. Bioactive phenolic compounds, metabolism and properties: A review on valuable chemical compounds in Scots pine and Norway spruce. *Phytochem. Rev.*, 2019, vol. 18, no. 3, pp. 623-664. <https://doi.org/10.1007/s11101-019-09630-2>
- Kilpeläinen P., Kitunen V., Ilvesniemi H., Hemming J., Pranovich A., Willför S. Pressurized hot water flow-through extraction of birch sawdust – Effects on sawdust density and sawdust size. *Nordic Pulp & Paper Res. J.*, 2014, vol. 29, no. 4, pp. 547-556. <https://doi.org/10.3183/npprj-2014-29-04-p547-556>
- Glazunova O.A., Moiseenko K.V., Savinova O.S., Fedorova T.V. Purification and Characterization of Two Novel Laccases from *Peniophora lycii*. *Journal of Fungi*, 2020, vol. 6, no. 4, art. 340. <https://doi.org/10.3390/jof6040340>
- Ravber M., Knez Ž., Škerget M. Isolation of phenolic compounds from larch wood waste using pressurized hot water: extraction, analysis and economic evaluation. *Cellulose*, 2015, vol. 22, no. 5, pp. 3359-3375. <https://doi.org/10.1007/s10570-015-0719-7>
- Reina R., Liers C., Ocampo J.A., García-Romera I., Aranda E. Solid state fermentation of olive mill residues by wood-and dung-dwelling Agaricomycetes: Effects on peroxidase production, biomass development and phenol phytotoxicity. *Chemosphere*, 2013, vol. 93, no. 7, pp. 1406-1412. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.07.006>
- Shah F., Mali T., Lundell T.K. Polyporales Brown Rot Species *Fomitopsis pinicola*: Enzyme Activity Profiles, Oxalic Acid Production, and Fe<sup>3+</sup>-Reducing Metabolite Secretion. *Appl. Environ. Microbiol.*, 2018, vol. 84, no. 8, e02662-17. <https://doi.org/10.1128/AEM.02662-17>
- Ling K.H., Yang C.K., Kuo C.A., Kuo M.D. Solvent systems for improved isolation and separation of territrems A and B. *Appl. Environ. Microbiol.*, 1982, vol. 44, no. 4, pp. 860-863. <https://doi.org/10.1128/aem.44.4.860-863.1982>
- Tien M., Kirk T.K. Lignin-degrading enzyme from *Phanerochaete chrysosporium*: Purification, characterization, and catalytic properties of a unique H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-requiring oxygenase. *PNAS*, 1984, vol. 81, no. 8, pp. 2280-2284. <https://doi.org/10.1073/pnas.81.8.2280>

N'Guessan J.L.L., Niamké F.B., Yao N.J.C., N. Amusant Wood extractives: main families, functional properties, fields of application and interest of wood waste. *Forest Products Journal*, 2023, vol. 73, no. 3, pp. 194–208. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-23-00015>

**Сведения об авторах****Новиков Артём Владимирович**

аспирант

Иркутский государственный университет  
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1  
e-mail: artem.ru88@mail.ru

**Ярыгин Дмитрий Андреевич**

магистрант

Иркутский государственный университет  
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1  
e-mail: mr.dmitry.yarygin@gmail.com

**Михайленко Валентина Львовна**

кандидат химических наук, доцент

Иркутский государственный университет  
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1  
e-mail: mival63@gmail.com

**Вздорова Ксения Сергеевна**

студент

Иркутский государственный университет  
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1  
e-mail: ksenialala62@gmail.com

**Казакова Анастасия Сергеевна**

студент

Иркутский государственный университет  
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1  
e-mail: kazakovaanastasia09373@gmail.com

**Пермякова Мария Сергеевна**

студент

Иркутский государственный университет  
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1  
e-mail: mari.permyakova.04.05@mail.ru

**Юринова Галина Валерьевна**

кандидат биологических наук, доцент

Иркутский государственный университет  
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1  
e-mail: yurinova@yandex.ru

**Information about the authors****Novikov Artem Vladimirovich**

Postgraduate

Irkutsk State University  
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,  
Russian Federation  
e-mail: artem.ru88@mail.ru

**Yarygin Dmitriy Andreevich**

Undergraduate

Irkutsk State University  
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,  
Russian Federation  
e-mail: mr.dmitry.yarygin@gmail.com

**Mikhailenko Valentina Lvovna**

Candidate of Sciences (Chemistry),

Associate Professor  
Irkutsk State University  
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,  
Russian Federation  
e-mail: mival63@gmail.com

**Vzdorova Ksenia Sergeevna**

Student

Irkutsk State University  
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,  
Russian Federation  
e-mail: ksenialala62@gmail.com

**Kazakova Anastasia Sergeevna**

Student

Irkutsk State University  
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,  
Russian Federation  
e-mail: kazakovaanastasia09373@gmail.com

**Permyakova Maria Sergeevna**

Student

Irkutsk State University  
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,  
Russian Federation  
e-mail: mari.permyakova.04.05@mail.ru

**Yurinova Galina Valerievna**

Candidate of Sciences (Biology),

Associate Professor  
Irkutsk State University  
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,  
Russian Federation  
e-mail: yurinova@yandex.ru

**Саловарова Валентина Петровна**  
доктор биологических наук, профессор,  
заведующий кафедрой  
Иркутский государственный университет  
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1  
e-mail: vsalovarova@gmail.com

**Salovarova Valentina Petrovna**  
Doctor of Sciences (Biology),  
Professor, Head of Department  
Irkutsk State University  
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,  
Russian Federation  
e-mail: vsalovarova@gmail.com

Статья поступила в редакцию **02.06.2025**; одобрена после рецензирования **08.09.2025**; принята к публикации **12.09.2025**  
Submitted **June, 02, 2025**; approved after reviewing **September, 08, 2025**; accepted for publication **September, 12, 2025**