

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ БИОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 630.839:54.056

EDN: PGTOYI

DOI: 10.21285/achb.1012



**Оценка биологического потенциала водных
экстрактов древесных отходов с использованием
ультрафиолетовой/видимой спектроскопии и тест-объектов**

А.В. Новиков[✉], А.А. Приставка, В.Л. Михайленко, З.А. Ефременко,
Д.А. Ярыгин, Г.В. Юринова, В.П. Саловарова

Иркутский государственный университет, Иркутск, Российская Федерация

Аннотация. Целью проведенного исследования являлось изучение влияния условий водной экстракции древесных опилок на биологическую активность экстрактивных веществ по отношению к тест-объектам разных таксономических и экологических групп: базидиомицету *Pleurotus ostreatus* 0482, бактериям рода *Bacillus*, редису *Raphanus sativus* (L.). Установлено, что полученные растворы подавляют рост и развитие большинства исследуемых тест-объектов пропорционально температуре экстракции (до 40% по отдельным показателям). В то же время эффективность утилизации компонентов древесины *Pleurotus ostreatus* 0482 при твердофазном культивировании возрастает на 25–40% после удаления водорастворимых экстрактивных веществ. Проведено фракционирование экстрактов с последовательным использованием гексана и хлороформа. Для всех органических и водных фаз получены спектры поглощения в ультрафиолетовой и видимой областях спектра. Сравнение спектральных характеристик выявило максимумы поглощения в диапазоне 200–300 нм. При этом с ростом температуры экстракции увеличивается число пиков, всего идентифицировано восемь максимумов, включая бато- и гипсохромные сдвиги одного и того же соединения. Математическая обработка спектров выявила паттерны, связывающие спектральные характеристики с биологическим действием экстрактов. Анализ максимумов поглощения указывает на присутствие лигнанов как вероятных фитотоксинов, флавоноидов и стильбенов как возможных индукторов ферментативной активности. В результате проведенной работы проанализирована предполагаемая химическая природа биоактивных соединений, а также исследованы возможные механизмы их действия и направления практического использования результатов.

Ключевые слова: древесные отходы, ультрафиолетовая/видимая спектроскопия, биотестирование, *Pleurotus ostreatus*, ферментативная активность

Для цитирования: Новиков А.В., Приставка А.А., Михайленко В.Л., Ефременко З.А., Ярыгин Д.А., Юринова Г.В. [и др.]. Оценка биологического потенциала водных экстрактов древесных отходов с использованием ультрафиолетовой/видимой спектроскопии и тест-объектов // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2025. Т. 15. № 4. С. 503–514. DOI: 10.21285/achb.1012. EDN: PGTOYI.

Biological potential assessment of aqueous wood-waste extracts using ultraviolet/visible spectroscopy and test objects

Artem V. Novikov[✉], Alexey A. Pristavka, Valentina L. Mikhailenko, Zinaida A. Efremenko, Dmitriy A. Yarygin, Galina V. Yurinova, Valentina P. Salovarova

Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract. The study aimed to examine the effect of conditions for aqueous extraction from sawdust on the biological activity of extractive substances for test objects from different taxonomic and ecological groups: *Pleurotus ostreatus* 0482 basidiomycete, *Bacillus* bacteria, and radish *Raphanus sativus* (L.). The obtained solutions were found to inhibit the growth and development of most test objects in proportion to the extraction temperature (up to 40% for some indicators). In solid-state fermentation, the biological efficiency of *Pleurotus ostreatus* 0482 increased by 25–40% after removing water-soluble extractives. The extracts were fractionated with successive use of hexane and chloroform. For all organic and aqueous phases, absorption ultraviolet/visible spectra were obtained. A comparison of spectral characteristics revealed absorption maxima within the range of 200–300 nm. With rising extraction temperature, the number of peaks was observed to increase; a total of eight maxima was identified, including batho- and hypsochromic shifts of the same compound. A mathematical processing of the spectra revealed patterns linking spectral characteristics to the biological action of extracts. The conducted absorption maximum analysis indicates the presence of lignans as potential phytotoxins, as well as flavonoids and stilbenes as possible inducers of enzymatic activity. The study analyzed the assumed chemical nature of bioactive compounds, as well as examining possible mechanisms of their action and practical applications of the obtained results.

Keywords: wood waste, ultraviolet/visible spectroscopy, bioassay, *Pleurotus ostreatus*, enzymatic activity

For citation: Novikov A.V., Pristavka A.A., Mikhailenko V.L., Efremenko Z.A., Yarygin D.A., Yurinova G.V., et al. Biological potential assessment of aqueous wood-waste extracts using ultraviolet/visible spectroscopy and test objects. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2025;15(4):503–514. (In Russian). DOI: 10.21285/achb.1012. EDN: PGTOYI.

ВВЕДЕНИЕ

Лесной сектор занимает ключевое место в экономике многих стран, включая Россию. Основными потребителями древесины являются лесопромышленные и перерабатывающие предприятия. По данным за 2022 год, мировой объем заготовки древесины составил 3914,5 млн м³ [1]. Сибирский федеральный округ аккумулирует около 40% от общих запасов древесины в России, при этом Иркутская область обладает 11% от общероссийского объема. В 2015 году здесь было заготовлено 50,7 тыс. м³ древесины, что сопровождалось образованием более 14,3 тыс. м³ отходов. В 2018 году объем заготовки в Иркутской области превысил 80 тыс. м³ [2].

Существуют различные способы утилизации отходов лесозаготовки, включая производство бумаги, картона, строительных материалов, древесного угля, биотоплива и других продуктов [3]. Однако переработке подвергаются менее 40% отходов, тогда как оставшаяся масса складируется на открытых участках или остается на местах рубки. Это ведет к серьезным экологическим (деструкция экосистем, загрязнение водоемов, эмиссия парниковых газов, распространение вредителей) и экономическим (утраты полезных земель, расходы на рекультивацию) последствиям [4].

Биотехнологическая переработка лигноцеллюлозных отходов позволяет получать ценные соединения – этианол,

органические кислоты, ферменты, полимеры и др. В то же время эффективность таких процессов ограничена устойчивостью исходного сырья к ферментации [5]. Одним из путей повышения доступности растительных отходов является их предварительная обработка. Несмотря на многочисленные исследования, этот этап по-прежнему остается одним из самых дорогостоящих во всем процессе преобразования лигноцеллюлозного субстрата в продукты. Его стоимость составляет от 11 до 27% от общих затрат [6]. Гидротермическая обработка (экстракция горячей водой) представляет собой экономически выгодную альтернативу, не требующую использования химических реагентов. При этом удаляются низкомолекулярные экстрактивные вещества и гемицеллюлозы, которые тормозят биоконверсию субстрата [7]. Существенным фактором устойчивости лигноцеллюлозных субстратов к разложению является лигнин, физически блокирующий доступ ферментов к углеводам. Биологические методы селективного удаления лигнина с применением базидиомицетов позволяют проводить обработку при мягких условиях без образования побочных продуктов [5]. Более того, такие грибы используются для получения биокомпозитов, востребованных в строительстве, дизайне, создании декоративных элементов и упаковочных средств [8].

Несмотря на достижения в области биодеструкции лигноцеллюлозы с использованием грибов, остается

нерешенным вопрос об эффективности однократной гидротермической обработки как самостоятельного этапа подготовки субстрата. Также недостаточно изучена взаимосвязь между условиями экстракции и составом водорастворимых компонентов, обладающих биологической активностью.

Целью представленного исследования являлось проведение оценки влияния параметров гидротермической экстракции древесных отходов на эффективность их утилизации базидиомицетом *Pleurotus ostreatus* 0482 и выявление биологически значимых спектральных паттернов в водных экстрактах, коррелирующих с их действием.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Общая схема исследования представлена на рис. 1.

В качестве лигноцеллюлозного сырья использовались отходы переработки древесины хвойных пород (смесь опилок сосны и лиственницы), полученные на деревоизделийном предприятии г. Иркутска. Их фракционный состав включал частицы размером 0,5–10,0 мм. Соотношение размерных фракций: менее 3 мм – 35%; 3,0–4,5 мм – 45%; от 5 мм и более – 20%. Исходная влажность сырья составляла $10,0 \pm 0,5\%$.

Предобработка субстрата водой осуществлялась при разных температурных режимах в соотношении опилок и дистилированной воды (W/V), равном 1:10:

- раствор W1: выдерживание в дистилированной воде при 20 °C в течение 24 ч;
- раствор W2: аналогично W1 с последующим нагреванием на водяной бане при 80 °C в течение 1 ч;
- раствор W3: аналогично W1 с последующей обработкой в автоклаве в течение 1 ч при избыточном давлении 1 атм и 121 °C.

Полученные растворы отфильтровывались через фильтр Шотта (160 мкм) для их последующего использования при культивировании в разных условиях кислотофильного базидиомицета *P. ostreatus* 0482 из коллекции

кафедры физико-химической биологии, биоинженерии и биоинформатики Иркутского государственного университета (г. Иркутск, Россия) (см. рис. 1).

Твердофазное культивирование гриба проводилось на предобработанной лигноцеллюлозе в чашках Петри без внесения дополнительных компонентов питательной среды при 27 °C и влажности субстрата 80% (W/V) в течение 2 месяцев. В качестве контроля использовалась аналогичная смесь опилок без предварительной обработки. Посевной материал вносили в виде суспензии мицелия в соотношении 20 мг биомассы на 100 г субстрата (по ACB¹). После завершения культивирования определялись биомасса мицелия, содержание внеклеточного белка, активность ферментов лигноцеллюлазного комплекса, остаточное количество лигнина и целлюлозы в ферментированном субстрате. Ферменты экстрагировались 0,001 M Na-ацетатным буферным раствором (pH 4,6) в соотношении 1:30 (W/V). Содержание лигнина определялось гравиметрически после кислотного гидролиза и отделения углеводного компонента [9]; содержание целлюлозы определяли щелочным методом [10].

Глубинное культивирование проводилось в течение 7 суток на питательной среде Чапека – Докса с 0,3%-м раствором глюкозы, приготовленным на основе водных экстрактов W1–W3. В качестве контроля использовали аналогичную среду на основе воды. В ходе культивирования оценивали накопление биомассы, внеклеточного белка и активность ферментов лигноцеллюлазного комплекса в культуральной жидкости. Содержание биомассы измерялось гравиметрически [11], белка – спектрофотометрически [12]. Активность ферментов определялась при pH 4,6 в присутствии 0,05 M Na-ацетатного буфера.

Активность лакказы оценивалась по изменению оптической плотности 10 мМ раствора пирокатехина при 410 нм. Определение активности лигниназы (лигнинпероксидазы) проводилось по начальной скорости окисления 10 мМ раствора вератрового спирта в присутствии перекиси водорода при 310 нм. За единицу

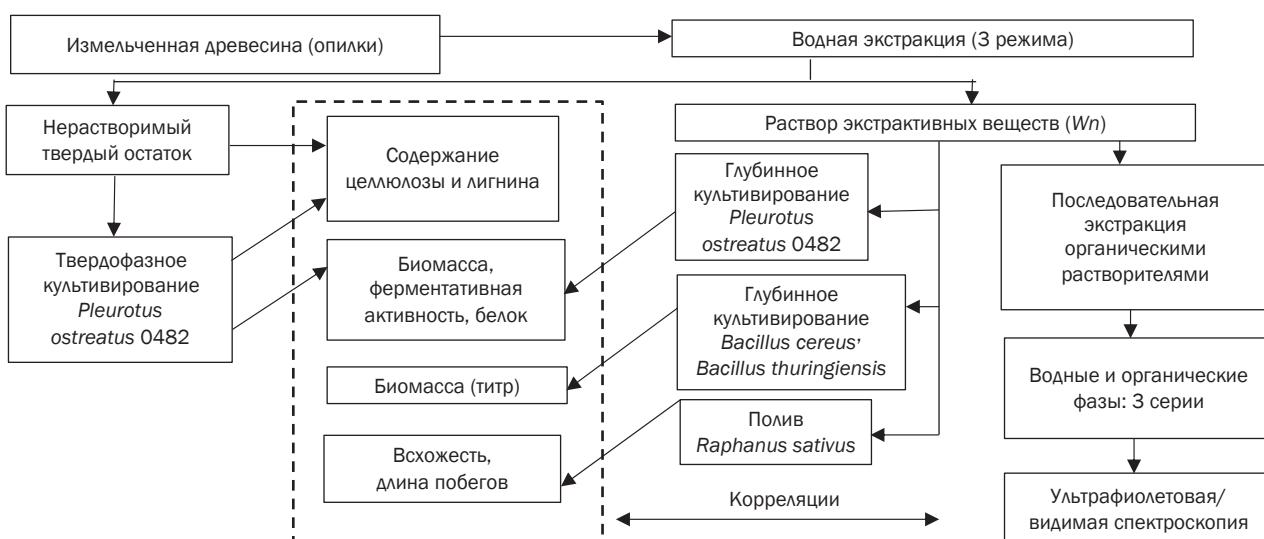


Рис. 1. Общая схема исследования

Fig. 1. General scheme of the study

¹ACB – абсолютно сухое вещество.

активности (U) лакказ и лигниназы принимали активность фермента, окисляющего 1 мкМ субстрата в минуту [13].

Общая целлюлазная активность определялась по скорости образования восстанавливающих сахаров (в пересчете на глюкозу) из фильтровальной бумаги с использованием динитросалицилового реагента. Ферментативную активность выражали в международных единицах на миллилитр (IU/ml), где 1 IU – количество молей глюкозы, образовавшихся за 1 мин в присутствии известного количества фермента [14].

Биологическая активность водных экстрактов $W1-W3$ оценивалась по отношению к тест-объектам из различных таксономических групп:

1. Почвенные бактерии двух видов – *Bacillus cereus* 846 и *Bacillus thuringiensis* KC (культуры любезно предоставлены заведующим кафедрой микробиологии Иркутского государственного университета, доцентом О.Ф. Вятчиной) – выращивались глубинным способом на среде LB, содержащей в качестве водной фазы исследуемые растворы ($W1-W3$). Посевной материал вносился в виде клеточной суспензии (10^8 КОЕ/мл). Культивирование осуществлялось в конических колбах на качалке при 130 об/мин и температуре 30 °C. Интенсивность накопления биомассы оценивалась по изменению оптической плотности культуральной жидкости при 600 нм через сутки культивирования [15].

2. Оценка фитотоксичности проводилась на семенах редиса посевного *Raphanus sativus*, увлажняемых 10 мл экстрактов. Контролем служила дистиллированная вода. Фитотоксичность оценивалась по всхожести (отношение проросших к общему числу семян) и длине проростков [16].

На заключительном этапе исследований растворы $W1-W3$ фракционировались последовательной экстракцией гексаном и хлороформом с получением следующих фракций: исходный водный раствор (Wn), гексановая фракция ($Wn.H$), водная фракция после гексана ($Wn.H.W$), хлороформная фракция ($Wn.C$), водная после хлороформа ($Wn.C.W$), где n – номер варианта предобработки.

Спектры поглощения регистрировались в диапазоне 200–950 нм в кварцевой кювете ($l = 10$ мм) на спектрофотометре NanoPhotometer P330 (Implen, Германия). В качестве контроля использовались аналогичные фракции, полученные из дистиллированной воды. Анализ пиков проводили методом первой производной [17] с использованием программного приложения OriginPro 2025b. Контроль pH проводился потенциометрически (рН-метр-иономер «Эксперт-001» (ООО «Эконикс-Эксперт», Россия)).

Все измерения выполнялись в 3–8 повторностях. Результаты представлены в виде $M \pm SD$. Для сравнения групп применяли критерий Тьюки (после ANOVA для параметрических данных) и U-критерий Манна – Уитни (для непараметрических данных). Корреляционный анализ (с использованием коэффициента Пирсона и Спирмена) применяли для оценки взаимосвязей между количественными признаками. Многомерный анализ PERMANOVA (с метрикой Брея – Кертиса и 9999 перестановками) применяли для оценки значимости влияния факторов на совокупность биологических показателей. Статистическую значимость принимали при $p < 0,05$. Обработку данных проводили в программе Past v5.2.2.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты исследований влияния режимов водной предобработки лигноцеллюлозного субстрата на рост и развитие *P. ostreatus* 0482 представлены на рис. 2.

Независимо от способа культивирования, наблюдается закономерное увеличение активности внеклеточных ферментов в ряду контроль → $W1 \rightarrow W2 \rightarrow W3$. При глубинном культивировании (см. рис. 2, а) достоверные отличия по активности целлюлаз и лакказ от контроля наблюдаются только у образцов, полученных после высокотемпературной обработки ($W2$ и $W3$). В случае твердофазного культивирования (см. рис. 2, б) предобработка при любом режиме вызывает достоверное повышение активности всех исследуемых ферментов по сравнению с контролем. Однако наибольшая глубина разложения субстрата (см. рис. 2, с) достигается только после высокотемпературной обработки: утилизация целлюлозы увеличивается на 25%, а деградация лигнина – примерно в 1,5 раза по сравнению с контролем. Хотя при жидкостном культивировании накопление биомассы на различных средах не отличалось от контроля, повышение активности ферментов, вероятно, обусловлено индукцией их синтеза водорастворимыми компонентами древесины, количество которых возрастает с температурой предобработки [18]. При твердофазном культивировании интенсивность освоения субстрата мицелием также коррелирует с температурой обработки, что отражается на уровне синтезируемых ферментов (см. рис. 2, д).

Таким образом, сочетание высокотемпературной водной предобработки с последующей ферментацией субстрата базидиомицетом *P. ostreatus* 0482 обеспечивает усиление процессов делигнификации и деструкции лигноцеллюлозы. Полученные данные свидетельствуют, что продукты после такой обработки становятся более доступными для биотрансформации и могут использоваться в биотехнологических процессах.

Поскольку водорастворимые компоненты древесины ингибируют развитие *P. ostreatus* 0482 на нативном субстрате, а на этапе водной предобработки образуются значительные объемы экстрактов, была оценена их биологическая активность в отношении других модельных объектов. Экстракты продемонстрировали выраженную фитотоксичность (рис. 3) и бактериостатическое действие (рис. 4), зависящие от температурного режима предобработки.

Все исследуемые растворы снижали всхожесть семян *R. sativus* по сравнению с контролем, однако между самими растворами статистически значимых различий не выявлено (см. рис. 3, б). Скорость роста побегов достоверно снижалась при обработке «горячими» экстрактами $W2$ и $W3$, тогда как низкотемпературный раствор $W1$ не оказывал значимого влияния на рост *R. sativus* (см. рис. 3, а).

Бактериостатический эффект экстрактов был менее выражен. Значимое ингибирование роста установлено лишь для одного варианта ($W3$) по отношению к бактерии *B. thuringiensis* KC. (см. рис. 4). Более высокая толерантность микроорганизмов может быть обусловлена их экологическими и/или морфологическими особенностями.

Таким образом, влияние экстрактов на тест-объекты явно зависит от температуры водной экстракции: при низких температурах биологическое действие слабо выражено или отсутствует. При увеличении темпе-

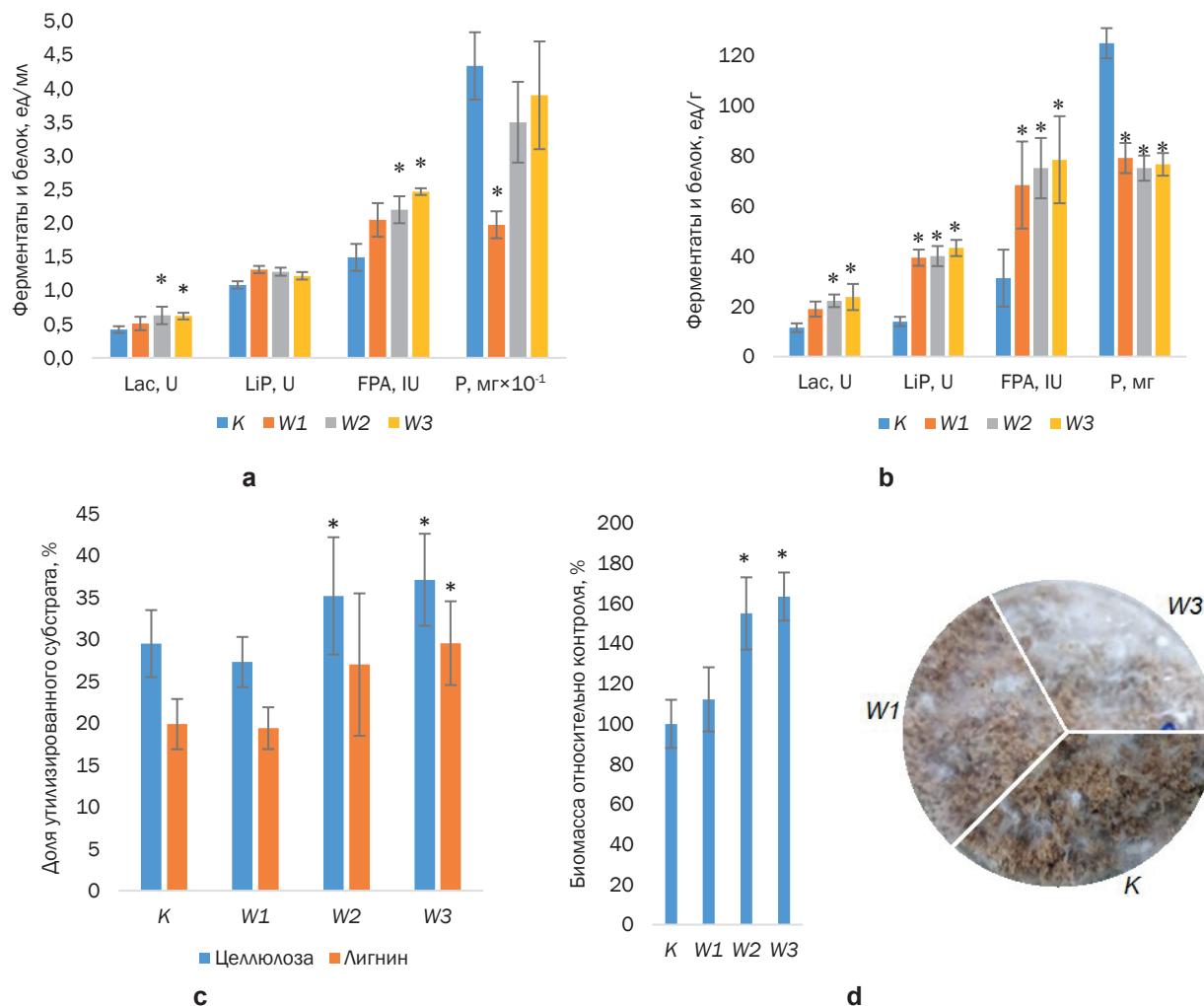


Рис. 2. Влияние условий водной экстракции древесины на активность *Pleurotus ostreatus* 0482 при глубинном и твердофазном культивировании: а – жидкая фаза после глубинного культивирования на среде Чапека – Докса (7-е сутки); б – ферментированный субстрат после твердофазного культивирования (2 месяца); в – доля компонентов древесины, утилизированных базидиомицетом после 2 месяцев твердофазного культивирования; г – накопление биомассы гриба при твердофазном культивировании на 14-е сутки (на фото) и через два месяца (на гистограмме) (К – контрольные среды; Lac – лакказа; LiP – лигнинпероксидаза; FPA – общая целлюлазная активность по фильтровальной бумаге; Р – содержание белка; * – отличие от контроля при $p < 0,05$)

Fig. 2. Effect of water extraction conditions of wood on the activity of *Pleurotus ostreatus* 0482 during submerged liquid culture and solid state fermentation: a – liquid phase after submerged cultivation on Czapek – Dox medium (7th day); b – fermented substrate after solid state fermentation (2 months); c – proportion of wood components utilized by the basidiomycete after 2 months of solid state fermentation; d – accumulation of fungus biomass solid state fermentation cultivation on the 14th day (in the photo) and after 2 months (in the histogram) (K – control media; Lac – laccase; LiP – lignin peroxidase; FPA – total cellulase activity on filter paper; P – protein content; * – difference from control at $p < 0,05$)

ратуры (W2, W3) негативное воздействие возрастает, что позволяет предположить накопление биоактивных соединений при высокотемпературной обработке древесины. pH водных экстрактов, полученных в разных условиях, различался в пределах 0,4 ед., поэтому изменение кислотности не может обусловливать наблюдаемое воздействие на тест-объекты.

Жидкая фаза после водной предобработки лигноцеллюлозы сама по себе является продуктом, имеющим биологическую активность [19], и перспективна для биотехнологии. В связи с этим важным является факт установления состава растворенных веществ. Точная идентификация компонентов сложна и не всегда целе-

сообразна, но можно применить простые методы для выявления паттернов, отвечающих за биологическую активность. В качестве таких паттернов могут выступать экстрактивные вещества древесного сырья. При этом необходимо учитывать, что выход экстрактивных веществ изменяется от способа экстракции и растворителя. Например, разные виды хроматографии или спектроскопии могут привести к различиям в результатах [20]. Тем не менее экстрактивные вещества могут служить критерием сравнения, если они извлечены из одних и тех же источников. При этом можно сравнивать вещества, извлеченные в результате как водной, так и органической экстракции [21].

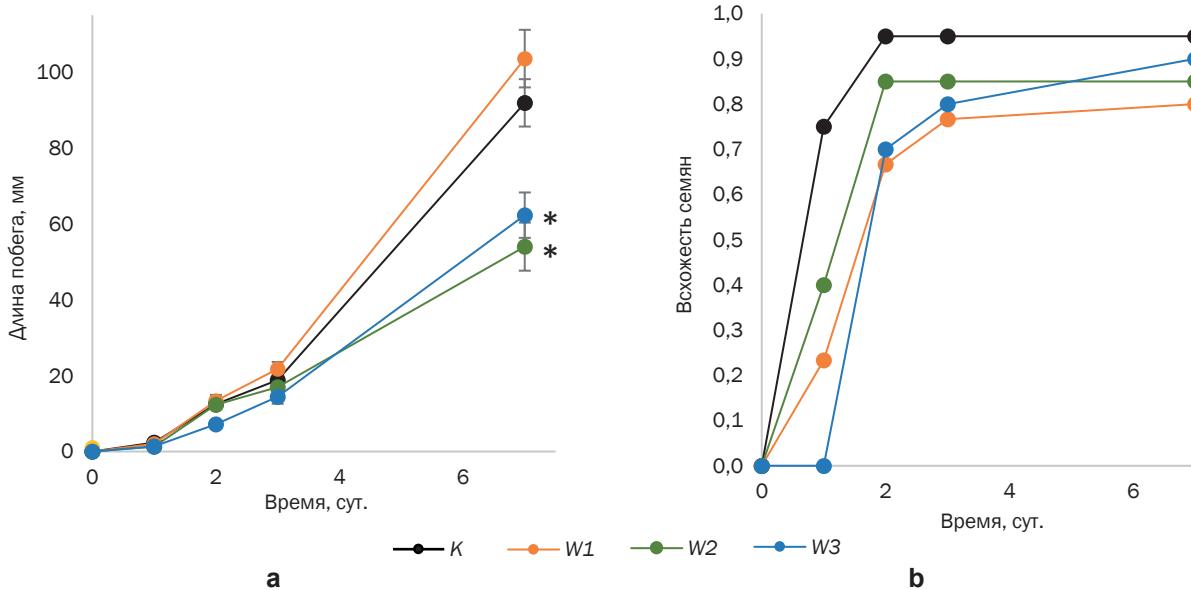


Рис. 3. Влияние водных экстрактов древесины на скорость роста побегов (а) и динамику всхожести семян (б) *Raphanus sativus* (К – контроль с дистиллированной водой; * – отличие от контроля при $p < 0,01$)

Fig. 3. Effect of aqueous wood extracts on the growth rate of sprouts (a) and the dynamics of seed germinability (b) *Raphanus sativus* (K – control group with distilled water; * – difference from control at $p < 0.01$)

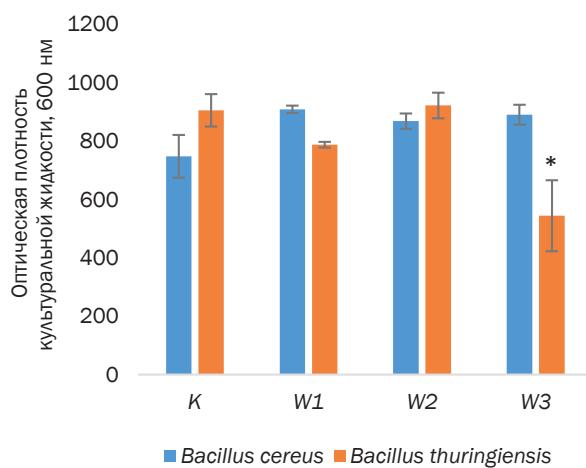


Рис. 4. Накопление биомассы бактериями рода *Bacillus* в жидкой среде LB с древесными экстрактами через сутки культивирования (К – контрольная среда без экстракта)

Fig. 4. Biomass accumulation by bacteria *Bacillus* in liquid LB-medium with wood extracts after 24 hours of cultivation (K – control medium without extract)

С целью выявления комплексных различий между водными экстрактами W1–W3 использовалась спектроскопия в видимой и ультрафиолетовой (УФ) области. Хотя метод не является способом абсолютной идентификации соединений (особенно в сложных смесях), сравнение спектров растворов, полученных в разных условиях, может позволить распознать структуры, указывающие на определенные химические группы и связанные с воздействием экстрактов на биологические объекты [22].

Водные экстракты подвергались фракционированию с использованием гексана и хлороформа с последующей регистрацией УФ/видимых спектров поглощения орга-

нических и водных фаз. Такая обработка позволяет выделить паттерны, связывающие спектральные характеристики с биологической активностью экстрактов. Выбор экстрагентов (вода, $\epsilon = 80,00$; хлороформ, $\epsilon = 4,70$; гексан, $\epsilon = 1,89$) обусловлен различиями в полярности и их прозрачностью в УФ-области. Вследствие того, что рафинат после обработки гексаном не имел максимумов поглощения, его дополнительно подвергали фракционированию хлороформом. Максимумы поглощения в спектрах идентифицировали методом первой производной (таблица).

Сравнение спектральных характеристик выявило следующие особенности:

1. Максимумы поглощения регистрируются в диапазоне 200–300 нм, в области более 400 нм сигналы отсутствуют.

2. С увеличением температуры экстракции число выявляемых пиков возрастает, что указывает на усложнение состава экстрактов. Это может быть связано не только с изменением компонентного состава экстрактивных веществ, но и с вариативностью их конформации [23].

3. В водных фракциях низкотемпературной экстракции (W1) четкие пики часто отсутствуют.

4. Некоторые максимумы характерны только для определенных растворителей, что свидетельствует о различии в полярности соединений (в том числе разных хромофорных групп). Идентифицируется ограниченное количество максимумов поглощения – всего восемь, причем пики с близкими, но не совпадающими максимумами поглощения ($\Delta D < 5$ нм) принимали за бато-(-гипсо-)хромный сдвиг одного вещества в случае, если эти пики не появлялись одновременно в одном и том же спектре ни в одной серии.

Распределение пиков по сериям указывает на разную полярность соединений с различными максимумами поглощения, наиболее гидрофильные соединения имеют

Координаты максимумов поглощения*, идентифицированных методом первой производной в спектрах поглощения продуктов фракционирования древесных экстрактов (цветом выделены ячейки с пиковыми значениями оптической плотности, цвета и их интенсивность пропорциональны величине оптической плотности)

Coordinates of absorption maxima*, identified by the first derivative method in the absorption spectra of fractionation products of wood extracts (cells with peak values of optical density are highlighted in color, colors and their intensity are proportional to the optical density value)

Фракция	Длина волны, соответствующая идентифицированным максимумам поглощения, нм							
	209±0,82	230±1,83	277±3,20	224±1,13	219±1,76	246±4,24	291±3,90	238,5±1,70
W1	1,621	0,990	0,460	1,100	1,227	0,566	0,351	0,773
W2	2,500	2,466	1,225	2,313	2,500	1,531	0,972	2,000
W3	0,284	0,060	0,279	0,302	0,489	0,840	0,592	0,358
W1.H	2,960	1,652	0,508	1,880	2,142	1,174	0,404	1,398
W2.H	0,000	0,000	0,456	1,152	2,500	1,463	0,868	1,182
W3.H	0,000	3,882	3,786	2,238	3,006	8,670	4,542	10,218
W1.C	0,000	2,500	1,577	1,761	0,407	1,332	0,751	5,700
W2.C	0,000	0,565	1,505	0,692	0,111	3,500	1,307	7,000
W3.C	0,000	0,506	0,528	0,690	5,000	1,040	0,800	2,138
W1.C.W	1,071	0,442	0,207	0,524	0,609	0,213	0,148	0,318
W2.C.W	4,230	9,285	4,860	5,520	1,080	2,985	2,325	7,125
W3.C.W	10,000	2,520	1,592	2,216	2,176	1,758	1,332	2,362

Примечание. * OD = f(λ_{max}).

максимумы при 209 нм. Вещества с максимумами 230 и 277 нм менее полярны, обнаруживаются как в водных, так и в хлороформных фракциях. Наиболее неполярное соединение (238 нм) выявляется только в органических растворителях.

Площади пиков в спектрах фракций не аддитивны относительно исходных водных экстрактов (W1–W3): сумма площадей после последовательной экстракции на порядок превышает площадь пика в исходном растворе. Это указывает на отсутствие линейной пропорциональности между концентрацией в исходном растворе и оптической плотностью фракций. Аналогичный эффект наблюдается для модельной смеси углеводов и полифенола. Вероятно, при разделении веществ с разной полярностью их оптическая активность значительно изменяется как сама по себе, так и под влиянием растворителя (например, при изобестическом равновесии [24]).

Корреляционный анализ ($p < 0,05$) показал, что оптическая плотность на длинах волн 224, 230, 277, 246 и 291 нм систематически связана с биологическими эффектами:

- 224, 230 и 277 нм – отрицательная корреляция со вхожестью и ростом растений редиса;
- 219, 246, 291 нм – отрицательная корреляция с ростом *B. thuringiensis*;
- 246 и 291 нм – положительная корреляция с ферментативной активностью *P. ostreatus* 0482, особенно лакказной и целлюлазной.

Результаты анализа координат максимумов поглощения (см. таблицу) и сопоставления их с литературными данными позволяют предположить наличие в экстрактах следующих классов соединений:

– лигнаны и их гликозиды (максимумы при ~230 и ~277 нм) – вероятные фитотоксины [25, 26];

– флавоноиды, стильбены и их производные (максимумы при ~246 и ~291 нм) – возможные индукторы ферментативной активности грибов.

Интерпретация пиков 246 и 291 нм сложнее, чем для лигнанов (230 нм). Их оптические свойства соответствуют стильбенам [27] или флавоноидам (флавонолам/флаванонам). Однако ожидаемый для флавоноидов пик ~310 нм не наблюдался. Обнаружение этих соединений в неполярных фазах после высокотемпературной экстракции может свидетельствовать об их окислительной трансформации и изменении свойств². Предположение о наличии флавоноидов частично подтверждается индукцией лакказной активности гриба (известный эффект флавоноидов [28]) и спектральными данными по модельной смеси (пик ~290 нм у дигидрокверцетина). Отсутствие в его спектре поглощения более длинноволнового пика согласуется с современными данными [29].

Таким образом, выявленные спектральные маркеры достоверно коррелируют с биологической активностью экстрактов. Эти маркеры могут быть использованы для: 1) оценки экотоксичности лигноцеллюлозных отходов; 2) оптимизации предобработки сырья для биотехнологий с дереворазрушающими грибами/бактериями. Предложенная схема анализа применима для выявления маркеров в сырье другого происхождения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Древесные отходы содержат водорастворимые экстрактивные вещества, оказывающие негативное влияние на организмы, относящиеся к разным таксономическим

²Handbook of chemistry and physics / ed. R.C. Weast. Boca Raton: CRC Press, 1979. 499 р.

и экологическим группам (бактерии, базидиомицеты и высшие растения), причем степень воздействия пропорциональна времени и температуре экстракции. Это может иметь отрицательные экологические последствия, особенно на территориях, где накапливаются отходы лесозаготовки и деревопереработки. Учитывая сложность химического состава растительного сырья, зависящего от видовых особенностей, условий произрастания и способов переработки, актуальным является выявление доступных и показательных количественных критериев, позволяющих оценить возможный экологический ущерб от размещения древесных отходов в биоценозах.

Сравнительный анализ показал, что, хотя УФ/видимые спектры растворов и не позволяют однозначно прогнозировать биологическую активность, использование органических экстрагентов усиливает спектральные

сигналы, отражающие различия в химическом составе и биологической активности. Выявленные паттерны взаимосвязи спектральных характеристик и биологической активности могут служить индикаторами потенциального воздействия древесных отходов на окружающую среду, а также использоваться для скрининга биологически активных компонентов с перспективой их дальнейшего изучения.

По всей видимости, предложенный подход, объединяющий экстракцию, спектроскопический анализ и биотестирование, может обладать универсальностью. Это позволяет предположить его потенциальную применимость для широкого спектра научных и прикладных задач, связанных с биотрансформацией и оценкой экологической значимости других видов лигноцеллюлозных отходов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- 1.** Капустина Л.М., Агабабаев М.С., Акберов К.Ч., Агабабаева Н.М. Анализ современного состояния и тенденций развития мирового рынка древесины // Естественно-гуманитарные исследования. 2024. N 4. С. 141–145. EDN: KYOQCS.
- 2.** Макаренко Е.Л. Оценка образования отходов лесозаготовки и деревообработки в центральной экологической зоне байкальской природной территории // Успехи современного естествознания. 2020. N 5. С. 63–69. DOI: 10.17513/use.37393. EDN: FUHUXG.
- 3.** Parobek J., Paluš H. Wood-based waste management – important resources for construction of the built environment // Creating a roadmap towards circularity in the built environment / L. Bragança, M. Cvetkovska, R. Askar, V. Ungureanu (eds). Cham: Springer, 2023. P. 213–223. DOI: 10.1007/978-3-031-45980-1_18.
- 4.** Udali A., Chung W., Talbot B., Grigolato S. Managing harvesting residues: a systematic review of management treatments around the world // International Journal of Forest Research. 2025. Vol. 98, no. 2. P. 117–135. DOI: 10.1093/forestry/cpac041.
- 5.** De Medeiros T.D.M., Dufossé L., Bicas J.L. Lignocellulosic substrates as starting materials for the production of bioactive biopigments // Food Chemistry: X. 2022. Vol. 13. P. 100223. DOI: 10.1016/j.fochx.2022.100223.
- 6.** Chen J., Ma X., Liang M., Guo Z., Cai Y., Zhu C., et al. Physical-chemical-biological pretreatment for biomass degradation and industrial applications: a review // Waste. 2024. Vol. 2, no. 4. P. 451–473. DOI: 10.3390/waste2040024.
- 7.** Гладышева Е.К. Предварительная гидротермическая обработка и паровой взрыв целлюлозосодержащего сырья для последующей биотехнологической трансформации: обзор // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2024. Т. 14. N 2. С. 184–194. DOI: 10.21285/achb.919. EDN: IDUAXB.
- 8.** Camilleri E., Narayan S., Lingam D., Blundell R. Mycelium-based composites: an updated comprehensive overview // Biotechnology Advances. 2025. Vol. 79. P. 108517. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2025.108517.
- 9.** Абдуазимов Б.Б., Биковенс О.Э., Нейберте Б.Я., Халилов Р.М. Химический состав гидролизных лигнинов рисовой лузги, древесных опилок, шелухи семян хлопчатника гидролизных заводов Узбекистана и оптимальные условия получения водорастворимого нитролигнина // Химия растительного сырья. 2024. N 2. С. 76–88.
- 10.** Зайцева Л.А., Волкова А.В., Миневич И.Э. Получение целлюлозного продукта из конопляной лузги // Ползуновский вестник. 2023. N 2. С. 174–183. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.023. EDN: WCTYHR.
- 11.** Yu K., van den Hoogen J., Wang Z., Averill C., Routh D., Smith G R., et al. The biogeography of relative abundance of soil fungi versus bacteria in surface topsoil // Earth System Science Data. 2022. Vol. 14. P. 4339–4350. DOI: 10.5194/essd-14-4339-2022.
- 12.** De Souza C.C., Guimarães J.M., dos Santos Pereira S., Mariúba L.A.M. The multifunctionality of expression systems in *Bacillus subtilis*: emerging devices for the production of recombinant proteins // Experimental Biology and Medicine. 2021. Vol. 246. P. 2443–2453. DOI: 10.1177/15353702211030189.
- 13.** Lzaod S., Sharma S., Das S., Dutta T. Harnessing recombinant *Bacillus licheniformis* CotA laccase for electrochemical detection of catechol // Journal of Biotechnology. 2025. Vol. 403. P. 30–39. DOI: 10.1016/j.jbiotec.2025.03.017.
- 14.** Закалюкина Ю.В., Зайцев А.Р., Бирюков М.В. Оценка целлюлозоразрушающей активности актинобактерий, ассоциированных с муравьями // Вестник Московского университета. Серия 16: Биология. 2021. Т. 76. N 1. С. 24–32. EDN: MSZJFF.
- 15.** Ahmad M.M., Azoddein A.M., Olalere O.A., Isa S. A predictive batch culture growth and biosynthesis for *Bacillus cereus* (ATCC 14579) using response surface methodology // Journal of Environmental Bioremediation and Toxicology. 2022. Vol. 5, no. 2. P. 40–45. DOI: 10.54987/jebat.v5i2.765.
- 16.** Deng H., Zhang Y., Liu K., Mao Q., Agathokleous E. Allelopathic effects of *Eucalyptus* extract and wood vinegar on germination and sprouting of rapeseed (*Brassica rapa* L.) // Environmental Science and Pollution Research. 2024. Vol. 31. P. 4280–4289. DOI: 10.1007/s11356-023-31481-w.
- 17.** Cerdà V., Phansi P., Ferreira S.L. From mono- to multicomponent methods in UV-VIS spectrophotometric and fluorimetric quantitative analysis – a review // Trends in Analytical Chemistry. 2022. Vol. 157. P. 116772. DOI: 10.1016/j.trac.2022.116772.
- 18.** Novy V., Nielsen F., Cullen D., Sabat G., Houtman C.J., Hunt C.G. The characteristics of insoluble softwood substrates affect fungal morphology, secretome composition, and hydrolytic efficiency of enzymes produced by *Tricho-*

- derma reesei // Biotechnology for Biofuels. 2021. Vol. 14. P. 105. DOI: 10.1186/s13068-021-01955-5.
- 19.** Van Boerdonk S., Saake P., Wanke A., Neumann U., Zuccaro A. β -Glucan-binding proteins are key modulators of immunity and symbiosis in mutualistic plant-microbe interactions // Current Opinion in Plant Biology. 2024. Vol. 81. P. 102610. DOI: 10.1016/j.pbi.2024.102610.
- 20.** Verkasalo E., Roitto M., Möttönen V., Tanner J., Kumar A., Kilpeläinen P., et al. Extractives of tree biomass of scots pine (*Pinus sylvestris* L.) for biorefining in four climatic regions in Finland – lipophilic compounds, stilbenes, and lignans // Forests. 2022. Vol. 13, no. 5. P. 779. DOI: 10.3390/f13050779.
- 21.** Didion Y.P., Tjalsma T.G., Su Z., Malankowska M., Pinelo M. What is next? The greener future of solid liquid extraction of biobased compounds: novel techniques and solvents overpower traditional ones // Separation and Purification Technology. 2023. Vol. 320. P. 124147. DOI: 10.1016/j.seppur.2023.124147.
- 22.** Craig A.P., Franca A.S., Irudayaraj J. Pattern recognition applied to spectroscopy: conventional methods and future directions // Pattern recognition: practices, perspectives and challenges / ed. D.B. Vincent. Nova Science Publishers, 2013. P. 1–45.
- 23.** Шагина Н.А., Азимова Ф.Ш., Мустафаева А.Т. Спектрофотометрическое исследование растительного экстракта зверобоя // Научно-методический электронный журнал «Концепт». 2015. N T13. C. 1301–1305. EDN: TWCIMB.
- 24.** Roy S.K., Raha S.K., Dey S.K., Chakrabarty S.L. Induction and catabolite repression of beta-glucosidase synthesis in *Myceliophthora thermophila* D-14 (= ATCC 48104) // Applied and Environmental Microbiology. 1988. Vol. 54, no. 8. P. 2152–2153. DOI: 10.1128/aem.54.8.2152-2153.1988.
- 25.** Ražná K., Nôžková J., Vargaová A., Harenčár L., Belková M. Biological functions of lignans in plants // Agriculture (Pol'nohospodárstvo). 2021. Vol. 67, no. 4. P. 155–165. DOI: 10.2478/agri-2021-0014.
- 26.** Patyra A., Kołtun-Jasion M., Jakubiak O., Kiss A.K. Extraction techniques and analytical methods for isolation and characterization of lignans // Plants. 2022. Vol. 11, no. 17. P. 2323. DOI: 10.3390/plants11172323.
- 27.** Сокуренко М.С., Соловьева Н.Л., Бессонов В.В., Мазо В.К. Полифенольные соединения класса стильбеноидов: классификация, представители, содержание в растительном сырье, особенности структуры, использование в пищевой промышленности и фармации // Вопросы питания. 2019. Т. 88. N 1. С. 17–25. DOI: 10.24411/0042-8833-2019-10002. EDN: VVQQDU.
- 28.** Rafi M., Nurcahyo B., Wahyuni W.T., Arif Z., Septaningsih D.A., Putri S.P., et al. Feasibility of UV-Vis spectral fingerprinting combined with chemometrics for rapid detection of *Phyllanthus niruri* adulteration with *Leucaena leucocephala* // Sains Malaysiana. 2021. Vol. 50, no. 4. P. 991–1006. DOI: 10.17576/JSM-2021-5004-10.
- 29.** Guo N., Zhu Y.-W., Jiang Y.-W., Li H.-K., Liu Z.-M., Wang W., et al. Improvement of flavonoid aglycone and biological activity of mulberry leaves by solid-state fermentation // Industrial Crops and Products. 2020. Vol. 148. P. 112287. DOI: 10.1016/j.indcrop.2020.112287.
- REFERENCES**
- 1.** Kapustina L.M., Agababayev M.S., Akberov K.Ch., Agababayeva N.M. Analysis of the current state and development trends of the global wood market. *Natural-Humanitarian Studies*. 2024;4:141-145. (In Russian). EDN: KYOQCS.
- 2.** Makarenko E.L. Assessment of forestry and wood-working waste formation in central ecological area of the Baikal natural territories. *Advances in current natural sciences*. 2020;5:63-69. (In Russian). DOI: 10.17513/use.37393. EDN: FUHUXG.
- 3.** Parobek J., Paluš H. Wood-based waste management – important resources for construction of the built environment. In: Bragança L., Cvetkovska M., Askar R., Ungureanu V. (eds). Creating a roadmap towards circularity in the built environment. Cham: Springer; 2023, p. 213–223. DOI: 10.1007/978-3-031-45980-1_18.
- 4.** Udali A., Chung W., Talbot B., Grigolato S. Managing harvesting residues: a systematic review of management treatments around the world. *International Journal of Forest Research*. 2025;98(2):117-135. DOI: 10.1093/forestry/cpae041.
- 5.** De Medeiros T.D.M., Dufossé L., Bicas J.L. Lignocellulosic substrates as starting materials for the production of bioactive biopigments. *Food Chemistry*: X. 2022;13:100223. DOI: 10.1016/j.fochx.2022.100223.
- 6.** Chen J., Ma X., Liang M., Guo Z., Cai Y., Zhu C., et al. Physical-chemical-biological pretreatment for biomass degradation and industrial applications: a review. *Waste*. 2024;2(4):451-473. DOI: 10.3390/waste2040024.
- 7.** Gladysheva E.K. Preliminary hydrothermal treatment and steam explosion of cellulosic feedstock for the subsequent biotechnological transformation: A review. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2024;14(2):184-194. (In Russian). DOI: 10.21285/achb.919. EDN: IDUAXB.
- 8.** Camilleri E., Narayan S., Lingam D., Blundell R. Mycelium-based composites: an updated comprehensive overview. *Biotechnology Advances*. 2025;79:108517. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2025.108517.
- 9.** Abdurazimov B.B., Bikovens O.E., Neiberte B.Ya., Khalilov R.M. Chemical composition of hydrolytic lignins of rice husks, wood sawdust, cotton seed husks of hydrolysis plants uzbekistan and optimal conditions for obtaining water-soluble nitrolignin. *Chemistry of plant raw material*. 2024;2:76-88. (In Russian). DOI: 10.14258/jcprm.20240213170. EDN: CKUXVC.
- 10.** Zaitseva L.A., Volkova A.V., Minevich I.E. Extraction of cellulose fibers from hemp husk. *Polzunovskiy vestnik*. 2023;2:174-183. (In Russian). DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.023. EDN: WCTYHR.
- 11.** Yu K., van den Hoogen J., Wang Z., Averill C., Routh D., Smith G.R., et al. The biogeography of relative abundance of soil fungi versus bacteria in surface topsoil. *Earth System Science Data*. 2022;14:4339-4350. DOI: 10.5194/essd-14-4339-2022.
- 12.** De Souza C.C., Guimarães J.M., dos Santos Pereira S., Mariúba L.A.M. The multifunctionality of expression systems in *Bacillus subtilis*: emerging devices for the production of recombinant proteins. *Experimental Biology and Medicine*. 2021;246:2443-2453. DOI: 10.1177/15353702211030189.
- 13.** Lzaod S., Sharma S., Das S., Dutta T. Harnessing recombinant *Bacillus licheniformis* CotA laccase for electro-

- chemical detection of catechol. *Journal of Biotechnology*. 2025;403:30-39. DOI: 10.1016/j.biotech.2025.03.017.
- 14.** Zakalyukina Y.V., Zaytsev A.R., Biryukov M.V. Study of cellulose-destroying activity of actinobacteria associated with ants. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 16: Biologiya*. 2021;76(1):24-32. (In Russian). EDN: MSZJFF.
- 15.** Ahmad M.M., Azoddein A.M., Olalere O.A., Isa S. A predictive batch culture growth and biosynthesis for *Bacillus cereus* (ATCC 14579) using response surface methodology // *Journal of Environmental Bioremediation and Toxicology*. 2022;5(2):40-45. DOI: 10.54987/jebat.v5i2.765.
- 16.** Deng H., Zhang Y., Liu K., Mao Q., Agathokleous E. Allelopathic effects of *Eucalyptus* extract and wood vinegar on germination and sprouting of rapeseed (*Brassica rapa* L.). *Environmental Science and Pollution Research*. 2024;31:4280-4289. DOI: 10.1007/s11356-023-31481-w.
- 17.** Cerdà V., Phansi P., Ferreira S.L. From mono- to multicomponent methods in UV-VIS spectrophotometric and fluorimetric quantitative analysis – a review. *Trends in Analytical Chemistry*. 2022;157:116772. DOI: 10.1016/j.trac.2022.116772.
- 18.** Novy V., Nielsen F., Cullen D., Sabat G., Houtman C.J., Hunt C.G. The characteristics of insoluble softwood substrates affect fungal morphology, secretome composition, and hydrolytic efficiency of enzymes produced by *Trichoderma reesei*. *Biotechnology for Biofuels*. 2021;14:105. DOI: 10.1186/s13068-021-01955-5.
- 19.** Van Boerdonk S., Saake P., Wanke A., Neumann U., Zuccaro A. β -Glucan-binding proteins are key modulators of immunity and symbiosis in mutualistic plant-microbe interactions. *Current Opinion in Plant Biology*. 2024;81:102610. DOI: 10.1016/j.pbi.2024.102610.
- 20.** Verkasalo E., Roitto M., Möttönen V., Tanner J., Kumar A., Kilpeläinen P., et al. Extractives of tree biomass of scots pine (*Pinus sylvestris* L.) for biorefining in four climatic regions in Finland – lipophilic compounds, stilbenes, and lignans. *Forests*. 2022;13(5):779. DOI: 10.3390/f13050779.
- 21.** Didion Y.P., Tjalsma T.G., Su Z., Malankowska M., Pinelo M. What is next? The greener future of solid liquid extraction of biobased compounds: novel techniques and solvents overpower traditional ones. *Separation and Purification Technology*. 2023;320:124147. DOI: 10.1016/j.seppur.2023.124147.
- 22.** Craig A.P., Franca A.S., Irudayaraj J. Pattern recognition applied to spectroscopy: conventional methods and future directions. In: D.B. Vincent (ed.). *Pattern recognition: practices, perspectives and challenges*. Nova Science Publishers; 2013, p. 1-45.
- 23.** Shagina N.A., Azimova F.S., Mustafayeva A.T. Spectrophotometric study of St. John's wort plant extract. *Scientific and Methodological Electronic Journal "Koncept"*. 2015;T13:1301-1305. (In Russian). EDN: TWCIMB.
- 24.** Roy S.K., Raha S.K., Dey S.K., Chakrabarty S.L. Induction and catabolite repression of beta-glucosidase synthesis in *Myceliophthora thermophila* D-14 (= ATCC 48104). *Applied and Environmental Microbiology*. 1988;54(8):2152-2153. DOI: 10.1128/aem.54.8.2152-2153.1988.
- 25.** Ražná K., Nôžková J., Vargaová A., Harenčár L., Bjelková M. Biological functions of lignans in plants. *Agriculture (Pol'nohospodárstvo)*. 2021;67(4):155-165. DOI: 10.2478/agri-2021-0014.
- 26.** Patyra A., Kołtun-Jasion M., Jakubiak O., Kiss A.K. Extraction techniques and analytical methods for isolation and characterization of lignans. *Plants*. 2022;11(17):2323. DOI: 10.3390/plants11172323.
- 27.** Sokurenko M.S., Solovieva N.L., Bessonov V.V., Mazo V.K. Polyphenolic compounds of the stilbenoid class: classification, representatives, content in plant raw materials, structural features, use in the food industry and pharmacy. *Problems of Nutrition*. 2019;88(1):17-25. (In Russian). DOI: 10.24411/0042-8833-2019-10002. EDN: VVQODU.
- 28.** Rafi M., Nurcahyo B., Wahyuni W.T., Arif Z., Septansih D.A., Putri S.P., et al. Feasibility of UV-Vis spectral fingerprinting combined with chemometrics for rapid detection of *Phyllanthus niruri* adulteration with *Leucaena leucocephala*. *Sains Malaysiana*. 2021;50(4):991-1006. DOI: 10.17576/JSM-2021-5004-10.
- 29.** Guo N., Zhu Y.-W., Jiang Y.-W., Li H.-K., Liu Z.-M., Wang W., et al. Improvement of flavonoid aglycone and biological activity of mulberry leaves by solid-state fermentation. *Industrial Crops and Products*. 2020;148:112287. DOI: 10.1016/j.indcrop.2020.112287.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Новиков Артём Владимирович,
аспирант,
Иркутский государственный университет,
664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,
Российская Федерация,
✉ artem.ru88@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0004-4729-9019>

Приставка Алексей Александрович,
к.б.н., доцент,
Иркутский государственный университет,
664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,
Российская Федерация,
pristavk@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-0724-8565>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Artem V. Novikov,
Postgraduate Student,
Irkutsk State University,
1, Karl Marx St., Irkutsk, 664003,
Russian Federation,
✉ artem.ru88@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0004-4729-9019>

Alexey A. Pristavka,
Cand. Sci. (Biology), Associate Professor,
Irkutsk State University,
1, Karl Marx St., Irkutsk, 664003,
Russian Federation,
pristavk@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-0724-8565>

Михайленко Валентина Львовна,
к.х.н., доцент,
Иркутский государственный университет,
664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,
Российская Федерация,
mival63@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-2278-2990>

Ефременко Зинаида Александровна,
аспирант,
Иркутский государственный университет,
664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,
Российская Федерация,
makar.efremenko@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0003-7310-4847>

Ярыгин Дмитрий Андреевич,
магистрант,
Иркутский государственный университет,
664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,
Российская Федерация,
mr.dmitry.yarygin@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0004-4933-7445>

Юринова Галина Валерьевна,
к.б.н., доцент,
Иркутский государственный университет,
664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,
Российская Федерация,
yurinova@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2266-6068>

Саловарова Валентина Петровна,
д.б.н., профессор, заведующий кафедрой,
Иркутский государственный университет,
664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,
Российская Федерация,
vsalovarova@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-3693-9058>

Вклад авторов

А.В. Новиков – проведение исследования, визуализация.
А.А. Приставка – разработка концепции, научное руководство, курирование данных, визуализация.
В.Л. Михайленко – разработка концепции, научное руководство, курирование данных, предоставление ресурсов, проведение исследования, написание черновика рукописи.
З.А. Ефременко – проведение исследования.
Д.А. Ярыгин – проведение исследования, визуализация.
Г.В. Юринова – разработка концепции, предоставление ресурсов, курирование данных, проведение исследования.
В.П. Саловарова – административное руководство исследовательским проектом, научное руководство, редактирование рукописи.

Valentina L. Mikhailenko,
Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor,
Irkutsk State University,
1, Karl Marx St., Irkutsk, 664003,
Russian Federation,
mival63@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-2278-2990>

Zinaida A. Efremenko,
Postgraduate Student,
Irkutsk State University,
1, Karl Marx St., Irkutsk, 664003,
Russian Federation,
makar.efremenko@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0003-7310-4847>

Dmitriy A. Yarygin,
Master's Student,
Irkutsk State University,
1, Karl Marx St., Irkutsk, 664003,
Russian Federation,
mr.dmitry.yarygin@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0004-4933-7445>

Galina V. Yurinova,
Cand. Sci. (Biology), Associate Professor,
Irkutsk State University,
1, Karl Marx St., Irkutsk, 664003,
Russian Federation,
yurinova@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2266-6068>

Valentina P. Salovarova,
Dr. Sci. (Biology), Professor,
Head of the Department,
Irkutsk State University,
1, Karl Marx St., Irkutsk, 664003,
Russian Federation,
vsalovarova@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-3693-9058>

Contribution of the authors

Artem V. Novikov – investigation, visualization.
Alexey A. Pristavka – conceptualization, supervision, data curation, visualization.
Valentina L. Mikhailenko – conceptualization, supervision, data curation, resources, investigation, writing – original draft.
Zinaida A. Efremenko – investigation.
Dmitriy A. Yarygin – investigation, visualization.
Galina V. Yurinova – conceptualization, resources, data curation, investigation.
Valentina P. Salovarova – project administration, supervision, editing.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Поступила в редакцию 29.08.2025.
Одобрена после рецензирования 08.10.2025.
Принята к публикации 26.11.2025.

Information about the article

*The article was submitted 29.08.2025.
Approved after reviewing 08.10.2025.
Accepted for publication 26.11.2025.*