



Биотехнологические подходы к культивированию некоторых дереворазрушающих грибов

Д.С. Белоусов✉, Н.В. Филинова, Ю.А. Малков, Л.А. Беловежец

Федеральный исследовательский центр «Иркутский институт химии им. А.Е. Фаворского СО РАН»,
Иркутск, Российская Федерация

Аннотация. Проблемы накопления отходов переработки древесины носят биосферный характер из-за непостоянства состава биомассы и сложности коммерциализации их переработки. Наиболее перспективными являются биологические методы компостирования древесных отходов базидиомицетами. Однако они требуют применения большого количества жизнеспособного мицелия таких грибов. В данной работе исследованы кинетические и продукционные показатели роста и накопления биомассы мицелия в стационарных и динамических условиях глубинного культивирования для пяти грибов: *Paecilomyces variotii* sp. Ирк 52, *Phanerochaete chrysosporium* Ирк 2, *Phanerochaete chrysosporium* Ирк 10, *Sporotrichum pulverulentum* Ирк 1766, *Sporotrichum pulverulentum* Ирк 1767, выделенные из зараженной древесины Восточной Сибири и используемые нами в технологии переработки древесных отходов. Показано, что радиальная скорость роста базидиомицетов на агаризованной среде значительно превышала показатели *Paecilomyces variotii*. Культивирование на жидких питательных средах привело к обратному результату. Это связано с различием в структуре колоний. Выбор условий культивирования выявил, что наиболее перспективными являются глюкозо-дрожжевая среда и динамические условия. В этих условиях штаммы продемонстрировали высокие выходы биомассы – 6,3–8,3 г/л. Изучены кинетика роста, динамика утилизации глюкозы и изменение pH исследуемых культур в выбранных условиях. При полупромышленном культивировании определены расход воздуха и скорость перемешивания, которые составили 1,0–1,3 л/(л×мин) и 0,3–0,5 м/с соответственно. Проведенные исследования позволили подобрать оптимальные условия культивирования отдельных штаммов. Это даст возможность масштабировать биотехнологический процесс получения жизнеспособного мицелия.

Ключевые слова: дереворазрушающие грибы, глубинное культивирование, переработка отходов, биотехнологические параметры

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке государственной программы (регистрационный номер 121120700091-6), финансируемой Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках базового проекта «Разработка микробиологических подходов к решению современных проблем промышленности».

Для цитирования: Белоусов Д.С., Филинова Н.В., Малков Ю.А., Беловежец Л.А. Биотехнологические подходы к культивированию некоторых дереворазрушающих грибов // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2026. Т. 16. N 2. С. 218–228. DOI: 10.21285/achb.1040. EDN: LGQUQI.

Biotechnological approaches to the cultivation of certain wood-decay fungi

Dmitry S. Belousov✉, Nadezhda V. Filinova,
Yuri A. Malkov, Lyudmila A. Belovezhets

A.E. Favorsky Irkutsk Institute of Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russian Federation

Abstract. The accumulation of wood-processing waste is a significant environmental challenge due to the heterogenous composition of biomass and the limited economic viability of its recycling. In this regard, biological composting of wood waste using basidiomycetes represent a promising direction. However, the implementation of such methods requires substantial amounts of viable fungal mycelium. In this study, we investigate the kinetics of mycelial growth and biomass accumulation under both stationary and dynamic conditions of submerged cultivation for five fungal strains isolated from decaying wood in Eastern Siberia and used for recycling wood waste: *Paecilomyces variotii* sp. Irk 52, *Phanerochaete chrysosporium* Irk 2, *Phanerochaete chrysosporium* Irk 10, *Sporotrichum pulverulentum* Irk 1766, and *Sporotrichum pulverulentum* Irk 1767. Basidiomycete strains exhibited significantly higher radial growth rates on solid agar media than *Paecilomyces variotii*. In contrast, cultivation in liquid nutrient media produced the opposite trend, likely due to species-specific variations in colony morphology. The evaluation of cultivation conditions identified a glucose–yeast medium and submerged cultivation under dynamic conditions as the most effective approach. Under these conditions, the investigated strains achieved high biomass yields ranging from 6.3 to 8.3 g/L. Growth kinetics, glucose consumption patterns, and culture medium pH dynamics under the selected cultivation regime were examined. During semi-industrial cultivation, the optimal aeration rate and mixing intensity were determined to be 1.0–1.3 L/(L·min) and 0.3–0.5 m/s, respectively. These findings enabled the selection of strain-specific cultivation parameters, thus forming a basis for scaling up the biotechnological production of viable fungal mycelium.

Keywords: wood-decay fungi, submerged cultivation, waste recycling, biotechnological parameters

Funding. The research was carried out with the support of the state program (registration no. 121120700091-b), funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the basic project “Development of microbiological approaches to solving modern industrial problems”.

For citation: Belousov D.S., Filinova N.V., Malkov Yu.A., Belovezhets L.A. Biotechnological approaches to the cultivation of certain wood-decay fungi. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2026;16(2): 218-228. (In Russian). DOI: 10.21285/achb.1040. EDN: LGQUQI.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в лесоперерабатывающих районах России остро стоит проблема с накоплением отходов переработки древесины [1]. Такие отходы из-за их невосприимчивости складываются на полигонах миллионами кубических метров, создавая серьезные экологические риски [2]. Под воздействием окружающей среды они очень медленно разлагаются, выделяя в почву и грунтовые воды продукты разложения в большом количестве (фенолы, кислоты) [3]. Кроме этого, постоянно происходит их самовозгорание и задымление прилегающих территорий [4]. Традиционные методы переработки, такие как химические и термические, экономически неэффективны из-за непостоянства состава и высокой устойчивости полимеров лигнина [5].

Перспективным направлением для решения проблемы утилизации древесных отходов является использование ксилотрофных базидиомицетов (*Agaricomycetes*, *Basidiomycota*) [6]. Эти микроорганизмы играют ключевую роль в деградации древесины и являются важнейшими

участниками глобального круговорота углерода благодаря своим уникальным внеклеточным ферментам для разложения устойчивых полимеров растений. Целенаправленное использование базидиомицетов может решить проблему утилизации лигноцеллюлозных отходов. Ранее нами была разработана технология микробной переработки опилок [7]. Она предполагает использование грибов в качестве инициаторов трансформации древесных отходов. Однако для этого необходима наработка большого количества жизнеспособной биомассы мицелия грибов. Наиболее перспективным методом является глубинное культивирование. Данный способ позволяет получать максимальный выход биомассы за короткий промежуток времени в больших объемах. Ключевым преимуществом глубинного культивирования является управляемость процесса, что позволяет создавать оптимальные условия для накопления целевых продуктов [8]. Высокая технологичность и воспроизводимость результатов делают глубинный метод основой промышленного производства биопрепаратов, обе-

спечивая получение стандартизированного продукта с заданными количественными и качественными характеристиками.

Цель данного исследования заключалась в оценке биотехнологической перспективности некоторых штаммов дереворазрушающих грибов для промышленного получения жизнеспособной биомассы мицелия.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В исследовании использовали чистые культуры грибов: *Phanerochaete chrysosporium* Ирк 2 (Ph-2), *Phanerochaete chrysosporium* Ирк 10 (Ph-10), *Sporotrichum pulverulentum* (конидиальная стадия *P. chrysosporium*) Ирк 1766 (Sp-14B), *Sporotrichum pulverulentum* (конидиальная стадия *P. chrysosporium*) Ирк 1767 (Sp-14Г), *Raecilomyces variotii* sp. Ирк 52 (Pv-52), выделенные из зараженной древесины Восточной Сибири. Культуры идентифицированы на основе 26S-RNA и депонированы во Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов (БРЦ ВКПМ).

Определение радиальной скорости роста. Мицелий гриба выращивали на чашке Петри с сусло-агаром (HiMedia, Индия) в течение одной-двух недель в зависимости от штамма. Из периферической части колонии с помощью стерильного микробиологического сверла вырезали кусочки диаметром 7 мм. Фрагменты переносили в чашки Петри на твердую питательную среду. Культивирование осуществляли в термостате при температуре 26 или 37 °С до полного зарастания мицелием питательной среды. Выбор температуры обуславливался результатами предыдущих исследований¹. Измерение диаметра колонии проводили ежедневно.

Вычисление радиальной скорости роста проводили по формуле²:

$$K_r = \frac{r - r_0}{t - t_0}, \quad (1)$$

где r_0 – радиус колонии в начальный момент времени t_0 ; r – радиус колонии в момент времени t .

Плотность мицелия оценивали по 3-бальной системе: 1 – редкая; 2 – средняя; 3 – плотная [9].

Влияние различных источников углерода и азота на прирост биомассы при глубинном культивировании. Для культивирования биомассы в качестве источника углерода использовали глюкозу (Fufeng, Китай) и свекловичную мелассу (сахароза $\geq 44\%$, «Русквас», Россия). В качестве источника азота применяли дрожжевой автолизат (общий азот $\geq 6,4\%$, (YA801), Angel, Китай), гидролизат говяжьего коллагена (общий азот $\geq 14,4\%$, HydroBEEF, Швеция) и нитрат аммония. Культивирование мицелия грибов осуществляли на следующих жидких питательных средах:

1) глюкозо-дрожжевая среда, г/л: глюкоза – 20; дрожжевой автолизат – 10;

2) глюкозо-коллагеновая среда, г/л: глюкоза – 20; гидролизат говяжьего коллагена – 10;

3) среда со свекловичной мелассой, г/л: свекловичная меласса – 40; KH_2PO_4 – 1,2; NH_4NO_3 – 3,0;

4) глюкозо-минеральная среда, г/л: глюкоза – 20; KH_2PO_4 – 1,2; NH_4NO_3 – 3,0.

Выбор питательных сред обусловлен физиологической доступностью компонентов для исследуемых культур и экономической целесообразностью. Среда стерилизовали автоклавированием в течение 40 мин при температуре 121 ± 1 °С и давлении 0,11–0,12 МПа. В качестве инокулята использовали диски мицелия диаметром 7 мм, выращенные на сусло-агаре.

Глубинное культивирование осуществляли в стационарных и динамических условиях в колбах Эрленмейера объемом 100 мл с 50 мл питательной среды при температуре 26 или 37 °С в течение 9 суток. Стационарное выращивание проводили с использованием суховоздушного термостата (ТС-1/80 СПУ, Россия), динамическое культивирование проводили в термостатируемом шейкер-инкубаторе (BioSan ES-20/60, Латвия) с интенсивностью перемешивания 120–130 об/мин.

Полупромышленное глубинное культивирование осуществляли в ферментационном аппарате 100 л с рабочим объемом 70 л («ЮВС», Россия) на глюкозо-дрожжевой питательной среде с начальным значением pH 5,5–5,7. Стерилизацию проводили острым паром при температуре 119–120 °С и давлении 0,11–0,12 МПа. Питательную среду инокулировали посевным материалом в количестве 10% по объему. Культивирование осуществляли при температуре 26 или 37 °С, скорости вращения мешалки 0,1–0,7 м/с, расходе воздуха 0,3–1,9 л/(л*мин) в течение 6–7 суток.

После выращивания мицелий грибов отделяли от культуральной жидкости фильтрованием через нейлоновую ткань или центрифугированием при 1300 об/мин, трехкратно промывали дистиллированной водой и высушивали на воздухе до постоянного веса. Накопление биомассы оценивали по абсолютно сухому весу гриба, влажность определяли на анализаторе влажности AND MX-50 (A&D, Япония) при температуре $105,0 \pm 1,0$ °С.

Динамика накопления биомассы, изменение pH и утилизация глюкозы в жидкой культуре. Биомассу мицелия получали методом глубинного культивирования в динамических условиях в колбах Эрленмейера объемом 100 мл с 50 мл глюкозо-дрожжевой питательной средой. Инокуляцию проводили методом, описанным выше. Культивировали в течение 9 суток при температуре 26 или 37 °С, начальном pH 5,5–5,7 и интенсивности перемешивания 120–130 об/мин, снимая каждые сутки показатели: прирост биомассы, значение pH и содержание глюкозы в культуральной жидкости. Активную кислотность среды определяли с помощью pH-метра «Эксперт-pH» (Россия), накопление биомассы оценивали по абсолютно сухому весу гриба, концентрацию глюкозы измеряли цифровым рефрактометром Milwaukee MA873 (США).

Кинетические показатели роста биомассы – абсолютную (v) и удельную (μ) скорости роста рассчитывали по формулам [10]:

¹ Беловежец Л.А. Эколого-биохимические процессы, протекающие при трансформации органических субстратов, и возможности их практического использования для биоремедиации почв: дис. ... д-ра биол. наук: 03.02.08. Иркутск, 2020. 279 с.

² Еремеева С.В. Плесневые грибы. Методы выделения, идентификации, хранения: учеб. пособие. Астрахань: Изд-во АГТУ, 2011. 111 с.

$$v = \frac{dX}{dt}; \quad (2)$$

$$\mu = \frac{1}{X} \times \frac{dX}{dt}, \quad (3)$$

где X – концентрация биомассы в момент времени t .

Иммобилизация биомассы мицелия на инертном носителе. Мицелий гриба, полученный при глубинном культивировании, смешивали со стерильным инертным субстратом в соотношении 1 г абсолютно сухого гриба на 100 г носителя. В качестве инертного носителя использовали цеолит (2–5 мм, Россия). Сушку иммобилизованного мицелия проводили в нестерильных условиях в сушильном шкафу КС-200 (Россия) при температуре 30–40 °С с периодическим перемешиванием. Высушенную биомассу мицелия на носителе хранили в темном прохладном месте. Жизнеспособность грибов определяли путем посева на сусло-агаре.

Статистический анализ. Все эксперименты выполнены в 3 биологических и 3 аналитических повторностях. Статистическую обработку экспериментальных данных проводили путем определения их средних арифметических и стандартных ошибок с помощью программы Microsoft Office Excel. Достоверность измерений оценивали по критерию Стьюдента, считая разницу достоверной при значении $p \leq 0,05$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Первым этапом оценки биотехнологического потенциала микроорганизма [11] является определение скорости его роста на твердых питательных средах [12].

Исследование динамики роста колоний дереворазрушающих грибов на твердой питательной среде с сусло-агаром при температуре 26 и 37 °С представлено

на рис. 1. Показано, что при культивировании Ph-2 и Ph-10 как при 26 °С, так и при 37 °С не наблюдалось лаг-фазы. Культуры переходили в экспоненциальную фазу роста в первые сутки культивирования, и на вторые-третьи сутки достигалась полная конфлюентность. Для культур Sp-14В и Sp-14Г при выращивании на 26 °С в первые сутки отмечена лаг-фаза, однако при 37 °С фазы задержки роста не наблюдалось, и на вторые-третьи сутки при обеих температурах отмечалась полная конфлюентность. Культура Pv-52 при исследованных температурах характеризовалась медленным ростом, на седьмые сутки культивирования коэффициент конфлюентности составлял 56 и 42% соответственно.

Культивирование грибов Ph-2, Ph-10, Sp-14В и Sp-14Г при 37 °С (табл. 1) привело к увеличению скорости роста в среднем в 2,0–2,5 раза. Культура Pv-52 показала обратную тенденцию: при 26 °С радиальная скорость роста была выше, чем при 37 °С. Это связано с таксономическим положением исследуемых грибов, обуславливающим их физиологические особенности.

Таблица 1. Средняя скорость радиального роста мицелия исследуемых культур на сусло-агаре при температуре 26 и 37 °С и плотность колоний

Культура гриба	Радиальная скорость роста, мм/сут.		Плотность колоний, балл
	26 °C	37 °C	
Ph-2	17,6±0,2	41,5±0,2	1
Ph-10	17,9±0,2	38,9±0,2	1
Sp-14В	15,9±0,2	33,5±0,2	1
Sp-14Г	18,4±0,2	36,0±0,2	1
Pv-52	2,4±0,1	1,9±0,1	3

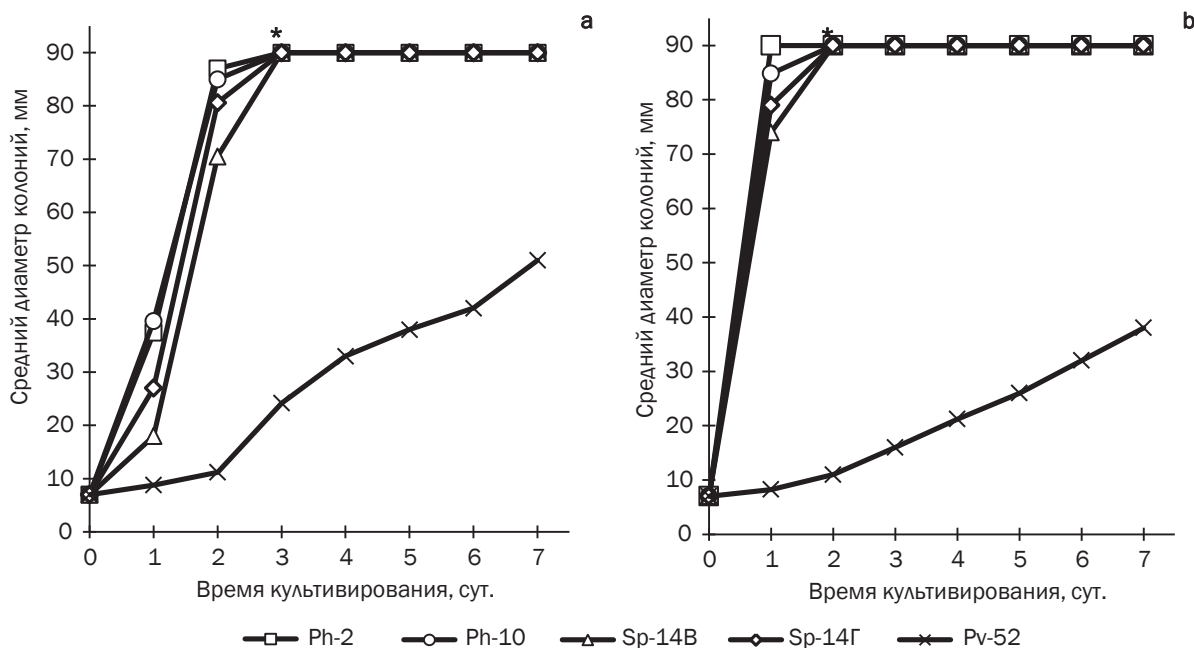


Рис. 1. Динамика роста колоний культур дереворазрушающих грибов на сусло-агаре при температуре 26 °С (а) и 37 °С (б) (* – 100%-я конфлюентность)

Fig. 1. Growth dynamics of wood-decomposing fungal colonies on Wort Agar at 26 °C (a) and 37 °C (b) (* – 100% confluence)

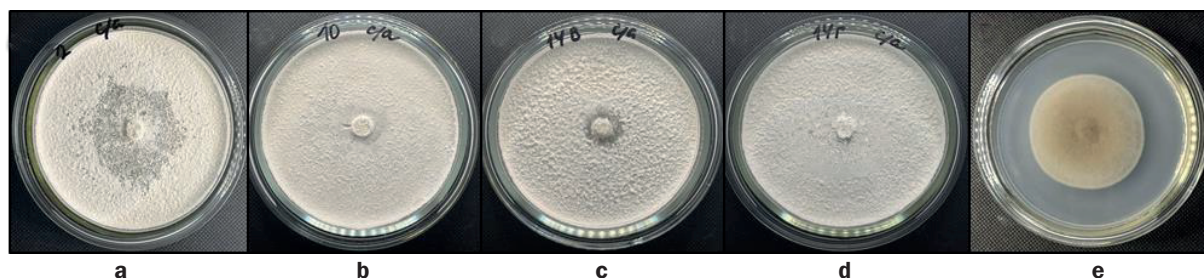


Рис. 2. Структура мицелия исследуемых грибов при твердофазном культивировании на сусло-агаре:
а – Ph-2; б – Ph-10; в – Sp-14В; д – Sp-14Г; е – Pv-52

Fig. 2. Mycelium structure of the studied fungi during solid-state cultivation on Wort Agar:
а – Ph-2; б – Ph-10; в – Sp-14В; д – Sp-14Г; е – Pv-52

Морфология колоний исследуемых грибов при твердофазном культивировании представлена на рис. 2. Культуры Ph-2, Ph-10, Sp-14В и Sp-14Г показали схожесть в структуре, они характеризовались рыхлым, шерстистым мицелием, тонкими, легко переплетающимися гифами, плотность мицелия по трехбалльной шкале составила единицу. Pv-52 отличался компактной плотной структурой мицелия с толстыми, четко различимыми гифами, колония порошистая, плотно прилегающая к агару, плотность колонии – 3.

Для оптимизации процесса промышленного производства данных грибов методом глубинного культивирования проведена комплексная оценка продуктивности исследуемых штаммов в стационарных и динамических условиях на питательных средах различного состава, в которых варьировали источники углерода и азота. Авторами работы [13] показано, что неопределенные

(сложные) питательные среды могут способствовать росту, но снижают сопоставимость результатов, в то время как определенные питательные среды улучшают контроль и интерпретацию физиологических реакций. Необходимость тщательного подбора питательных сред подтверждается и в работе [12].

Для всех исследованных грибов при культивировании в стационарных условиях наибольший выход биомассы наблюдался на глюкозо-дрожжевой среде и составлял 0,8–1,0 г/л (рис. 3, а). Аналогичные данные получены при культивировании в динамических условиях (рис. 3, б; рис. 4), но выход биомассы оказался выше и составлял 6,3–8,3 г/л, что связано с увеличением площади контакта между жидкой и газовой фазами при перемешивании питательной среды [14]. Умеренные выходы получены на средах со свекловичной мелассой и глюкозо-коллагеновой среде. В динамических условиях выход

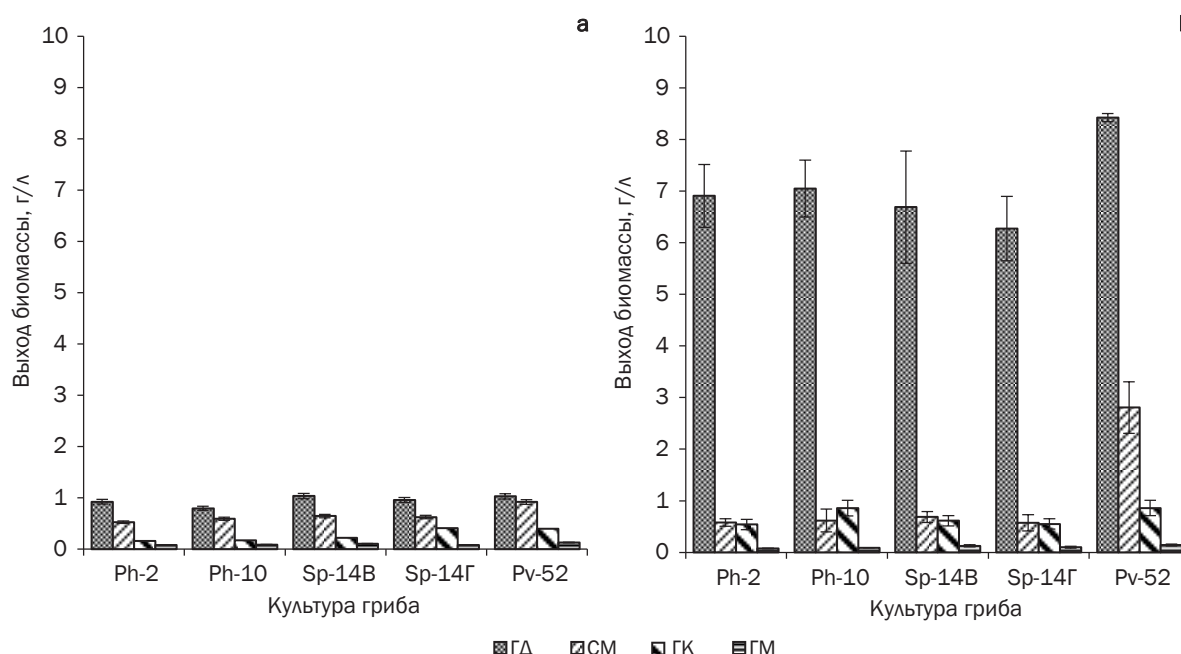


Рис. 3. Накопление биомассы исследуемыми грибами при стационарном (а) и динамическом (б) глубинном культивировании на различных питательных средах: ГД – глюкозо-дрожжевая среда; ГК – глюкозо-коллагеновая среда; СМ – среда со свекловичной мелассой; ГМ – глюкозо-минеральная среда

Fig. 3. Biomass accumulation by the studied fungi during stationary (а) and dynamic (б) submerged cultivation on various nutrient media: ГД – glucose-yeast medium; ГК – glucose-collagen medium; СМ – medium with beet molasses; ГМ – glucose-mineral medium

биомассы для Ph-2, Ph-10, Sp-14В и Sp-14Г составил 0,5–0,8 г/л, для Pv-52 – 0,9–2,8 г/л. На минеральной среде прирост биомассы для всех исследуемых грибов был минимальным, что может быть связано с потребностью в органических источниках азота и витаминов. Следовательно, для дальнейшей работы выбраны глюкозо-дрожжевая среда и динамические условия.

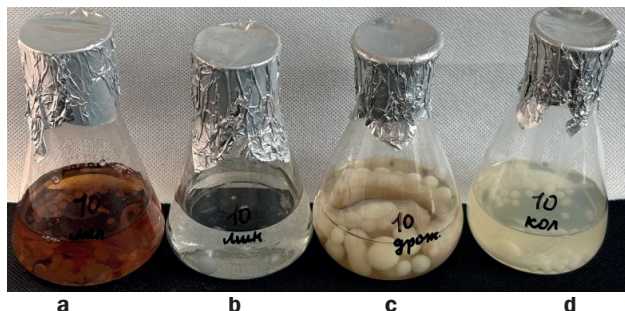


Рис. 4. Набор биомассы грибом Ph-10 при динамическом жидкофазном культивировании на различных питательных средах: а – среда со свекловичной мелассой; б – глюкозо-минеральная среда; с – глюкозо-дрожжевая среда; д – глюкозо-коллагеновая среда

Fig. 4. Biomass accumulation by Ph-10 fungus during dynamic liquid-phase cultivation in various nutrient media: а – medium with beet molasses; б – glucose-mineral medium; с – glucose-yeast medium; д – glucose-collagen medium

На следующем этапе изучена кинетика роста исследуемых культур в динамических глубинных условиях, а также рассчитаны скорости роста в экспоненциальную фазу. Показано, что лаг-фаза на жидкой питательной среде для всех культур продолжалась в течение первых суток (рис. 5). На вторые сутки наблюдался переход к экспоненциальной фазе роста.

на экспоненциальной фазе роста. На пятые сутки рост мицелия замедлялся и наступала стационарная фаза роста.

Интересно отметить, что, в отличие от роста на твердой питательной среде, в жидкой культуре Pv-52 имел четко выраженную экспоненциальную фазу.

Для оптимизации условий ферментации и прогнозирования производительности биотехнологического процесса рассчитывались абсолютная и удельная скорости роста мицелия. Полученные данные представлены в табл. 2. Для всех исследуемых культур удельная скорость роста мицелия оказалась сравнима и в среднем равнялась $0,045 \text{ ч}^{-1}$, однако абсолютная скорость роста Pv-52 была в 1,6 раза выше в сравнении с остальными культурами, что соответствовало его высокому выходу биомассы. Аналогичные результаты получены нами для *Laccaria bicolor*, которая также характеризовалась медленным ростом на твердых питательных средах с образованием плотных колоний, но высоким выходом биомассы при глубинном культивировании [15].

Таблица 2. Абсолютная и удельная скорости роста и выходы биомассы мицелия исследуемых культур при динамическом глубинном культивировании

Table 2. Absolute and specific growth rates and mycelial biomass yields of the studied cultures during dynamic submerged cultivation

Культура гриба	Скорость роста		Выход биомассы, г/л
	абсолютная, г/л×ч ⁻¹	удельная, ч ⁻¹	
Ph-2	0,066±0,007	0,037±0,002	6,9±0,6
Ph-10	0,068±0,007	0,047±0,001	7,0±0,5
Sp-14В	0,059±0,005	0,059±0,001	5,6±0,7
Sp-14Г	0,063±0,003	0,039±0,003	7,0±0,4
Pv-52	0,104±0,004	0,045±0,002	9,1±0,3

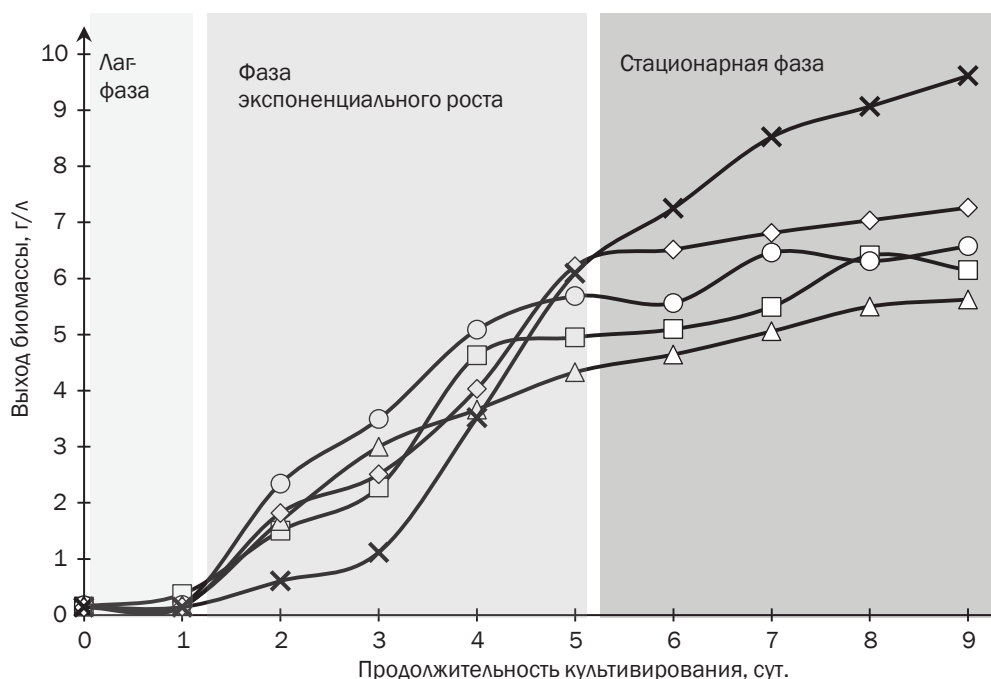


Рис. 5. Кинетика роста исследуемых культур в динамических глубинных условиях

Fig. 5. Growth kinetics of the studied cultures under dynamic submerged conditions

Для эффективного управления биотехнологическим процессом необходимо понимание особенностей метаболических потребностей исследуемых микроорганизмов. Особую роль в метаболизме микроорганизмов играет глюкоза – важнейший углеводный компонент. При этом скорость потребления глюкозы напрямую коррелирует с фазой роста культуры и физиологическим состоянием клеток.

В процессе культивирования наблюдалась характерная динамика утилизации глюкозы [16] (рис. 6): активное потребление глюкозы грибами начиналось на вторые-третьи сутки, что соответствовало экспоненциальной фазе роста. К концу ферментации при исходной концентрации субстрата 19–20 г/л доля утилизированной глюкозы для Ph-2, Ph-10, Sp-14B и Sp-14Г составила 60–65%, а для Pv-52 – 85%.

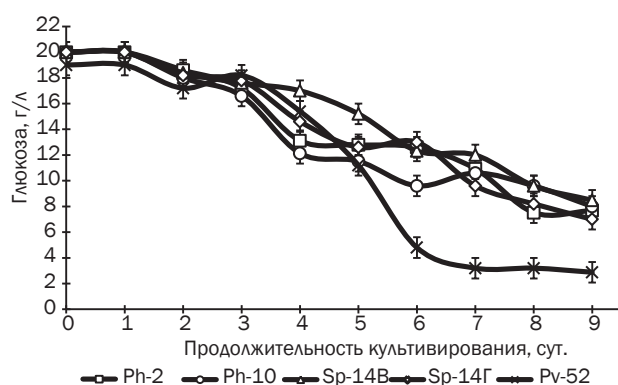


Рис. 6. Убыль глюкозы при глубинном культивировании исследуемых грибов

Fig. 6. Glucose consumption during submerged cultivation of the studied fungi

Известно, что одним из важнейших факторов, регулирующих рост и развитие микроорганизмов, является pH питательной среды. Этот параметр обуславливает физиологическую активность культур, влияет на свойства клеточных стенок, транспорт питательных веществ, ско-

рость роста и характер метаболизма [17]. При глубинном культивировании мицелия грибов исследуемых штаммов наблюдалась следующая динамика pH (рис. 7).

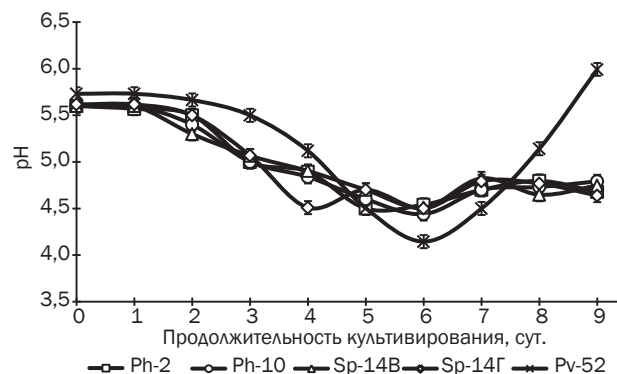


Рис. 7. Динамика pH при глубинном культивировании исследуемых грибов

Fig. 7. pH dynamics during submerged cultivation of the studied fungi

Для четырех исследуемых грибов (Ph-2, Ph-10, Sp-14B и Sp-14Г) наблюдалось закисление среды. pH среды снижался с начального значения 5,6 со стабилизацией на уровне 4,5–4,7 к седьмым-девятым суткам культивирования. Такая динамика изменения pH среды отмечалась авторами исследования [18], что коррелировало с накоплением внеклеточных ферментов.

На следующем этапе было проведено глубинное культивирование исследуемых грибов в ферментере объемом 100 л на глюкозо-дрожжевой питательной среде. В этом эксперименте осуществлялся подбор таких биотехнологически важных параметров, как степень аэрации и скорость перемешивания среды. Аэрация является необходимым условием при культивировании аэробных микроорганизмов и способствует интенсификации переноса кислорода из газа к клетке. При введении воздуха и перемешивании в среде увеличивается площадь поверхности контакта

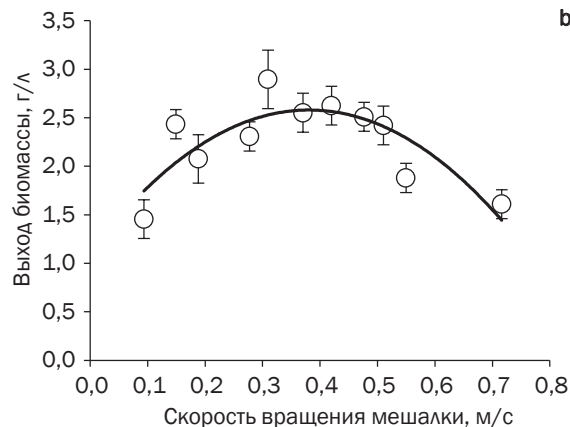
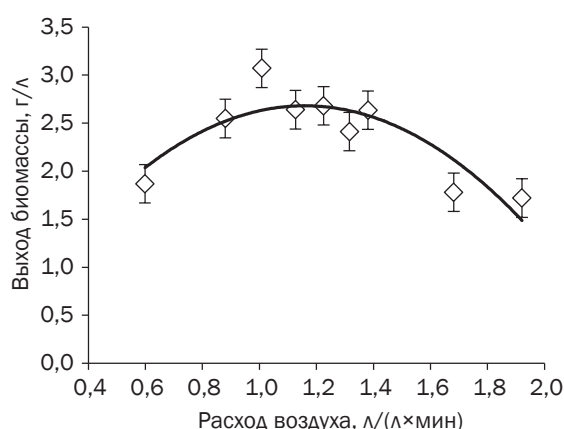


Рис. 8. Зависимость выхода биомассы (среднее для всех исследованных грибов) от расхода воздуха (a) и скорости вращения мешалки (b) при глубинном культивировании

Fig. 8. Dependence of biomass yield (average for all studied fungi) on air flow rate (a) and stirrer rotation speed (b) during submerged cultivation

фаз газ-жидкость, возрастает градиент концентраций между газовой фазой и сплошной фазой жидкости. Следовательно, необходимо постоянно поддерживать его концентрацию в культуре на оптимальном уровне.

Установлено, что при глубинном культивировании мицелия дереворазрушающих грибов оптимальный расход воздуха в среднем составляет 1,0–1,3 л/(л×мин), а линейная скорость перемешивающего устройства находится в диапазоне 0,3–0,5 м/с (рис. 8). В этих условиях выход биомассы варьировал в диапазоне 2,5–3,3 г/л в зависимости от культуры.

В процессе культивирования осуществляли ступенчатую аэрацию: в период лаг-фазы расход воздуха составлял 0,3 л/(л×мин), в фазе экспоненциального роста – 0,5–1,0 л/(л×мин), в стационарной фазе роста – 1,0–1,5 л/(л×мин). Данный подход позволяет избежать вспенивания питательной среды на первых этапах культивирования и удовлетворяет потребности растущих микроорганизмов в кислороде на протяжении всего процесса [19].

Еще одной важной частью биотехнологического процесса считается сушка и хранение готового продукта. Особенностью высших базидиальных грибов является отсутствие спороношения при глубинном культивировании, следовательно, необходимы более щадящие методы консервации. Авторами работы [20] показано, что при стандартных методах сушки (лиофилизация, распылительная сушка) наблюдалась существенная потеря жизнеспособности мицелия. Нами разработаны подходы к сушке и хранению микроорганизмов на инертном субстрате без потери жизнеспособности. Имобилизованный мицелий гриба в течение длительного времени (до 5 лет) сохранял жизнеспособное состояние.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате проведенного исследования определены кинетические и продукционные показатели накопления биомассы мицелия дереворазрушающими грибами. Показано, что радиальная скорость роста базидиомицетов на агаризованных средах значительно превышала показатели *Paecilomyces variotii* (33,5–41,5 мм/сут. для базидиомицетов, 2,4 мм/сут. для *Paecilomyces variotii* в оптимальных условиях). Культивирование на жидких питательных средах привело к обратному результату. Это связано с различием в структуре колоний грибов. Выбор условий культивирования выявил, что наиболее перспективными являются глюкозо-дрожжевая среда и динамические условия. В этих условиях штаммы продемонстрировали высокие выходы биомассы – 6,3–8,3 г/л. Динамика утилизации глюкозы соответствовала фазам роста грибов, к концу ферментации индекс мобилизации глюкозы составил 60–85% в зависимости от штамма. При масштабировании процесса определены биотехнологические параметры, наиболее важные для промышленного культивирования. Так, оптимальный расход воздуха в среднем составлял 1,0–1,3 л/(л×мин), а линейная скорость перемешивающего устройства находилась в диапазоне 0,3–0,5 м/с.

Проведенные исследования позволили подобрать оптимальные условия культивирования отдельных штаммов. Это даст возможность масштабировать биотехнологический процесс получения жизнеспособного мицелия, который используется нами при микробной трансформации древесных отходов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Липский В.А. Перспективы развития лесопромышленного комплекса. Необходимость изменения вектора развития промышленности. Часть III // Бюллетень Ассоциации «ЛЕСТЕХ». 2024. N 2. С. 16–23. EDN: FKGERK.
2. Bridi Raffaelli B.L., Carneiro Neto J.A., de Souza Andrade H. Application of reverse logistics in the identification of solid waste suitable for recycling discarded in landfills in the City of Lorena // Revista de Gestão Social e Ambiental. 2025. Vol. 19, no. 11. P. e013903. DOI: 10.24857/rgsa.v19n11-069.
3. Reddy P.N., Kumari J.A., Mounika C., Tiwari S., Reddy M.S. Characterization and dynamics of lignocellulosic components, enzyme activities and microbial populations in diverse crop residues during decomposition // Scientific Reports. 2026. Vol. 16. P. 6560. DOI: 10.1038/s41598-026-37886-0.
4. Yuan Z., Xu W., He Z., Shen H. Poplar sawdust stack self-heating properties and variations of internal microbial communities // Materials. 2022. Vol. 15, no. 3. P. 1114. DOI: 10.3390/ma15031114.
5. Verma S., Kumar R., Singh B., Sahu C., Soni P., Chetan S., et al. Wood waste utilization in the forest industry: innovations for sustainable management // Archives of Current Research International. 2025. Vol. 25, no. 7. P. 889–898. DOI: 10.9734/acri/2025/v25i71388.
6. Lei L., Zeng J., Liu Q., Luo L., Ma Z., Chen Y., et al. Effects of soil fauna on the home-field advantage of litter total phenol and condensed tannin decomposition // Forests. 2024. Vol. 15, no. 2. P. 389. DOI: 10.3390/f15020389.
7. Пат. № 2701942, Российская Федерация, С05F 11/08. Способ утилизации древесных опилок с применением композиции дереворазрушающих микроорганизмов для получения комплексного органо-минерального удобрения / Л.А. Беловежец. Заявл. 05.02.2019; опубл. 02.10.2019. Бюл. № 28.
8. Sun K., Liu S., Kasperski A., Tian Y. Dynamics analysis and biomass productivity optimisation of a microbial cultivation process through substrate regulation // Discrete Dynamics in Nature and Society. 2016. Vol. 2016. P. 1–13. DOI: 10.1155/2016/3685941.
9. Чибизова А.С., Барсукова Е.Н., Гуков Г.В. Поверхностное культивирование мицелия гриба шиитаке (*Lentinula edodes* (Berk.) Pegler) на питательных средах с биостимуляторами // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2021. N 3. С. 29–34. DOI: 10.37102/0869-7698_2021_217_03_04. EDN: IMGUCF.
10. Najafpour-Darzi G. Chapter 5 – Growth kinetics // Biochemical engineering and biotechnology / ed. G. Najafpour-Darzi. P. 141–205. DOI: 10.1016/B978-0-443-33096-4.00006-5.
11. Crosier J., von Longo-Liebenstein L., Edman M., Adamczyk S., Hamberg L. Optimizing laboratory cultivation of wood-inhabiting fungi with emphasis on applied conservation // Applied Microbiology and Biotechnology. 2025. Vol. 109. P. 210. DOI: 10.1007/s00253-025-13603-1.
12. Ahmad L., Albiski F., Murshed R., Mando H., Al okla B. Effect of different nutrient media on mycelial

growth of different species of medicinal mushroom // Arab American University Journal. 2025. Vol. 11, no. 1. P. 75–86. DOI: 10.35517/AAUP-2025.V11.1.07.

13. Aliyev T., Memmedova A. Cultivation conditions and optimization strategies for antibiotic-producing microorganisms: focus on actinomycetes // Luminis Applied Science and Engineering. 2026. Vol. 3, no. 1. P. 29–34. DOI: 10.69760/lumin.2026001004.

14. Stanbury P.F., Whitaker A., Hall S.J. Chapter 9 – Aeration and agitation // Principles of fermentation technology. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017. P. 537–618. DOI: 10.1016/B978-0-08-099953-1.00009-0.

15. Belousov D.S., Filinova N.V., Belovezhets L.A., Malkov Y.A. Biotechnological parameters of cultivation of mycorrhizal fungi *Cortinarius caperatus* and *Laccaria bicolor* // Journal of Biotechnology. 2026. Vol. 414. P. 1–7. DOI: 10.1016/j.jbiotec.2026.02.014.

16. Meletiadis J., Meis J.F., Mouton J.W., Verweij P.E. Analysis of growth characteristics of filamentous fungi in different nutrient media // Journal of Clinical Microbiology. 2001. Vol. 39, no. 2. P. 478–484. DOI: 10.1128/JCM.39.2.478-484.2001.

REFERENCES

1. Lipsky V.A. Prospects for the development of the timber industry. The need to change the vector of industrial development. Part III. *Byulleten' Associacii "LESTEH"*. 2024;2:16-23. (In Russian). EDN: FKGERK.

2. Bridi Raffaelli B.L., Carneiro Neto J.A., de Souza Andrade H. Application of reverse logistics in the identification of solid waste suitable for recycling discarded in landfills in the City of Lorena. *Revista de Gestão Social e Ambiental*. 2025;19(11):e013903. DOI: 10.24857/rgsa.v19n11-069.

3. Reddy P.N., Kumari J.A., Mounika C., Tiwari S., Reddy M.S. Characterization and dynamics of lignocellulosic components, enzyme activities and microbial populations in diverse crop residues during decomposition. *Scientific Reports*. 2026;16:6560. DOI: 10.1038/s41598-026-37886-0.

4. Yuan Z., Xu W., He Z., Shen H. Poplar sawdust stack self-heating properties and variations of internal microbial communities. *Materials*. 2022;15(3):1114. DOI: 10.3390/ma15031114.

5. Verma S., Kumar R., Singh B., Sahu C., Soni P., Chetan S., et al. Wood waste utilization in the forest industry: innovations for sustainable management. *Archives of Current Research International*. 2025;25(7):889-898. DOI: 10.9734/acri/2025/v25i71388.

6. Lei L., Zeng J., Liu Q., Luo L., Ma Z., Chen Y., et al. Effects of soil fauna on the home-field advantage of litter total phenol and condensed tannin decomposition. *Forests*. 2024;15(2):389. DOI: 10.3390/f15020389.

7. Belovezhets L.A. *Method of recycling wood shavings using a wood-destroying microorganisms composition to produce complex organo-mineral fertilizer*. Patent RF, no. 2701942; 2019. (In Russian).

8. Sun K., Liu S., Kasperski A., Tian Y. Dynamics analysis and biomass productivity optimisation of a microbial cultivation process through substrate regulation. *Discrete Dynamics in Nature and Society*. 2016;2016:1-13. DOI: 10.1155/2016/3685941.

17. Bentil J.A., Thygesen A., Mensah M., Lange L., Meyer A.S. Cellulase production by white-rot basidiomycetous fungi: solid-state versus submerged cultivation // Applied Microbiology and Biotechnology. 2018. Vol. 102, no. 14. P. 5827–5839. DOI: 10.1007/s00253-018-9072-8.

18. Kumar V.P., Sridhar M., Kumar S.A., Bhatta R. Elucidating the role of media nitrogen in augmenting the production of lignin-depolymerizing enzymes by white-rot fungi // Microbiology Spectrum. 2023. Vol. 11, no. 5. P. e01423. DOI: 10.1128/spectrum.01419-23.

19. Пат. № 2821927, Российская Федерация, С12N 1/14. Способ периодического глубинного культивирования мицелия базидиальных грибов / Д.С. Белоусов, Ю.А. Малков, Л.А. Беловежец, Д.О. Самульцев. Заявл. 27.04.2024; опубл. 27.06.2024. Бюл. № 18.

20. Иванушкина Н.Е., Кочкина Г.А., Еремина С.С., Озерская С.М. Опыт использования современных методов длительного хранения грибов во Всероссийской коллекции микроорганизмов // Микология и фитопатология. 2010. Т. 44. N 1. С. 19–30. EDN: OIYKWL.

9. Chibizova A.S., Barsukova E.N., Gukov G.V. Surface cultivation of mycelium of shiitake mushroom (*Lentinula edodes* (Berk.) Pegler) on nutrient media with biostimulants. *Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2021;3:29-34. (In Russian). DOI: 10.37102/0869-7698_2021_217_03_04. EDN: IMGUCF.

10. Najafpour-Darzi G. Chapter 5 – Growth kinetics. In: Najafpour-Darzi G. (ed.). *Biochemical engineering and biotechnology*. P. 141–205. DOI: 10.1016/B978-0-443-33096-4.00006-5.

11. Crosier J., von Longo-Liebenstein L., Edman M., Adamczyk S., Hamberg L. Optimizing laboratory cultivation of wood-inhabiting fungi with emphasis on applied conservation. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2025;109:210. DOI: 10.1007/s00253-025-13603-1.

12. Ahmad L., Albiski F., Murshed R., Mando H., Al okla B. Effect of different nutrient media on mycelial growth of different species of medicinal mushroom. *Arab American University Journal*. 2025;11(1):75-86. DOI: 10.35517/AAUP-2025.V11.1.07.

13. Aliyev T., Memmedova A. Cultivation conditions and optimization strategies for antibiotic-producing microorganisms: focus on actinomycetes. *Luminis Applied Science and Engineering*. 2026;3(1):29-34. DOI: 10.69760/lumin.2026001004.

14. Stanbury P.F., Whitaker A., Hall S.J. Chapter 9 – Aeration and agitation. In: Principles of fermentation technology. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2017, p. 537-618. DOI: 10.1016/B978-0-08-099953-1.00009-0.

15. Belousov D.S., Filinova N.V., Belovezhets L.A., Malkov Y.A. Biotechnological parameters of cultivation of mycorrhizal fungi *Cortinarius caperatus* and *Laccaria bicolor*. *Journal of Biotechnology*. 2026;414:1-7. DOI: 10.1016/j.jbiotec.2026.02.014.

16. Meletiadis J., Meis J.F., Mouton J.W., Verweij P.E. Analysis of growth characteristics of filamentous fungi in different nutrient media. *Journal of Clinical Microbiology*. 2001;39(2):478-484. DOI: 10.1128/JCM.39.2.478-484.2001.

17. Bentil J.A., Thygesen A., Mensah M., Lange L., Meyer A.S. Cellulase production by white-rot basidiomycetous fungi: solid-state versus submerged cultivation. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2018;102(14):5827-5839. DOI: 10.1007/s00253-018-9072-8.

18. Kumar V.P., Sridhar M., Kumar S.A., Bhatta R. Elucidating the role of media nitrogen in augmenting the production of lignin-depolymerizing enzymes by white-rot fungi. *Microbiology Spectrum*. 2023;11(5):e01423. DOI: 10.1128/spectrum.01419-23.

19. Belousov D.S., Malkov Y.A., Belovezhets L.A.,

Samultsev D.O. Method for periodic submerged cultivation of basidiomycetes mycelium. Patent RF, no. 2821927; 2024. (In Russian).

20. Ivanushkina N.E., Kochkina G.A., Eremina S.S., Ozerskaya S.M. Experience in using modern methods of long-term preservation of VKM fungi. *Mycology and Phytopathology*. 2010;44(1):19-30. (In Russian). EDN: OIYKWL.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Беловусов Дмитрий Сергеевич,
аспирант, инженер-исследователь,
Федеральный исследовательский центр
«Иркутский институт химии
им. А.Е. Фаворского СО РАН»,
664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1,
Российская Федерация,
✉ belousov_off@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1412-9572>

Филинова Надежда Владимировна,
к.б.н., старший научный сотрудник,
Федеральный исследовательский центр
«Иркутский институт химии
им. А.Е. Фаворского СО РАН»,
664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1,
Российская Федерация,
filinova_nv@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7647-9271>

Малков Юрий Алексеевич,
к.т.н., научный сотрудник,
Федеральный исследовательский центр
«Иркутский институт химии
им. А.Е. Фаворского СО РАН»,
664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1,
Российская Федерация,
malkov@irioch.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8326-7736>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Dmitry S. Belousov,
Postgraduate Student, Research Engineer,
A.E. Favorsky Irkutsk Institute of Chemistry
of the Siberian Branch of the Russian
Academy of Sciences,
1, Favorsky St., Irkutsk, 664033,
Russian Federation,
✉ belousov_off@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1412-9572>

Nadezhda V. Filinova,
Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher,
A.E. Favorsky Irkutsk Institute of Chemistry
of the Siberian Branch of the Russian
Academy of Sciences,
1, Favorsky St., Irkutsk, 664033,
Russian Federation,
filinova_nv@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7647-9271>

Yuri A. Malkov,
Cand. Sci. (Engineering), Researcher,
A.E. Favorsky Irkutsk Institute of Chemistry
of the Siberian Branch of the Russian
Academy of Sciences,
1, Favorsky St., Irkutsk, 664033,
Russian Federation,
malkov@irioch.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8326-7736>

Беловежец Людмила Александровна,
д.б.н., ведущий научный сотрудник,
заведующий лабораторией,
Федеральный исследовательский центр
«Иркутский институт химии
им. А.Е. Фаворского СО РАН»,
664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1,
Российская Федерация,
belovezhets@irioch.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5922-3397>

Lyudmila A. Belovezhets,
Dr. Sci. (Biology), Leading Researcher,
Head of the Laboratory,
A.E. Favorsky Irkutsk Institute of Chemistry
of the Siberian Branch of the Russian
Academy of Sciences,
1, Favorsky St., Irkutsk, 664033,
Russian Federation,
belovezhets@irioch.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5922-3397>

Вклад авторов

Д.С. Белоусов – разработка методологии,
проведение исследования, визуализация,
написание черновика рукописи,
редактирование рукописи.
Н.В. Филинова – разработка концепции,
разработка методологии, проведение
исследования, визуализация, написание
черновика рукописи, редактирование рукописи.
Ю.А. Малков – разработка методологии,
проведение исследования, визуализация,
написание черновика рукописи
Л.А. Беловежец – разработка концепции,
разработка методологии,
получение финансирования,
административное руководство
исследовательским проектом,
редактирование рукописи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии
конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили
окончательный вариант рукописи.*

Информация о статье

Поступила в редакцию 13.03.2026.
Одобрена после рецензирования 14.05.2026.
Принята к публикации 16.05.2026.

Contribution of the authors

Dmitry S. Belousov – methodology, investigation,
visualization, writing – original draft, editing.
Nadezhda V. Filinova – conceptualization,
methodology, investigation, visualization,
writing – original draft, editing.
Yuri A. Malkov – methodology, investigation,
visualization, writing – original draft.
Lyudmila A. Belovezhets – conceptualization,
methodology, funding acquisition,
project administration, editing.

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.*

Information about the article

The article was submitted 13.03.2026.
Approved after reviewing 14.05.2026.
Accepted for publication 16.05.2026.