ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ БИОЛОГИЯ

**Научная статья**
**УДК 579.61**
**EDN: BUWBKE**
**DOI: 10.21285/achb.996**

# Влияние состава среды на рост мицелия и биосинтез метаболитов *Daedaleopsis tricolor*

**М.А. Сысоева, И.Ш. Прозорова✉, Е.В. Сысоева**

*Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Российская Федерация*

***Аннотация.*** *Метаболиты Daedaleopsis tricolor представляют практический интерес, поскольку они обладают антиоксидантными, антимикробными, противоопухолевыми свойствами. Погруженное культивирование Daedaleopsis tricolor KS11 было осуществлено на питательных средах, содержащих разные источники азота – дрожжевой экстракт, соевый изолят и их комбинацию в соотношении 1:1. Было показано, что культивирование Daedaleopsis tricolor KS11 на комбинированной среде позволяет получить до 9 г/л биомассы. При этом на 1 сутки сокращается продолжительность его выращивания по сравнению с использованием дрожжевого экстракта или соевого изолята в качестве единственных источников азота. При культивировании базидиомицета на комбинированной среде суммарные экзометаболиты проявляют высокие антиоксидантные (88,61 мг/г) и антирадикальные (3,41 мг/мл) свойства. Это коррелирует с высоким содержанием в них флавоноидов – 18,56 мг/г по сравнению с экзометаболитами, полученными при культивировании гриба на других средах. Показано, что для получения эндопигментов эффективнее использовать в качестве источника азота соевый изолят. На основании инфракрасного спектрометрического анализа эндопигменты отнесены к меланинам. Установлено, что перспективно культивировать Daedaleopsis tricolor KS11 на комбинированной среде, содержащей дрожжевой экстракт и соевый изолят в соотношении 1:1, поскольку на ней гриб накапливает экзо- и эндопигменты с высокими антиоксидантными свойствами. Полученные результаты можно использовать для создания биологически активных добавок антиоксидантного действия.*

***Ключевые слова:*** *Daedaleopsis tricolor, погруженное культивирование, эндопигменты, флавоноиды, антиоксидантная активность*

***Благодарности.*** *Авторы выражают благодарность кандидату биологических наук, доценту кафедры биохимии, биотехнологии и фармакологии Казанского федерального университета Т.И. Абдуллину и младшему научному сотруднику научно-образовательного центра фармацевтики Казанского федерального университета М.И. Камалову за помощь в проведении инфракрасной спектроскопии.*

***Для цитирования:*** Сысоева М.А., Прозорова И.Ш., Сысоева Е.В. Влияние состава среды на рост мицелия и биосинтез метаболитов *Daedaleopsis tricolor* // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2025. Т. 15. N 3. DOI: 10.21285/achb.996. EDN: BUWBKE.

PHYSICOCHEMICAL BIOLOGY

**Original article**

# Culture medium composition influences mycelial growth and metabolite biosynthesis of *Daedaleopsis tricolor*

**Maria A. Sysoeva, Ilyuza Sh. Prozorova✉, Elena V. Sysoeva**

*Kazan National Research Technological University, Kazan, Russian Federation*

***Abstract.*** *The metabolites of the basidiomycete Daedaleopsis tricolor have attracted research attention due to their antioxidant, antimicrobial, and antitumor properties. This study investigated the submerged cultivation of the*

© Сысоева М.А., Прозорова И.Ш., Сысоева Е.В., 2025

*Daedaleopsis tricolor strain KS11 in nutrient media supplemented with varying nitrogen sources, including yeast extract, soy protein isolate, and a 1:1 combination thereof. The cultivation on the combined medium yielded up to 9 g/L of biomass and reduced the cultivation time by one day compared to media containing a single nitrogen source. The total pool of exometabolites obtained using the combined medium demonstrated high antioxidant (88.61 mg/g) and antiradical activity (3.41 mg/mL). This activity correlated with a high flavonoid content of 18.56 mg/g, which exceeded the levels found in exometabolites from the other media. The use of soy protein isolate as a nitrogen source was more effective for the synthesis of endopigments. These endopigments were identified as melanins by infrared spectrometry. The cultivation of Daedaleopsis tricolor KS11 on a combined medium containing a 1:1 ratio of yeast extract and soy protein isolate represents a promising approach, as it facilitates the concurrent accumulation of exopigments and endopigments with high antioxidant properties. These findings provide a basis for developing dietary supplements with enhanced antioxidant activity.*

***Keywords:*** *Daedaleopsis tricolor, submerged cultivation, endopigments, flavonoids, antioxidant activity*

***Acknowledgements.*** *The authors would like to express their gratitude to Cand. Sci. Timur Abdullin (Department of Biochemistry, Biotechnology and Pharmacology, Kazan Federal University), as well as to Marat Kamalov (Scientific and Educational Center for Pharmacy, Kazan Federal University). Their assistance in conducting infrared spectroscopy is greatly appreciated.*

***For citation:*** Sysoeva M.A., Prozorova I.Sh., Sysoeva E.V. Culture medium composition influences mycelial growth and metabolite biosynthesis of *Daedaleopsis tricolor. Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology.* 2025;15(3). (In Russian). DOI: 10.21285/achb.996. EDN: BUWBKE.

## ВВЕДЕНИЕ

В последние годы наблюдается заметный интерес к культивируемым грибам, в том числе базидиомицетам, поскольку они продуцируют множество биологически активных соединений с разнообразными фармакологическими свойствами [1–3]. Дереворазрушающие грибы являются одними из самых богатых по содержанию и разнообразию вторичных метаболитов, включая фенольные соединения, терпеноиды, а также пигменты, известные своими антиоксидантными и антимикробными свойствами [2, 4–8]. Их мицелий и метаболиты используются в качестве биологически активных добавок.

Одним из перспективных базидиомицетов для разработки биотехнологии по получению метаболитов является *Daedaleopsis tricolor.* Наибольшая часть исследований его природных плодовых тел и мицелия направлена на выделение и идентификацию сесквитерпенов и эргостерола, которые обладают антиоксидантной, антибиотической и противоопухолевой активностью [9–12]. Кроме этого, сравнительный анализ этанольных экстрактов из культивируемых плодовых тел и мицелия показал, что содержание в них фенолов в 2,4 и 3,1 раза больше по сравнению с их количеством в экстракте, полученном из природных плодовых тел. Наибольшей антирадикальной активностью обладал экстракт из мицелия $IC_{50}$ = 7,93 мг/мл [13].

При культивировании базидиомицетов погруженным способом можно изменять условия проведения процесса и состав питательных сред, что позволяет интенсифицировать их рост и биосинтез метаболитов. Так, при культивировании *D. tricolor* Db-14, Db-18 и Dr-17 на средах с разными источниками углерода и азота было установлено, что содержание полисахаридов, фенольных соединений, флавоноидов и каротиноидов в этанольных экстрактах мицелия заметно отличаются в зависимости от состава среды [14]. Интерес представляют не только плодовые тела и мицелий гриба, но и культуральные жидкости, которые содержат экзометаболиты, обладающие значительными биологически активными свойствами. В литературе имеется мало сведений по экзометаболитам *D. tricolor*, что обуславливает перспективу дальнейших исследований экзо- и эндометаболитов *D. tricolor* KS11.

Целью проведенного исследования являлся подбор оптимальной среды, в которой источником азота может быть дрожжевой экстракт, соевый изолят или их комбинация, обеспечивающей накопление грибом *D. tricolor* KS11 метаболитов с высокими антиоксидантными свойствами для дальнейшего их использования в разработке биотехнологии получения биологически активных добавок.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

*Объект исследования.* В работе использовали культуру базидиального гриба *D. tricolor* KS11 из коллекции кафедры пищевой биотехнологии Казанского национального исследовательского технологического университета (г. Казань, Россия). Штамм выделен из природного плодового тела, депонирован в базе данных GenBank (номер OR804093) и содержится на глюкозо-картофельной среде в пробирке со скошенным агаром при температуре 4±2 °C.

*Погруженное культивирование гриба Daedaleopsis tricolor KS11.* Для погруженного культивирования применяли питательные среды, состав которых приведен в табл. 1.

В колбы объемом 750 мл с предварительно стерилизованной питательной средой (100 мл) помещали 7-суточный инокулят гриба в количестве 10%. Выращивание проводили в шейкере-инкубаторе (Infors HT Ecotron, Швейцария) при скорости вращения 200 об/мин и при температуре 27 °C в течение 5–7 суток. Затем выросшую биомассу отфильтровывали от культуральной жидкости, высушивали при 40±2 °C конвективно-кондуктивным способом на электросушилке (Oberhof Fruchttrockner B-53, Китай). Количество биомассы определяли гравиметрически. Культуральную жидкость концентрировали на роторном испарителе (IKA RV 10 Digital, Германия) и высушивали при 40±2 °C в электросушилке (Oberhof Fruchttrockner B-53, Китай).

**Таблица 1.** Состав питательных сред, использованных при культивировании *Daedaleopsis tricolor* KS11

**Table 1.** Composition of nutrient media used in the cultivation of *Daedaleopsis tricolor* KS11

| Состав, г/л | Среда с дрожжевым экстрактом (среда 1) | Среда с соевым изолятом (среда 2) | Среда комбинированная (среда 3) |
|---|---|---|---|
| Глюкоза | 20,0 | 20,0 | 20,0 |
| Дрожжевой экстракт | 5,0 | – | 2,5 |
| Соевый изолят | – | 5,0 | 2,5 |
| Дигидроортофосфат калия | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Магний сернокислый | 0,5 | 0,5 | 0,5 |

*Выделение эндопигментов*. Пигменты из биомассы *D. tricolor* KS11 экстрагировали с помощью 2%-го раствора гидроксида натрия и выделяли осаждением 25%-й хлористоводородной кислотой [15].

*Определение содержания флавоноидов*. Готовили 70%-е этанольные растворы высушенной культуральной жидкости. К 200 мкл исследуемого объекта добавляли 100 мкл 2%-го раствора хлорида алюминия и выдерживали в течение 1 ч при комнатной температуре. После этого к смеси приливали 650 мкл 96%-го этанола и 50 мкл 4%-го раствора ацетата натрия. Измеряли оптическую плотность на микропланшетном ридере (TECAN Infinite 200 PRO, Австрия) при длине волны $\lambda$ = 380 нм. В качестве контроля использовали аналогично приготовленную смесь, заменив образец на 96%-й этиловый спирт. Калибровочный график строили по дигидрокверцетину в концентрациях 10–200 мкг/мл. Содержание флавоноидов выражали в пересчете на эквивалент дигидрокверцетина, мг/г образца [14].

*Определение антиоксидантной активности фосфомолибденовым методом*. Готовили водные растворы эндопигментов и высушенной культуральной жидкости. Для лучшего растворения образцов пигментов в водный раствор добавляли 2–3 капли аммиака. 2 мл исследуемых растворов смешивали с 2 мл фосфомолибденового реактива и инкубировали на водяной бане при температуре 95 °C в течение 1 ч 30 мин. Оптическую плотность определяли при длине волны $\lambda$ = 695 нм на микропланшетном ридере (TECAN Infinite 200 PRO, Австрия). Калибровочный график строили по растворам кверцетина, результаты выражали в пересчете на эквивалент дигидрокверцетина, мг/г образца [15–17].

*Определение антиоксидантной активности фенантролиновым методом.* Готовили водные растворы эндопигментов. Для лучшего растворения образцов пигментов в водный раствор добавляли 2–3 капли аммиака. К 0,5 мл раствора исследуемых объектов вносили 0,2 мл фенантролинового реактива и 4,3 мл дистиллированной воды. Перемешивали и выдерживали на водяной бане при температуре 50 °C в течение 30 мин. Измеряли оптическую плотность при длине волны $\lambda$ = 510 нм на микропланшетном ридере (TECAN Infinite 200 PRO, Австрия). Активность рассчитывали по калибровочному графику, построенному по стандартным растворам кверцетина. Результаты выражали в пересчете на эквивалент дигидрокверцетина, мг/г образца [15, 18].

*Определение антирадикальной активности.* Спиртовые растворы высушенных культуральных жидкостей готовили в концентрациях от 2 до 16 мг/мл. Использовали метод, основанный на реакции антиоксидантов с 0,2 мМ DPPH в 96%-м этаноле. Результаты выражали в $IC_{50}$, мг/мл [19].

*Инфракрасная спектрометрия*. Структуру эндопигментов подтверждали с помощью инфракрасной (ИК) спектроскопии с преобразованием Фурье в режиме неполного внутреннего отражения на спектрометре (Frontier Perkin Elmer, США) в диапазоне 500–4000 см$^{-1}$ (разрешение – 1 см$^{-1}$, число сканов – 10).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

*Погруженное культивирование гриба Daedaleopsis tricolor KS11.* Важным параметром, влияющим на рост мицелия и биосинтез многих метаболитов при культивировании грибов, является состав питательной среды и условия выращивания. Погруженное культивирование базидиомицета *D. tricolor* осуществляют на глюкозо-картофельной среде [9], а также на синтетических средах, в состав которых входят глюкоза, крахмал, кукурузный и дрожжевой экстракты, пептон [14]. Для того чтобы стимулировать рост мицелия, необходимо внести дополнительные питательные вещества, которые способны увеличить количество биомассы и синтез вторичных метаболитов, обладающих антиоксидантными, иммуномодулирующими и другими биологическими свойствами.

Часто в качестве таких добавок при выращивании грибов используют дрожжевой экстракт, продукты переработки сои и пептон [20–24]. Продукты переработки сои, например соевая мука и шрот сои, являются богатыми источниками белка. Дрожжевой экстракт является источником не только белка, пептидов, но и аминокислот, витаминов, минералов, которые необходимы грибу в качестве факторов роста. Пептоны представляют собой белоксодержащий продукт, количество белка в котором достигает 85%. Некоторые авторы используют для культивирования грибов *D. tricolor* среды, в состав которых входят как дрожжевой экстракт, так и пептон [14]. Выход биомассы на такой среде выше приблизительно в 2 раза по сравнению с использованием среды, в которой применена соевая мука. В данном исследовании предлагается вместо пептона в питательную среду добавлять соевый изолят, который в 16 раз дешевле, чем пептон, и в тоже время содержит больше (до 95%) белков, чем в соевой муке. Это позволит снизить стоимость среды для культивирования продуцента.

Для культивирования *D. tricolor* KS11 были применены следующие среды: среда с дрожжевым экстрактом (среда 1), среда с соевым изолятом (среда 2) и комбинированная среда (среда 3), которая содержит дрожжевой экстракт и соевый изолят в соотношении 1:1. Рост биомассы показан на рис. 1.

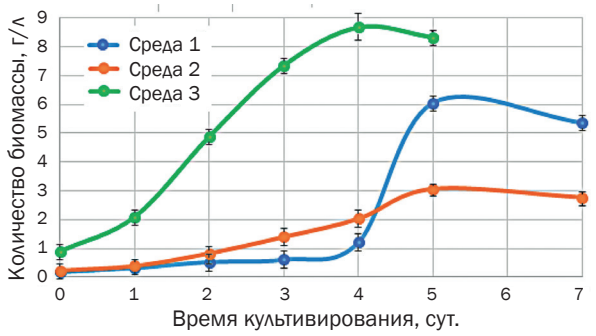


**Рис. 1.** Рост биомассы *Daedaleopsis tricolor* KS11 при культивировании на питательных средах с различным источником азота

**Fig. 1.** Growth of *Daedaleopsis tricolor* KS11 biomass during submerged cultivation on nutrient media with a different nitrogen sources

На среде 1 наблюдается максимальное накопление биомассы на 5-е сутки культивирования (6,05±0,33 г/л), скорость роста равна 1,61 г/сут. Наибольшее количество биомассы на среде 2 (3,07±0,33 г/л) также отмечается на 5-е сутки выращивания, скорость роста при этом составила 0,41 г/сут. Можно предположить, что ингибирование роста мицелия связано с избытком азота в питательной среде, поскольку соевого изолята было внесено 5 г/л и он содержит до 95% белка.

Среда 3 включает два источника азотсодержащего субстрата – дрожжевой экстракт и соевый изолят в соотношении 1:1. Такой состав позволит снизить избыточное количество белка, при этом сохранить необходимые питательные компоненты для интенсивного роста гриба. При выращивании *D. tricolor* KS11 на среде 3 на 4-е сутки отмечается максимальное количество биомассы – 8,67±0,01 г/л, скорость роста составляет 0,17 г/сутки. Внесение в среду дрожжевого экстракта и соевого изолята позволило сократить процесс культивирования на 1 сутки и увеличить количество биомассы на 43%.

Проведенный анализ литературных данных показал, что штаммы Db-14, Db-18 и Dr-17 гриба *D. tricolor* при погруженном культивировании на среде, содержащей пептон и дрожжевой экстракт в концентрации 5 и 2 г/л соответственно, накапливают биомассу в количестве от 5,1 до 7,4 г/л в течение 5–7 суток [14]. Следовательно, базидиомицет *D. tricolor* KS11 является перспективным объектом биотехнологии, поскольку он за 4 суток наращивает до 9 г/л биомассы.

Для дальнейшей разработки продуктов с антиоксидантными свойствами в качестве объектов исследования были выбраны суммарные экзометаболиты культуральной жидкости и проанализировано содержание в них флавоноидов. Кроме того, одними из самых активных антиоксидантов грибов являются меланины, поэтому были выделены и исследованы антиоксидантные свойства этих эндометаболитов.

*Экзометаболиты гриба Daedaleopsis tricolor KS11.* Содержание флавоноидов и антиоксидантные свойства высушенной культуральной жидкости представлены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, высокие показатели содержания флавоноидов экзометаболитов наблюдаются уже к 5-м суткам культивирования на всех питательных средах.

Согласно литературным данным, рекомендуется проводить как минимум два разных анализа для определения антиоксидантной активности [26], так как антиоксидант не может вступить в реакцию из-за того, что его окислительно-восстановительный потенциал выше, чем окислительно-восстановительный потенциал индикаторной системы, или из-за стерических препятствий. Учитывая, что экзометаболиты могут быть представлены различными группами веществ, проявляющих антиоксидантную активность, в работе для измерения этого показателя было применено два метода, оба из которых показали высокие значения антиоксидантной активности экзометаболитов гриба *D. tricolor* KS11 при выращивании на всех средах на 7-е сутки культивирования.

Рост культуры на среде 2 (см. рис. 1) показывает, что гриб находится в состоянии стресса, поскольку накапливает мало биомассы и имеет низкую скорость роста. Анализ результатов табл. 2 демонстрирует, что в этих условиях *D. tricolor* KS11 продуцирует мало флавоноидных соединений, но при этом экзометаболиты на 7-е сутки имеют высокие значения антиоксидантных свойств. Хороший рост *D. tricolor* KS11 показал на среде 1, которая лучше удовлетворяла его потребности. Это сказалось на увеличении концентрации флавоноидов, накопленных в среде, в 1,5–3,0 раза. Можно предположить, что антиоксидантные свойства экзометаболитов обеспечивают именно эти соединения. Активный рост на среде 3 *D. tricolor* KS11 позволил

**Таблица 2.** Антиоксидантные свойства экзометаболитов *Daedaleopsis tricolor* KS11 и содержание в них флавоноидов

**Table 2.** Antioxidant properties of *Daedaleopsis tricolor* KS11 exometabolites and their flavonoid content

| Питательная среда | Сутки | Содержание флавоноидов, мг/г | Антиоксидантная активность | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Фосфомолибденовый метод, мг/г | DPPH, $IC_{50}$, мг/мл |
| Среда 1 | 1-е | 8,87±0,19 | 27,67±0,90 | 7,68 |
| | 5-е | 12,54±1,45 | 48,09±3,27 | 7,65 |
| | 7-е | 11,49±0,21 | 63,93±0,53 | 6,96 |
| Среда 2 [25] | 1-е | 2,80±0,25 | 27,75±1,62 | 12,63 |
| | 5-е | 3,84±0,44 | 49,30±4,34 | 4,56 |
| | 7-е | 7,68±0,63 | 74,93±0,04 | 4,51 |
| Среда 3 | 1-е | 8,15±0,36 | 33,26±1,90 | 13,09 |
| | 5-е | 18,56±0,33 | 88,61±0,04 | 3,41 |

ему синтезировать в 1,5 раза больше флавоноидов, а также увеличить антиоксидантные и антирадикальные свойства суммарных экзометаболитов в 1,8 и 2,2 раза соответственно.

Учеными из Португалии было показано, что метанольные экстракты культуральной жидкости, полученные при выращивании гриба *Pleurotus eryngii* на глюкозо-картофельной среде и среде Melin – Norkans, обладают антирадикальной активностью ($EC_{50}$ = 22,0±0,5 и 28,2±0,5 мг/мл соответственно) [27]. Суммарные экзометаболиты *D. tricolor* KS11 превосходят по антирадикальным свойствам в 1,8–8,2 раза экзометаболиты *P. eryngii*, экстрагируемые метанолом.

Таким образом, удовлетворение потребностей гриба и хороший рост на среде 3 позволяет к 5-м суткам как получить максимальное количество флавоноидов, так и обеспечить высокие показатели общей антиоксидантной и антирадикальной активности суммарных экзометаболитов.

*Эндометаболиты гриба Daedaleopsis tricolor KS11.* Известно, что базидиомицеты являются источником пигментов – меланинов и каротиноидов, которые способны проявлять высокие антиоксидантные свойства. Согласно данным авторов работ [14, 27], в экстрактах природных плодовых тел и мицелия *D. tricolor* были обнаружены каротиноиды. Другими авторами [28] был выделен меланин из плодовых тел этого гриба, произрастающего в природе. Приведенные сведения показывают перспективу изучения эндопигментов гриба *D. tricolor.*

В ходе проведения настоящего исследования были выделены пигменты из мицелия *D. tricolor* KS11 при его выращивании на средах с различными источниками азота на 5-е сутки культивирования и определены их антиоксидантные свойства (табл. 3).

Вероятно, при выращивании на среде 2 гриб испытывает стресс, в связи с чем синтезирует большое количество эндопигментов. Из-за недостаточного количества доступных питательных веществ они имеют низкую антиоксидантную активность.

При выращивании *D. tricolor* KS11 на среде 3 количество синтезируемых им эндопигментов находится на приемлемом уровне, а так как в этом случае в питательной среде присутствует оптимальное соотношение доступных для гриба питательных веществ, синтезируемые пигменты имеют достаточно высокую антиоксидантную активность.

По сравнению с продуктивностью базидиомицета *Pycnoporellus fulgens* KS12, который накапливает эндопигменты в количестве от 12 до 32 мг/г биомассы, *D. tricolor* KS11 продуцирует их в 2 раза больше. Эндопигменты *D. tricolor* KS11 обладают близкими антиоксидантными свойствами с эндопигментами *P. fulgens* KS12 [15].

В настоящей работе показано, что по количеству пигментов в биомассе, а также их антиоксидантным свойствам *D. tricolor* KS11 не уступает другим видам грибов, что демонстрирует возможность дальнейшего создания на его основе биологически активных добавок антиоксидантного действия.

Эндопигмент, выделенный из биомассы *D. tricolor* KS11 при его культивировании на среде 2, проанализирован с применением ИК-спектрометрии (рис. 2).

ИК-спектр эндопигмента *D. tricolor* KS11 имеет все полосы поглощения, характерные для синтетического меланина и меланина сепии [29, 30], которые обычно используют в качестве стандартов для иден-

**Таблица 3.** Концентрация эндопигментов *Daedaleopsis tricolor* KS11 и их антиоксидантная активность при погруженном культивировании на средах с различными источниками азота на 5-е сутки

**Table 3.** Concentration of *Daedaleopsis tricolor* KS11 endopigments and their antioxidant activity in case of submerged cultivation on media with various nitrogen sources on the 5th day

| Питательная среда | Концентрация эндопигментов, мг/г | Антиоксидантная активность, мг/г | |
|---|---|---|---|
| | | Фосфомолибденовый метод | Фенантролиновый метод |
| Среда 1 | 29,00±3,00 | 69,81±1,34 | 19,15±2,79 |
| Среда 2 | 126,00±3,50 | 45,65±4,03 | 7,47±1,04 |
| Среда 3 | 63,00±4,00 | 52,14±2,31 | 11,78±0,95 |

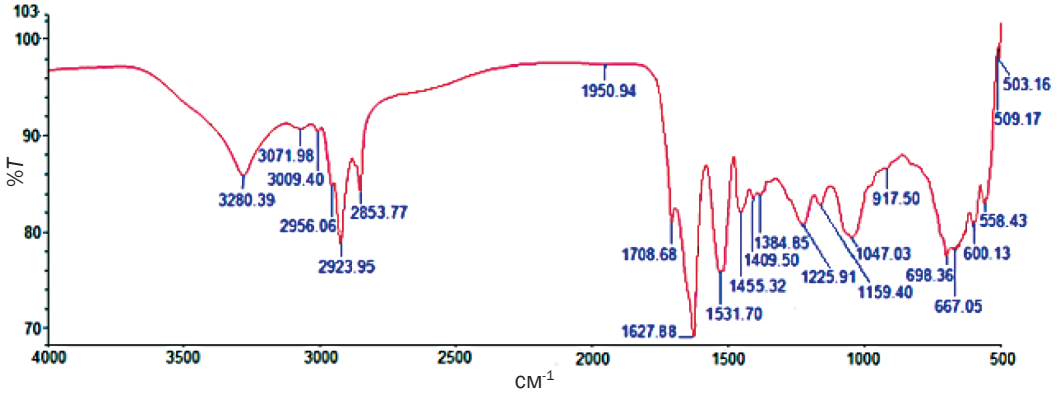


**Рис. 2.** Инфракрасный спектр эндопигмента, выделенного из биомассы *Daedaleopsis tricolor* KS11, полученной при культивировании гриба на среде 2

**Fig. 2.** Infrared spectrum of endopigment isolated from biomass obtained by *Daedaleopsis tricolor* KS11 cultivating on a nutrient medium 2

тификации этих пигментов. В спектре эндопигмента *D. tricolor* KS11 проведено отнесение полос поглощения, согласно источникам [29, 30]. Полосы поглощения в диапазоне 3600–2800 см$^{-1}$ связаны с валентными колебаниями (O-H и N-H) аминов, амидов или карбоновых кислот, фенольных и ароматических аминокислот, присутствующих в индольной и пирроловой системах. Характерная сильная полоса при ~1708 см$^{-1}$ обусловлена валентными колебаниями C = O, а полоса ~1627 см$^{-1}$ – колебаниями связей ароматического кольца C = C амида I или симметричным валентными колебаниями COO-групп. Наличие полос поглощения деформационных колебаний N-H при 1627 см$^{-1}$ (амид II-полоса) и валентных колебаний C-N при 1531 см$^{-1}$ (амид II-полоса) указывает на то, что пигмент имеет типичную индольную структуру меланина. Полосы в диапазоне ~1400–1500 см$^{-1}$ относятся к асимметричным деформационным колебаниям алифатических C–H-связей. Полоса при 1409 см$^{-1}$ ($CH_2$-$CH_3$-связи) является характерным признаком меланина. Фенольные C-OH плоскостные деформационные колебания, проявляющиеся при 1225 см$^{-1}$, могут свидетельствовать о присутствии в меланине фенольных соединений. Полоса с центром в 1047 см$^{-1}$ может указывать на присутствие гетероциклов с кислородным гетероатомом или характеризовать внеплоскостные деформационные колебания метильной группы $\gamma CH_3$ (крутильные и веерные) с перекрытием плоскостными деформационными колебаниями $\delta$C-H-связи (ножничными и маятниковыми CH в плоскости алифатической структуры, которые также является характерными для пигмента меланина). Полосы ниже 700 см$^{-1}$ могут быть связаны с замещением алкена C-H в пигменте меланина.

Проведено сравнение спектра эндопигмента *D. tricolor* KS11 со спектрами меланинов, выделенных из других культивируемых грибов. Наиболее близкая картина спектра и наличие аналогичных полос поглощения в спектре эндопигмента *D. tricolor* KS11 наблюдаются со спектрами меланинов грибов: немодифицированного меланина *D. tricolor* [31], *Inonotus hispidus* [32], *Lachnum* YM404 [33] и ряда других. Отличительной особенностью спектров этих меланинов является высокая интенсивность полос поглощения при 2920 см$^{-1}$. Поскольку эта и близкие к ней полосы соответствуют колебаниям алифатических C-H-групп, то считают, что в составе этих меланинов имеется высокое содержание алифатических соединений. Кроме того, полосы средней интенсивности при 2853 см$^{-1}$ на правом плече полосы колебаний алкильных C-H подтверждают присутствие альдегидных групп в меланине. Таким образом, по результатам анализа ИК-спектра эндопигмента *D. tricolor* KS11 он может быть отнесен к меланинам. Требуется провести расширенное исследование эндопигментов *D. tricolor* KS11 для того, чтобы отнести их к меланинам.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено погруженное культивирование гриба *D. tricolor* KS11 на питательных средах, содержащих разные источники азота – дрожжевой экстракт, соевый изолят и их комбинацию в соотношении 1:1. Показано, что применение среды 3, в состав который входят оба источника азота, приводит к максимальному накоплению грибом на 4-е сутки биомассы практически до 9 г/л, что в 1,4 раза больше, чем при культивировании его на среде 1. Это позволяет сократить продолжительность выращивания *D. tricolor* KS11 на 1-е сутки в сравнении с использованием других сред. При культивировании на среде 3 суммарные экзометаболиты проявляют высокие антиоксидантные (88,61 мг/г) и антирадикальные (3,41 мг/мл) свойства. Скорее всего, это связано с наибольшим содержанием в них флавоноидов (18,56 мг/г) по сравнению с экзометаболитами, полученными при культивировании гриба на других средах. Установлено, что при использовании соевого изолята в качестве источника азотсодержащего субстрата *D. tricolor* KS11 синтезирует эндопигментов в 2 и 4 раза больше, чем при его культивировании на среде 3 и среде 1 соответственно. С помощью ИК-спектроскопии проведено отнесение эндопигментов к меланинам на основании сравнения со спектрами меланинов грибов. Для дальнейшей разработки биотехнологии получения антиоксидантов на основе эндопигментов *D. tricolor* KS11 можно рекомендовать использование среды 3, поскольку именно на ней он накапливает экзо- и эндопигменты с высокими антиоксидантными свойствами.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

**1.** Mišković J., Rašeta M., Čapelja E., Krsmanović N., Novaković A., Karaman M. Mushroom species *Stereum hirsutum* as natural source of phenolics and fatty acids as antioxidants and acetylcholinesterase inhibitors // Chemistry & Biodiversity. 2021. Vol. 18. N 11. P. e2100409. DOI: 10.1002/cbdv.202100409.

**2.** Karaman M., Čapelja E., Rašeta M., Rakić M. Diversity, chemistry, and environmental contamination of wild growing medicinal mushroom species as sources of biologically active substances (antioxidants, anti-diabetics, and ache inhibitors) // Biology, Cultivation and Applications of Mushrooms / eds A. Arya, K. Rusevska. Singapore: Springer, 2022. P. 203–257. DOI: 10.1007/978-981-16-6257-7_8.

**3.** Gariboldi M.B., Marras E., Ferrario N., Vivona V., Prini P., Vignati F., et al. Anti-cancer potential of edible/medicinal mushrooms in breast cancer // International Journal of Molecular Sciences. 2023. Vol. 24, no. 12. P. 10120. DOI: 10.3390/ijms241210120.

**4.** Bang T.H., Suhara H., Doi K., Ishikawa H., Fukami K., Parajuli G.P., et al. Wild mushrooms in Nepal: some potential candidates as antioxidant and ACE-inhibition sources // Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine. 2014. P. 95305. DOI: 10.1155/2014/195305.

**5.** Rašeta M., Miškovic J., Čapelja E., Zapora E., Fabijan A.P., Kneževi´c P., et al. Do *Ganoderma* species represent novel sources of phenolic based antimicrobial agents? // Molecules. 2023. Vol. 28, no. 7. P. 3264. DOI: 10.3390/molecules28073264.

**6.** Adhikari M., Bhusal S., Pandey M.R., Raut J.K., Bhatt L.R. Mycochemical and nutritional analysis of selected wild mushrooms from Gaurishankar conservation area, Nepal // International Journal of Pharmacognosy and Chinese Medicine. 2019. Vol. 3, no. 3. P. 000169. DOI: 10.23880/ipcm-16000169.

**7.** Kurchenko V.P., Sushinskaya N.V., Kiseleva I.S., Ermoshin A.A. Biologically active substances in fruit bodies of wood decomposing fungi // AIP Conference Proceedings. 2022. Vol. 2390, no. 1. P. 030045. DOI: 10.1063/5.0069253.

**8.** Ставский Е.А., Теплякова Т.В., Андреева И.С., Давыдова Е.С., Ставская А.А., Потешкина А.Л. Экспериментальная оценка лечебных свойств мази на основе меланинов из природного сырья и глубинной культуры чаги // Journal of Siberian Medical Sciences. 2022. Т. 6. N 1. С. 93–105. DOI: 10.31549/2542-1174-2022-6-1-93-105. EDN: GNWRSX.

**9.** Kanehara R., Tonouchi A., Konno K., Hashimoto M. Cyclohumulanoid sesquiterpenes from the culture broth of the basidiomycetous fungus *Daedaleopsis tricolor* // Molecules. 2021. Vol. 26, no. 14. P. 4364. DOI: 10.3390/molecules26144364.

**10.** Zhao J.-Y., Feng T., Li Z.-H., Dong Z.-J., Zhang H.-B., Liu J.-K. Sesquiterpenoids and an ergosterol from cultures of the fungus *Daedaleopsis tricolor* // Natural Products and Bioprospecting. 2013. Vol. 3. P. 271–276. DOI: 10.1007/s13659-013-0065-0.

**11.** Kim E.-M., Jung H.-R., Min T.-J. Purification, structure determination and biological activities of 20(29)-lupen-3-one from *Daedaleopsis tricolor* (Bull. ex Fr.) Bond. et Sing // Bulletin of the Korean Chemical Society. 2001. Vol. 22, no. 1. P. 59–62.

**12.** Kanehara R., Tonouchi A., Konno K., Koshino H., Hashimoto M. Isolation of cyclohumulanoids from *Daedaleopsis tricolor* and their biosynthesis based on *in silico* simulations // Tetrahedron. 2022. Vol. 123. P. 133006. DOI: 10.1016/j.tet.2022.133006.

**13.** Ćilerdžić J., Stajić M.M., Milovanović I.N., Galić M.M., Vukojević J.B. Antioxidative potential of *Daedaleopsis tricolor* basidiocarps and mycelium // Zbornik Matice srpske za prirodne nauke. 2017. Vol. 132. P. 19–27. DOI: 10.2298/ZMSPN1732019C.

**14.** Проценко М.А., Костина Н.Е., Теплякова Т.В. Подбор питательных сред для глубинного культивирования дереворазрушающего гриба *Daedaleopsis tricolor* (Bull.) Bondartsev et Singer // Биотехнология. 2018. Т. 34. N 1. С. 45–51. DOI: 10.21519/0234-2758-2018-34-1-45-51. EDN: YWQNGB.

**15.** Сысоева Е.В., Прозорова И.Ш., Сысоева М.А., Парикова Ю.С. Метаболиты, синтезируемые *Pycnoporellus fulgens* KS12 при погруженном культивировании // Бутлеровские сообщения. 2024. Т. 80. N 12. С. 175–184. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/24-80-12-175. EDN: DWCTTP.

**16.** Хабибрахманова В.Р., Рассабина А.Е., Хайруллина А.Ф., Минибаева Ф.В. Физико-химические характеристики и антиоксидантные свойства меланинов, выделенных из лишайника *Leptogium furfuraceum* (Harm.) // Химия растительного сырья. 2022. N 4. С. 115–125. DOI: 10.14258/jcprm.20220411774. EDN: SOUXVT.

**17.** Saadaoui N., Mathlouthi A., Zaiter A., El-Bok S., Mokni M., Harbi M., et al. Phytochemical profiling, antioxidant potential and protective effect of leaves extract of tunisian *Vitis vinifera* autochthonous accessions against acute CCl4-injured hepatotoxicity in mice // Heliyon. 2023. Vol. 9, no. 5. P. e16377. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e16377.

**18.** Klyushova L.S., Kandalintseva N.V., Grishanova A.Y. Antioxidant activity of new sulphur- and selenium-containing analogues of potassium phenosan against $H_2O_2$-induced cytotoxicity in tumour cells // Current Issues in Molecular Biology. 2022. Vol. 44, no. 7. P. 3131–3145. DOI: 10.3390/cimb44070216.

**19.** Kannan J., Pang K.-L., Ho Y.-N., Hsu P.-H., Chen L.-L. A comparison of the antioxidant potential and metabolite analysis of marine fungi associated with the red algae *Pterocladiella capillacea* from Northern Taiwan // Antioxidants. 2024. Vol. 13, no. 3. P. 336. DOI: 10.3390/antiox13030336.

**20.** Ribera J., Panzarasa G., Stobbe A., Osypova A., Rupper P., Klose D., Schwarze F.W.M.R. Scalable Biosynthesis of Melanin by the Basidiomycete *Armillaria cepistipes* // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2019. Vol. 67, no. 1. P. 132–139. DOI: 10.1021/acs.jafc.8b05071.

**21.** Mišković J., Karaman M., Rašeta M., Krsmanović N., Berežni S., Jakovljević D., et al. Comparison of two *Schizophyllum commune* strains in production of acetylcholinesterase inhibitors and antioxidants from submerged cultivation // Journal of Fungi. 2021. Vol. 7, no. 2. P. 115. DOI: 10.3390/jof7020115.

**22.** Krupodorova T., Barshteyn V., Dzhagan V., Pluzhnyk A., Zaichenko T., Blume Ya. Enhancement of antioxidant activity and total phenolic content of *Fomitopsis pinicola* mycelium extract // Fungal Biology and Biotechnology. 2024. Vol. 11. P. 18. DOI: 10.1186/s40694-024-00187-0.

**23.** Krupodorova T., Barshteyn V., Gafforov Yu., Raseta M., Zaichenko T., Blume Ya. Comparative evaluation of free radical scavenging activity and total metabolite profiles among 30 macrofungi species // Bioresources and Bioprocessing. 2025. Vol. 12. P. 13. DOI: 10.1186/s40643-025-00841-4.

**24.** Chutimanukul P., Sukdee S., Prajuabjinda O., Thepsilvisut O., Panthong S., Athinuwat D., et al. The effects of soybean meal on growth, bioactive compounds, and antioxidant activity of *Hericium erinaceus* // Horticulturae. 2023. Vol. 9, no. 6. P. 693. DOI: 10.3390/horticulturae9060693.

**25.** Прозорова И.Ш., Сысоева М.А., Сысоева Е.В., Красильников Р.О. Антиоксидантная активность культуральной жидкости *Daedaleopsis tricolor* KS11, содержание в ней флавоноидов, простых фенолов // BIOAsia-Altai 2024: материалы IV Междунар. биотехнологического форума (г. Барнаул, 23–28 сентября 2024 г.). Барнаул: Изд-во АлтГУ, 2024. С. 169–172.

**26.** Sadowska-Bartosz I., Bartosz G. Evaluation of the antioxidant capacity of food products: methods, applications and limitations // Processes. 2022. Vol. 10, no. 10. P. 2031. DOI: 10.3390/pr10102031.

**27.** Souilem F., Fernandes A., Calhelha R.C., Barreira J.C.M., Barros L., Skhiri F., et al. Wild mushrooms and their mycelia as sources of bioactive compounds: antioxidant, anti-inflammatory and cytotoxic properties // Food Chemistry. 2017. Vol. 230. P. 40–48. DOI: 10.1016/j.foodchem.2017.03.02.

**28.** Le T.N., Tran N.T.H., Pham V.N.T., Van-Thi N.-D., Tran H.T.M. Anti-ultraviolet, antibacterial, and biofilm eradication activities against *Cutibacterium acnes* of melanins and melanin derivatives from *Daedaleopsis tricolor* and *Fomes fomentarius* // Frontiers in Microbiology. 2023. Vol. 14. P. 1305778. DOI: 10.3389/fmicb.2023.1305778.

**29.** Pralea I.-E. Moldovan R.-C., Petrache A.-M., Ilie-M., Heghe- S.-C., Ielciu I., et al. From extraction to advanced analytical methods: the challenges of melanin analysis // International Journal of Molecular Sciences. 2019. Vol. 20, no. 16. P. 3943. DOI: 10.3390/ijms20163943.

**30.** Wang L.-F., Rhim J.-W. Isolation and characterization of melanin from black garlic and sepia ink // LWT – Food Science and Technology. 2019. Vol. 99. P. 17–23. DOI: 10.1016/j.lwt.2018.09.033.

**31.** Nguyen H.A.T., Ho T.Ph., Mangelings D., Eeckhaut A.V., Heyden Y.V., Tran H.T.M. Antioxidant, neuroprotective, and neuroblastoma cells (SH-SY5Y) differentiation effects of melanins and arginine-modified melanins from *Daedaleopsis tricolor* and *Fomes fomentarius* // BMC Biotechnology. 2024. Vol. 24. P. 89. DOI: 10.1186/s12896-024-00918-6.

**32.** Hou R., Liu X., Xiang K., Chen L., Wu X., Lin W., et al. Characterization of the physicochemical properties and extraction optimization of natural melanin from *Inonotus hispidus* mushroom // Food Chemistry. 2019. Vol. 277. P. 533–542. DOI: 10.1016/j.foodchem.2018.11.002.

**33.** Ye M., Guo G., Lu Yi., Song Sh., Wang H.-Y., Yang L. Purification, structure and anti-radiation activity of melanin from *Lachnum* YM404 // International Journal of Biological Macromolecules. 2014. Vol. 63. P. 170–176. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2013.10.046.

## REFERENCES

**1.** Mišković J., Rašeta M., Čapelja E., Krsmanović N., Novaković A., Karaman M. Mushroom species *Stereum hirsutum* as natural source of phenolics and fatty acids as antioxidants and acetylcholinesterase inhibitors. *Chemistry & Biodiversity*. 2021;18(11):e2100409. DOI: 10.1002/cbdv.202100409.

**2.** Karaman M., Čapelja E., Rašeta M., Rakić M. Diversity, chemistry, and environmental contamination of wild growing medicinal mushroom species as sources of biologically active substances (antioxidants, antidiabetics, and ache inhibitors). In: Arya A., Rusevska K. (eds). *Biology, Cultivation and Applications of Mushrooms*. Singapore: Springer; 2022, p. 203-257. DOI: 10.1007/978-981-16-6257-7_8.

**3.** Gariboldi M.B., Marras E., Ferrario N., Vivona V., Prini P., Vignati F., et al. Anti-cancer potential of edible/medicinal mushrooms in breast cancer. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023;24(12):10120. DOI: 10.3390/ijms241210120.

**4.** Bang T.H., Suhara H., Doi K., Ishikawa H., Fukami K., Parajuli G.P., et al. Wild mushrooms in Nepal: some potential candidates as antioxidant and ACE-inhibition sources. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*. 2014:95305. DOI: 10.1155/2014/195305.

**5.** Rašeta M., Miškovic J., Čapelja E., Zapora E., Fabijan A.P., Kneževi´c P., et al. Do *Ganoderma* species represent novel sources of phenolic based antimicrobial agents? *Molecules*. 2023;28(7):3264. DOI: 10.3390/molecules28073264.

**6.** Adhikari M., Bhusal S., Pandey M.R., Raut J.K., Bhatt L.R. Mycochemical and nutritional analysis of selected wild mushrooms from Gaurishankar conservation area, Nepal. *International Journal of Pharmacognosy and Chinese Medicine*. 2019;3(3):000169. DOI: 10.23880/ipcm-16000169.

**7.** Kurchenko V.P., Sushinskaya N.V., Kiseleva I.S., Ermoshin A.A. Biologically active substances in fruit bodies of wood decomposing fungi. *AIP Conference Proceedings*. 2022;2390(1):030045. DOI: 10.1063/5.0069253.

**8.** Stavsky E.A., Teplyakova T.V., Andreeva I.S., Davydova E.S., Stavskaya A.A., Poteshkina A.L. Experimental evaluation of therapeutic properties of ointment based on melanins from natural raw material and a submerged culture of chaga (*Inonotus obliquus*). *Journal of Siberian Medical Sciences*. 2022;6(1):93-105. (In Russian). DOI: 10.31549/2542-1174-2022-6-1-93-105. EDN: GNWRSX.

**9.** Kanehara R., Tonouchi A., Konno K., Hashimoto M. Cyclohumulanoid sesquiterpenes from the culture broth of the basidiomycetous fungus *Daedaleopsis tricolor*. *Molecules*. 2021;26(14):4364. DOI: 10.3390/molecules26144364.

**10.** Zhao J.-Y., Feng T., Li Z.-H., Dong Z.-J., Zhang H.-B., Liu J.-K. Sesquiterpenoids and an ergosterol from cultures of the fungus *Daedaleopsis tricolor. Natural Products and Bioprospecting*. 2013;3:271-276. DOI: 10.1007/s13659-013-0065-0.

**11.** Kim E.-M., Jung H.-R., Min T.-J. Purification, structure determination and biological activities of 20(29)-lupen-3-one from *Daedaleopsis tricolor* (Bull. ex Fr.) Bond. et Sing. *Bulletin of the Korean Chemical Society*. 2001;22(1):59-62.

**12.** Kanehara R., Tonouchi A., Konno K., Koshino H., Hashimoto M. Isolation of cyclohumulanoids from *Daedaleopsis tricolor* and their biosynthesis based on *in silico* simulations. *Tetrahedron*. 2022;123:133006. DOI: 10.1016/j.tet.2022.133006.

**13.** Ćilerdžić J., Stajić M.M., Milovanović I.N., Galić M.M., Vukojević J.B. Antioxidative potential of *Daedaleopsis tricolor* basidiocarps and mycelium. *Zbornik Matice srpske za prirodne nauke*. 2017;132:19-27. DOI: 10.2298/ZMSPN1732019C.

**14.** Protsenko M.A., Kostina N.E., Teplyakova T.V. Selection of nutrient media for submerged culturing of wood-destroying mushroom of *Daedaleopsis tricolor* (Bull.) Bondartsev et Singer. *Biotehnologia*. 2018;34(1):45-51. (In Russian). DOI: 10.21519/0234-2758-2018-34-1-45-51. EDN: YWQNGB.

**15.** Sysoeva E.V., Prozorova I.S., Sysoeva M.A., Parikova Y.S. Metabolites produced by the *Pycnoporellus fulgens* KS12 during submerged cultivation. *Butlerov Communications*. 2024;80(12):175-184. (In Russian). DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/24-80-12-175. EDN: DWCTTP.

**16.** Khabibrakhmanova V.R., Rassabina A.E., Khayrullina A.F., Minibayeva F.V. Physico-chemical characteristics and antioxidant properties of melanins extracted from *Leptogium furfuraceum* (Harm.). *Chemistry of plant raw material*. 2022;4:115-125. (In Russian). DOI: 10.14258/jcprm.20220411774. EDN: SOUXVT.

**17.** Saadaoui N., Mathlouthi A., Zaiter A., El-Bok S., Mokni M., Harbi M., et al. Phytochemical profiling, antioxidant potential and protective effect of leaves extract of tunisian *Vitis vinifera* autochthonous accessions against acute CCl4-injured hepatotoxicity in mice. *Heliyon*. 2023;9(5):e16377. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e16377.

**18.** Klyushova L.S., Kandalintseva N.V., Grishanova A.Y. Antioxidant activity of new sulphur- and selenium-containing analogues of potassium phenosan against $H_2O_2$-induced cytotoxicity in tumour cells. *Current Issues in Molecular Biology*. 2022;44(7):3131-3145. DOI: 10.3390/cimb44070216.

**19.** Kannan J., Pang K.-L., Ho Y.-N., Hsu P.-H., Chen L.-L. A comparison of the antioxidant potential and metabolite analysis of marine fungi associated with the red algae *Pterocladiella capillacea* from Northern Taiwan. *Antioxidants*. 2024;13(3):336. DOI: 10.3390/antiox13030336.

**20.** Ribera J., Panzarasa G., Stobbe A., Osypova A., Rupper P., Klose D., Schwarze F.W.M.R. Scalable Bio-

synthesis of Melanin by the Basidiomycete *Armillaria cepistipes*. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2019;67(1):132-139. DOI: 10.1021/acs.jafc.8b05071.

**21.** Mišković J., Karaman M., Rašeta M., Krsmanović N., Berežni S., Jakovljević D., et al. Comparison of two *Schizophyllum commune* strains in production of acetylcholinesterase inhibitors and antioxidants from submerged cultivation. *Journal of Fungi*. 2021;7(2):115. DOI: 10.3390/jof7020115.

**22.** Krupodorova T., Barshteyn V., Dzhagan V., Pluzhnyk A., Zaichenko T., Blume Ya. Enhancement of antioxidant activity and total phenolic content of *Fomitopsis pinicola* mycelium extract. *Fungal Biology and Biotechnology*. 2024;11:18. DOI: 10.1186/s40694-024-00187-0.

**23.** Krupodorova T., Barshteyn V., Gafforov Yu., Raseta M., Zaichenko T., Blume Ya. Comparative evaluation of free radical scavenging activity and total metabolite profiles among 30 macrofungi species. *Bioresources and Bioprocessing*. 2025;12:13. DOI: 10.1186/s40643-025-00841-4.

**24.** Chutimanukul P., Sukdee S., Prajuabjinda O., Thepsilvisut O., Panthong S., Athinuwat D., et al. The effects of soybean meal on growth, bioactive compounds, and antioxidant activity of *Hericium erinaceus*. *Horticulturae*. 2023;9(6):693. DOI: 10.3390/horticulturae9060693.

**25.** Prozorova I.Sh., Sysoeva M.A., Sysoeva E.V., Krasilnikov R.O. Antioxidant activity of *Daedaleopsis tricolor* KS11 culture liquid, its content of flavonoids, simple phenols. In: *BIOAsia-Altai 2024: materialy IV Mezhdunar. biotekhnologicheskogo foruma = BIOAsia-Altai 2024: Proc. IV Int. Biotech. Forum*. 23–28 September 2024, Barnaul. Barnaul: Altai State University; 2024, p. 169-172. (In Russian).

**26.** Sadowska-Bartosz I., Bartosz G. Evaluation of the antioxidant capacity of food products: methods, applications and limitations. *Processes*. 2022;10(10):2031. DOI: 10.3390/pr10102031.

**27.** Souilem F., Fernandes A., Calhelha R.C., Barreira J.C.M., Barros L., Skhiri F., et al. Wild mushrooms and their mycelia as sources of bioactive compounds: antioxidant, anti-inflammatory and cytotoxic properties. *Food Chemistry*. 2017;230:40-48. DOI: 10.1016/j.foodchem.2017.03.02.

**28.** Le T.N., Tran N.T.H., Pham V.N.T., Van-Thi N.-D., Tran H.T.M. Anti-ultraviolet, antibacterial, and biofilm eradication activities against *Cutibacterium acnes* of melanins and melanin derivatives from *Daedaleopsis tricolor* and *Fomes fomentarius*. *Frontiers in Microbiology*. 2023;14:1305778. DOI: 10.3389/fmicb.2023.1305778.

**29.** Pralea I.-E. Moldovan R.-C., Petrache A.-M., Ilie- M., Heghe- S.-C., Ielciu I., et al. From extraction to advanced analytical methods: the challenges of melanin analysis. *International Journal of Molecular Sciences*. 2019;20(16):3943. DOI: 10.3390/ijms20163943.

**30.** Wang L.-F., Rhim J.-W. Isolation and characterization of melanin from black garlic and sepia ink. *LWT – Food Science and Technology*. 2019;99:17-23. DOI: 10.1016/j.lwt.2018.09.033.

**31.** Nguyen H.A.T., Ho T.Ph., Mangelings D., Eeckhaut A.V., Heyden Y.V., Tran H.T.M. Antioxidant, neuroprotective, and neuroblastoma cells (SH-SY5Y) differentiation effects of melanins and arginine-modified melanins from *Daedaleopsis tricolor* and *Fomes fomentarius*. *BMC Biotechnology*. 2024;24:89. DOI: 10.1186/s12896-024-00918-6.

**32.** Hou R., Liu X., Xiang K., Chen L., Wu X., Lin W., et al. Characterization of the physicochemical properties and extraction optimization of natural melanin from *Inonotus hispidus* mushroom. *Food Chemistry*. 2019;277:533-542. DOI: 10.1016/j.foodchem.2018.11.002.

**33.** Ye M., Guo G., Lu Yi., Song Sh., Wang H.-Y., Yang L. Purification, structure and anti-radiation activity of melanin from *Lachnum* YM404. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2014;63:170-176. DOI: 10.1016/wj.ijbiomac.2013.10.046.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Сысоева Мария Александровна,**
д.х.н., профессор, профессор,
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
420015, г. Казань, ул. Карла Маркса, 68,
Российская Федерация,
oxygen1130@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-4228-9124

**Прозорова Илюза Шамилевна,**
ассистент,
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
420015, г. Казань, ул. Карла Маркса, 68,
Российская Федерация,
✉ kuleeva.1996@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-6661-6217

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Maria A. Sysoeva,**
Dr. Sci. (Chemistry), Professor, Professor,
Kazan National Research Technological University,
68, Karl Marx St., Kazan, 420015,
Russian Federation,
oxygen1130@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-4228-9124

**Ilyuza Sh. Prozorova,**
Assistant,
Kazan National Research Technological University,
68, Karl Marx St., Kazan, 420015,
Russian Federation,
✉ kuleeva.1996@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-6661-6217

**Сысоева Елена Владиславовна,**
к.х.н., доцент,
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
420015, г. Казань, ул. Карла Маркса, 68,
Российская Федерация,
inonotus@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0003-0592-3667

**Elena V. Sysoeva,**
Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor,
Kazan National Research Technological University,
68, Karl Marx St., Kazan, 420015,
Russian Federation,
inonotus@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0003-0592-3667

**Вклад авторов**

М.А. Сысоева – разработка концепции, разработка методологии, курирование данных, формальный анализ, получение финансирования, проведение исследования, административное руководство исследовательским проектом, предоставление ресурсов, научное руководство, валидация результатов, редактирование рукописи.
И.Ш. Прозорова – разработка методологии, курирование данных, формальный анализ, проведение исследования, валидация результатов, написание черновика рукописи.
Е.В. Сысоева – разработка концепции, разработка методологии, курирование данных, формальный анализ, научное руководство, валидация результатов, редактирование рукописи.

**Contribution of the authors**

Maria A. Sysoeva – conceptualization, methodology, data curation, formal analysis, funding acquisition, investigation, project administration, resources, supervision, validation, editing.
Ilyuza Sh. Prozorova – methodology, data curation, formal analysis, investigation, validation, writing – original draft.
Elena V. Sysoeva – conceptualization, methodology, data curation, formal analysis, supervision, validation, 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 20.03.2025.*
*Одобрена после рецензирования 16.06.2025.*
*Принята к публикации 19.09.2025.*

**Information about the article**

*The article was submitted 20.03.2025.*
*Approved after reviewing 16.06.2025.*
*Accepted for publication 19.09.2025.*