

УДК 543.422.3:678.048:630*813.2:582.28

СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ФОТОЗАЩИТНЫХ И АНТИОКСИДАНТНЫХ СВОЙСТВ ЭКСТРАКТОВ ИЗ ПЛОДОВЫХ ТЕЛ КУЛЬТИВИРУЕМЫХ ВИДОВ ГРИБОВ

© *О.М. Храмченкова*

*Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины,
ул. Советская, 104, Гомель, 246028, Республика Беларусь,
hramchenkova@gsu.by*

В работе представлены результаты спектрофотометрической оценки фотозащитных и антиоксидантных свойств гексановых, метанольных и ацетоновых экстрактов из плодовых тел культивируемых грибов *Ganoderma lucidum*, *Hericium erinaceus*, *Lentinula edodes* и *Pleurotus ostreatus*, полученных методами последовательной и прямой экстракции. Для экстрактов оценены величины солнцезащитного фактора и критической длины волны, содержания флавоноидов, антирадикальная активность в отношении ДФПГ и β-каротина. Показано, что наибольший выход экстрактов достигается при использовании метанола (12.2–19.4%), наименьший – гексана (1.7–4.1%). Для гексановых и ацетоновых экстрактов из *H. erinaceus* и *P. ostreatus* установлены высокие уровни SPF: 29.3±2.34; 22.7±1.63 и 14.7±1.32; 18.4±1.37 соответственно. Экстракты из грибов с высокими показателями SPF не являются фотозащитными, так как слабо поглощают УФ-А ($\lambda_{\text{крит}} < 370$ нм). Наибольшее содержание флавоноидов установлено для метанольных экстрактов из *G. lucidum*. По показателям процента ингибирования ДФПГ и окисления β-каротина антиоксидантная активность метанольных экстрактов из *G. lucidum*, *H. erinaceus* и *P. ostreatus* сопоставима с антиоксидантной активностью α-токоферола. На основании полученных данных можно заключить, что экстракты из данных видов грибов могут использоваться в качестве фотозащитных и антиоксидантных добавок при разработке рецептур солнцезащитных средств.

Ключевые слова: культивируемые грибы, экстракты, солнцезащитный фактор, критическая длина волны, содержание флавоноидов, ДФПГ-тест, обесцвечивание β-каротина.

Для цитирования: Храмченкова О.М. Спектрофотометрическая оценка фотозащитных и антиоксидантных свойств экстрактов из плодовых тел культивируемых видов грибов // Химия растительного сырья. 2024. №4. С. 268–277. DOI: 10.14258/jcprm.20240413038.

Введение

В настоящее время высшие грибы рассматриваются не только как пищевой продукт, но и как источник биологически активных веществ широкого спектра действия. Введен даже термин «лекарственные грибы» или «грибы медицинского назначения», причем речь идет как о разработке БАДов на основе грибного сырья, так и о широком скрининге свойств различных извлечений из грибов с оценкой их биологической активности в сравнении с уже известными субстанциями. Химический состав определенных видов грибов, особенно их вторичных метаболитов, изучен достаточно слабо, хотя существует множество работ, в том числе обширные обзоры, в которых описаны соединения, извлеченные из биомассы анализируемого сырья [1]. По этим данным можно судить о наличии в изучаемых видах грибов того или иного вещества.

Еще более популярным у исследователей является получение и изучение свойств различного рода экстрактов из плодовых тел грибов, их мицелия и даже субстратов для культивирования. Такой интерес понятен, так как в обществе существует обширный коммерческий запрос на так называемую «зеленую» или «экологичную» продукцию пищевого, косметического и медицинского назначения. С другой стороны, стремительно возрастающее в последние годы количество экспериментальных работ, описывающих виды физиологической активности, физико-химическую и биохимическую эффективность экстрактов из грибов, по крайней мере, в модельных экспериментальных системах, существенно актуализирует данное направление исследований.

Одним из важных, но пока крайне слабо изученных свойств экстрактов из грибов является их способность к поглощению ультрафиолетового излучения (УФ), хотя определение таких простейших параметров фотозащиты, как величина SPF (Sun Protection Factor) и критической длины волны ($\lambda_{\text{крит}}$), позволяет уже на этапе первичного скрининга свойств анализируемой субстанции сделать вывод о ее перспективности как солнцезащитного средства [2, 3]. Такого рода исследования представляются вполне правомочными, прежде всего, в отношении культивируемых видов грибов, которые выращиваются в контролируемых условиях, позволяющих минимизировать влияние внешних условий на пути метаболизма ростовых процессов при формировании плодовых тел и, следовательно, химический состав грибного сырья.

Одним из основных требований к свойствам потенциальной фотозащитной субстанции является наличие у нее антиоксидантных свойств как дополнительной гарантии репарации клеточных повреждений от ультрафиолета [2]. Так как не существует универсального метода определения антиоксидантной активности экстрактов из любого натурального сырья, необходимо использовать несколько методик анализа, жестально со схожими если не механизмами реакций в аналитической системе, то, по крайней мере, с наличием признака, объединяющего применяемые методы анализа [4].

Получение экстрактов из грибов требует методологического обоснования примененного вида экстрагирования с позиции предполагаемого химического состава получаемого экстракта, эффективности и экономичности процесса. Выбор растворителя (вода или органические растворители) в определенной степени предопределяет процедуру подготовки образцов сырья, влияет на выход экстрактов, обуславливает аппаратное оформление экстрагирования. Для получения экстрактов из плодовых тел грибов чаще всего используют метanol, воду и этанол; реже – ацетон, гексан, этилацетат и хлороформ; очень редко – бутанол, дихлорметан, петролейный и диэтиловый эфиры [5–7]. Основной метод экстрагирования – макерация. Очевидно, что при последовательном экстрагировании одной и той же навески сырья различными растворителями состав и свойства экстрактов отличаются [8].

Цель настоящей работы – получение экстрактов из плодовых тел четырех видов культивируемых грибов при последовательном и прямом экстрагировании органическими растворителями, а также оценка фотозащитных и антиоксидантных свойств экстрактов.

Экспериментальная часть

Получение экстрактов. Экстрагировали измельченную воздушно-сухую биомассу плодовых тел следующих видов культивируемых грибов: *Ganoderma lucidum* (Curtis) P.Karst. (трутовик лакированный, гриб Рейши); *Hericium erinaceus* (Bull.) Pers. (ежовик гребенчатый, «обезьяня голова»); *Lentinula edodes* (Berk.) Pegler (лентинула съедобная, шиитаке); *Pleurotus ostreatus* (Jacq.) P.Kumm. (вешенка обыкновенная, устричный гриб). Образцы плодовых тел грибов получены из лаборатории микологии кафедры лесохозяйственных дисциплин биологического факультета Гомельского государственного университета имени Ф. Скорины. Плодовые тела исследуемых видов грибов выращивали на субстрате, состоящем из осиновых опилок, пшеничной соломы и пшеничных отрубей, смешанных в соотношении масс 2 : 2 : 1. Субстрат увлажняли до 60%, стерилизовали, инокулировали посевным мицелием, после чего при температуре 14–18 °C, освещении 80–120 лк и влажности воздуха около 90% получали плодовые тела грибов. Сырую биомассу грибов высушивали до постоянного веса при температуре 30 °C, измельчали. Навески сырья последовательно экстрагировали в аппарате Сокслета гексаном, метанолом и ацетоном. Для получения экстрактов сравнения дополнительно производили прямое экстрагирование образцов в аппарате Сокслета метанолом и ацетоном. Растворители отгоняли путем ротационного испарения, экстракты досушивали до твердого состояния под вытяжкой при 20–22 °C.

Полученные экстракты использовали для оценки их фотозащитных и антиоксидантных свойств. Спектрофотометрический анализ образцов проводили на УФ-спектрофотометре Solar PB 2201, измерительные кюветы – кварцевые, длина оптического пути 10 мм.

Оценка фотозащитных свойств экстрактов. Величины SPF и $\lambda_{\text{крит}}$ определяли методом скрининга *in vitro* [9, 10]. Экстракты растворяли в этаноле до концентрации 200 мкг/мл, регистрировали спектры поглощения в диапазоне 290–400 нм. Величину SPF рассчитывали по формуле Мансура:

$$SPF = CF \cdot \sum_{290}^{320} EE(\lambda) \cdot I(\lambda) \cdot Abs(\lambda),$$

где CF – поправочный коэффициент (равен 10); $EE(\lambda)$ – спектр эритемного эффекта; $I(\lambda)$ – спектр солнечной интенсивности; $Abs(\lambda)$ – оптическая плотность образца. Величина $EE(\lambda) \cdot I(\lambda)$ является константой.

Критическую длину волны определяли по [11]:

$$\int_{290\text{ нм}}^{\lambda_{\text{крит}}} Abs(\lambda)d\lambda = 0.9 \cdot \int_{290\text{ нм}}^{400\text{ нм}} Abs(\lambda)d\lambda,$$

где $Abs(\lambda)$ – оптическая плотность образца.

Оценка антиоксидантных свойств [12–17]. Для изучения антиоксидантной активности экстрактов определяли суммарное содержание флавоноидов, а также применяли методики ингибиования дифенил-пикрилгидразила (ДФПГ-тест) и окисления эмульсии β -каротина. Для проведения анализов все экстракты и вещества сравнения растворяли в этаноле в концентрации 1 мг/мл.

Суммарное содержание флавоноидов определяли по методике, основанной на реакции данных соединений с хлоридом алюминия [12, 13]. Растворы экстрактов смешивали с 2% $AlCl_3$, инкубировали при 20–22 °C на протяжении 60 мин, оптическую плотность измеряли при 415 нм. Результаты выражали в миллиграмм-эквивалентах рутина на грамм экстракта.

ДФПГ разводили этанолом до концентрации 1 мМ/л [4, 14]. Равные объемы раствора ДФПГ и экстракта смешивали, инкубировали 30 мин в темноте при комнатной температуре, измеряли оптическую плотность растворов при 517 нм. Для сравнения использовали α -токоферол. Вычисляли процент ингибиования ДФПГ:

$$I\% = \frac{A_c - A_s}{A_c} \cdot 100,$$

где A_c – оптическая плотность «холостой» пробы; A_s – оптическая плотность образца.

Для создания реакционной системы окисления эмульсии β -каротина последний растворяли в хлороформе, вносили линолевую кислоту, эмульгатор ТВИН-20, раствор экстракта и дистиллированную воду, насыщенную кислородом. Смесь энергично встряхивали 15 мин, измеряли оптическую плотность при 470 нм, после чего 48 ч инкубировали в темноте при комнатной температуре, вновь измеряли оптическую плотность [4, 15–17].

Вычисляли антирадикальную активность образца:

$$APA\% = 100 \cdot \left[1 - \frac{A_{0\delta}^0 - A_{0\delta}^{48}}{A_{\kappa}^0 - A_{\kappa}^{48}} \right],$$

где $A_{0\delta}^0$, $A_{0\delta}^{48}$ – оптическая плотность реакционной смеси с образцом (через 0 и 48 ч инкубации соответственно); A_{κ}^0 , A_{κ}^{48} – оптическая плотность контроля через 0 и 48 ч инкубации, соответственно. Для контроля использовали α -токоферол.

Обсуждение результатов

Метод исчерпывающей экстракции грибного сырья различными растворителями в аппарате Сокслета позволяет получить высокий выход экстракта с высоким содержанием БАВ, хотя и является довольно дорогостоящим. Установлено, что выход экстрактов наибольший при использовании метанола в качестве растворителя (табл. 1).

Таблица 1. Процентный выход экстрактов из плодовых тел грибов

Экстракты	Виды грибов			
	<i>G. lucidum</i>	<i>H. erinaceus</i>	<i>L. edodes</i>	<i>P. ostreatus</i>
Гексановый	1.7±0.16	4.1±0.19	1.7±0.13	2.9±0.15
Метанольный	3.4±0.23 / 6.3±0.79	12.2±0.44 / 19.4±1.43	4.5±0.27 / 7.4±0.97	3.9±0.31 / 5.8±0.46
Ацетоновый	0.8±0.09 / 2.8±0.37	2.1±0.09 / 5.7±0.69	0.7±0.05 / 2.8±0.15	0.6±0.06 / 3.1±0.19

В числителе – выход экстрактов при последовательном экстрагировании; в знаменателе – при прямом.

Для *G. lucidum*, *H. erinaceus* и *L. edodes* при последовательном экстрагировании сырья суммарный выход гексановых, метанольных и ацетоновых экстрактов составляет до 95% выхода экстрактов, полученных прямым экстрагированием метанолом. Для *G. lucidum* и *L. edodes* суммарный выход гексановых и ацетоновых экстрактов при последовательном экстрагировании сырья составляет до 90% выхода экстрактов, полученных прямым экстрагированием ацетоном. Последовательное экстрагирование биомассы *P. ostreatus* гексаном, метанолом и ацетоном позволяет извлечь из сырья на 27.6% больше биологически активных веществ, чем при прямом экстрагировании метанолом. По-видимому, результаты экстрагирования отражают соотношение в биомассе определенных видов грибов фенольных соединений, жиров, стероидов и терпеноидов.

Поглощение ультрафиолета в диапазоне 290–400 нм растворами экстрактов из плодовых тел грибов также отличалось по видам сырья, растворителей и способов экстрагирования (рис. 1).

Все значения, превышающие 2.0 Б, получены путем экстраполяции после статистически надежного определения линейности зависимости оптической плотности раствора от его концентрации.

Установлено, что экстракты из плодовых тел грибов эффективнее поглощают УФ-Б (290–320 нм), чем УФ-А (320–400 нм). При прямом экстрагировании образцов поглощение УФ-метанольными экстрактами из *G. lucidum* и *L. edodes* выше, чем ацетоновыми, тогда как для *H. erinaceus* и *P. ostreatus* спектры поглощения метанольных и ацетоновых экстрактов практически идентичны. При последовательном экстрагировании образцов первыми получали гексановые экстракты, поглощение которыми УФ было очень сильным (*H. erinaceus*, *P. ostreatus*), средним (*G. lucidum*) и слабым (*L. edodes*) – 1.9–3.1 Б; 1.0–1.9 Б; 0.4–0.9 Б и 0.2–0.5 Б соответственно. Очищенные гексаном от липидно-стериоидной фракции образцы экстрагировали метанолом. Полученные экстракты были самыми слабыми в отношении поглощения как УФ-Б, так и УФ-А. Самая малочисленная по химическому выходу ацетоновая фракция экстрагирования показала высокие значения поглощения ультрафиолета (до 2.7 Б).

Расчет показателей фотозащиты SPF и $\lambda_{\text{крит}}$ показал, что собственно фотозащитных субстанций среди экстрактов из изучаемых видов грибов не обнаружено (табл. 2).

Уровень фотозащиты субстанции считается низким при SPF=2–6; средним при SPF=8–12; высоким при SPF=15–25; очень высоким при SPF=30–50; сверхвысоким при SPF>50 [18]. Почти все проанализированные экстракты относились к первой и второй группам фотозащиты, тогда как гексановые и ацетоновые экстракты из *H. erinaceus* и *P. ostreatus* – к третьей. Экстракты, для которых SPF>15.0 и $\lambda_{\text{крит}}>370$ нм, считаются фотозащитными [18]. По этому признаку все проанализированные экстракты из плодовых тел грибов фотозащитными не являются, а могут служить лишь добавками в солнцезащитных композициях. Тем не менее показано, что экстракты из плодовых тел культивируемых грибов могут обладать фотозащитными свойствами, и эти свойства связаны с видом грибов, природой растворителя и способом экстрагирования. При прямом экстрагировании биомассы грибов SPF и $\lambda_{\text{крит}}$ метанольных экстрактов выше, чем ацетоновых, тогда как при последовательном экстрагировании SPF ацетоновых экстрактов в 2.3–6.5 раза выше таковых, определенных для экстрактов, полученных прямым экстрагированием ацетоном.

Антиоксидантные свойства извлечений из натурального сырья могут быть оценены при помощи нескольких десятков методов, базирующихся на различных аспектах развития окислительных механизмов. Все ныне существующие методики неспецифичны, зачастую связаны с использованием в анализе не присутствующих в живых системах соединений, условиями и концентрациями формирования регистрируемого сигнала, не характерными и даже токсичными для организмов. Одним из часто определяемых показателей наличия антиоксидантных свойств у экстракта является определение содержания в нем суммы фенольных соединений (обычно с использованием реактива Фолина-Чокальтеу) и суммы флавоноидов (чаще всего с прямым применением раствора хлорида алюминия или предварительным нитрованием катехиновых групп). По нашему мнению, суммарное содержание фенольных соединений в сухой биомассе грибов менее точно характеризует ее антиоксидантные свойства, чем сумма флавоноидов, так как на величину регистрируемого параметра может влиять вовлечение в реакционную систему того или иного количества меланинов, которые в клетках грибов присутствуют всегда, но в разных количествах и соотношениях. Можно ожидать, что визуально более темные плодовые тела грибов (в нашем случае это *G. lucidum* и *L. edodes*) покажут большее содержание фенольных соединений, чем более светлые (*H. erinaceus* и *P. ostreatus*). Поэтому в нашем исследовании определена сумма флавоноидов в экстрактах из грибов (рис. 2).

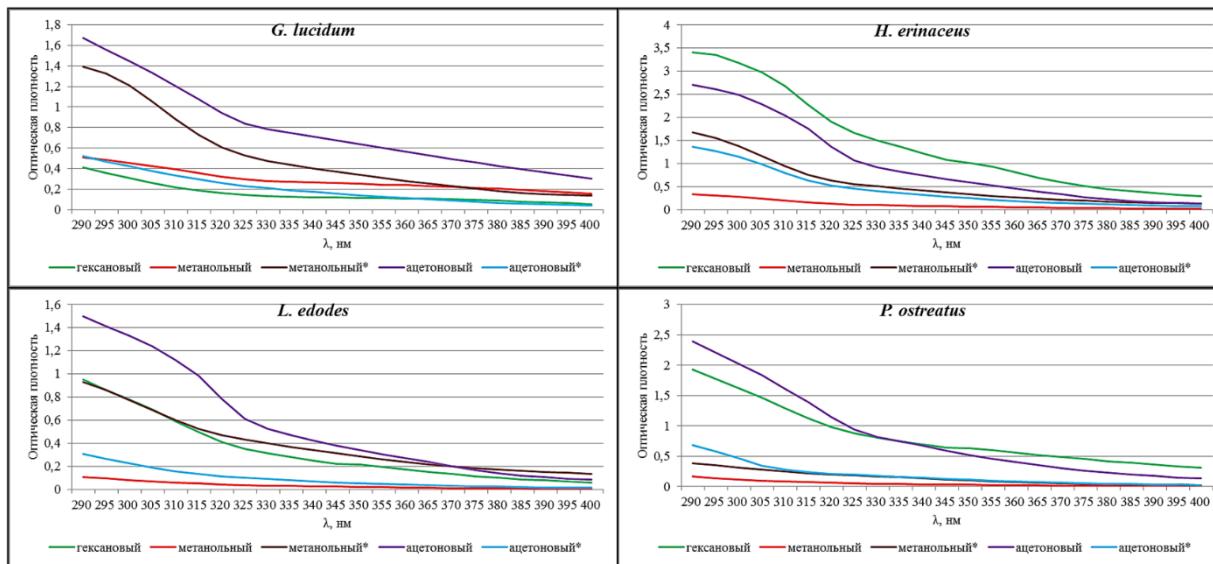


Рис. 1. Поглощения ультрафиолета растворами экстрактов из грибов (символом * обозначены экстракты прямого экстрагирования)

Таблица 2. Показатели фотозащиты экстрактов из грибов

Экстракты	Виды грибов			
	<i>G. lucidum</i>	<i>H. erinaceus</i>	<i>L. edodes</i>	<i>P. ostreatus</i>
Гексановый	6.9±0.62	29.3±2.34	2.7±0.18	14.7±1.32
Метанольный	4.3±0.36 / 10.6±0.75	2.4±0.15 / 11.8±0.97	0.7±0.09 / 6.9±0.57	1.0±0.17 / 2.9±0.13
Ацетоновый	13.4±1.02 / 3.8±0.44	22.7±1.63 / 9.9±0.85	12.3±0.98 / 1.9±0.04	18.4±1.37 / 3.8±0.19
$\lambda_{\text{крит}}$, нм				
Гексановый	376±3.5	361±5.1	362±3.9	375±4.2
Метанольный	382±4.7 / 368±3.4	361±2.7 / 365±5.7	359±3.5 / 374±4.6	361±4.1 / 362±5.4
Ацетоновый	355±2.2 / 360±4.1	360±4.8 / 361±3.7	377±3.8 / 366±4.1	361±5.4 / 360±5.6

В числителе – показатели экстрактов, полученных при последовательном экстрагировании образцов; в знаменателе – при прямом.

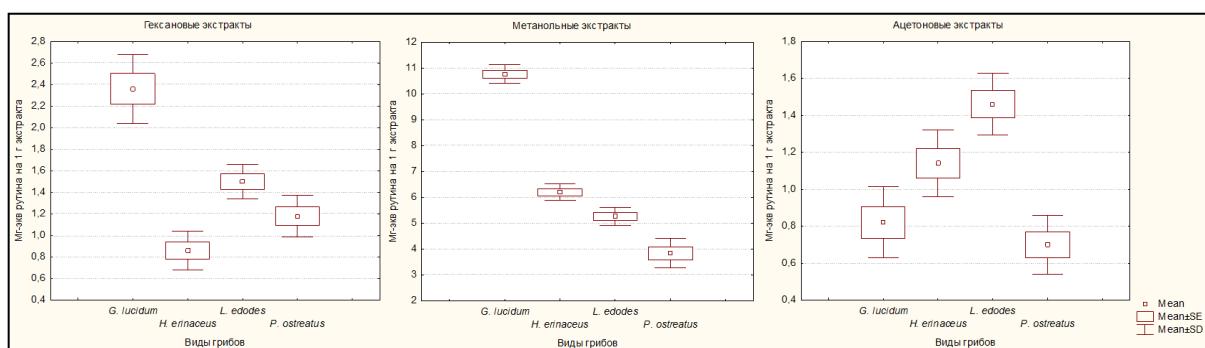


Рис. 2. Суммарное содержание флавоноидов в извлечениях из грибов, полученных последовательным экстрагированием сырья

Приведенные данные отражают как видовые различия, так и свойство растворимости флавоноидов в спиртах – по этой причине в метанольных экстрактах этих соединений существенно больше, чем в гексановых и ацетоновых. Прямое экстрагирование плодовых тел грибов метанолом дало следующие подтверждающие представленные выше результаты: *G. lucidum* – 17.2±0.56; *H. erinaceus* – 12.8±0.18; *L. edodes* – 13.1±0.49; *P. ostreatus* – 12.2±0.16 мг-экв рутина на 1 г экстракта; ацетоном: *G. lucidum* – 5.1±0.44; *H. erinaceus* – 1.9±0.25; *L. edodes* – 1.5±0.11; *P. ostreatus* – 3.9±0.07 мг-экв рутина на 1 г экстракта. Полученные данные по *G. lucidum* частично согласуются с [19].

Оценка антирадикальных свойств экстракта при помощи ДФПГ-теста представляет собой один из самых распространенных видов подобных анализов. Радикал дифенилпикрилгидразила растворим в органических растворителях, стабилен при комнатной температуре, в присутствии антиоксиданта дает хорошо регистрируемое изменение цвета раствора, не требует сложных условий инкубации реакционных смесей. Как и остальные колориметрические методы, ДФПГ-тест неспецифичен, результат анализа подвержен влиянию других радикалов, наличествующих или образующихся в ходе аналитической реакции. Кроме того, дифенилпикрилгидразил не может считаться нормальным интермедиатом метаболических превращений в живых системах, в силу чего результаты ДФПГ-теста могут являться лишь оценочным показателем наличия или отсутствия у анализируемого экстракта антирадикальных свойств (рис. 3).

Наиболее активными в отношении ДФПГ-радикала были метанольные экстракты. Определенный процент ингибирования ДФПГ α -токоферолом составил 93.4 ± 0.72 , что согласуется с результатом, приведенным в [20]. Результаты ДФПГ-теста для экстрактов, полученных при прямом экстрагировании сырья, составили (в процентах ингибирования): *G. lucidum* – 91.7 ± 3.46 ; *H. erinaceus* – 85.6 ± 4.25 ; *L. edodes* – 84.5 ± 4.24 ; *P. ostreatus* – 62.7 ± 2.37 (метанольные экстракты); *G. lucidum* – 77.5 ± 3.49 ; *H. erinaceus* – 52.6 ± 2.28 ; *L. edodes* – 62.9 ± 2.45 ; *P. ostreatus* – 57.3 ± 1.18 (ацетоновые экстракты).

Метод окисления эмульсии β -каротина также может считаться способом оценки антирадикальных свойств экстракта, так как соединения анализируемого экстракта в ходе реакции конкурируют с продуктом неферментативного окисления линолевой кислоты пероксильным радикалом. Следовательно, чем менее обесцвечивается эмульсия β -каротина, тем выше антирадикальная активность экстракта (рис. 4).

Наибольшую антирадикальную активность проявили метанольные и ацетоновые экстракты из плодовых тел *G. lucidum*. Определенный уровень антирадикальной активности α -токоферола составил $91.1 \pm 0.93\%$. Результаты оценки окисления эмульсии β -каротина для экстрактов, полученных прямым экстрагированием сырья, составили (в процентах): *G. lucidum* – 87.5 ± 1.25 ; *H. erinaceus* – 82.6 ± 1.21 ; *L. edodes* – 80.2 ± 1.31 ; *P. ostreatus* – 87.4 ± 1.27 (метанольные экстракты); *G. lucidum* – 61.1 ± 2.56 ; *H. erinaceus* – 62.6 ± 2.34 ; *L. edodes* – 64.3 ± 3.09 ; *P. ostreatus* – 62.7 ± 2.18 (ацетоновые экстракты).

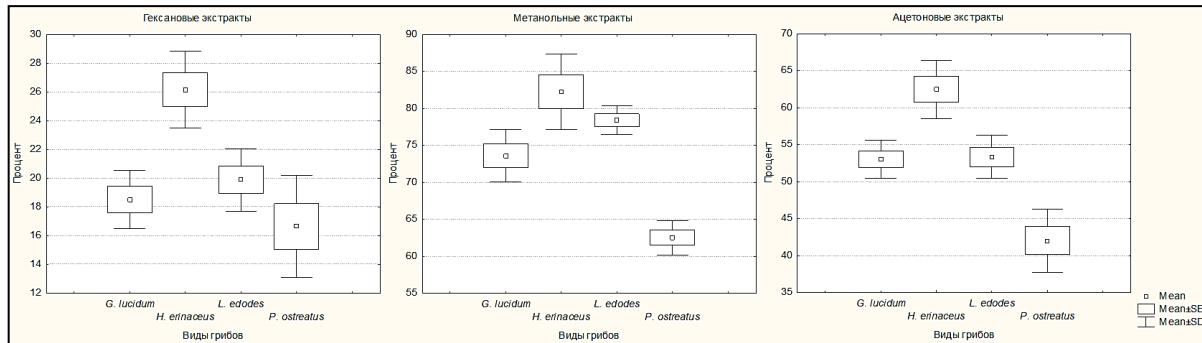


Рис. 3. Ингибирование дифенилпикрилгидразила (ДФПГ) извлечениями из грибов, полученными последовательным экстрагированием сырья

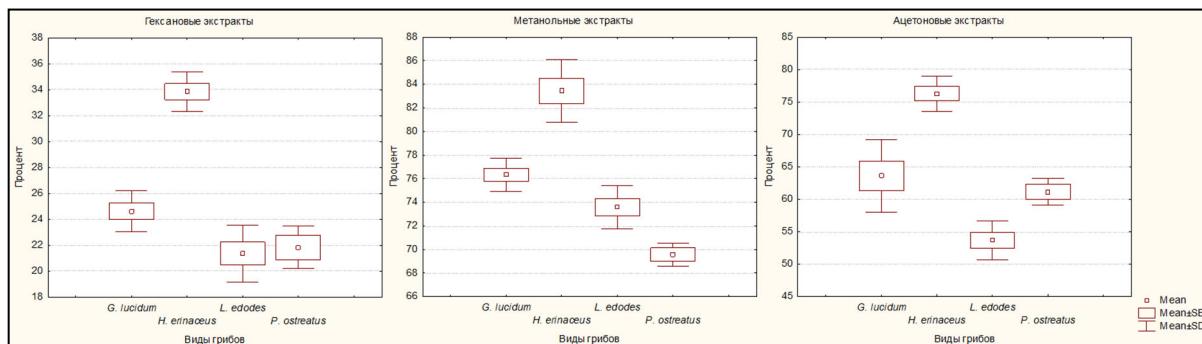


Рис. 4. Обесцвечивание β -каротина экстрактами из грибов, полученными путем последовательного экстрагирования сырья

Таким образом, очевидно, что антиоксидантные свойства экстрактов из культивируемых видов грибов при последовательном экстрагировании образцов гексаном, метанолом и ацетоном распределяются следующим образом: наименьшая активность присуща гексановым экстрактам, наибольшая – метанольным. Ацетоновые экстракты обедняются флавоноидами, но проявляют значимые антиоксидантные свойства в ДФПГ-тесте и реакции обесцвечивания β -каротина. Прямое экстрагирование грибного сырья метанолом позволяет получить экстракты с содержанием флавоноидов, сопоставимым с таковым для высших растений медицинского назначения, и антирадикальной активностью, близкой к α -токоферолу. При экстрагировании ацетоном антиоксидантная активность экстрактов существенно ниже.

Выходы

Грибное сырье традиционно экстрагируют методом мацерации водой и водно-спиртовыми растворами, поэтому представленные результаты исследования расширяют область знаний по последовательному и прямому экстрагированию органическими растворителями. Показано, что наибольший выход экстрактов достигается при использовании метанола (12.2–19.4%), наименьший – гексана (1.7–4.1%). Наибольший процентный выход экстрактов установлен для *H. erinaceus* (19.4±1.43 при прямом экстрагировании).

Методом скрининга *in vitro* показано, что экстракты из грибов эффективно поглощают УФ-Б, существенно слабее – УФ-А. Установлено, что гексановые и ацетоновые экстракты из *H. erinaceus* и *P. ostreatus*, полученные последовательным экстрагированием сырья, обладают высоким уровнем фотозащиты в области УФ-Б (величины SPF равны 29.3±2.34; 22.7±1.63 и 14.7±1.32; 18.4±1.37, для ежовика гребенчатого и вешенки обыкновенной соответственно). Экстракты из грибов с высокими показателями SPF не являются фотозащитными, так как слабо поглощают УФ-А ($\lambda_{\text{крит}}<370$ нм). Значения критической длины волны, превышающие 370 нм, установлены для гексановых и метанольных экстрактов из *G. lucidum*, ацетоновых из *L. edodes* и гексановых из *P. ostreatus*. Экстракты с высокими показателями SPF могут быть рекомендованы в качестве добавок к солнцезащитным составам в качестве компонентов, повышающих фотозащиту в диапазоне 290–320 нм. Широкий скрининг фотозащитных свойств экстрактов из грибов перспективен, так как для ряда культивируемых видов имеются данные об отсутствии у них цитотоксичности в отношении культур клеток человека.

В метанольных экстрактах из грибов, полученных прямым экстрагированием сырья, установлено значимое суммарное содержание флавоноидов – 17.2±0.56 мг-экв рутина на 1 г экстракта для *G. lucidum* и 12.8±0.18; 13.1±0.49 мг-экв рутина на 1 г экстракта для *H. erinaceus* и *L. edodes*, соответственно. При последовательном экстрагировании содержание флавоноидов в метанольных экстрактах в 1.6–3.2 ниже. Для полученных прямым экстрагированием метанольных экстрактов из *G. lucidum*, *H. erinaceus* и *L. edodes*, а также ацетоновых из *G. lucidum* и *P. ostreatus* методами ДФПГ и окисления эмульсии β -каротина установлены проценты ингибирования свободно-радикальных реакций, сопоставимые с показателями α -токоферола (93.4±0.72 и 91.1±0.93, соответственно). Применение последовательного экстрагирования сырья, как правило, несколько ухудшает антиоксидантные характеристики экстрактов.

Выявленные антиоксидантные показатели полученных экстрактов дополнительно подтверждают перспективность грибного сырья, особенно в области преодоления последствий перекисного окисления липидов – одного из стартовых механизмов патологических клеточных эффектов. Таким образом, биомасса плодовых тел культивируемых грибов *G. lucidum*, *H. erinaceus*, *L. edodes* и *P. ostreatus* является источником комплексов веществ, обладающих свойством поглощения ультрафиолета Б и характеризующихся высокой антиоксидантной активностью.

Финансирование

Исследование проводилось в рамках ГПНИ «Природные ресурсы и окружающая среда», подпрограмма «Радиация и биологические системы», задание 10.3.03.01, №ГР 20211714.

Конфликт интересов

Автор данной работы заявляет, что у нее нет конфликта интересов.

Открытый доступ

Эта статья распространяется на условиях международной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая разрешает неограниченное использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии, что вы дадите соответствующие ссылки на автора(ов) и источник и предоставите ссылку на Лицензию Creative Commons и укажете, были ли внесены изменения.

Список литературы

- Chen H.P., Liu J.K. Secondary metabolites from higher fungi // Progress in the chemistry of organic natural products 106. 2017. Pp. 1–201. https://doi.org/10.1007/978-3-319-59542-9_1.
- He H., Li A., Li S., Tang J., Li L., Xiong L. Natural components in sunscreens: Topical formulations with sun protection factor (SPF) // Biomedicine & pharmacotherapy = Biomedecine & pharmacotherapie. 2020. Vol. 134. Pp. 111161–111161. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2020.111161>.
- Stiefel C., Schwack W. Photoprotection in changing times – UV filter efficacy and safety, sensitization processes and regulatory aspects // International Journal of Cosmetic Science. 2015. Vol. 37, no. 1. Pp. 2–30. <https://doi.org/10.1111/ics.12165>.
- Bibi Sadeer N., Montesano D., Albrizio S., Zengin G., Mahomoodally M.F. The versatility of antioxidant assays in food science and safety – Chemistry, applications, strengths, and limitations // Antioxidants. 2020. Vol. 9(8). P. 709. <https://doi.org/10.3390/antiox9080709>.
- Elbatrawy E.N., Ghonimy E.A., Alassar M.M., Wu F.S. Medicinal mushroom extracts possess differential antioxidant activity and cytotoxicity to cancer cells // International journal of medicinal mushrooms. 2015. Vol. 17, no. 5. Pp. 471–479. <https://doi.org/10.1615/IntJMedMushrooms.v17.i5.70>.
- Abd Razak D.L., Jamaluddin A., Abd Rashid N.Y., Sani N.A., Abdul Manan M. Assessment of cosmeceutical potentials of selected mushroom fruitbody extracts through evaluation of antioxidant, anti-hyaluronidase and anti-tyrosinase activity // J. 2020. Vol. 3(3). Pp. 329–342. <https://doi.org/10.3390/j3030026>.
- Hayati S.N., Darsih C., Rosyida V.T., Apriyana W., Nisa K., Indrianingsih A.W., Wulanjati M.P. Phytochemical properties and antioxidant activity of wild-grown and cultivated *Ganoderma lucidum* // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2021. Vol. 1011, no. 1. 012061. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1011/1/012061>.
- Aruwa G., Adenipekun C.O., Ogunbanwo S.T., Akinbode E.O. Phytochemical Evaluation and Antioxidant Capacity of *Ganoderma lucidum* and *Pleurotus pulmonarius* in Ibadan, Nigeria // Biotechnology Journal International. 2021. Vol. 25(1). Pp. 23–32. <https://doi.org/10.9734/BJI/2021/v25i130131>.
- Prakash P.K.T., Lokesh P.N.K.S., Manral K. A simple and rapid method developed to determine the Sun protection factor (SPF) by using UV-visible spectrophotometer for topical formulations // Journal of Research & Method in Education. 2015. Vol. 5(1). Pp. 1–5. <https://doi.org/10.9790/7388-05130105>.
- Majeed M., Majeed S., Jain R., Mundkur L., Rajalakshmi H.R., Lad P., Neupane P. A randomized study to determine the sun protection factor of natural pterostilbene from *Pterocarpus marsupium* // Cosmetics. 2020. Vol. 7, no. 1. P. 16. <https://doi.org/10.3390/cosmetics7010016>.
- Garoli D., Pelizzo M.G., Bernardini B., Nicolosi P., Alaibac M. Sunscreen tests: Correspondence between in vitro data and values reported by the manufacturers // Journal of Dermatological Science. 2008. Vol. 52(3). Pp. 193–204. <https://doi.org/10.1016/j.jdermsci.2008.06.010>.
- Siangu B.N., Sauda S., John M.K., Njue W.M. Antioxidant activity, total phenolic and flavonoid content of selected Kenyan medicinal plants, sea algae and medicinal wild mushrooms // African Journal of Pure and Applied Chemistry. 2019. Vol. 13, no. 3. Pp. 43–48. <https://doi.org/10.5897/AJPAC2018.0775>.
- Pękal A., Pyrzynska K. Evaluation of aluminium complexation reaction for flavonoid content assay // Food Analytical Methods. 2014. Vol. 7. Pp. 1776–1782. <https://doi.org/10.1007/s12161-014-9814-x>.
- Smolskaitė L., Venskutonis P.R., Talou T. Comprehensive evaluation of antioxidant and antimicrobial properties of different mushroom species // LWT – Food Science and Technology. 2015. Vol. 60, no. 1. Pp. 462–471. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.08.007>.
- Haida Z., Hakiman M. A comprehensive review on the determination of enzymatic assay and nonenzymatic antioxidant activities // Food science & nutrition. 2019. Vol. 7, no. 5. Pp. 1555–1563. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1012>.
- Xiao F., Xu T., Lu B., Liu R. Guidelines for antioxidant assays for food components // Food Frontiers. 2020. Vol. 1, no. 1. Pp. 60–69. <https://doi.org/10.1002/fft2.10>.
- Adebayo E.A., Martínez-Carrera D., Morales P., Sobal M., Escudero H., Meneses M.E., Avila-Nava A., Castillo I., Bonilla M. Comparative study of antioxidant and antibacterial properties of the edible mushrooms *Pleurotus levis*, *P. ostreatus*, *P. pulmonarius* and *P. tuber-regium* // International Journal of Food Science & Technology. 2018. Vol. 53, no. 5. Pp. 1316–1330. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13712>.
- Rojas J.L., Díaz-Santos M., Valencia-Islands N.A. Metabolites with antioxidant and photo-protective properties from *Usnea roccellina* Motyka, a lichen from Colombian Andes // Pharmaceutical and Biosciences Journal. 2015. Vol. 3(4). Pp. 18–26. <https://doi.org/10.20510/ukjpb/3/i4/89454>.
- Celik G.Y., Onbasli D., Altinsoy B., Alli H. In vitro antimicrobial and antioxidant properties of *Ganoderma lucidum* extracts grown in Turkey // European Journal of Medicinal Plants. 2014. Vol. 4, no. 6. Pp. 709–722.
- Boonsong S., Klaypradit W., Wilaipun P. Antioxidant activities of extracts from five edible mushrooms using different extractants // Agriculture and Natural Resources. 2016. Vol. 50, no. 2. Pp. 89–97. <https://doi.org/10.1016/j.anres.2015.07.002>.

Поступила в редакцию 12 июня 2023 г.

После переработки 8 сентября 2023 г.

Принята к публикации 24 октября 2024 г.

Khramchankova V.M. SPECTROPHOTOMETRIC EVALUATION OF PHOTOPROTECTIVE AND ANTIOXIDANT PROPERTIES OF EXTRACTS FROM THE CULTURED MUSHROOMS FRUIT BODIES

*Francisk Skorina Gomel State University, Sovetskaya st., 104, Gomel, 246028, Republic of Belarus,
hramchenkova@gsu.by*

The article presents the results of a spectrophotometric evaluation of the photoprotective and antioxidant properties of hexane, methanol and acetone extracts from the fruit bodies of cultivated mushrooms *Ganoderma lucidum*, *Hericium erinaceus*, *Lentinula edodes* and *Pleurotus ostreatus*, which were obtained by sequential and direct extraction methods. For the extracts, the values of the sun protection factor and the critical wavelength, the content of flavonoids, and DPPH (2,2-Diphenyl-1-Picrylhydrazyl) radical scavenging activity and β -carotene bleaching assay were evaluated. The largest mass of extracts is obtained using methanol (12.2–19.4%), the smallest – hexane (1.7–4.1%). For hexane and acetone extracts from *H. erinaceus* and *P. ostreatus*, high levels of SPF were found: 29.3 \pm 2.34; 22.7 \pm 1.63 and 14.7 \pm 1.32; 18.4 \pm 1.37, respectively. Mushroom extracts with high SPF values are not photoprotective, as they absorb UV-A weakly ($\lambda_{crit}<370$ nm). The highest content of flavonoids was found for methanol extracts from *G. lucidum* and *H. erinaceus*. In terms of percentage inhibition of DPPH and oxidation of β -carotene, the antioxidant activity of methanol extracts from *G. lucidum*, *H. erinaceus*, and *P. ostreatus* is comparable to the antioxidant activity of α -tocopherol. It can be concluded that extracts from these mushroom species can be used as photoprotective and antioxidant additives in the development of sunscreen formulations.

Keywords: cultivated mushrooms, extracts, sun protection factor, critical wavelength, flavonoid content, DPPH scavenging, β -carotene bleaching assay.

For citing: Khramchankova V.M. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2024, no. 4, pp. 268–277. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.20240413038.

References

1. Chen H.P., Liu J.K. *Progress in the chemistry of organic natural products* 106, 2017, pp. 1–201. https://doi.org/10.1007/978-3-319-59542-9_1.
2. He H., Li A., Li S., Tang J., Li L., Xiong L. *Biomedicine & pharmacotherapy = Biomedecine & pharmacotherapy*, 2020, vol. 134, pp. 111161–111161. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2020.111161>.
3. Stiefel C., Schwack W. *International Journal of Cosmetic Science*, 2015, vol. 37, no. 1, pp. 2–30. <https://doi.org/10.1111/ics.12165>.
4. Bibi Sadeer N., Montesano D., Albrizio S., Zengin G., Mahomoodally M.F. *Antioxidants*, 2020, vol. 9(8), p. 709. <https://doi.org/10.3390/antiox9080709>.
5. Elbatrawy E.N., Ghonimy E.A., Alassar M.M., Wu F.S. *International journal of medicinal mushrooms*, 2015, vol. 17, no. 5, pp. 471–479. <https://doi.org/10.1615/IntJMedMushrooms.v17.i5.70>.
6. Abd Razak D.L., Jamaluddin A., Abd Rashid N.Y., Sani N.A., Abdul Manan M. *J*, 2020, vol. 3(3), pp. 329–342. <https://doi.org/10.3390/j3030026>.
7. Hayati S.N., Darsih C., Rosyida V.T., Apriyana W., Nisa K., Indrianingsih A.W., Wulanjati M.P. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2021, vol. 1011, no. 1, 012061. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1011/1/012061>.
8. Aruwa G., Adenipekun C.O., Ogunbanwo S.T., Akinbode E.O. *Biotechnology Journal International*, 2021, vol. 25(1), pp. 23–32. <https://doi.org/10.9734/BJI/2021/v25i130131>.
9. Prakash P.K.T., Lokesh P.N.K.S., Manral K. *Journal of Research & Method in Education*, 2015, vol. 5(1), pp. 1–5. <https://doi.org/10.9790/7388-05130105>.
10. Majeed M., Majeed S., Jain R., Mundkur L., Rajalakshmi H.R., Lad P., Neupane P. *Cosmetics*, 2020, vol. 7, no. 1, p. 16. <https://doi.org/10.3390/cosmetics7010016>.
11. Garoli D., Pelizzio M.G., Bernardini B., Nicolosi P., Alaibac M. *Journal of Dermatological Science*, 2008, vol. 52(3), pp. 193–204. <https://doi.org/10.1016/j.jdermsci.2008.06.010>.
12. Siangu B.N., Sauda S., John M.K., Njue W.M. *African Journal of Pure and Applied Chemistry*, 2019, vol. 13, no. 3, pp. 43–48. <https://doi.org/10.5897/AJPAC2018.0775>.
13. Pekal A., Pyrzynska K. *Food Analytical Methods*, 2014, vol. 7, pp. 1776–1782. <https://doi.org/10.1007/s12161-014-9814-x>.
14. Smolskaitė L., Venskutonis P.R., Talou T. *LWT – Food Science and Technology*, 2015, vol. 60, no. 1, pp. 462–471. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.08.007>.
15. Haida Z., Hakiman M. *Food science & nutrition*, 2019, vol. 7, no. 5, pp. 1555–1563. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1012>.
16. Xiao F., Xu T., Lu B., Liu R. *Food Frontiers*, 2020, vol. 1, no. 1, pp. 60–69. <https://doi.org/10.1002/fft2.10>.
17. Adebayo E.A., Martínez-Carrera D., Morales P., Sobal M., Escudero H., Meneses M.E., Avila-Nava A., Castillo I., Bonilla M. *International Journal of Food Science & Technology*, 2018, vol. 53, no. 5, pp. 1316–1330. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13712>.
18. Rojas J.L., Díaz-Santos M., Valencia-Islas N.A. *Pharmaceutical and Biosciences Journal*, 2015, vol. 3(4), pp. 18–26. <https://doi.org/10.20510/ukjpb/3/i4/89454>.
19. Celik G.Y., Onbashi D., Altinsoy B., Alli H. *European Journal of Medicinal Plants*, 2014, vol. 4, no. 6, pp. 709–722.
20. Boonsong S., Klaypradit W., Wilaipun P. *Agriculture and Natural Resources*, 2016, vol. 50, no. 2, pp. 89–97. <https://doi.org/10.1016/j.anres.2015.07.002>.

Received June 12, 2023

Revised September 8, 2023

Accepted October 24, 2024

Сведения об авторе

Храмченкова Ольга Михайловна – кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры ботаники и физиологии растений, hramchemkova@gsu.by

Information about author

Khramchenkova Olga Mikhailovna – candidate of biological sciences, associate professor, associate professor of the department of botany and plant physiology, hramchemkova@gsu.by