



УДК (544.431.15+544.433.3+547.1'123+582.284):543.422.3

АНТИОКСИДАНТНЫЙ СТАТУС МИЦЕЛИЯ МАКРОБАЗИДИОМИЦЕТОВ, ВЫРАЩЕННЫХ С ДОБАВЛЕНИЕМ СЕЛЕНОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ



А. Н. Панкратов, О. М. Цивилева, А. С. Белобородая, О. А. Цымбал, Я. Б. Древяко

Панкратов Алексей Николаевич, профессор кафедры аналитической химии и химической экологии, Институт химии, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, доктор химических наук. E-mail: PankratovAN@info.sgu.ru

Цивилева Ольга Михайловна, ведущий научный сотрудник лаборатории микробиологии, Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов РАН (Саратов), доктор биологических наук. E-mail: tsivileva@ibppm.sgu.ru

Белобородая Анастасия Сергеевна, бакалавр по направлению 04.03.01 "Химия", Институт химии, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского. E-mail: nastya365@mail.ru

Цымбал Олег Александрович, соискатель учёной степени кандидата химических наук кафедры аналитической химии и химической экологии, Институт химии, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского. E-mail: olegtsymbal1990@yandex.ru

Древяко Ярослав Борисович, доцент кафедры микробиологии, биотехнологии и химии, Саратовский государственный аграрный университет имени Н. И. Вавилова, кандидат химических наук. E-mail: drevko@list.ru

Спектрофотометрическим методом по реакциям со свободным радикалом 1,1-дифенил-2-пикрилгидразилом (2,2-дифенил-1-пикрилгидразил, N,N-дифенил-N'-пикрилгидразил,ДФПГ, DPPH) ($C_6H_5)_2N-N'-C_6H_2(NO_2)_3$ -2,4,6 проанализирована антирадикальная активность водно-этанольных экстрактов мицелия макробазидиомицетов *Laetiporus sulphureus* (трутовик серно-жёлтый), *Pleurotus ostreatus* (вешенка обыкновенная), *Grifola umbellata* (грифола зонтичная), *Ganoderma applanatum* (трутовик плоский) и *Lentinula edodes* (шиитакэ), выращенных с добавлением селенорганических соединений в среду глубинного культивирования. В качестве добавок использованы 1,5-дифенилселенопентандион-1,5 (диацетофенилселенид, бис(бензоилметил)селенид, препарат ДАФС-25) $C_6H_5COCH_2SeCH_2COC_6H_5$, 2,4-дифенил-7,8-бензо-5,6-дигидро-4Н-селенохромен, 2-(4-бромфенил)-4-фенил-7,8-бензо-5,6-дигидро-4Н-селенохромен и перхлорат 2,4-дифенил-7,8-бензо-5,6-дигидроселенохромилия. Установлено, что положительное влияние на антирадикальную активность экстрактов и антиоксидантный статус мицелия оказывает диацетофенилселенид, селеносодержащий фрагмент молекулы которого имеет открытоцепное строение. Напротив, вещества с атомом селена в цикле – дигидроселенохромены и соль дигидроселенохромилия – снижают антирадикальную активность экстрактов. Диацетофенилселенид, в противоположность гетероциклическим соединениям селена, перспективен в качестве антиоксидантной и микроэлементной добавки при культивировании макробазидиомицетов. Наиболее выраженный позитивный эффект в отно-

шении возрастания антирадикальной активности экстрактов при добавлении диацетофенилселенида в среду культивирования проявляется для макробазидиомицета *Ganoderma applanatum*. Экстракт мицелия *Lentinula edodes* характеризуется сравнительно высокой антирадикальной активностью даже без добавок. Остальные рассмотренные высшие грибы не проявили отчётливой дифференциации эффективности антиоксидантных систем организмов.

Ключевые слова: антиоксидантный статус, антирадикальная активность, ДФПГ, селенорганические соединения, диацетофенилселенид, дигидроселенохромены, соли дигидроселенохромилия, макробазидиомицеты.

DOI: 10.18500/1816-9775-2017-17-3-286-298

Базидиомицеты – один из классов царства грибов [1]. Базидиомицеты с макроскопическим размером плодовых тел называются макробазидиомицетами [2]. Последние играют исключительно важную роль как объекты промышленного выращивания в пищевых и биомедицинских целях [3]. Исследование и оптимизация процессов культивирования высших грибов является актуальной научной задачей.

Не менее важны макробазидиальные грибы как биологические объекты для выявления закономерностей функционирования, развития живых систем, их отклика на действие эффекторов различной природы ([4–19] и др.).

Для живых организмов разных эволюционных ступеней остро стоит проблема окислительного стресса. Недостаточная активность антиоксидантной системы, не позволяющая преодолеть негативные последствия окислительного стресса (избыточный уровень свободных радикалов в клетках) – причина старения и отмирания организмов [20–22].

С другой стороны, окислительный стресс обеспечивает цитодифференцировку и переход к генеративной стадии. Поэтому необходимо поддерживать оптимальный антиоксидантный статус грибного организма.

Для направленного регулирования антиоксидантного статуса целесообразно на стадии глубинного культивирования вводить в состав питательных сред химические эффекторы – антиоксиданты в количестве, способствующем повышению стрессоустойчивости культур высших грибов.



Мощными антиоксидантами являются соединения селена, прежде всего селенопротеины, имеющие в своём составе остатки α -аминокислот селеноцистеина (2-амино-3-селанилпропановая (-пропионовая) кислота, α -амино- β -селанилпропановая (-пропионовая) кислота, 2-амино-3-гидроселенопропановая (-пропионовая) кислота, α -амино- β -гидроселенопропановая (-пропионовая) кислота, 3-селанилаланин, β -селанилаланин, 3-гидроселеноаланин, β -гидроселеноаланин, 3-селенилаланин, β -селенилаланин, селеносерин) $\text{H}_2\text{NCH}(\text{CH}_2\text{SeH})\text{COOH} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{N}^+\text{CH}(\text{CH}_2\text{SeH})\text{COO}^-$ и селенометионина (2-амино-4-(метилселанил)-бутановая (-масляная) кислота, α -амино- γ -(метилселанил)бутановая (-масляная) кислота, 2-амино-4-(метилселенил)бутановая (-масляная) кислота, α -амино- γ -(метилселенил)бутановая (-масляная) кислота, 2-амино-4-(метилселено)бутановая (-масляная) кислота, α -амино- γ -(метилселено)бутановая (-масляная) кислота, γ -метилселанил- α -аминобутановая (-масляная) кислота, γ -метилселенил- α -аминобутановая (-масляная) кислота, γ -метилселено- α -аминобутановая (-масляная) кислота) $\text{H}_2\text{NCH}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{SeCH}_3)\text{COOH} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{N}^+\text{CH}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{SeCH}_3)\text{COO}^-$, синтезируемые в организмах. Основной биологической ролью селена является его участие в синтезе и активности антиоксидантных ферментов: глутатионпероксидаз I-IV, селензависимой пероксидазы нейтрофилов, селенопротеинов *P* и *W*, тиоредоксинредуктазы и др., а также 5'-иодотирониндеиодиназа I, II и III. К настоящему моменту прочно сформулировано представление о том, что ключевой биохимической функцией селена, лежащей в основе его эссенциальности для человека, является участие в построении и функционировании глутатионпероксидаз – ключевых антиоксидантных ферментов, которые предотвращают накопление в тканях свободных радикалов, инициирующих пероксидное окисление липидов, белков, нуклеиновых кислот и других соединений (см. работы [23–76] и др., а также цитируемые в них многочисленные научные труды).

К тому же селен – жизненно важный микроэлемент с уникальными биологическими функциями и широким спектром биологического действия его соединений (см. литературные источники, ссылки на которые даны в предыдущем абзаце).

Одним из показателей антиоксидантного действия служит антирадикальная активность [77], определяемая спектрофотометрическим методом по реакциям [77] с участием стабильного свободного радикала 1,1-дифенил-2-пикрилгидразила (2,2-дифенил-1-пикрилгидразил, N,N-дифенил-

N'-пикрилгидразил,ДФПГ, DPPH) $(\text{C}_6\text{H}_5)_2\text{N}-\text{N}'-\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3-2,4,6$ ([78-81] и др.).

Цель настоящей работы – определение антирадикальной активности водно-этанольных экстрактов мицелия и выяснение антиоксидантного статуса мицелия некоторых высших грибов-макробазидиомицетов, выращенных с добавлением селенорганических соединений в среду глубинного культивирования.

Экспериментальная часть

1. Оборудование для экспериментального исследования

Для изучения антирадикальной активности экстрактов грибного мицелия используют следующее аналитическое и исследовательское оборудование: ультразвуковую ванну «Сапфир» (напряжение питания 220 В; рабочая частота 30–40 кГц; таймер цифровой 1–99 мин; термостат цифровой 15–65 °С; объём 2.8 л; габариты ёмкости 240 мм × 135 мм × 100 мм; габаритные размеры 260 мм × 160 мм × 250 мм; масса 4 кг; в комплектацию входят ультразвуковая ванна, корзина из нержавеющей стали, крышка пластиковая, паспорт, упаковка); весы аналитические AND HR-200 (наибольший предел взвешивания 210 г; дискретность отсчёта 0.1 мг; класс точности специальный – I; диаметр платформы 85 мм; габариты 301 мм × 195 мм × 319.5 мм; масса 5.8 кг); спектрофотометр Shimadzu UV-1800 (оптическая система двулучевая; высокоэффективный монохроматор М. Черни – А. Ф. Тернера с голографической дифракционной решёткой; спектральный диапазон от 190.0 до 1100.0 нм; спектральная ширина щели 1 нм; дискретность отображения длины волны (шаг) 0.1 нм; точность установки длины волны 0.1 нм; воспроизводимость длины волны ± 0.1 нм; скорость сканирования до 3800 нм/мин; фотометрический диапазон: оптическая плотность от –4 до 4, пропускание от 0 до 400%; габариты 450 мм × 490 мм × 270 мм; масса 15 кг). Спектрофотометр имеет компактный дизайн, светосильный монохроматор, встроенный жидкокристаллический дисплей, клавиатуру, встроенную память для сохранения данных без персонального компьютера (до 24 файлов), USB-интерфейс и функцию USB-контроля. Предусмотрено двойное управление работой прибора по выбору оператора: от встроенного процессора или от персонального компьютера с помощью программного обеспечения UVProbe.

2. Приготовление растворов реагента и экстрактов образцов

Готовят 0.1 мМ раствор ДФПГ в 80 %-ном (по объёму) водном этаноле $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$. Массу



ДФПГ для приготовления раствора вычисляют по формуле

$$m(\text{ДППГ}) = \frac{M(\text{ДППГ})c(\text{ДППГ})V}{10^6},$$

где $m(\text{ДППГ})$ – масса ДФПГ, г; $M(\text{ДППГ})$ – молярная масса ДФПГ, равная 394.33 г/моль; $c(\text{ДППГ})$ – миллимолярная концентрация раствора ДФПГ (0.1 ммоль/л); V – необходимый объём раствора, мл.

На 25 мл раствора берут навеску 0.0010 г ДФПГ. Для ускорения и обеспечения полноты растворения вещества используют ультразвук (частота акустических колебаний 30–40 кГц, время 10–15 мин, температура 27 °С). Раствор нестойк, хранится не более двух суток.

Для построения градуировочной зависимости используют раствор тролокса (Тролох, 6-гидрокси-2,5,7,8-тетраметилхроман-2-карбоновая кислота) (рис. 1).

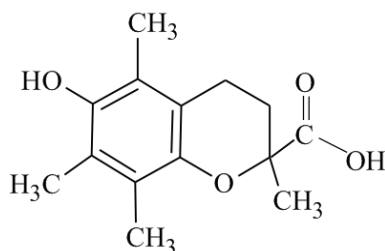


Рис. 1. Тролокс (Тролох, 6-гидрокси-2,5,7,8-тетраметилхроман-2-карбоновая кислота)

Растворяют 3 мг тролокса в 2.4 мл 80 об. %-ного этанола. Раствор устойчив в течение длительного времени.

Для приготовления экстрактов берут навески образцов мицелия, помещают в пробирки, заливают 4 мл 50 об. %-ного этанола, встряхивают в течение 10 мин и оставляют на сутки (первое экстрагирование). По истечении суток собирают надосадочную жидкость и переносят в другие пробирки. Осадки из первых пробирок с образцами заливают 3 мл 96 об. %-ного этанола, встряхивают в течение 10 мин и выдерживают в течение суток (второе экстрагирование). По истечении суток собирают надосадочную жидкость, объединяют оба экстракта, фильтруют через бумажный фильтр с белой лентой для крупнодисперсных осадков.

3. Построение градуировочной характеристики

В соответствии с табл. 1 в пробирки вносят определённый объём сток-раствора тролокса и добавляют 80 об. %-ный этанол до 2 мл. Иницирование реакции производят путём добавления в реакционную смесь по 2 мл раствора ДФПГ. Пробирки хорошо встряхивают и оставляют на 30 мин в темноте. По истечении указанного времени измеряют оптическую плотность растворов, берут значения оптической плотности при длине волны $\lambda = 517$ нм и строят градуировочную характеристику (градуировочный график).

Таблица 1

Данные для градуировочного графика, предназначенного для определения антирадикальной активности экстрактов мицелия

Объём сток-раствора, мкл	Объём 80 об. %-ного этанола, мкл	Количество вещества тролокса (q , мкмоль)	Оптическая плотность при $\lambda = 517$ нм	Процент ингибирования (I)*
0	2000	0.00	0.332	0.000
1	1999	2.50	0.308	7.229
2	1998	5.00	0.281	15.36
3	1997	7.50	0.261	21.39
4	1996	10.0	0.236	28.92
5	1995	12.5	0.211	36.45
6	1994	15.0	0.189	43.07
7	1993	17.5	0.161	51.51
8	1992	20.0	0.135	59.34
9	1991	22.5	0.116	65.06

Примечание. *Значения процента ингибирования как величины, предназначенной для вывода уравнения градуировочной характеристики и промежуточной при вычислении содержания антиоксидантов, приведены с избыточной четвёртой значащей цифрой (кроме случая нулевого объёма сток-раствора).



Результаты и их обсуждение

Объекты исследования в настоящей работе – культуры пяти высших грибов-макробазидиомицетов: *Laetiporus sulphureus* (трутовик серно-жёлтый), *Pleurotus ostreatus* (вешенка обыкновенная), *Grifola umbellata* (грифола зонтичная), *Ganoderma applanatum* (трутовик плоский), *Lentinula edodes* (шиитаке).

В качестве добавок взяты следующие органические соединения селена: 1,5-дифенилселенопентандион-1,5 (диацетофенонилселенид, бис(бензоилметил)селенид, препарат ДАФС-25) (1), 2,4-дифенил-7,8-бензо-5,6-дигидро-4H-селенохромен (2), 2-(4-бромфенил)-4-фенил-7,8-бензо-5,6-дигидро-4H-селенохромен (3) и перхлорат 2,4-дифенил-7,8-бензо-5,6-дигидроселенохромилия (4) [82–87] (рис. 2).

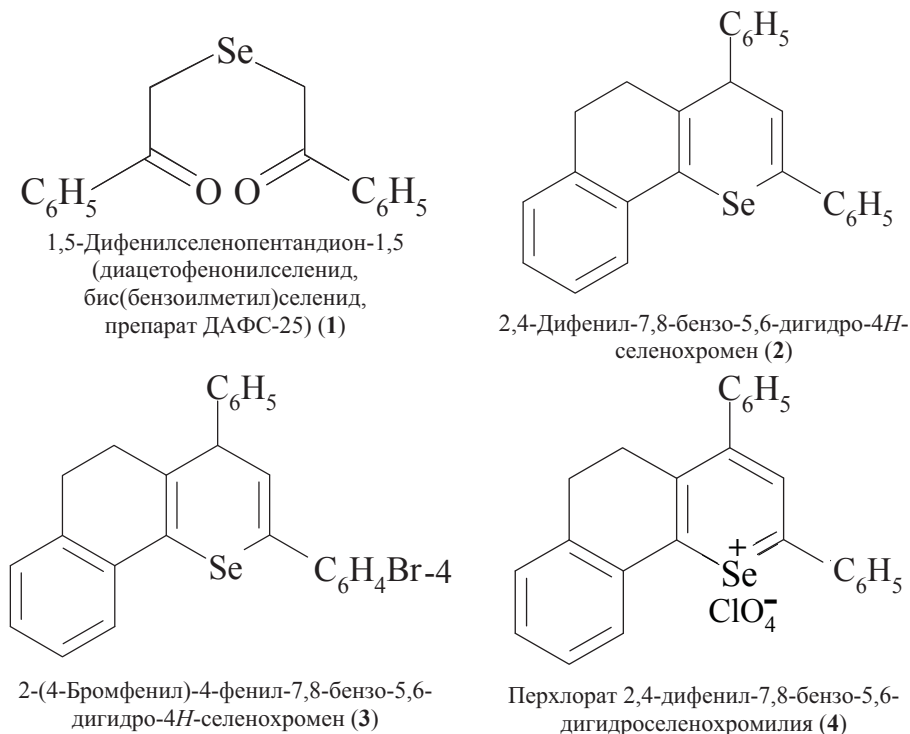


Рис. 2. Селенорганические соединения – добавки к средам культивирования макробазидиомицетов

Грибные культуры выращивали в присутствии веществ 1–4 в течение семи дней; также для сравнения были выращены контрольные образцы без добавок.

В качестве питательных сред для выращивания глубинных культур грибов использовали водные растворы состава (моль/л): *D*-глюкоза (*D*-глюкогексоза), $2,22 \cdot 10^{-2}$; *L*-аспарагин (*L*-2-амино-3-карбамоилпропановая кислота, *L*-2,4-диамино-4-оксобутановая кислота, *L*-2-аминобутанамид-4-овая кислота) $\text{H}_2\text{NC}(\text{O})\text{CH}_2\text{CH}(\text{NH}_2)\text{COOH} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{NC}(\text{O})\text{CH}_2\text{CH}(\text{NH}_3^+)\text{COO}^-$ в виде моногидрата, $1,00 \cdot 10^{-2}$; селенорганическое соединение 1, 2, 3 или 4, $1,00 \cdot 10^{-4}$.

Готовили водно-этанольные экстракты образцов мицелия (табл. 2).

Суть способа [77] определения антирадикальной активности заключается в снижении оптической плотности раствора стабильного свободного радикала ДФПГ в присутствии антиоксидантов вследствие протекания реакций ДФПГ с радикалами R^* , образующимися в клетках культур при окислительном стрессе (рис. 3).

Радикал ДФПГ применяется также как мягкое дегидрирующее средство, ингибитор радикальных (гомолитических) реакций, аналитический реагент, стандарт в спектроскопии электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) ([78–81] и др.).

С использованием сток-раствора тролокса по данным табл. 1 нами построена градуировоч-

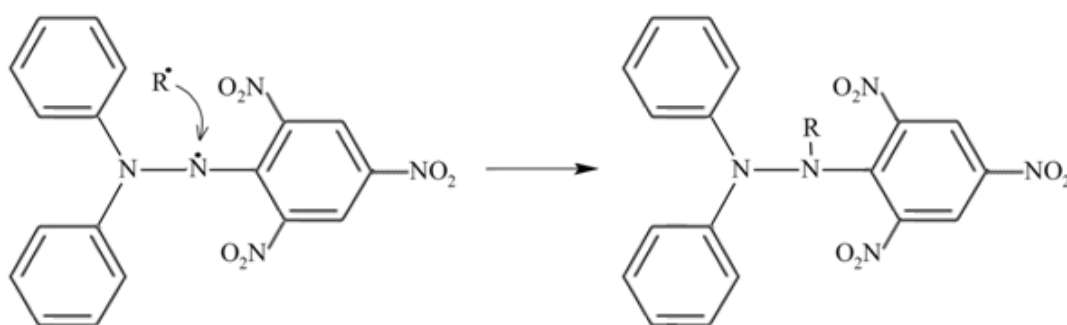


Таблица 2

Пример исследованных образцов мицелия

Номер образца	Макробазидиомицет	Добавка*	Масса навески образца (m , г)**
1	<i>L. sulphureus</i>	0	0.0505
2	<i>P. ostreatus</i>	0	0.0428
3	<i>Gr. umbellata</i>	0	0.0344
4	<i>G. applanatum</i>	0	0.0682
5	<i>L. edodes</i>	0	0.0208
6	<i>L. sulphureus</i>	1	0.1566
7	<i>P. ostreatus</i>	1	0.0350
8	<i>Gr. umbellata</i>	1	0.1952
9	<i>G. applanatum</i>	1	0.0084
10	<i>L. edodes</i>	1	0.0407
11	<i>L. sulphureus</i>	2	0.1712
12	<i>P. ostreatus</i>	2	0.0526
13	<i>Gr. umbellata</i>	2	0.1867
14	<i>G. applanatum</i>	2	0.1396
15	<i>L. edodes</i>	2	0.0565
16	<i>L. sulphureus</i>	3	0.0424
17	<i>P. ostreatus</i>	3	0.0576
18	<i>Gr. umbellata</i>	3	0.0501
19	<i>G. applanatum</i>	3	0.0467
20	<i>L. edodes</i>	3	0.0421
21	<i>L. sulphureus</i>	4	0.0607
22	<i>P. ostreatus</i>	4	0.0473
23	<i>Gr. umbellata</i>	4	0.0785
24	<i>G. applanatum</i>	4	0.029
25	<i>L. edodes</i>	4	0.0054

Примечание. *Цифра 0 означает отсутствие добавки (контроль). Цифрами 1–4 обозначены добавки веществ 1–4. **Одно из трёх параллельных определений для каждого образца.

Рис. 3. Схема взаимодействия радикалов R^\bullet с ДФПГ

ная характеристика для определения антирадикальной активности экстрактов мицелия (рис. 4).

Значения концентрации тролокса (и, следовательно, величины q) подобраны так, чтобы на всём их интервале зависимость I vs q имела линейный характер.

Методом регрессионного анализа [88, 89] получены уравнения градуировочной зависимости процента ингибирования (I) от количества тролокса (q , мкмоль) и обратной по отношению к ней зависимости для непосредственного вычисления количества вещества q .

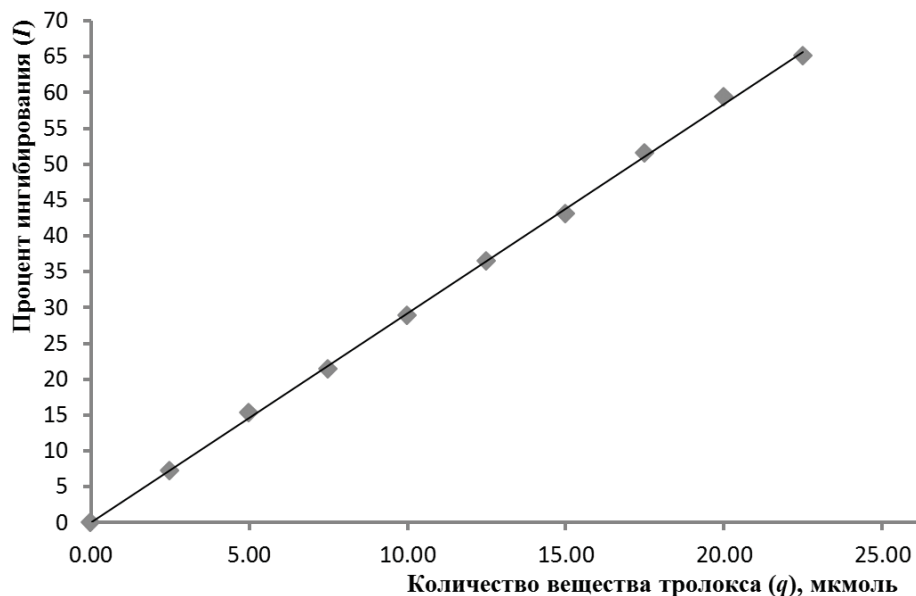


Рис. 4. Градуировочный график для определения антиоксидантной активности экстрактов мицелия

Уравнение прямой для градуировочного графика:

$$I = bq;$$

$$b = 2.918 \pm 0.030 \text{ \%}/\text{мкмоль};$$

дисперсия адекватности: $S_0^2 = 0.3236 \text{ мкмоль}^2/\text{\%}^2$.

Обратное выражение для расчёта количества вещества q :

$$q = b^{-1}I;$$

$$b^{-1} = 0.3426 \pm 0.0036 \text{ мкмоль}/\text{\%};$$

дисперсия адекватности: $S_0^2 = 0.03799 \text{ мкмоль}^2/\text{\%}^2$.

Общие параметры двух взаимно обратных зависимостей $I = bq$ и $q = b^{-1}I$:

коэффициент корреляции К. Пирсона: $r = 0.9997$;

величина достоверности линейной аппроксимации, полученная с использованием программного пакета Microsoft Excel: $R^2 = 9993$;

На рис. 5 приведён пример электронных спектров поглощения реакционных смесей при определении антиоксидантной активности экстрактов мицелиальных образцов.

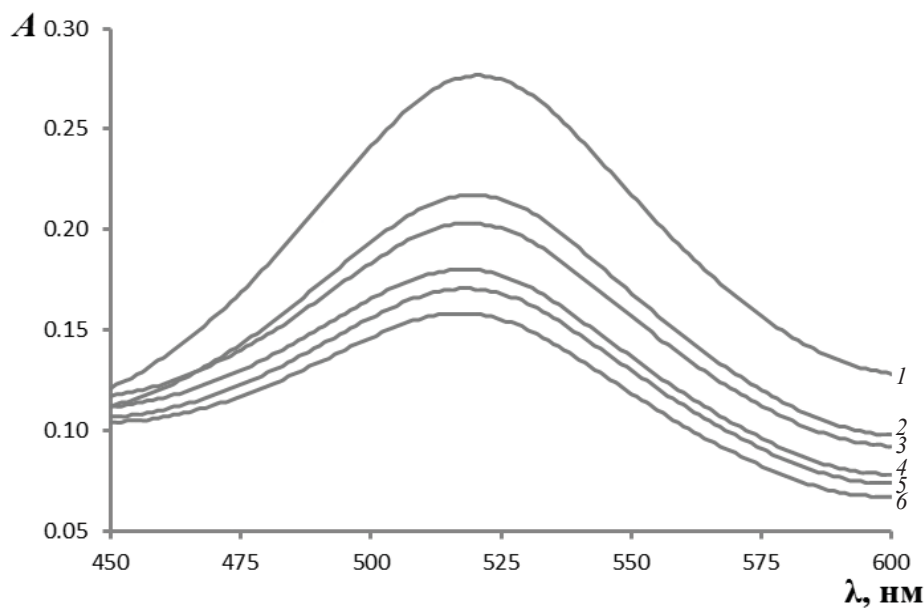


Рис. 5. Спектры поглощения реакционных смесей при определении антирадикальной активности экстрактов мицелия с добавкой диацетофенонилселенида 1: 1 – контрольный опыт, 2 – *L. sulphureus*, 3 – *P. ostreatus*, 4 – *Gr. umbellata*, 5 – *G. applanatum*, 6 – *L. edodes*



Для вычисления процента ингибирования (I) использована формула

$$I = \frac{A_0 - A_x}{A_0} \cdot 100,$$

где A_0 – оптическая плотность в отсутствие антиоксидантов (контроль); A_x – оптическая плотность исследуемого раствора.

Для расчёта содержания антиоксидантов в образцах (c , мкмоль/г), то есть для выяснения антиоксидантного статуса мицелия, в предположении о полном извлечении антиоксидантов при экстрагировании применена формула

$$c = \frac{Kc_q}{m},$$

где K – коэффициент разведения экстрактов образцов мицелия ($K = 28$) c_q – условное (в пересчёте на тролокс) содержание антиоксидантов в 0.25 мл экстракта, мкмоль (получается

из градуировочной характеристики); m – масса навески образца, г.

Антирадикальная активность экстрактов передаёт тенденции изменения содержания антиоксидантов в мицелии, с высокой степенью достоверности отражая их антиоксидантный статус.

Результаты определения содержания антиоксидантов в образцах мицелия представлены в табл. 3. Для каждого из образцов 1–25 число измерений (*number of observations*) или объём выборки (*sample size*) $n = 3$, число степеней свободы (*degrees of freedom*) $\nu = n - 1 = 2$, уровень доверительной вероятности (*confidence level*) $1 - \alpha = 0.95$ (где комплементарная величина α известна как уровень значимости (*significance level*)), коэффициент Стьюдента (У. С. Госсет) $t_{1-\alpha, \nu} = 4.30$. Названия и обозначения величин при статистической обработке даны в соответствии с рекомендациями IUPAC [90].

Таблица 3

Содержание антиоксидантов в образцах экстрактов мицелия

Номер образца	Макробазидиомицет	Добавка*	Содержание антиоксидантов (c , мкмоль/г)
1	<i>L. sulphureus</i>	0	1600 ± 550
2	<i>P. ostreatus</i>	0	3900 ± 770
3	<i>Gr. umbellata</i>	0	400 ± 270
4	<i>G. applanatum</i>	0	2300 ± 270
5	<i>L. edodes</i>	0	9000 ± 2900
6	<i>L. sulphureus</i>	1	1600 ± 120
7	<i>P. ostreatus</i>	1	6000 ± 800
8	<i>Gr. umbellata</i>	1	1900 ± 180
9	<i>G. applanatum</i>	1	38000 ± 5000
10	<i>L. edodes</i>	1	10000 ± 580
11	<i>L. sulphureus</i>	2	73 ± 17
12	<i>P. ostreatus</i>	2	700 ± 150
13	<i>Gr. umbellata</i>	2	30 ± 27
14	<i>G. applanatum</i>	2	220 ± 91
15	<i>L. edodes</i>	2	1400 ± 140
16	<i>L. sulphureus</i>	3	2200 ± 160
17	<i>P. ostreatus</i>	3	100 ± 60
18	<i>Gr. umbellata</i>	3	150 ± 91
19	<i>G. applanatum</i>	3	200 ± 90
20	<i>L. edodes</i>	3	4000 ± 1300
21	<i>L. sulphureus</i>	4	760 ± 64
22	<i>P. ostreatus</i>	4	820 ± 81
23	<i>Gr. umbellata</i>	4	280 ± 93
24	<i>G. applanatum</i>	4	500 ± 100
25	<i>L. edodes</i>	4	500 ± 170

Примечание. *Цифра 0 означает отсутствие добавки (контроль). Цифрами 1–4 обозначены добавки веществ 1–4.



Таким образом, в ходе проведённых нами лабораторных экспериментов по реакциям с ДФПГ проанализирована антирадикальная активность экстрактов мицелия макробазидиомицетов *Laetiporus sulphureus* (трутовика серно-жёлтого), *Pleurotus ostreatus* (вешенки обыкновенной), *Grifola umbellata* (грифолы зонтичной), *Ganoderma applanatum* (трутовика плоского), *Lentinula edodes* (шиитаке). Выяснено, что положительное влияние на антирадикаль-

ную активность экстрактов и антиоксидантный статус мицелия оказывает 1,5-дифенилселенопентандион-1,5 (диацетофенонилселенид, бис(бензоилметил)селенид, препарат ДАФС-25) $C_6H_5COCH_2SeCH_2COC_6H_5$ (**1**), селенсодержащий фрагмент молекулы которого имеет открытоцепное строение. Напротив, вещества с атомом селена в цикле – дигидроселенохромены **2, 3** и соль дигидроселенохромилия **4** – снижают антирадикальную активность культур (рис. 6).

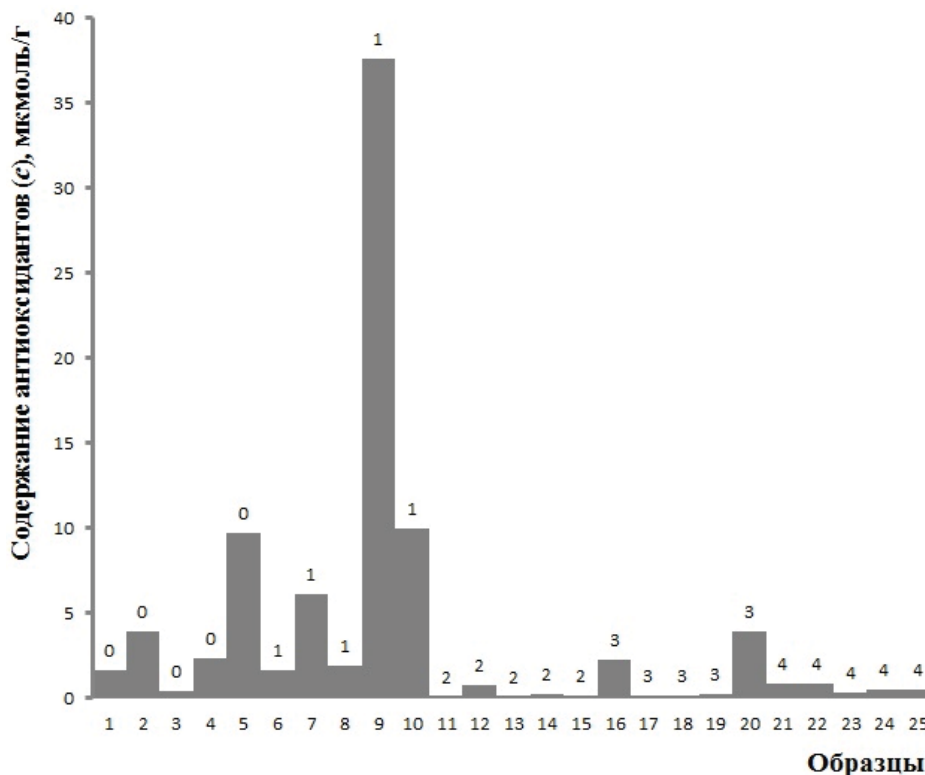


Рис. 6. Диаграмма содержания антиоксидантов в экстрактах мицелия. Обозначения образцов на оси абсцисс: 1, 6, 11, 16, 21 – *L. sulphureus*; 2, 7, 12, 17, 22 – *P. ostreatus*; 3, 8, 13, 18, 23 – *Gr. umbellata*; 4, 9, 14, 19, 24 – *G. applanatum*; 5, 10, 15, 20, 25 – *L. edodes*. Над каждым столбцом диаграммы цифра 0 означает отсутствие добавки (контроль). Цифрами 1–4 обозначены добавки веществ 1–4

Наиболее выраженный позитивный эффект в отношении возрастания антирадикальной активности при добавлении диацетофенонилселенида в среду культивирования проявляется для макробазидиомицета *Ganoderma applanatum* (трутовика плоского). Макробазидиальный гриб *Lentinula edodes* (шиитаке) характеризуется сравнительно высокой антирадикальной активностью даже без добавки (см. рис. 6). Остальные рассмотренные высшие грибы не проявили отчётливой дифференциации эффективности антиоксидантных систем организмов.

Заключение

Полученные результаты позволяют констатировать, что диацетофенонилселенид, в противоположность гетероциклическим соединениям селена, перспективен в качестве антиоксидантной и микроэлементной добавки при культивировании макробазидиомицетов.

Список литературы

1. Мюллер Э., Лёффлер В. Микология / пер. с нем. К. Л. Тарасова. М. : Мир, 1995. 343 с. (Müller E., Loeffler W.)



- Микология. Grundriß für Naturwissenschaftler und Mediziner. Stuttgart ; N.Y. : Georg Thieme Verlag, 1992. 366 S.).
- Беккер З. Э. Физиология и биохимия грибов / науч. ред. З. А. Туркова. М. : Изд-во Моск. ун-та, 1988. 230 с.
 - Дудка И. А., Вассер С. П., Элланская И. А., Коваль Э. З., Горбик Л. Т., Никольская Е. А., Билай В. И., Билай Т. И., Борисова В. Н., Сиверс В. С., Мусич Е. Г., Лизак Ю. В., Стрижевская А. Я., Айзенберг В. Л., Кириллова Л. М., Безбородова С. П., Зайченко А. М., Загордонец Л. А., Метейко Т. Я., Черменский Д. Н., Щербина С. М., Харченко С. Н., Курбацкая З. А., Безбородов А. М., Богомолова Л. А., Берестецкий О. А., Патыка В. Ф., Левитин М. М., Михайлова Л. А., Одинцова Н. Г., Афанасенко О. С., Жданова Н. Н., Василевская А. И., Кашкин П. Н., Кириленко Т. С., Бухало А. С., Редчиц Т. И. Методы экспериментальной микологии : справочник / отв. ред. В. И. Билай. Киев : Наук. думка, 1982. 551 с.
 - Билай В. И. Основы общей микологии. Киев : Вища школа. Головное изд-во, 1980. 360 с.
 - Цивилева О. М., Панкратов А. Н., Никитина В. Е., Гарибова Л. В. Взаимосвязь молекулярной структуры источника азота и активности внеклеточных лектинов при глубинном культивировании *Lentinus edodes* (Berk.) Sing [*Lentinula edodes* (Berk.) Pegler] // Микробиология. 2004. Т. 73, № 4. С. 486–490 (Tsivileva O. M., Pankratov A. N., Nikitina V. E., Garibova L. V. Relationship Between the Molecular Structure of the Nitrogen Source and the Activity of the Extracellular Lectins of *Lentinus edodes* (Berk.) Sing [*Lentinula edodes* (Berk.) Pegler] upon Submerged Cultivation // Microbiol. 2004. Vol. 73, № 4. P. 410–414).
 - Цивилева О. М., Никитина В. Е., Панкратов А. Н., Древкин Б. И., Лоцинина Е. А., Гарибова Л. В. Влияние селенсодержащего препарата ДАФС-25 на рост и лектиновую активность *Lentinus edodes* // Биотехнология. 2005. № 2. С. 56–62 (Tsivileva O. M., Nikitina V. E., Pankratov A. N., Drevko B. I., Loshchinina E. A., Garibova L. V. Effect of a selenium-containing preparation DAPS-25 on growth and lectin activity of *Lentinus edodes* // Biotechnology in Russia. 2005. № 2. P. 70–79.).
 - Tsivileva O. M., Pankratov A. N., Nikitina V. E., Garibova L. V. Effect of Media Components on the Mycelial Film Formation in Submerged Culture of *Lentinus edodes* (Shiitake) // Food Technol. Biotechnol. 2005. Vol. 43, № 3. P. 227–234.
 - Цивилева О. М., Панкратов А. Н., Лоцинина Е. А., Никитина В. Е. Экспериментальное и теоретическое исследование влияния катионов металлов триады железа на активность внеклеточных лектинов *Lentinus edodes* // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2 : Химия. 2006. Т. 47, № 2. С. 91–96 (Pankratov A. N., Tsivileva O. M., Loshchinina E. A., Nikitina V. E. Experimental and Theoretical Studies of the Influence of Iron Family Metal Cations on the Activity of Extracellular Lectins of *Lentinus Edodes* // Moscow Univ. Chem. Bull. Vol. 47, № 2. P. 15–21).
 - Цивилева О. М., Панкратов А. Н., Никитина В. Е., Бычков Н. А., Лоцинина Е. А. Влияние некоторых неорганических соединений на активность внеклеточных лектинов гриба *Lentinus edodes* // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология. 2007. Т. 7, вып. 1. С. 21–27.
 - Pankratov A. N., Tsivileva O. M., Loshchinina E. A., Nikitina V. E. Effect of Fe(II), Co(II), Ni(II) on the Activity of Extracellular Lectins of the Mushroom *Lentinus edodes* : the Experiment and Quantum Chemical Modeling // Afinidad. 2009. Vol. 66, № 544. P. 498–504.
 - Цивилева О. М., Бычков Н. А., Панкратов А. Н., Щерба В. В., Пучкова Т. А., Никитина В. Е. Медь (II) индуцирует продукцию индолных соединений в глубокой культуре гриба шиитаке // Иммунопатология, аллергология, инфектология. 2010. № 1. С. 35–36.
 - Цивилева О. М., Учаева И. М., Андреев К. В., Лоцинина Е. А., Панкратов А. Н., Дербенёва В. В., Никитина В. Е. Биосинтез компонентов микробного фактора автолиза клеток в присутствии триптофана при глубинном культивировании базидиомицета *Lentinus edodes* // Иммунопатология, аллергология, инфектология. 2010. № 1. С. 270–271.
 - Pankratov A. N., Tsivileva O. M., Drevko B. I., Nikitina V. E. Compounds of the 1,5-Di(4-R-phenyl)-3-selenopentanediones-1,5 Series Interaction with the Basidiomycete *Lentinula edodes* Lectins : Computations and Experiment // J. Biomol. Struct. Dynam. 2011. Vol. 28, № 6. P. 969–974.
 - Панкратов А. Н., Лоцинина Е. А., Цивилева О. М., Макаров О. Е., Юрасов Н. А., Никитина В. Е. Выявление участия индола в ростовых и метаболических процессах мицелиального гриба // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология. 2011. Т. 11, вып. 2. С. 54–59.
 - Tsivileva O. M., Loshchinina E. A., Pankratov A. N., Burashnikova M. M., Yurasov N. A., Bylinkina N. N., Kazarinov I. A., Nikitina V. E. Biodegradation of an Organoselenium Compound to Elemental Selenium by *Lentinula edodes* (Shiitake) Mushroom // Biol. Trace Element Res. 2012. Vol. 149, № 1. P. 97–101.
 - Панкратов А. Н., Лоцинина Е. А., Цивилева О. М., Бурашиникова М. М., Казаринов И. А., Былинкина Н. Н., Никитина В. Е. Ростовые и метаболические эффекты ксенобиотической органической формы селена в культуре базидиомицета *Lentinula edodes* // Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология. 2012. Т. 12, вып. 1. С. 11–17.
 - Цивилева О. М., Учаева И. М., Панкратов А. Н., Маркович Ю. Д., Никитина В. Е. Акридон-N-уксусная кислота в искусственной культуре базидиомицета: первоначальное исследование на примере *Lentinula edodes* // Вестн. Казах. нац. ун-та им. аль-Фараби. Сер. биол. 2012. № 4 (56). С. 340–343.
 - Tsivileva O. M., Uchaeva I. M., Pankratov A. N., Kudryavtseva T. N., Markovich Yu. D., Nikitina V. E. First Estimations of Plant Acridone Alkaloid Implemented in Mushroom Mycelium Growth // J. Agric. Sci. Technol. B. 2013. Vol. 3, № 12. P. 873–879.
 - Цымбал О. А., Цивилева О. М., Панкратов А. Н., Маркин А. В., Аткин В. С. Потенциальное биомедицинское назначение селенизированного мицелия высших



- грибов // Рос. иммунол. журн. : Тем. вып. «Пермский научный форум». 2015. Т. 9 (18), № 2. С. 767–769.
20. *Vertuani S., Angusti A., Manfredini S.* The Antioxidants and Pro-Antioxidants Network: An Overview // *Current Pharmaceutical Design*. 2004. Vol. 10, № 14. P. 1677–1694.
 21. *Apel K., Hirt H.* Reactive Oxygen Species : Metabolism, Oxidative Stress, and Signal Transduction // *Annu Rev. Plant Biol.* 2004. Vol. 55. P. 373–399.
 22. *Mishra V., Shah Ch., Mokashe N., Chavan R., Yadav H., Prajapati J.* Probiotics As Potential Antioxidants : A Systematic Review // *J. Agric. Food Chem.* 2015. Vol. 63, № 14. P. 3615–3626.
 23. *Rosenfeld I., Beath O. A.* Selenium : Geobotany, Biochemistry, Toxicity, and Nutrition. N.Y. ; L. : Academic Press, 1964. 411 p.
 24. *Organic Selenium Compounds : Their Chemistry and Biology / Eds. D. L. Klayman, W. H. H. Gunther. L. : Wiley-Interscience, 1973. 1188 p.*
 25. *Ермаков В. В., Ковальский В. В.* Биологическое значение селена. М. : Наука, 1974. 300 с.
 26. *Combs G. F., Jr., Combs S. B.* The Role of Selenium in Nutrition. Orlando, FL, USA : Academic Press, Inc., 1986. 532 p.
 27. Гигиенические критерии состояния окружающей среды 58. Селен. Женева : Всемирная организация здравоохранения, 1989. 272 с. (*Environmental Health Criteria 58 : Selenium. Geneva: World Health Organization, 1987. 306 p.*)
 28. *Авцын А. П., Жаворонков А. А., Риш М. А., Строчкова Л. С.* Микроэлементозы человека : этиология, классификация, органопатология. М. : Медицина, 1991. 496 с.
 29. *Иванов В. Н., Никитина Л. П., Аникина Л. В., Кулиш Н. И.* Селен в жизни человека и животных / под ред. Л. П. Никитина, В. Н. Иванова. М. : ТОО «Рос-универсал» ; МП «Калина», 1995. 242 с.
 30. *Trace Elements in Human Nutrition and Health. Geneva : World Health Organization, 1996. 343 p.*
 31. *Antioxidants and Disease Prevention / A. T. Diplock, H. S. Garewal, P. F. Inserra, S. K. Ardestani, R. R. Watson, Zhen Zhang, J. W. McLarty, S. T. Mayne, R. G. Ziegler, G. F. Combs, Jr., L. Clark, C. J. Fuller, I. Jialal, R. M. Hoffman, P. F. Jacques; ed. and introduction by H. S. Garewal. Boca Raton : CRC Press LLC, 1997. 186 p. (Modern nutrition).*
 32. *Вапиров В. В., Шубина М. Э., Вапирова Н. В., Беличенко В. И., Шубин И. В.* Селен. Некоторые аспекты химии, экологии и участия в развитии патологии : обзор. Петрозаводск : Петрозаводск. гос. ун-т, кафедра неорганической химии, кафедра пропедевтики внутренних болезней, 2000. 68 с. // Единое окно доступа к образовательным ресурсам. URL: <http://window.edu.ru/resource/032/28032/files/petsu014.pdf>.
 33. *Handbook of Antioxidants / eds. E. Cadenas, L. Packer. N.Y. : CRC Press (Taylor & Francis Group), 2001. 732 p.*
 34. *Тутельян В. А., Княжев В. А., Хотимченко С. А., Голубкина Н. А., Кушлинский Н. Е., Соколов Я. А.* Селен в организме человека : метаболизм, антиоксидантные свойства, роль в канцерогенезе. М. : Изд-во РАМН, 2002. 224 с.
 35. *Голубкина Н. А., Скальный А. В., Соколов Я. А., Щелкунов Л. Ф.* Селен в медицине и экологии. М. : Изд-во КМК, 2002. 136 с.
 36. *Reilly C.* Selenium in Food and Health. N.Y. : Springer Science + Business Media, LLC, 2006. 338 p.
 37. *Голубкина Н. А., Паназян Т. Т.* Селен в питании. Растения, животные, человек. М. : Печатный город, 2006. 255 с.
 38. *Reddy C. Ch., Massaro E. J.* Biochemistry of Selenium : A Brief Overview // *Fundamental Appl. Toxicol.* 1983. Vol. 3, № 5. P. 431–436.
 39. *Flohé L.* The Glutathione Peroxidase Reaction : Molecular Basis of the Antioxidant Function of Selenium in Mammals // *Current Topics in Cellular Regulation*. 1985. Vol. 27. P. 473–478.
 40. *Stadtman Th. C.* Selenium Biochemistry // *Ann. Rev. Biochem.* 1990. Vol. 59. P. 111–127.
 41. *Sunde R. A.* Molecular Biology of Selenoproteins // *Ann. Rev. Nutr.* 1990. Vol. 10. P. 451–474.
 42. *Bedwal R. S., Nair N., Sharma M. P., Mathur R. S.* Selenium – Its Biological Perspectives // *Med. Hypotheses*. 1993. Vol. 41, № 2. P. 150–159.
 43. *Foster L. H., Sumar S.* Selenium in the Environment, Food and Health // *Nutrition & Food Science*. 1995. Vol. 95, № 5. P. 17–23.
 44. *Блинохватов А. Ф.* О селене, которого нам не хватает // *Химия и жизнь*. 1995. № 4. С. 42–47.
 45. *Tamura T., Stadtman Th. C.* A New Selenoprotein from Human Lung Adenocarcinoma Cells: Purification, Properties, and Thioredoxin Reductase Activity // *Proc. Natl Acad. Sci. USA*. 1996. Vol. 93, № 3. P. 1006–1011.
 46. *Foster L. H., Sumar S.* Selenium in Health and Disease : A Review // *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 1997. Vol. 37, № 3. P. 211–228.
 47. *Гореликова Г. А., Маюрникова Л. А., Поздняковский В. М.* Нутрицевтик селен : недостаточность в питании, меры профилактики // *Вопросы питания*. 1997. Т. 66, № 5. С. 18–21.
 48. *Flohé L.* Selen im Peroxidstoffwechsel // *Medizinische Klinik*. 1997. Bd. 2, Suppl. 3. S. 5–7.
 49. *Gladyshev V. N., Hatfield D. L.* Selenocysteine-Containing Proteins in Mammals // *J. Biomed. Sci.* 1999. Vol. 6, № 3. P. 151–160.
 50. *Гмошинский И. В., Мазо В. К.* Селен в питании : краткий обзор // *Medicina Altera*. 1999. № 4. С. 18–22.
 51. *Patching S. G., Gardiner R. H. E.* Recent Developments in Selenium Metabolism and Chemical Speciation : A Review // *J. Trace Elements Med. Biol.* 1999. Vol. 13, № 4. P. 193–214.
 52. *Решетник Л. А., Парфёнова Е. О.* Биогеохимическое и клиническое значение селена для здоровья человека // *Сиб. мед. журн. (Иркутск)*. 1999. Т. 18, № 3. С. 16–22 (Научная электронная библиотека «КиберЛенинка»). URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/biogeohimicheskoe-i-klinicheskoe-znachenie-selena-dlya-zdorovya-cheloveka>.
 53. *Schrauzer G. N.* Selenomethionine : A Review of Its Nutritional Significance, Metabolism and Toxicity // *J. Nutr.* 2000. Vol. 130, № 7. P. 1653–1656.



54. Гмошинский И. В., Мазо В. К., Тутельян В. А., Хотимченко С. А. Микроэлемент селен: роль в процессах жизнедеятельности // Экология моря : республик. межвед. сб. науч. тр. / отв. ред. В. Е. Заика. Киев : Наук. думка, 2000. Вып. 54. С. 5–19.
55. Волкотруб Л. П., Андропова Т. В. Роль селена в развитии и предупреждении заболеваний (Обзор) // Гигиена и санитария. 2001. № 3. С. 57–61.
56. Combs G. F. Jr. Selenium in Global Food Systems // British J. Nutr. 2001. Vol. 85, № 5. P. 517–547.
57. Решетник Л. А., Парфёнова Е. О. Биогеохимическое и клиническое значение селена для здоровья человека // Микроэлементы в медицине. 2001. Т. 2, № 2. С. 2–8.
58. Whanger P. D. Selenocompounds in Plants and Animals and Their Biological Significance // J. Amer. Coll. Nutr. 2002. Vol. 21, № 3. P. 223–232.
59. Burk R. F., Hill K. E., Motley A. K. Selenoprotein Metabolism and Function : Evidence for More Than One Function for Selenoprotein P // J. Nutr. 2003. Vol. 133, № 5. P. 1517S–1520S.
60. Ермаков В. В. Биогеохимия селена и его значение в профилактике эндемических заболеваний человека // Вестн. Отд-ния наук о Земле РАН. 2004. № 1 (22). С. 1–17. URL: <http://geo.web.ru/conf/khitari-ada/1-2004/scpub-4.pdf>.
61. Барабой В. А., Шестакова Е. Н. Селен : биологическая роль и антиоксидантная активность // Укр. биохим. журн. 2004. Т. 76, № 1. С. 23–32.
62. McKenzie R. C., Arthur J., Beckett G. J. Selenium and the Regulation of Cell Signaling, Growth, and Survival : Molecular and Mechanistic Aspects // Antioxidants & Redox Signaling. 2004. Vol. 4, № 2. P. 339–351.
63. Willcox J. K., Ash S. L., Catignani G. L. Antioxidants and Prevention of Chronic Disease // Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 2004. Vol. 44, № 4. P. 275–295.
64. Gromer S., Eubel J.K., Lee B. L., Jacob J. Human Selenoproteins at a Glance // Cellular Mol. Life Sci. 2005. Vol. 62, № 21. P. 2414–2437.
65. Третьяк Л. Н., Герасимов Е. М. Специфика влияния селена на организм человека и животных (применительно к проблеме создания селеносодержащих продуктов питания) // Вестн. Оренб. гос. ун-та. 2007. № 12. С. 136–145. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/spetsifika-vliyaniya-selena-na-organizm-cheloveka-i-zhivotnyh-primenitelno-k-probleme-sozdaniya-selenosoderzhaschih-produktov-pitaniya>.
66. Margis R., Dunand Ch., Teixeira F. K., Margis-Pinheiro M. Glutathione Peroxidase Family – An Evolutionary Overview // FEBS Journal. 2008. Vol. 275, № 15. P. 3959–3970.
67. Reeves M. A., Hoffmann P. R. The Human Selenoproteome: Recent Insights into Functions and Regulation // Cellular Mol. Life Sci. 2009. Vol. 66, № 15. P. 2457–2478.
68. Степанов Ю. М., Белицкий В. В., Коссинская С. В. Селен как микроэлемент : характеристика и значение для человека // Сучасна гастроентерология. 2012. № 3 (65). С. 91–96. URL: http://vitapol.com.ua/user_files/pdfs/gastro/gas65isgastro3-12-13.pdf;
69. Tapiero H., Townsend D. M., Tew K. D. The Antioxidant Role of Selenium and Seleno-Compounds // Biomedicine & Pharmacotherapy. 2003. Vol. 57, № 3–4. P. 134–144.
70. Гмошинский И. В., Мазо В. К. Минеральные вещества в питании человека. Селен : всасывание и биодоступность // Вопросы питания. 2006. Т. 75, № 5. С. 15–19.
71. Dumont E., Vanhaecke F., Cornelis R. Selenium Speciation from Food Source to Metabolites: A Critical Review // Analyt. Bioanal. Chem. 2006. Vol. 385, № 7. P. 1304–1323.
72. Ogra Y., Anan Y. Selenometabolomics: Identification of Selenometabolites and Specification of Their Biological Significance by Complementary Use of Elemental and Molecular Mass Spectrometry // J. Analyt. Atomic Spectrom. 2009. Vol. 24, № 11. P. 1477–1488.
73. Галочкин В. А., Галочкина В. П. Органические и минеральные формы селена, их метаболизм, биологическая доступность и роль в организме // Сельскохозяйственная биология. 2011. № 4. С. 3–15. URL: <http://agrobiology.ru/4-2011galochkin.html>;
74. Hurst R., Collings R., Harvey L. J., King M., Hooper L., Bouwman J., Gurinovic M., Fairweather-Tait S. J. EUR-RECA – Estimating Selenium Requirements for Deriving Dietary Reference Values // Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 2013. Vol. 53, № 10. P. 1077–1096.
75. Bodnar M., Szczygłowska M., Konieczka P., Namiesnik J. Methods of Selenium Supplementation: Bioavailability and Determination of Selenium Compounds // Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 2016. Vol. 56, № 1. P. 36–55.
76. Moreda-Piñeiro J., Moreda-Piñeiro A. Bermejo-Barreira P. In vivo and in vitro Testing for Selenium and Selenium Compounds Bioavailability Assessment in Foodstuff // Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 2017. Vol. 57, № 4. P. 805–833.
77. Сибгатуллина Г. В., Хаертдинова Л. Р., Гумерова Е. А., Акулов А. Н., Костюкова Ю. А., Никонова Н. А., Румянцева Н. И. Методы определения редокс-статуса культивируемых клеток растений. Казань : Казан. (Приволжский) Федеральный ун-т, 2011. 61 с.
78. Бучаченко А. Л., Вассерман А. М. Стабильные радикалы. Электронное строение, реакционная способность и применение. М. : Химия, 1973. 408 с.
79. Розанцев Э. Г., Шолле В. Д. Органическая химия свободных радикалов. М. : Химия, 1979. 344 с.
80. Нонхивел Д., Волтон Дж. Химия свободных радикалов. Структура и механизм реакций / пер. с англ. М. Г. Гольдфельда ; под ред. И. П. Белецкой. М. : Мир, 1977. 608 с. (Nonhebel D. C., Walton J. C. Free-Radical Chemistry: Structure and Mechanism / With a foreword by J. M. Tedder. Cambridge: Cambridge University Press, 1974. 572 p.).
81. Нонхивел Д., Теддер Дж., Волтон Дж. Радикалы / пер. с англ. В. А. Смита. М. : Мир, 1982. 268 с. (Nonhebel D. C., Tedder J. M., Walton J. C. Radicals. Cambridge ;



- L.; N.Y.; Melbourne: Cambridge University Press, 1979. 200 p. (Cambridge chemistry texts)).
82. Пат. 2051681 Российская Федерация. МПК 6 А 61 К 33/04. Средство для лечения и профилактики болезней, вызываемых недостаточностью селена в организме сельскохозяйственных животных и птиц / Древо Б. И., Антипов В. А., Жуков О. И., Фоменко Л. А., Маркова Л. И., Древо Р. И., Родионова Т. Н., Ефремов В. И., Харченко В. Г. Заявл. 24.09.1993, № 93045743/15; Опубл. 10.01.1996. 12 с. // Изобретения (заявки и патенты). 1996. Бюл. № 1 (II ч.). С. 161.
83. Пат. 2171110 Российская Федерация. МПК 7 А 61 К 33/04. Средство для лечения и профилактики инфекционных заболеваний и отравлений животных и птиц, повышающее их продуктивность и сохранность / Древо Б. И., Древо Р. И., Антипов В. А., Чернуха Б. А., Яковлев А. Н. Заявл. 26.05.1999, № 99111064/13; Опубл. 27.07.2001. 16 с. // Изобретения. Полезные модели. 2001. Бюл. № 21 (II ч.). С. 219.
84. Древо Я. Б., Федотова О. В. Синтез первых представителей бензаннелированных дигидроселенохроменов // Химия гетероцикл. соед. 2006. № 10. С. 1586–1587 (Drevko Ya. B., Fedotova O. V. Synthesis of the First Representatives of Benzannellated Dihydroselenochromenes // Chem. Heterocyclic Compds. 2006. Vol. 42, № 10. P. 1372–1373).
85. Хайруллина В. Р., Герчиков А. Я., Гарифуллина Г. Г., Древо Я. Б., Федотова О. В. Антиокислительные свойства 2,4-дифенил-7,8-бензо-5,6-дигидро(4H)селенохромена и 2-пара-хлорфенил-4-фенил-7,8-бензо-5,6-дигидро(4H)селенохромена // Кинетика и катализ. 2010. Т. 51, № 1. С. 43–46 (Khairullina V. R., Gerchikov A. Ya., Garifullina G. G., Drevko Ya. B., Fedotova O. V. Antioxidant Properties of 2,4-Diphenyl-7,8-benzo-5,6-dihydro(4H)selenochromene and 2-para-Chlorophenyl-4-phenyl-7,8-benzo-5,6-dihydro(4H)selenochromene // Kinetics and Catalysis. 2010. Vol. 51, № 1. P. 38–41).
86. Хайруллина В. Р., Герчиков А. Я., Ильина Е. А., Древо Я. Б., Исаева А. Ю., Древо Б. И. Антиокислительные свойства некоторых производных 7,8-бензо-5,6-дигидро(4H)селенохромена // Кинетика и катализ. 2013. Т. 54, № 1. С. 16–19 (Khairullina V. R., Gerchikov A. Ya., Il'ina E. A., Drevko Ya. B., Isaeva A. Yu., Drevko B. I. Antioxidant Properties of Some 7,8-Benzo-5,6-dihydro(4H)selenochromene Derivatives // Kinetics and Catalysis. 2013. Vol. 51, № 1. P. 14–17).
87. Древо Я. Б., Осина Т. С., Федотова О. В., Древо Б. И. Реакция восстановления 2,4-диарил-7,8-бензо-5,6-дигидроселенохроменов // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология. 2015. Т. 15, вып. 2. С. 5–7.
88. Чарыков А. К. Математическая обработка результатов химического анализа. Методы обнаружения и оценки ошибок. Л.: Химия. Ленингр. отд-ние, 1984. 168 с.
89. Дёрффель К. Статистика в аналитической химии / пер. с нем. Л. Н. Петровой; под ред. и с предисл. Ю. П. Адлера. М.: Мир, 1994. 268 с. (Doerffel K. Statistik in der analytischen Chemie. Weinheim; Deerfield Beach, Florida; Basel: Verlag Chemie; 1985. 192 S.).
90. Представление результатов химического анализа (рекомендации IUPAC 1994 г.) // Журн. аналит. химии. 1998. Т. 53, № 9. С. 999–1008 (пер. М. А. Проскурным статьи: Currie L. A., Svehla G. Nomenclature for the Presentation of Results of Chemical Analysis (IUPAC Recommendations 1994) // Pure Appl. Chem. 1994. Vol. 66, № 3. P. 595–608).

Antioxidant Status of Macrobasidiomycetes Mycelium Grown in the Presence of Organoselenium Compounds

A. N. Pankratov, O. M. Tsivileva, A. S. Beloborodaya, O. A. Tsybal, Ya. B. Drevko

Alexei N. Pankratov, Saratov State University, 83, Astrakhanskaya Str., Saratov, 410012, Russia, pankratovan@info.sgu.ru

Olga M. Tsivileva, Institute of Biochemistry and Physiology of Plants and Microorganisms, Russian Academy of Sciences, 13, Prospekt Entuziastov, Saratov, 410049, Russia, tsivileva@ibppm.sgu.ru

Anastasiya S. Beloborodaya, Saratov State University, 83, Astrakhanskaya Str., Saratov, 410012, Russia, nastya365@mail.ru

Oleg A. Tsybal, Saratov State University, 83, Astrakhanskaya Str., Saratov, 410012, Russia, olegtsybal1990@yandex.ru

Yaroslav B. Drevko, Saratov State Agrarian University named after N. I. Vavilov, 1, Teatralnaya Sqr., Saratov, 410012, Russia, drevko@list.ru

Antioxidant status maintenance plays a significant role for mushroom cultures in respect to oxidative stress resistance, cytodifferentiation and transition to the generative stage. Strong antioxidants are the selenium compounds. One of the antioxidant action indices is the antiradical activity determined by means of the spectrophotometric method using the reactions with the free radical 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl, N,N-diphenyl-N'-picrylhydrazyl, DPPH) (C₆H₅)₂N-N'-C₆H₂(NO₂)₃-2,4,6. Macrobasidiomycetes are important as edible, medicinal mushrooms and biological objects for research into regularities of the living systems functioning, development and response to the various-nature effectors impact. The work is aimed at the determination of the antiradical activity of the aqueous-ethanolic mycelial extracts, as well as at the elucidation of the antioxidant status of the mycelia grown with the addition of organoselenium compounds to the submerged cultivation medium. The macrobasidiomycetes under study were *Laetiporus sulphureus* (sulfur-yellow polypore), *Pleurotus ostreatus* (oyster mushroom), *Grifola umbellata* (umbrella polypore), *Ganoderma applanatum* (flat polypore), and *Lentinula edodes* (shiitake mushroom). The additives used were 1,5-diphenylselenopentanedione-1,5 (diacetophenonylselenide, bis(benzoylmethyl)selenide, preparation DAPS-25) C₆H₅COCH₂SeCH₂COC₆H₅, 2,4-diphenyl-7,8-benzo-5,6-dihydro-4H-selenochromene, 2-(4-bromophenyl)-4-phenyl-7,8-benzo-5,6-dihydro-4H-selenochromene, and 2,4-diphenyl-7,8-benzo-5,6-dihydroselenochromilium perchlorate. The positive impact on the extracts antiradical activity and mycelium antioxidative status has



been stated to be exerted by diacetophenonylselenide, the molecular selenium-containing fragment of which is of an open-chain structure. On the contrary, the substances with the selenium atom in cycle – dihydroselenochromenes and dihydroselenochromilium salt – reduced the cultures antiradical activity. Diacetophenonylselenide, in contrast to the heterocyclic selenium species, is promising as the antioxidant and microelement additive at the basidiomycetes cultivation. The most pronounced positive effect in relation to the antiradical activity increase at diacetophenonylsel-

enide supplementation to the culture medium has manifested itself with the basidiomycete *Ganoderma applanatum*. *Lentinula edodes* mycelial extract is featured by rather high antiradical activity even without additives. The rest higher fungi under study do not exhibit any clear differentiation in their organisms' antioxidant systems efficiency.

Key words: antioxidant status, antiradical activity, DPPH, organoselenium compounds, diacetophenonylselenide, dihydroselenochromenes, dihydroselenochromilium salts, macrobasidiomycetes.

Образец для цитирования:

Панкратов А. Н., Цивилева О. М., Белобородая А. С., Цымбал О. А., Древки Я. Б. Антиоксидантный статус мицелия макробазидиомицетов, выращенных с добавлением селенорганических соединений // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология. 2017. Т. 17, вып. 3. С. 286–298. DOI: 10.18500/1816-9775-2017-17-3-286-298.

Cite this article as:

Pankratov A. N., Tsivileva O. M., Beloborodaya A. S., Tsymbal O. A., Drevko Ya. B. Antioxidant Status of Macrobasidiomycetes Mycelium Grown in the Presence of Organoselenium Compounds. *Izv. Saratov Univ. (N.S.), Ser. Chemistry. Biology. Ecology*, 2017, vol. 17, iss. 3, pp. 286–298 (in Russian). DOI: 10.18500/1816-9775-2017-17-3-286-298.
