

УДК 582.284.3

Л.П. Дзигун

ЛІКАРСЬКИЙ КСИЛОТРОФНИЙ БАЗИДИОМЦЕТ *LAETIPORUS SULPHUREUS* (BULL.: FR.) MURRILL – ПЕРСПЕКТИВНИЙ ОБ'ЄКТ БІОТЕХНОЛОГІЇ

This paper brings into light the critical review of publications on the chemical composition, action, and the use of compounds isolated from fruit bodies, submerged mycelium and culture liquid of edible basidiomycete *Laetiporus sulphureus*. In addition, we uncover biologically active compounds revealing the role of *L. sulphureus* as a substances producer that can be applied in various fields of industry.

Вступ

Грибні метаболіти представлені широким спектром речовин, що належать до різних хімічних класів. Тому дослідження вторинних метаболітів грибів з метою розроблення технології їх отримання є актуальним завданням для створення вітчизняних біотехнологій. Представники порядку *Polyporales* є одним із найважливіших джерел біологічно активних сполук у грибному царстві. *Laetiporus sulphureus*, який за сучасною класифікацією грибів належить до цього порядку, є єдиним представником роду *Laetiporus*, що трапляється в Україні. Він є ксилотрофом, факультативним сапротрофом і збудником бурої призматичної гнилі, яка розвивається переважно приховано у центральній частині стовбура. Плодові тіла трутовика сірчано-жовтого часто можна зустріти під час його вегетативного періоду на пнях і стовбурах живих та відмерлих дерев листяних і хвойних порід, а інколи й на землі. Молоде плодове тіло цього трутовика спочатку нагадує тістоподібну безформну масу, яка з часом перетворюється на черепичні скупчення з в'ялоподібних, об'єднаних спільною основою, м'ясистих базидіом, які можуть підійматися по стовбуру до 70 см вгору. Маса таких утворень може сягати до 20 кг. Базидіоми *L. sulphureus* мають яскраво-жовтогаряче забарвлення з рожевим відтінком, але з часом яскравість кольорів втрачається, вони вицвітають і стають блідо-жовтими. Молоді базидіоми *L. sulphureus* є їстівними й у деяких країнах світу вважаються делікатесом, а ціна за 1 кг цього гриба сягає від 0,6 до 8,1 дол США [1]. У країнах Сходу цей гриб набув широкого вжитку у традиційній народній медицині [2].

Дослідження *L. sulphureus* як потенційного продуцента цінних речовин з різними біологічними властивостями проводилися починаючи з

50-х років ХХ ст. [3]. Проте, незважаючи на це, вивчення *L. sulphureus* було не настільки інтенсивним, як інших представників порядку *Polyporales*, таких як *Ganoderma applanatum*, *G. lucidum*, *Grifola frondosa* або *Trametes versicolor*.

Постановка задачі

Метою даного огляду є узагальнення літературних відомостей про склад базидіом і міцелію *L. sulphureus* та їх біологічно активних компонентів з метою оцінки можливості розроблення технологій їх промислового отримання.

Харчова цінність біомаси *L. sulphureus*

Оскільки базидіоми *L. sulphureus* у молодому віці їстівні, то було проведено цілий ряд досліджень з метою встановлення поживної цінності біомаси цього гриба, що визначається вмістом білка та його амінокислотним складом [4–7]. Дослідження білкових фракцій у базидіомах трутовика сірчано-жовтого в Македонії показали низький вміст протеїну ($14,00 \pm 0,64$ % сухої маси) [6]. Низький вміст білка (в межах 0,19–0,49 %) був виявлений і в плодових тілах *L. sulphureus*, вирощених у лабораторії [4]. Проте фракційний склад протеїну *L. sulphureus*, представлений альбумінами – $20,49 \pm 0,74$ %, глобулінами – $10,87 \pm 0,48$ %, глутеліном – $6,58 \pm 0,15$ і проламіном – $14,26 \pm 0,70$ % (відсоток від загального протеїну), є свідченням високої поживної цінності білка цього гриба [6].

Перші дослідження амінокислотного складу базидіом *L. sulphureus* були здійснені у 70-х роках ХХ ст. [5, 7]. Дані, наведені в табл. 1, вказують на наявність у базидіомах трутовика всіх незамінних амінокислот. Близько 40 % від загальної кількості амінокислот припадає на аланін, лейцини, аспарагінову та глютамінову

Таблиця 1. Амінокислотний склад базидіом і міцелію *L. sulphureus*

Амінокислота	Вміст амінокислоти в базидіомах		Вміст амінокислоти в міцелії, % на суху вагу
	Сумарний, % від загальної кількості	Вільних, мг у 100 г маси плодового тіла	
Аланін	8,9	3,7	3,2
Аспарагінова кислота	10,9	—	3,6
Аспарагін + глутамін	—*	0,81	—
Аргінін	1,9	0,49	1,9
Валін	4,5	1,61	1,2
Гліцин	6,9	0,29	2,1
Глутамінова кислота	18,5	0,96	5,9
Гістидин	2,2	0,29	1,6
Ізолейцин	—	0,31	—
Лейцини	12,1	0,55	3,9
Лізін	3,8	0,56	2,2
Метіонін	3,1	0,30	2,1
Пролін	3,2	0,45	1,4
Серин	6,2	1,15	2,1
Тирозин	1,95	не виявлено	1,2
Треонін	5,4	4,17	2,6
Триптофан	1,4	—	0,3
β-фенилаланін	2,9	0,54	2,9

* — немає даних.

кислоти, а серед вільних амінокислот значний вміст у трутовика лише аланіну і треоніну. В базидіомах *L. sulphureus*, вирощених на експериментальних плантаціях у природі, виявлено наявність 24 вільних амінокислот, загальний вміст яких становив 1,00–6,59 %. Зокрема, во-

ни містять цистеїнову кислоту, α- і γ-аміномасляні кислоти, орнітин, цитрулін, оксипролін разом із зазначеними раніше амінокислотами, виявленими в базидіомах, зібраних у природі. Відзначено найбільший вміст глутаміну, глутамінової кислоти, лейцину, аргініну, тирозину, аланіну, серину, оксипроліну, γ-аміномасляної кислоти і гліцину. З незамінних амінокислот у штучно вирощених базидіомах *L. sulphureus* виявлено ізолейцин, лейцин, лізін, метіонін, треонін і валін [4].

Міцеліальна біомаса *L. sulphureus* також має значну поживну цінність. Для глибинного міцелію *L. sulphureus* вміст білка становить від 18–20 до 39 ± 0,21 % сухої маси, а концентрація амінокислот у 5–8 разів більша порівняно з базидіомами [6, 8]. Амінокислотний склад міцелію ідентичний складу

базидіом: для нього характерним є значний вміст аланіну, моноамінодикарбонових кислот і лейцинів та незначна кількість лужних амінокислот (табл. 1), але міцелій має більшу кількість сірковмісних амінокислот [5].

Таблиця 2. Елементний склад базидіом *L. sulphureus*

Елемент	Регіон						
	Туреччина, мг/кг а.с.р.	Росія, Москва, мг/кг				Росія, Прибайкалля, %	
		Останкіно	Ізмайловський парк	Воронцовський парк	Срібноборське лісництво		
Ag	0,26 ± 0,05	—	—	—	—	4,17·10 ⁻⁴	0,83·10 ⁻⁴
As	—	0,04	0,02	0,01	0,02	—	—
Cd	0,68 ± 0,18	0,2	0,5	1,9	0,2	—	—
Co	—	0,25	0,83	< 0,25	0,25	0,27·10 ⁻³	5,39·10 ⁻³
Cu	22,7 ± 3,8	5	9	15	4	0,02	0,03
Fe	—	38	195	143	45	0,13	0,08
Hg	—	0,026	0,062	0,021	0,016	—	—
Mn	30,7 ± 2,5	5	24	9	5	0,16	0,11
Mo	—	0,35	0,20	0,30	0,35	6,67·10 ⁻⁵	3,32·10 ⁻⁵
Ni	21,7 ± 3,1	1,2	6,0	2,5	2,5	6,56·10 ⁻⁴	5,82·10 ⁻⁴
Pb	24,5 ± 2,4	0,2	1,8	1,0	0,2	3,92·10 ⁻³	3,32·10 ⁻³
Sr	—	1	9	1	1	—	—
Zn	—	28	26	50	24	0,83·10 ⁻³	1,66·10 ⁻³

Оскільки *L. sulphureus* вважається їстівним, то мікроелементний склад його базидію, зокрема вміст важких металів, багато з яких потрапляють у гриби з навколишнього середовища, є важливим показником. Вивчення мікроелементного складу капрофорів *L. sulphureus* проводилося в різних регіонах (табл. 2) [4, 9, 10].

Крім наведених у табл. 2 хімічних елементів, у базидіомах *L. sulphureus* з Прибайкалля встановлено наявність срібла, силіцію, цирконію, алюмінію, берилію і кальцію [4]. Така різниця у мікроелементному складі може бути пов'язана з особливостями місця розвитку плодових тіл і потребує значної уваги при збиранні їх для вживання в їжу. Встановлено низьку здатність базидію *L. sulphureus* накопичувати з навколишнього середовища радіоактивні елементи, а саме стронцій (^{137}Cs) [11].

Хімічний склад клітини *L. sulphureus*

Базидіоми макроміцетів є джерелом багатьох біологічно активних сполук. Трутовик сірчано-жовтий не є винятком, і для нього встановлено наявність і склад речовин з фізіологічною активністю (табл. 3).

Одним із важливих компонентів як базидію, так і міцелію є полімерні сполуки, які входять до складу клітинної стінки. Серед таких сполук слід відзначити пектинові речовини, вміст яких у міцелії *L. sulphureus* становить 3,5 % фракції, що не руйнується кип'ятінням у

концентрованих кислотах, і полісахариди, які визначають досить широкий спектр фармакологічних властивостей лікарських грибів [16]. Для *L. sulphureus* проведено широкий спектр досліджень з метою виділення і характеристики його полісахаридів. Матеріал клітинної стінки базидію *L. sulphureus* на 78–88 % складається з (1→3)- α -D-глюкану, також містяться хітин і (1→3)- β -D-глюкан, який отримав назву ламінаран. Встановлено, що 98,8 % всіх полісахаридів базидію цього гриба містять глюкозу. Полісахаридні фракції також містять фукозу, манозу і галактозу у співвідношенні 18:35:41, які є складовими розгалуженого полісахариду з (1→6)-зв'язаними α -D-галактопіранозою у головному ланцюзі та з L-фукопіранозою, α -D-манопіранозою і 3-O- α -манопіранозо-L-фукопіранозою у бокових ланцюгах. За даними літератури, цей фукоманогалактан з *L. sulphureus* є подібним за структурою до таких самих полісахаридів з інших базидіоміцетів, що забезпечують значну біологічну активність і широко застосовуються в біохімічних дослідженнях. За фракційним складом серед полісахаридів базидію *L. sulphureus* виділяють п'ять фракцій водорозчинних полісахаридів з молекулярною масою – $(1,5-5,6) \cdot 10^4$ Да і дві фракції лугорозчинних полісахаридів з молекулярною масою $(1,5-1,8) \cdot 10^5$ Да. Водорозчинний β -(1→3)-гетероглюкан з молекулярною масою $5,6 \cdot 10^4$ Да і з галактозою, манозою, фукозою, рамнозою та ксилозою у бічних ланцюгах отримав назву ла-

Таблиця 3. Загальний хімічний склад плодових тіл і міцелію *L. sulphureus* згідно з даними літератури

Компонент	Вміст		Літературне джерело
	Базидіома	Міцелій	
Протеїн	14,00 ± 0,64 % сухої маси	–	[6]
Білок	0,19–0,49 %	18–39 ± 0,21 % сухої маси	[4, 8]
Пектинові речовини	–	3,5 %	[16]
Полісахариди	до 66 %	–	[4]
Стероїдні речовини	2,54 % сухої маси	–	[17]
Тритерпенові кислоти	1,14 % сухої маси	–	[17]
Тритерпенові сполуки	0,54 %	–	[4]
Ергостерол	–	0,68–0,72 % сухої маси	[18]
Ергостерин (провітамін D ₂)	0,19 % від сухої маси	–	[17]
Органічні кислоти	3,27–5,05 %	–	[4]
Ліпіди	0,60–1,03 %	20 % сухої маси	[4, 8]
Фосфоліпіди	–	11,6 ± 5,0 мг/г сухої маси	[19]
Каротиноїдні сполуки	0,003 мг	10 мг/г сухої маси	[8, 13]
Алкалоїди	0,32–0,40 %	–	[4, 20]
Фенольні сполуки	0,69–2,85 %	–	[4]

типоран А. Лугорозчинні полісахариди представлені лінійним β -(1 \rightarrow 3)-гомоглюканом латиглюканом I, який близький за структурою до бактеріального курдлану *Alcaligenes faecalis* і ламінарину з бурих водоростей *Laminaria sp.* [4]. Екзополісахариди міцелію *L. sulphureus* var. *miniatus* є глюканами і представлені чотирма фракціями з молекулярною масою 263, 43, 5,7 і 0,6 кДа [21].

Протеїн-полісахариди *L. sulphureus* на 84 % складаються з полісахариду і на 5 % – з протеїну. Головним компонентом полісахаридної складової є фукоза (94,5 %). Протеїновий компонент містить аспарагінову та глютамінову кислоти, триптофан, серин, пролін, гліцин, аланін, аргінін, валін, метіонін, ізолейцин, лейцин, тирозин, фенілаланін і лізин [22].

Загальний вміст тритерпенових сполук у базидіомах *L. sulphureus* становить 0,54 % [4]. Базидіома *L. sulphureus* має такі стеролвмісні фракції: речовини, що екстрагуються спиртом, – 10,58 %; неомілювальні речовини (стероїдні речовини) – 2,54 %; тритерпенові кислоти – 1,14 % сухої ваги [17]. Тритерпенова ебурикова кислота ($C_{31}H_{50}O_3$, 3β -окси-ебурико-8:24(28)-дієн-21-кислота), виявлена в культуральному міцелії *L. sulphureus*, синтезується із залишків оцтової кислоти через сквален за участі тих же ферментів, що й для інших тритерпенів і стеролів. Це дає грибу можливість утилізувати оцтову кислоту, яка в значних кількостях може накопичуватись представниками бурої гнилі. З міцелію *L. sulphureus* було ізольовано тетрациклічний неантибіотичний тритерпен і сульфуренову кислоту, оцінену як 15 α -гідроксиебурикову кислоту [3]. Спиртовий екстракт міцелію *L. sulphureus* містив ергостерол, фугістерол і тритерпенові кислоти. Вміст ергостеролу становив 0,68–0,72 % маси сухого міцелію [18]. Ергостероли спиртових екстрактів з базидіом *L. sulphureus* var. *miniatus* ідентифіковані як егонол, деметоксиегонол, егонол глюкозид, егонол гентіобіозид, 2-(3,4-дигідроксифеніл)-2,3-дигідро-7-гідроксиметил-5-бензофуранпропанол, бензофуран глікозид і C_{10} -ацетиленова кислота. Дві останні речовини вперше виявлені в базидіомах *L. sulphureus* й отримали назви: машутакезид I та машутакова кислота відповідно [15]. В базидіомах *L. sulphureus* виявлено також наявність β -ситосерину, холестерину і ергостерину (провітамін D_2), концентрація якого становить 0,19 % сухої ваги базидіоми [4, 17].

Ще одна важлива складова базидіом грибів – це ліпіди, які в більшості випадків забез-

печують функціонування цитоплазматичної мембрани і є енергетичним запасом для клітин. Ліпіди разом з білками займають важливе місце у харчуванні людини, а їх харчова цінність тим вища, чим більший вміст поліненасичених жирних кислот. На ліпідну фракцію в базидіомах *L. sulphureus* припадає 0,60–1,03 %, у її складі переважають жирні кислоти з довжиною ланцюга C_{12} – C_{25} і домінуванням кислот C_{16} – C_{18} -ряду. Ненасичені жирні кислоти: пальмітолеїнова, цис-вакценова, олеїнова і лінолева – становлять до 70 % ліпідного комплексу. Насичені жирні кислоти представлені лауриною, міристиною, пентадеканою, пальмітиною, маргариною, стеариною, арахіною, бегеновою, трикозаною, лігноцериновою і пентакозаною. Вміст цих кислот становив 27,79–42,39 % сумарного вмісту нейтральних ліпідів [4]. Вміст ліпідів у міцелії *L. sulphureus* перевищує 20 % сухої біомаси з переважанням лінолевої кислоти (65–70 % жирних кислот), що подібно до жирнокислотного складу базидіом [8]. Фосфоліпіди міцелію *L. sulphureus* становлять $8,0 \pm 1,5$ % ліпідів і представлені лізофосфатидилхоліном ($4,1 \pm 1,2$ %), сфінгомієліном ($0,6 \pm 0,3$ %), фосфатидилхоліном ($21,0 \pm 1,7$ %), фосфатидилінозитом та фосфатидилсеріном ($15,3 \pm 1,6$ %), фосфатидилетаноламіном ($41,5 \pm 2,2$ %), фосфатидилгліцеріном, кардіоліпіном і фосфатидильною кислотою ($17,6 \pm 2,2$ %) [19].

Серед інших класів речовин для базидіом *L. sulphureus* відзначено наявність алкалоїдів із загальним вмістом 0,32–0,40 %, до складу яких входять хорденін, N-метилтерамін і терамін [4, 20]. Серед речовин *L. sulphureus* з вираженою фізіологічною активністю наявні дигідротраметінова кислота і похідні бетаїну: гомарин, бутиробетаїн, герцин, тригонелін і похідні імідазолу. *L. sulphureus* здатен продукувати циклодепептид беауверіцин – іонофор, комплексно зв'язаний з алкілами металів [17, 23].

З базидіом гриба *L. sulphureus* було виділено лектин з молекулярною масою близько 190000 а.о.м. і тетрамерною структурою з нековалентно зв'язаних субодиниць масою 60000 та 36000 а.о.м. Лектин проявляє гемаглютинуючу і гемолітичну дію, яка інгібується лакто-N-неотетозою (Gal1–4GlcNAc1–3Gal1–4Glc), що є подібним до бактеріальних токсинів: москуїтоцидал токсину (MTX2) з *Bacillus sphaericus* і токсину з *Clostridium septicum*, арбіну та рицину з *C. botulinum*, ϵ -токсину з *C. perfringens* та β -пороформуючого токсину аеролізіну з грам-негативної бактерії *Aeromonas hydrophila* [12].

Зрілі базидіоми *L. sulphureus* мають кислуватий смак, що пов'язано з накопиченням у них органічних кислот, загальний вміст яких становить 3,27–5,05 %. До їх складу входять вина, лимонна, яблучна, маленова та янтарна кислоти. На зрілі базидіоми *L. sulphureus* припадає найбільший вміст вільних (1,44 %), а на старіючі – зв'язаних органічних кислот (3,80 %) [4]. У глибинній культурі *L. sulphureus* також накопичує кислоти. Так, для нейтралізації 10 мл культуральної рідини після культивування *L. sulphureus* необхідно 9,2 і 2,4 мл 0,1 N лугу за стаціонарних умов та при перемішуванні відповідно, а рівень рН знижується до 2,5–2,7. Така значна кислотність культуральної рідини пов'язана з накопиченням пропіонової, масляної, ізомасляної, ізовалеріанової, валеріанової, молочної, шавлевої та гіпурової кислот. Вміст шавлевої кислоти є найбільшим – 9400–36000 мг/л культуральної рідини залежно від доби культивування, що є типовим для представників бурої гнилі і пов'язано з каталітичною активністю ізоцитратліази та малатсинтази, які для дереворуйнівних грибів є, на відміну від бактерій, конститутивними ферментами циклу трикарбонових кислот [24].

Пігменти базидіом *L. sulphureus*, що забезпечують типове забарвлення цього гриба від яскраво-оранжевого до рожевого кольору, є каротиноїдами, які виконують світлозахисну функцію. У складі пігментів *L. sulphureus* виявлено каротиноїдну карбонову кислоту (0,003 мг), яка отримала назву летипорксантин [18] і міститься у пігментах міцелію. Вона входить до ліпофільної фракції оранжево-червоного кольору, яка екстрагується хлороформом, і дає характерну лише для каротиноїдів чітко виражену смугу поглинання в області 450 нм. Загальний вміст каротиноїдів у міцелії *L. sulphureus* досягає 10 мг/г сухої біомаси. Вони представлені трьома різними фракціями у кількісному співвідношенні 6,4:86,7:6,9 [8, 13].

Важливою характеристикою плодкових тіл базидіоміцетів є їхній аромат, який визначається складом летких, у тому числі й фенольних, компонентів. Аромат молодих базидіом *L. sulphureus* визначають 40 речовин. Запахні речовини ароматичного ряду становлять 11,5 % всієї леткої фракції. Головні компоненти, які забезпечують типовий аромат базидіомам *L. sulphureus*, – (Z)-3-метилціннамальдегід, 2-фенілетанол (аромат троянди), бензальдегід (запах гіркого мигдалю), N-фенілетилформамід, 1-октен-3-он, 1-октен-3-ол, 3-метилбутанова, феніл-

оцтова, бузкова, ванілінова, 2,5-діоксибензойна та п-кумарова кислоти [4, 14]. Широкий спектр ароматичних речовин і досить високий для виділення вміст деяких з них роблять базидіоми *L. sulphureus* потенційним джерелом природних ароматних сполук.

Відомо, що фітопатогенні та дереворуйнівні гриби здатні синтезувати в культурі рослинні гормони, такі як гіберелінова й абсцинова кислоти та цитокін зеатин. *L. sulphureus* при культивуванні на відходах оливково-олійного виробництва виявився здатним також накопичувати рослинні гормони. Максимальне накопичення припадало на початок культивування: концентрація гіберелінів становила 0,247 г/мл, абсцинової кислоти – 0,124 мг/мл, зеатину – 18,73 мкг/мл [25].

Ферменти *L. sulphureus*

Важливою фізіолого-біохімічною характеристикою грибів, як і будь-якого біологічного об'єкта, є здатність засвоювати різні субстрати, що забезпечується наявністю ферментів різних груп. Приналежність трутовика сірчано-жовтого до дереворуйнівних грибів визначає наявність у нього целюлолітичного ферментативного комплексу, який дає йому можливість засвоювати сполуки, що входять до складу деревини [26]. З урахуванням того, що основна маса азотвмісних сполук деревини представлена білками, які локалізовані у живих елементах ксилеми, і є основним джерелом азоту, позаклітинні протеолітичні ферменти відіграють важливу роль у життєдіяльності ксилотрофних грибів [27]. Для трутовика сірчано-жовтого було виділено і охарактеризовано цілий ряд ферментів різних класів (табл. 4).

Так, для глюканази, β-глюкозидази і глюкоамілази *L. sulphureus* характерна штамова різноманітність динаміки та синергізм дії, пов'язаний з мультикомпонентністю системи целюлолітичних ферментів, а найбільш сприятливий рівень рН для максимальної активності цього комплексу варіюється в межах від 5,95 до 6,00. Суміш янтарної, глутарової та бутан-1,4-дикарбонової кислот у концентраціях 0,1 і 0,5 % впливає на динаміку гідролітичних ферментів, збільшуючи активність C_x -ендоглюканази і β-глюкозидази для штаму *L. sulphureus* БН-6. Активність β-1,3-1,4-глюканази підсилювалась наявністю у розчині іонів Ni^{2+} , Co^{2+} , Fe^{2+} і Ca^{2+} , а іони Mn^{2+} і Cu^{2+} виступали інгібіторами [28]. Іони міді також виступали інгібітором ен-

Таблиця 4. Характеристика ферментів *L. sulphureus*

Фермент	Джерело отримання	Характеристика					Літературне джерело
		Молекулярна маса, кДа	Субстратна специфічність	Активність	Оптимальна температура, °С	Оптимальний рН	
β -1,3-1,4-глюканаза	Культуральна рідина	52	Ячмінний β -глюкан	29 од/мг білка	75	4,0	[28]
Ендоксилаза	Культуральна рідина	69,3	Ксилан	72,4 од/мг білка	80	3,0	[26]
Мп-пероксидаза	Культуральна рідина	48	Гваякол	2,5 од/мл або 1119,4 од/мг білка	30	4,5	[29]
Лігнінпероксидаза	Культуральна рідина	—	—	1,0 од/мл	—	—	[29]
Аспартильна протеїназа	Культуральна рідина	50	α 1- і β -казеїн	—	—	2,6	[27]
β -D-манозидаза	Базидіома	64	p-нітрофеніл- β -D-манопіраноза	—	—	2,4–3,4	[30]

доксиланази, тоді як наявність у розчині іонів кальцію підвищувала активність цього ферменту [26].

Наявність у трутовика сірчано-жовтого ферментів з комплексу лігноцелюлаз зумовлює його здатність знебарвлювати барвники, утилізувати оброблену міддю, хромом і миш'яком деревину, мінералізувати 2,4,6-тринітротолуол і фенол, розкласти поліциклічні ароматичні сполуки, такі як фенантрен, пірен, бенз[а]пірен, нафталін, флюорен, антрацен, які є небезпечними забрудниками навколишнього середовища [29]. Ці ферменти застосовуються також у виноробстві та пивоварінні для покращення якості напоїв, у тваринництві – для поліпшення засвоюваності кормів, у текстильній промисловості – для пом'якшення волокон натуральних тканин і в сільському господарстві – для переробки його відходів [9, 25, 28].

Термолабільна аспартильна протеїназа *L. sulphureus* за продуктами розкладу α 1- і β -казеїнів подібна до комерційних субстрат-специфічних молокозгортаючих ензимів, що використовуються у сироварінні, але в ній відсутні речовини, що відповідають за терпкуватий смак. А втрата активності при температурі 35 °С і велике відношення молокозгортаючої активності до казеїнолітичної активності (3,113) роблять протеїназу *L. sulphureus* потенційним заміником ферментів з телячого сичуга для створення фібрилярної структури сирів [27].

Біологічна активність і застосування речовин, виділених з *L. sulphureus*

Значна кількість сполук різних класів у *L. sulphureus* забезпечує різні фармакологічні властивості, відомості про які зведено в табл. 5.

З табл. 5 видно, що сірчано-жовтий трутовик проявляв значну антагоністичну активність відносно *S. aureus*, *Bacillus subtilis* (12–14 мм), *Escherichia coli* (12 мм), що пов'язано із сульфуридином, накопичення якого за сухою масою становило 7,6 мг/мл [3]. Виявлено протимікробну активність метанольних екстрактів культуральної рідини *L. sulphureus* відносно *B. subtilis* MB964, *Serratia marcescens* MB252 і *S. aureus* MB5393 [32], антифунгальну активність проти деяких видів дереворуйнівних грибів, таких як *Coniophora cerebella*, *Coriolus versicolor*, *Fomes fomentarius*, *Trametes radiciperda* та до ґрунтового мікроміцета *Trichoderma viride* [17].

Спиртовий і водний екстракти з базидіом *L. sulphureus* проявляли імуномодулюючі властивості, полегшуючи наслідки впливу бактеріального ендотоксину на імунну систему, знижуючи запальний цитокінез фактора некрозу пухлин α -TFN та стимулюючи вивільнення регуляторного інтерлейкіну ІЛ-4 [12]. Культуральна рідина *L. sulphureus* штаму W008T у досліджах зі встановлення часткової активації тромбоцитів, протромбінового та тромбінового часу показала значну тромболітичну активність порівняно з іншими досліджуваними грибами [40].

Таблиця 5. Фармакологічні властивості базидіоміцета *L. sulphureus*

Фармакологічна властивість	Речовина	Літературне джерело
Антибактеріальна дія	Не наведена Сульфуридин	[2, 24, 31–33] [3]
Антидіарейна дія	Не наведена	[34]
Антиоксидантна активність	Ендополісахарид, розгалужений β -1,3-галактоманоглюкан латіпорин А Ксантофіл – кетокаротиноїдна кислота Не наведена	[4] [8] [31, 33]
Антифунгальна дія	Не наведена	[33, 34]
Галюциногенна дія	Алкалоїди: хорденін, N-метилтерамін і терамін Алкалоїд, подібний до рослинного алкалоїду кава	[20] [2]
Гіпоглікемічна активність	Екзополісахариди, глюкан Дигідротраметинова кислота	[21] [23]
Загальнозміцнювальна активність, підвищення опору організму	Не наведена	[35]
Імуностимулююча активність	Протеополісахариди, протеофукан	[22]
Імуномодулююча дія	Не наведена	[36]
Протипухлинна активність: відносно саркоми 180 відносно карциноми Kato III відносно HL-60 клітин мієлоїдної лейкемії	Не наведена Літіробін Протеополісахариди: протеофукан Ергостероли: бензофуран глікозид (машутакезид I), егонол, деметоксиегонол і егонол глюкозид Тритерпеноїди	[37] [38] [22] [15] [37]
Противірусна активність: відносно ВІЛ відносно вірусу звичайного герпесу першого типу	Кислий компонент, що містить аміногрупу Ліпокаротиноїдний комплекс	[39] [8]
Радіопротекторна активність	Ліпокаротиноїдний комплекс	[8]
Тромболітична активність	Не наведена	[40]

Латіпоран А з полісахаридів водорозчинної фракції у дослідях *in vivo* на моделі токсичного ССІ₄-гепатиту щурів проявляв протекторні властивості за рахунок впливу на процеси перекисного окиснення ліпідів, знижуючи концентрації малонового діальдегіду та дієнових кон'югатів до 22,74 і 17,12 % відносно контрольної групи відповідно [4, 11]. Екзополісахариди *L. sulphureus* var. *miniatus* проявляли дозозалежний стимулюючий ефект на проліферацію клітин RINm5F інсуліноми та секрецію інсуліну [21]. Протеїн-полісахариди *L. sulphureus* проявляли у дослідях *in vitro* та *in vivo* цитотоксичну та імуностимулюючу властивості. Так, протеофукан з *L. sulphureus* показав виражену протипухлинну активність, пригнічуючи на 70 % ріст саркоми 180 та подовжуючи тривалість життя піддослідних мишей, що пов'язано зі стимуляцією гуморального імунітету. Для сульфуренової та 15- α -гідрокситраметанової кислот, виді-

лених з *L. sulphureus*, при внутрішньом'язовому введенні мавпам у дозі 3,8 мг/кг ваги тіла встановлено агоністичну активність до рецептора допамін D₂ [22].

Егонол, деметоксиегонол, егонол глюкозид, егонол гентіобіозид, 2-(3,4-дигідроксифеніл)-2,3-дигідро-7-гідроксиметил-5-бензофуран-пропанол і бензофуран глікозид проявили цитотоксичну активність відносно клітин карциноми Kato III. Для егонолу, деметоксиегонолу та егонол глюкозиду було встановлено концентрації, які на 50 % пригнічували ріст карциноми: 28,8, 27,5 і 24,9 мкг/мл відповідно [15].

Ліпокаротиноїдний комплекс *L. sulphureus* M131, отриманий екстракцією етиловим спиртом з міцелію, на метилолеатній окиснювальній моделі та на моделі окиснення лінолевої кислоти показав наявність високоактивних ліпофільних антиоксидантів. Антиоксидантна активність проявлялася для концентрацій екс-

тракту в модельній системі від 0,05 до 10,0 мг/мл за сухими речовинами з оптимумом при 1,0 мг/мл [8]. У дослідях на білих щурах-самцях, при зовнішньому опроміненні 12,0, 3,0 і 1,0 Гр, встановлено радіозахисні та антиоксидантні властивості, на що вказували нормалізація показників перекисного окиснення у плазмі крові, підвищення виживання на 40 % і збільшення тривалості життя у піддослідних тварин при введенні ліпокаротиноїдного екстракту *L. sulphureus* M131. Ліпокаротиноїдний екстракт проявляв і антивірусну активність відносно стійких до ацикловіру та фосфорно-оцтової кислоти варіантів вірусу звичайного герпесу першого типу.

При дослідженні гострої токсичності екстракту ліпокаротиноїдної субстанції загибель лабораторних тварин (білі миші та щури) не спостерігалася, а LD₅₀ встановити не вдалося. Додавання до раціону білих щурів і пташенят-бройлерів ліпокаротиноїдного екстракту в дозах від 0,34 до 3,1 мг/кг маси тіла не змінювало їх клінічного стану. Екстракт мав ростостимулюючу дію. Так, у щурів приріст становив 8–9 %, а у пташенят-бройлерів – 12,5–40 % [8].

Крім лікарського застосування, встановлено можливість використання жовтогарячих пігментів сірчаного-жовтого трутовика як барвників для бавовняних тканин.

Дигідротраметинова кислота з *L. sulphureus* діє подібно до інсуліну в тестах толерантності до глюкози та знижує гіперглікемію у мишей з

неінсулінозалежним діабетом. Так, γ -бутиробетаїн з *L. sulphureus*, як і інші бетаїни, при парентеральному введенні здатен викликати прискорення дихання, клонічні судоми, параліч нервових закінчень і подовження діастолі, виділення слини та розширення зіниць. Циклодепептид беауверин з *L. sulphureus* у концентрації 3,0 мкМ інгібував ацетил СоА:холістерол ацил трансферазу, пригнічуючи на 50 % активність цього ферменту [23].

Висновки

У статті було узагальнено літературні відомості про склад базидіоміцета і міцелію *L. sulphureus*. Для цього базидіоміцета виявлено цілий ряд біологічно активних сполук, таких як полісахариди, каротиноїди, ергостероли, ферменти, рослинні гормони та алкалоїди, які проявляють антибактеріальну, антиоксидантну, гіпоглікемічну, імуностимулюючу, протипухлинну, протівірусну, радіопротекторну та тромболітичну активність. Це визначає можливість використання трутовика сірчаного-жовтого як продуцента речовин, які можуть знайти своє застосування у медицині, харчовій, переробній та інших галузях промисловості.

Подальші дослідження будуть спрямовані на більш детальне вивчення культур для місцевих штамів *L. sulphureus* з метою створення вітчизняних технологій.

1. Christensen M., Bhattarai S., Devkota S., Larsen H.O. Collection and use of wild edible fungi in Nepal // *Economic Botany*. – 2008. – 62, N 1. – P. 12–23.
2. Stamets P. Novel Antimicrobials from mushrooms // *Herbal Gram*. – 2002. – 54. – P. 29–33.
3. Semerdžieva M., Veselý J. Léive houby dríve a nyní – ČSAV. – Praha: Academia, 1986. – 177 s.
4. Агафонова С.В. Изучение химического состава и особенностей накопления биологически активных соединений в плодовых телах *Laetiporus sulphureus* (Bull.: Fr.) Murrill в условиях Прибайкалья: Автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.00.12. – Иркутск, 2007. – 23 с.
5. Маслова Р.А. Рост и развитие некоторых афиллофоровых грибов на различных питательных средах: Автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.101. – Ленинград, 1972. – 25 с.
6. Petrovska B.B. Protein Fraction in Edible Macedonian Mushrooms // *Eur Food Res Technol*. – 2000. – 212. – P. 469–472.
7. Tadeusiak W., Balicka E. Wolne aminokwasy w owocnikach niektórych grzybyw rozkladajacych drewno // *Acta mycologica*. – 1978. – XIV, N 1-2. – P. 151–155.
8. Гвоздкова Т.С., Сорока О.Н., Черноок Т.В., Залашко М.В. Эффективность антиоксидантного действия различных концентраций спиртового экстракта из мицелия каротинсинтезирующего гриба *Laetiporus sulphureus* // *Микробиология и биотехнология XXI столетия: Матер. Междунар. конф., посвященной 100-летию со дня рождения С.А. Самцевича, Минск, 22–24 мая 2002 г.* – Минск, 2002. – С. 24–25.
9. Второва В.Н., Солнцева О.Н., Гордиенко П.В. Микроэлементный состав растений и дереворазрушающих грибов как индикатор состояния дубрав Московского мегаполиса // *Лесоведение*. – 2003. – № 6. – С. 20–27.
10. Doğan H.H., Şanda M.A., Uyanöz R. et al. Contents of metals in Some Wild Mushrooms // *Biological Trace Element Research*. – 2006. – 110. – P. 79–94.

11. Гродзинская А.А. Содержание радиоецезия в дикорастущих лекарственных грибах Украины // Матер. Междунар. науч.-практ. конф. "Перспективы использования лекарственных грибов при решении медико-экологических проблем", Киев, 10–11 сентября 2004 г. – К., 2004. – 84 с.
12. Kanska G., Guillot J., Dusser M. et al. Isolation and Characterization of an N-Acetylglucosamine-Binding Lectin from the Mushroom *Laetiporus sulphureus* // J. Biochem. – 1994. – **116**. – P. 519–523.
13. Davoli P., Mucci A., Schenetti L., Weber R.W.S. Laetiporic acids, a family of non-carotenoid polyene pigments from fruit-bodies and liquid cultures of *Laetiporus sulphureus* (Polyporales, Fungi) // Phytochemistry. – 2005. – **66**. – P. 817–823.
14. Wu S.M., Zorn H., Krings U., Berger R.G. Characteristic volatiles from young and aged fruiting bodies of wild *Polyporus sulphureus* (Bull.: Fr.) Fr. // Agric. Food. Chem. – 2005. – **53**. – P. 4524–4528.
15. Kazuko Yoshikawa, Shinya Bando, Shigenobu Arihara et al. Benzofuran Glycoside and an Acetylenic Acid from the Fungus *Laetiporus sulphureus* var. *miniatus* // Chem. Pharm. Bull. – 2001. – **49**, N 3. – P. 327–329.
16. Руначек В. Биология дереворазрушающих грибов / Пер. с чеш. М. Гашковой. – М.: Лесная промышленность, 1967. – 276 с.
17. Шверина А.Н. Биологически активные вещества высших грибов. – М.; Л.: Наука, 1965. – 197 с.
18. Mishyn L., Gvozdikova T. Steroid compounds from the fungus *Laetiporus sulphureus* (Bull.: Fr) Murr.: recovery and quantitation // Матер. Междунар. науч. конф. "Современное состояние и перспективы развития микробиологии и биотехнологии", Минск, 26–28 мая 2004 г. – Минск, 2004. – С. 265–267.
19. Капич А.Н., Шишкина Л.Н. Фосфолипиды мицелия дереворазрушающих базидиомицетов // Микология и фитопатология. – 1993. – **27**, № 3. – С. 32–37.
20. Appleton R.E., Jan J.E., Kroeger P.D. *Laetiporus sulphureus* causing visual hallucination and ataxia in child // Can. Med. Assoc. J. – 1988. – **139**. – P. 48–49.
21. Hwang H.S., Yun J.W. Hypoglycemic effect of polysaccharides produced by submerged mycelial culture of *Laetiporus sulphureus* on streptozotocin-induced diabetic rats // Biotechnology and Bioprocess Engineering. – 2010. – **15**. – P. 173–181.
22. Kang C.Y., Lee C.O., Chung K.S. et al. Antitumor Component of *Laetiporus sulphureus* and its Immunostimulating Activity // Arch. Pharm. Res. – 1982. – **5**, N 2. – P. 39–43.
23. Lindequist U., Niedermeyer T.H.J., Jylich W.-D. The Pharmacological Potential of Mushrooms (Review) // CAM. – 2005. – **2**, N 3. – P. 285–299.
24. Ефременкова О.В., Тихонова О.В., Еришова Е.Ю. и др. Антимикробные свойства базидиального гриба *Laetiporus sulphureus* в условиях глубинного культивирования // Успехи медицинской микологии: Матер. IV Всерос. конгресса по мед. микологии. – М.: Нац. академия микологии, 2006. – Т. 7. – С. 280–282.
25. Özcan B., Topçuoğlu S.F. GA₃, ABA and cytokinin production by *Lentinus tigrinus* and *Laetiporus sulphureus* fungi cultured in the medium of olive oil mill waste // Turk J. Biol. – 2001. – **25**. – P. 453–462.
26. Jae-Won Lee, Jun-Yeong Park, Mi Kwon, In-Gyu Choi. Purification and characterization of a thermostable xylanase from the brown-rot fungus *Laetiporus sulphureus* // J. of Bioscience and Bioengineering. – 2009. – **107**, Is. 1. – P. 33–37.
27. Kobayashi H., Kim H. Characterization of aspartic proteinase from Basidiomycetes, *Laetiporus sulphureus* // Food Sci. Technol. Res. – 2003. – **9**, N 1. – P. 30–34.
28. Hong Mi-Ri, Yeong-Su Kim, Ah-Reum Joo et al. Purification and characterization of a thermostable β-1,3-1,4 Glucanase from *Laetiporus sulphureus* var. *miniatus* // J. Microbiol. Biotechnol. – 2009. – **19**, N 8. – P. 818–822.
29. Mtui G., Masalu R. Extracellular enzymes from brown-rot fungus *Laetiporus sulphureus* isolated from mangrove forests of coastal Tanzania // Scientific Research and Essay. – 2008. – **3**, N 4. – P. 154–161.
30. Wan C.C., Muldrey J.E., Li S.C., Li Y.T. Beta-Mannosidase from the mushroom *Polyporus sulphureus* // JBC. – 1976. – **251**, Is. 14. – P. 4384–4388.
31. Karaman M., Jovin E., Malbala R. et al. Medicinal end edible lignicolous fungi as natural sources of antioxidative and antibacterial agenyus // Phytotherapy research. – 2010. – **24**. – P. 1473–1481.
32. Suay I., Arenal F., Asensio F.J. et al. Screening of basidiomycetes for antimicrobial activities // Antonie van Leeuwenhoek. – 2000. – **78**. – P. 129–139.
33. Turkoglu A., Duru M.E., Mercan N. et al. Antioxidant and antimicrobial activities of *Laetiporus sulphureus* (Bull.) Murrill // Food Chemistry. – 2007. – **101**, Is. 1. – P. 267–273.
34. Бадалян С.М. Основные группы и терапевтическая значимость биоактивных метаболитов, образуемых макромицетами // Пробл. мед. микологии. – 2000. – **3**, № 1. – С. 16–23.
35. Денисова Н.П. Лечебные свойства грибов: Этномикол. очерк. – СПб: Изд-во СПбГМУ, 1998. – 60 с.
36. Koch J., Witt S., Lindequist U. The influence of Selected Higher Basidiomycetes on the Binding of Lipopolysaccharide to CD14+ Cells and on the Release of Cytokines // Intern. J. of Medicinal Mushrooms. – 2002. – **4**. – P. 229–235.
37. Shen Q., Chen W., Yan Z., Xie Z. Potential pharmaceutical resours of the Qinling Mountain in central China: medicinal fungi // Front. Biol. China. – 2009. – **4**, N 1. – P. 89–93.

38. *Lear M.J., Simon O., Foley T.L. et al.* Laetirobin from the Parasitic Growth of *Laetiporus sulphureus* on *Robinia pseudoacacia* // J. Nat. Prod. – 2009. – **72**, N 11. – P. 1980–1987.
39. *Mlinarič A., Kac J., Pohleven F.* Screening of selected wood-damaging fungi for the HIV-1 reverse transcriptase inhibitors // Acta Pharm. – 2005. – **55**. – P. 69–79.
40. *Tokumitsu Okamura, Tomomi Takeno, Shoko Fukuda et al.* Cultural characteristics of *Laetiporus sulphureus*, producing an anti-thrombin substance // Bull. Mukogawa Women's Univ. Nat. Sci. – 2000. – **48**. – P. 65–68.

Рекомендована Радою
факультету біотехнології і біотехніки
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
18 лютого 2011 року