

**Н.Л. Поєдинок¹, А.М. Негрійко², Н.А. Бісько¹,
О.Б. Михайлова¹, В.М. Ходаковський², Ж.В. Потьомкіна²**

¹ Інститут ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України, Київ

² Інститут фізики НАН України, Київ

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ СИСТЕМИ ШТУЧНОГО ОСВІТЛЕННЯ У ТЕХНОЛОГІЯХ ВИРОЩУВАННЯ ЇСТІВНИХ ТА ЛІКАРСЬКИХ ГРИБІВ



Розроблено науково-обґрунтовані методи інтенсифікації технологічних етапів культивування їстівних та лікарських грибів, що базуються на застосуванні енергоефективних систем штучного освітлення на основі твердотільних світлодіодних джерел світла.

Ключові слова: їстівні та лікарські гриби, біосинтетична активність, штучне освітлення, твердотільні світлодіоди, спектр випромінювання, матриці світловипромінювальних діодів.

СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ОСВІТЛЕННЯ ДЛЯ РЕГУЛЮВАННЯ РОСТУ І МОРФОГЕНЕЗУ ГРИБІВ

Шапінкові гриби розглядаються на даний час не лише як цінний харчовий продукт, але і як важливе джерело одержання природних фармакологічних речовин онкостатичної, антивірусної, імуномодулюючої, антисклеротичної, тонізуючої та ін. дій [1–3]. Останні два десятиріччя характеризуються інтенсивними дослідженнями біохімічного складу і лікувальних властивостей шапінкових грибів. На основі цих грибів фірми (переважно зарубіжні) виробляють низку нутрицевтиків, лікарських і косметичних препаратів [4].

Світло є одним із важливих чинників росту й морфогенезу багатьох видів грибів. Як і температурний режим та вологість, світло належить до екологічних факторів, що впливають на їх життєдіяльність. Встановлено, що різні

види грибів (у т.ч. й макроміцети), які були об'єктом наших досліджень протягом останніх років, по-різному реагують на дію електромагнітного випромінювання різного спектрального складу. Механізми фоторецепції грибів останнім часом є предметом інтенсивних досліджень. Проте практичне використання світла з метою інтенсифікації біотехнологічних процесів, зокрема при вирощуванні їстівних і лікарських грибів, на сьогодні є, безумовно, реальним і ефективним завдяки встановленим раніше емпіричним закономірностям стимулювання росту і біологічної активності грибних культур.

У сучасних інтенсивних технологіях тепличного рослинництва як найбільш досконалі джерела фотосинтетично активного випромінювання застосовуються натрієві лампи високого тиску, у спектрі випромінювання яких практично повністю відсутня складова у важливому для розвитку організмів діапазоні 400–500 нм. Значний розвиток технологій світловипромінювальних діодів призвів до створення освітлювальних джерел нового покоління. З ними ви-

робники пов'язують перспективи з точки зору як енергоефективності, так і затратності та практичного застосування (в Україні подібні джерела розробляються у рамках Державної цільової науково-технічної програми «Розробка і впровадження енергозберігаючих світлодіодних джерел світла та освітлювальних систем на їх основі»). До переваг світлодіодних джерел (висока світлова віддача та тривалий строк використання) відноситься і можливість керування спектральним складом випромінювання без застосування додаткових світлофільтрів. Це особливо важливо при застосуванні їх у інтенсивних технологіях вирощування грибів, для яких на відміну від рослин з відомими спектрами фотосинтетично активного світла спектри дії достатньо не вивчені.

Прогрес у розвитку технології світловипромінюючих діодів зробив можливим реалізацію освітлювальних систем для інтенсивних агротехнічних технологій з добре визначеними спектральним складом та точним контролем інтенсивності випромінювання. Так, з використанням світлодіодів видимого діапазону досліджувався вплив світла на міцелій *Coprinopsis cinereus* [5]. Встановлено, що пригнічення фази росту синім світлом залежить від його інтенсивності, тоді як червоне і далеке червоне світло незалежно від інтенсивності не впливає на фази росту. Спектральні чутливості процесів фотоіндукування утворення примордій, фотопригнічення розвитку примордій і фотодозрівання примордій доволі схожі, тому можна припустити, що при морфогенезі плодових тіл діють спільні фоторецептори. Спектри дії для фотоінгібіторного ефекту були досліджені у ділянці спектра 407–690 нм. Найбільш ефективною виявилася синя ділянка спектра (445 нм). Довжини хвиль, більші за 510 нм, були мало ефективними. Загальна форма цього спектра дії була схожа на спектр, одержаний для багатьох типів реакцій на синє світло, в яких фоторецептором вважався флавопреїн. Хоча застосовані в роботі методи аналізу не дають можливості реєструвати швидкі індуковані світлом

трансформації, результати можуть бути важливими для розуміння реакції грибів на синє світло, і ця нова інформація може служити основою для подальших досліджень, спрямованих на покращення культивування грибів.

Як перспективний природний екологічно чистий регуляторний фактор світло у видимій частині спектра використовують у біотехнології глибокого культивування міцеліальних грибів, наприклад роду *Aspergillus* (Російський хіміко-технологічний університет) [6]. Встановлено, що світло довжиною хвиль 650 і 530 нм суттєво впливає на утворення регуляторів росту та інтенсивність ростових процесів грибів цього роду, а також є модифікатором ліпідного і вуглеводного складу грибних спор. Зміни, спричинені світлом, мають пролонговану дію і можуть передаватися на подальшу онтогенетичну стадію від спор до міцелію. У вегетативному міцелії, що сформувався із модифікованих спор під дією світла, також зберігається здатність до прискореного росту, спостерігається зміна у вуглеводному і ліпідному складі, а отже у складі і активності ферментів, що мають безпосереднє відношення до метаболізму. Крім того, змінювалась активність екзоферментів, зокрема целюлозолітичного комплексу. Показово, що характер біохімічних змін у клітинах грибів залежить як від довжини хвилі, так і від інтенсивності освітлення, причому зниження інтенсивності світла до певної міри супроводжувалося посиленням його регуляторної дії. Отже, варіюючи параметри освітлення, можна одержати спори заданої якості.

Таким чином, результати численних досліджень дозволяють говорити про можливість реалізації високоефективних біотехнологій, що базуються на використанні штучного освітлення для отримання культур з високою біологічною активністю, підвищеним клітинним і позаклітинним вмістом цінних біологічних продуктів. Практично використання світла в біотехнологічних процесах можливе навіть за відсутності загальноновизнаних висновків щодо механізмів дії світла, але за умов ретельного

дослідження спектра дії, найефективніших довжин хвиль, режимів опромінювання (інтенсивності, дози, геометрії дослідів, поляризації і т.п.). Відсутність таких відомостей про той чи інший біологічний об'єкт, а також відсутність розробок, що враховують специфіку сучасних методів керованого культивування і отримання продуктів біосинтезу в лабораторних і промислових умовах, є істотною перешкодою на шляху розробки і впровадження таких технологій.

ВПЛИВ СВІТЛА НА МОРФОГЕНЕЗ І МЕТАБОЛІЗМ ГРИБІВ

У грибів можна виділити три світлочутливі системи на молекулярному рівні [7]. Чутливість до синього світла забезпечується фоторецептором на основі флавіну, який сам діє як передаючий чинник. Чутливість до червоного світла реалізується за допомогою фітохрому — молекули, яка донедавна вважалася складовою тільки фотосинтезуючих організмів. Відкрито опсинові системи на основі ретиналу, біологічні функції яких ще потребують з'ясування. Поглиблене дослідження світлової дії на гриби призвело до відкриття мікохромних систем у представників різних таксономічних груп: аскоміцетів, базидіоміцетів, дейтероміцетів. Переважне число грибів, у яких встановлено наявність мікохромних систем, мають каротиноїдні та меланінові пігменти. Вказані пігменти тісно пов'язані з клітинною мембраною і здатні зворотно окислюватися і відновлюватися [8].

Важливі дані щодо впливу світла на розвиток грибів одержано порівняно недавно, зокрема щодо виявлення генів, відповідальних за реакцію грибів на світло. Так, у 2006 р. Л.М. Горочано і П. Голандом було вивчено особливості регулювання світлом розвитку грибів [9]. Було виявлено, що найефективнішим з точки зору впливу на фотоморфогенез грибів є синє світло, яке також може активізувати метаболізм грибів або безпосередньо впливати на ріст грибних структур. Важливим, але до кінця не вив-

ченим є питання про фоторецептори, відповідальні за реакцію гриба на світло. Фоторецепторами є молекули, які поглинають фотони за допомогою спеціалізованих поглинаючих світло хромофорів і передають енергію фотона в клітину, спричиняючи відповідну реакцію. Описано кілька видів фоторецепторів [10,11]. Виділення та характеристика фоторецепторів грибів започаткована виділенням генів *Neurospora* WC-1 WC-2 [12, 13]. Гени, схожі на WC-1 і WC-2, були ідентифіковані в геномах деяких аскоміцетів, базидіоміцетів та зигоміцетів і багато з цих генів необхідні для фотовідгуку грибів на світло. Є думка, що WC-комплекси виникли на ранніх стадіях еволюції грибів для регулювання їх фотовідгуку як фоторецептори і транскрипційні фактори. Крім цього, дослідження геномів грибів дало змогу ідентифікувати ще деякі фоторецепторні гени. Деякі з них досить неочікувані, на зразок чутливих до червоного світла фоторецепторів, фітохромів, на доповнення до поглинаючих синє світло криптохромів і родопсинів [14, 15].

Розвиток шапинкових грибів потребує відповідного циклу *світло—темрява*. І ця світлозалежна регуляція розвитку була детально досліджена у базидіоміцета *Coprinopsis sinerea* [15]. У цій роботі узагальнено результати щодо впливу світла на розвиток виду *C. sinerea*. Сьогодні дослідження фотобіології грибів викликають значний інтерес. Білки на зразок WC-1 і WC-2 ідентифіковані у більшості грибів і багато з них необхідні для пояснення чутливості до світла. Крім того, більшість геномів грибів містять гени інших фоторецепторів, але їх роль у клітинах грибів значною мірою залишається не з'ясованою. Засідання групи «Фотобіологія грибів» на 90-му Міжнародному екологічному конгресі в Единбурзі у серпні 2010 р. сприяло розвитку уявлень щодо сучасного стану фоторецепторів і фотовідгуків грибів. Учасники конгресу запропонували нові напрямки дослідження і співробітництва [16]. Зауважимо, що порівняно недавно була здійснена ідентифікація фотовідгуку генів на синє

світло в міцелії гриба гливи звичайної (*Pleurotus ostreatus*) [17].

Впливу світла на ріст і розвиток шапинкових грибів присвячено велику кількість досліджень і опубліковано низку оглядових праць [7–11, 18–35].

ТВЕРДОТІЛЬНІ СВІТЛОВИПРОМІНЮЮЧІ ДІОДИ У СИСТЕМАХ ШТУЧНОГО ОСВІТЛЕННЯ

У видимій ділянці сонячного спектра можна виділити три основні області, важливі для процесів фотосинтезу, фототропізму і фотоморфогенезу. Для фотосинтезу важливою є ділянка спектра в межах піків поглинання хлорофілів *a* і *b* (близько 662 і 642 нм відповідно), які є найбільш важливими фотосинтетичними пігментами. Фототропні процеси, що керують рухом органів рослин і оптимізують біофізичні і біохімічні реакції, запускаються світлом з довжинами хвиль в області 400–500 нм. Нарешті, морфогенез рослин, який включає процеси синтезу пігментів зорового росту, визначається випромінюванням у далекій червоній області 730–735 нм.

У освітлювальних системах штучного освітлення ефективна генерація світла з необхідними довжинами хвиль забезпечується використанням трьох класів матеріалів на основі напівпровідників III–V груп, а саме AlGaAs, AlGaInP, AlInGaN [36].

Прямозонні $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ добре підходять для напівпровідникових гетероструктур, які використовуються у світлодіодах (далі – англійська аббревіатура LED – *Light-Emitting Diode*), завдяки узгодженню параметрів ґратки зі сплавами різного складу. Структури виготовляються відносно недорогим методом рідкофазної епітаксії і перекривають область довжин хвиль від 870 нм ($x = 0$) до 624 нм ($x = 0,45$). Сплав з алюмінієвою молярною фракцією $x > 0,2$ є найкращим матеріалом для активного шару LED з подвійною гетероструктурою на 730 нм та світловою ефективністю більше 20 %, який є відносно недорогим. Однак при зменшенні довжини хвилі менше 700 нм ефективність випромінювальної рекомбінації в AlGaAs змен-

шується завдяки впливу непрямих переходів. Оскільки чутливість людського ока в червоній області зі зменшенням довжини хвилі зростає, світлова ефективність світлодіодів цього класу має пік в області 660 нм. Саме це пояснює масовий випуск LED на 660 нм в основному для візуалізації та сигнальних застосувань. Завдяки узгодженню спектра з піком поглинання хлорофілу ці LED були першими застосовані для культивування рослин у 1991 р. [37]. Однак випромінювальна ефективність на 660 нм LED на AlGaAs обмежена величиною 21 % і є нижче 15 % для комерційних приладів. Крім того, сплави AlGaAs з високим вмістом алюмінію мають схильність до прискореного старіння. Технологія відносно недорогої рідкофазної епітаксії не забезпечує достатнього видалення кисню, тоді як алюміній схильний до утворення багатих на кисень сполук шляхом гідролізу. Деградація цих матеріалів підсилюється за умов високих температур і вологості, що накладає обмеження на теплові режими для LEDів і, відповідно, для застосування у тепличному господарстві. У поєднанні з температурно-індукованим заселенням непрямих зон це позбавляє перспективи створення високопотужних одночіпових AlGaAs LEDів для 660 нм.

Альтернативою для фотосинтетично важливих довжин хвиль є система, яка базується на матеріалі AlGaInP. Прямозонний $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{P}$ сплав, у якого ґратка узгоджується з GaP незалежно від молярної фракції *x*-алюмінію, є добрим матеріалом для активних шарів LED, котрі випромінюють в області від 652 нм ($x = 0$) до 580 нм ($x = 0,4$). Хоча ефективність випромінювальної рекомбінації в цьому матеріалі також залежить від присутності непрямой зони, цей ефект набагато менший і менш температурно чутливий у сплаві AlGaInP з малим вмістом алюмінію, ніж AlGaAs, який випромінює на 660 нм. Структури AlGaInP виготовляються з використанням металоорганічного хімічного наплення з парової фази, що є більш прогресивною технологією з точки зору контролю вмісту матеріалу у порівнянні з рідкофаз-

ною епітаксією, яка використовується для вирощування структури AlGaAs. Ці переваги системи AlGaInP забезпечують роботу LED у режимі високої потужності, зменшуючи таким чином ціну як приладів, так і самої системи. Одночіповий LED на GaInP (652 нм) потужністю 1 Вт вже демонструвався і показав рекордну квантову ефективність — більшу за 50 %. На час написання статті високопотужні LED з довжиною хвилі більше 640 нм випускаються масово, в основному для застосування у візуалізації, оскільки вони мають найвищу світлову ефективність у червоній області. Зсув піка довжини на 652 нм технологічно простий. Більш того, це бажано через більш високу випромінювальну ефективність і меншу температурну чутливість цих LED. Можливим недоліком LED-системи AlGaInP в фотосинтетичних застосуваннях є те, що основна доля випромінювання поглинається хлорофілом *b*, що може порушити природний баланс хлорофілів у рослинах.

Нарешті, найбільш досконаліми і ефективними з точки зору вартості компонентів систем штучного освітлення рослин, що забезпечують генерацію синього випромінювання, є світлодіоди AlGaInN, які почали використовуватися в культивуванні рослин починаючи від 1994 р. Нітридні LED-структури наносяться на сапфір способом металоорганічного хімічного напылення з парової фази і вже продемонстрували випромінювальну ефективність більше ніж 40 %. Вони мають низьку температурну чутливість і в них не проявляється вплив населеності непрямих зон. Це робить системи на основі матеріалів AlGaInN привабливими для застосування у потужних LED. Такі LED з потужністю до 5 Вт вже є у продажу. Теоретично довжини хвиль генерації в AlGaInN потенційно можуть перекривати область від 200 нм (AlN) до 1,5 мкм (InN). Проте через проблеми з якістю матеріалів серійні високопотужні нітридні LED випромінюють у спектральній області лише від ближньої УФ-області до зеленої області спектра. Сині нітридні LED мають потенціал для подальшого збільшення потуж-

ності і зменшення ціни, оскільки вони складають базу для LED-технологій білого світла, яка енергійно розробляється для широкого застосування.

У рамках науково-технічного проекту «Розробка та підготовка до впровадження інтенсивної технології вирощування їстівних та лікарських грибів на основі енергоефективних систем штучного освітлення» розроблялась інтенсивна технологія культивування цінних їстівних грибів, що мають лікарські властивості, з використанням систем штучного освітлення на основі матриць світловипромінювальних діодів для застосування у промисловому та приватному секторах виробництва і наукових досліджень.

ВПЛИВ ШТУЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА БІОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ЇСТІВНИХ ТА ЛІКАРСЬКИХ МАКРОМІЦЕТІВ

Дію низькоінтенсивного опромінювання видимого діапазону на ріст і розвиток базидіоміцетів досі вивчено не достатньо.

Ми провели спеціальні дослідження впливу низькоінтенсивного випромінювання оптичного діапазону на ріст і розвиток шапінкових грибів. Наведемо результати досліджень дії лазерного опромінювання на проростання базидіоспор і ріст моноспорних ізолятів цінного їстівного гриба *Hericium erinaceus* [23, 24].

Як показали наші дослідження, відсоток проростання базидіоспор суттєво відрізняється для різних штамів з числа досліджуваних. Ця різниця для деяких з них досягає кількох порядків (9,6 % для He-13 і $1,4 \cdot 10^{-4}$ % для He-6). Спори проростали на 3–7-у добу, а повітряний міцелій утворювався через 8–12 діб. Таким чином, припустимо, що ці ознаки можна вважати штамоспецифічними.

Як відомо, низькоінтенсивне опромінення з довжиною хвилі 632,8 нм справляло стимулюючу дію на деякі організми. Тому ми досліджували вплив такого світла на проростання базидіоспор трьох штамів *H. erinaceus* (He-1, He-6 та He-13), які суттєво відрізняються за цим

показником. Споривий порошок, отриманий з плодкових тіл цих штамів, опромінювали лазерним світлом з довжиною хвилі 632,8 нм у дозах 45, 230 і 650 мДж/см². Можна констатувати (табл. 1), що лазерне опромінювання в дозах 45–230 мДж/см² активізувало процес проростання спор у штама He-13 приблизно в 10 разів, у штама He-6 — в 100, у He-1 — в 10⁵. При цьому дія опромінювання була тим ефективнішою, чим нижчим був початковий відсоток проростання спор. Крім збільшення відсотку проростання було виявлено також скорочення часу проростання опромінених спор і формування повітряного міцелію на агаризованому середовищі порівняно з початковими показниками у досліджених штамів. У 50-ти моноспоривих

ізолятів штаму He-13, отриманих із базидіоспор і опромінених, вивчали динаміку росту. Отримані результати дають підставу стверджувати, що така обробка дає можливість втричі збільшити швидкість росту культур, що має важливе значення у селекційній роботі.

Проведено дослідження впливу світла різної довжини хвилі на морфогенез різних видів їстівних і лікарських грибів, зокрема *Pleurotus ostereatus*, *Lentinus edodes* та *Hericium erinaceus* на різних за складом рослинних субстратах і агаризованих живильних середовищах [24, 25]. У досліді контролювали швидкість обростання субстрату, процес формування примордіїв, кількість і габітус плодкових тіл, їхню врожайність, динаміку плодоношення.

Таблиця 1

Вплив випромінювання (660 нм) на проростання базидіоспор *H. erinaceus*

Штам	Проростання базидіоспор							
	72-а година				96-а година			
	Без опромінювання	45 мДж/см ²	230 мДж/см ²	650 мДж/см ²	Без опромінювання	45 мДж/см ²	230 мДж/см ²	650 мДж/см ²
He-1	0	1,6	8,6	0	$0,9 \cdot 10^{-6}$	2,75	11,42	0
He-6	0	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$6,6 \cdot 10^{-6}$	0	$0,6 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$0,8 \cdot 10^{-2}$	0
He-13	9,6	13	36	0	13,6	82	98	0

Таблиця 2

Характеристика плодоношення контрольних і опромінених штамів

Варіанти дослідів	Середня кількість плодкових тіл на блок, шт.	Середня маса плодового тіла, г	Питома вага плодкових тіл, г/см ³	Початок плодоношення після інокуляції, доба	Врожайність, %
<i>Lentinus edodes</i>					
Контроль	16	20,00 ± 0,09	3,0 ± 0,06	180	16,0 ± 2,2
зелене світло	22	22,12 ± 0,10	3,2 ± 0,08	170	23,2 ± 2,8
червоне світло	23	23,18 ± 0,12	3,3 ± 0,07	150	24,5 ± 1,6
<i>Pleurotus ostereatus</i>					
Контроль	46	8,00 ± 0,40	3,0 ± 0,09	30	18,4 ± 1,8
зелене світло	55	9,61 ± 0,71	3,4 ± 0,24	26	24,9 ± 2,9
червоне світло	52	10,00 ± 0,73	3,6 ± 0,16	24	26,0 ± 3,6
<i>Hericium erinaceus</i>					
Контроль	10	30,16 ± 3,80	2,8 ± 0,20	47	15,0 ± 3,0
зелене світло	8	49,86 ± 5,63	4,1 ± 5,13	36	20,6 ± 1,9
червоне світло	8	56,66 ± 4,93	3,8 ± 0,42	33	22,4 ± 2,6

Через 120–130 днів інкубування *L. edodes* на агаризованому середовищі на опроміненому міцелії починали формуватися примордії. У контролі протягом 160 діб спостережень формування плодових тіл не спостерігалось. Після опромінення червоним світлом утворення примордіїв починалося на 7–10 днів раніше, ніж після опромінення в зеленому спектрі, і кількість їх була значно більшою. Повне обростання субстратних блоків, інокульованих опроміненним вегетативним міцелієм базидіальних макроміцетів *Pleurotus ostreatus*, *Lentinus edodes* та *Hericium erinaceus*, відбувається на 10–20 діб швидше, ніж у контролі. Плодоношення в цих варіантах досліджу також починалось на 10–30 днів раніше. Збільшення врожайності порівняно з контролем складало 51 % – при опроміненні в червоному спектрі і 49 % – при опроміненні в зеленому спектрі (табл. 2).

Аналізуючи плодоношення контрольного й опроміненого штамів *Lentinus edodes*, можна відзначити, що опромінення зернового інокулюма у досліджених режимах індукує формування більшої кількості плодових тіл, трохи збільшується їхня маса і питома вага.

Вивчення динаміки плодоношення *L. edodes*, *P. ostreatus* і *H. erinaceus* у різних варіантах досліджу показало, що опромінення сприяє скороченню періоду, що передує плодоношенню, і тер-

мінів плодоношення. При цьому відбувається значне збільшення врожайності плодових тіл. Усе перераховане вище, безсумнівно, може мати практичне значення при промисловому культивуванні цих цінних видів їстівних грибів з лікувальними властивостями.

РОЗРОБКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ СИСТЕМ ШТУЧНОГО ОСВІТЛЕННЯ НА ОСНОВІ ТВЕРДОТІЛЬНИХ СВІТЛОВИПРОМІНЮЮЧИХ ДІОДІВ ДЛЯ ВІДПРАЦЮВАННЯ ІНТЕНСИВНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОЩУВАННЯ ЇСТИВНИХ ТА ЛІКАРСЬКИХ ГРИБІВ

З урахуванням вищезазначених принципів створення установок штучного освітлення для застосування у рослинництві, а також на основі відомих даних про фоточутливість грибів була розроблена схема формування світлового потоку із заданими параметрами за допомогою високоінтенсивних світлодіодів.

Установка включає світловипромінювальну панель з матрицями світлодіодів, систему охолодження із світловідбиваючими поверхнями, блоки живлення світлодіодів та блоки керування.

Матриця фотодіодів формувалася з 21-го потужного світлодіода на основі AlGaInN, світлодіода типу YSH-FRGBB-IA виробництва компанії China Young Sun Led Technology Ltd. Кожний діодний блок мав три світловипроби-

Таблиця 3

Розрахункові параметри освітлювальної системи

Параметр	Довжина хвилі 463 нм	Довжина хвилі 522 нм	Довжина хвилі 625 нм
Енергія фотона, Дж · 10 ⁻¹⁹	4,3	3,8	3,2
Значення функції видимості	0,06	0,8	0,3
К-ть діодів	21	21	21
Світловий потік від одного діода, лм	13	57	35
Світлова потужність діода, Вт	0,32	0,10	0,17
Сумарний потік від усіх діодів, лм	273	1197	735
Освітленість, лк (лм/м ²)	1300	5700	3500
Інтенсивність світла на поверхні, Вт/м ²	32	10	17
Густина потоку фотонів, фотон/м ² с	7,4E + 19	2,7E + 19	5,4E + 19
Густина потоку фотонів, мкЕс/м ² с	122	45	90

новальних мікрочіпи, які випромінюють світло з довжинами хвиль 463 нм (синє), 522 нм (зелене) та 625 нм (червоне). Електрична потужність кожного мікрочіпа складала 1 Вт, інтенсивність випромінювання регулювалася від нуля до максимального значення незалежно для кожного спектрального діапазону, тобто окремо для синього, зеленого та червоного світла регулюванням сили струму через діоди. На основі вибраних світловипромінювальних діодів розрахована та сконструйована світловипромінювальна панель, яка є основним елементом освітлювальної системи (див. рисунок).

Панель вибиралася розміром 350 × 700 мм, що дає можливість розмістити за необхідності десять чашок Петрі з матеріалами для опромінення світлом з різними довжинами хвиль. На панелі вмонтовано 21 світлодіод з незалежним регулюванням потужності по кожному з трьох спектральних каналів (синьому, зеленому, червоному), блок баластних резисторів та вентилятор системи повітряного охолодження світловипромінювальних діодів. Регулювання інтенсивності світла здійснювали за допомогою виносного блоку регулювання. Блоки живлення розташовували на бічній панелі освітлювальної системи.



Освітлювальна система

Матеріал для опромінення розташовували у контейнерах або насипом на скляній полиці під світловипромінювальною панеллю. За необхідності опромінення матеріалу у суспензії крізь дно колб система встановлюється так, що світловипромінювальна панель розташовується внизу, а колби з рідкими зразками на скляній полиці поставлені таким чином, що світло падає на них знизу. Розрахункові параметри освітлювальної системи наведені у табл. 3.

Таблиця 4

Динаміка плодоношення *Pleurotus ostreatus* шт. 431 на соломі за умови внесення різних доз опроміненого і неопроміненого інокулюма

Кількість посівного міцелію від маси субстрату, %	Врожайність, %									Усього
	Доба після інокуляції									
	20	27	34	41	48	55	62	69	76	
5	Інокуляція неопроміненим міцелієм									20,6
	10,4	2,4	0,4	0,2	4,5	2,6	0,1	*	*	
2,5	1,6	7,2	1,2	1,5	0,1	3,7	1,3	0,2	*	18,4
1,2	*	2,5	7,5	1,0	0,1	0,3	4,3	1,2	0,1	16,9
5	Інокуляція міцелієм опроміненим червоним світлом									29,5
	14,0	2,8	0,8	0,5	8,0	3,2	0,2	*	*	
2,5	9,6	4,0	1,2	0,1	0,6	8,3	4,0	0,3	*	27,9
1,2	*	8,3	6,0	2,0	0,1	0,2	6,3	3,7	0,5	27,1

Примітка. * — плодові тіла відсутні.

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОМИСЛОВОГО КУЛЬТИВУВАННЯ ГЛИВИ ЗВИЧАЙНОЇ І ПЕЧЕРИЦІ ДВОСПОРОВОЇ НА ОСНОВІ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ СИСТЕМ ШТУЧНОГО ОСВІТЛЕННЯ

Одним із завдань наших досліджень був пошук шляхів інтенсифікації технологічного процесу культивування *Pleurotus ostreatus* за рахунок збільшення фізіологічної активності посівного міцелію. Робота проводилась із штамом 431, який застосовується в промисловому грибовництві України.

Вивчення характеру обростання субстрату, інокульованого різними дозами опроміненого і неопроміненого міцелію *P. ostreatus*, дало можливість установити, що при однаковому внесенні опроміненого і неопроміненого міцелію повне обростання субстрату в першому варіанті відбувається на кілька днів раніше, ніж при інокуляції неопроміненним посівним матеріалом. Опромінення посівного міцелію *P. ostreatus* червоним світлом дозволяє знизити дози його внесення в субстрат як мінімум у 2 рази. При використанні опроміненого посівного матеріалу скорочується час обростання субстрату; утворення примордіїв відбувається значно раніше; спостерігається дружне плодоношення; врожайність збільшується (табл. 4).

Досліджено вплив світла з довжиною хвилі 660 нм на активність посівного міцелію печериці двоспорової. Збільшення врожайності після світлової обробки інокулюма складало 10 %. При зменшенні дози опроміненого міцелію при інокуляції компосту процеси обростання субстрату і плодоношення були, практично, такими ж, як і при внесенні стандартної дози опроміненого міцелію. Таким чином, передпосівна обробка зернового міцелію печериці двоспорової світлом дозволяє не лише (як мінімум у 2 рази) знизити кількість посівного міцелію, внесеного в субстрат, але при цьому ще й збільшити врожайність плодівих тіл на 10 %. Крім того, помічено зростання кількості плодівих тіл гриба першого сорту на 18,0 % при інокуляції компосту стандартною дозою опроміне-

ного міцелію і на 8,6 % при інокуляції половинною стандартної дози опроміненого міцелію.

Таким чином, світловий фактор може виступати як стимулятор біологічної активності міцелію не лише для грибів, для яких світло необхідне при формуванні плодівих тіл, але і для *A. bisporus*, який може розвиватися в повній темряві. Отримані нами результати свідчать про доцільність використання світла в технологіях культивування їстівних і лікарських макроміцетів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Chang S.T., Miles Ph.G. Mushrooms. Cultivation, nutritional value, Medicinal effect and Environmental impact. CRC Press, London, New-York, Washington. — 2004. — 451 p.
2. Wasser S.P., Sytnik K.M., Buchalo A.S., Solomko E.F. Medicinal mushrooms: past, present and future // Укр. ботан. журн. — 2002. — 59, № 5. — P. 499–524.
3. Dai Yu-Ch., Yang Zh-L., Cui B-K., Yu Ch-J. Species diversity and utilization of medicinal mushrooms and fungi in China (review) // Inter. J. Med. Mushr. — 2009. — 11, N 3. — P. 287–302.
4. Ikekava T. Beneficial effects on edible and medicinal mushrooms on health care // Inter. J. Med. Mushr. — 2001. — 3, N 4. — P. 291–398.
5. Laringuet P and Dunand C. Plant Photoreceptors: Phylogenetic Overview // J. Mol. Evol. — 2005. — 61. — P. 559–569.
6. Горюнова И.Б. Использование видимого света в биотехнологии / 1 съезд микологов России. «Современная микология в России» Тезисы докладов. Раздел 12. Москва, 11-13 апреля 2002.
7. Kumagai T. Blue and Near Ultraviolet Reversible Photo-reaction in Conidial Development of Certain Fungi // Blue Light Syndrom. — Berlin: Springer, 1980. — P. 251–260.
8. Жданова Н.Н., Василевская А.И. Экстремальная экология грибов в природе и эксперименте. — К.: Наук. думка, 1982. — 168 с.
9. Corrochano LM, Galland P. Photomorphogenesis and gravitropism in fungi. In: The Mycola. Vol. I. Growth, Differentiation and Sexuality / Eds. U. Kues, R. Fisher. — Berlin; Springer-Verlag, 2006. — P. 233–259.
10. Corrochano LM. Fungal photoreceptors sensory molecules for fungal development and behaviour // Photochemical and Photobiological Sciences. — 2007. — 6. — P. 725–736.
11. Herrera-Estrella A., Horowitz BA. Looking through the eyes of fungi: molecular genetics of photoreception // Molecular Mikrobiology. — 2007. — 64. — P. 5–15.

12. Ballario P., Vittirioso P., Magrelli A., Talora C. et al. White collar-1, a central regulator of blue light responses in *Neurospora*, is a zinc finger protein // EMBO Jornal. — 1996. — **15**. — P. 1650—1657.
13. Linder H., Machino G. White collar-2, a partner in blue-light signal transduction, controlling expression of light-regulated genes in *Neurospora crassa* // EMBO Jornal. — 1997. — **16**. — P. 98—109.
14. Galagan G.V., Calvo S.E. et al. The genome sequence of the filamentous fungus *Neurospora crassa* // Nature. — 2003. — **422**. — P. 859—868.
15. Kamada T., Sano H., Nakazawa T., Nakahori K. Regulation of fruiting body photomorphogenesis in *Coprinopsis cinerea* // Fungal Genetics and Biology. — 2010. — **47**. — P. 917—921.
16. Corochano L.M. Fungal photobiology: a synopsis // IMA Fungus. — 2011. — **2**, № 1. — P. 25—28.
17. Yoko Nakano, Niroshi Fujii and Masanobu Kojima. Identification of Blue-Light Photoresponse Genes in Mushroom Mycelia // Biosci. Biotechnol. Biochem. — 2010. — **74**, № 10. — P. 2160—2165.
18. Manachere G., Bastoull-Descollonges Y. Conditions essential for controlled fruiting of Macromycetes — a revive // Trans. Brit. Mycol. Soc. — 1980. — **75**, N 2. — P. 255—270.
19. Gressel J. Blue light photoreception // Photochem. Photobiol. — 1979. — **10**. — P. 749—754.
20. Gressel J., Rau J.W. Photocontrol of Fungal development // Photomorphogenesis. — Berlin e.a. — 1983. — P. 603—639.
21. Горовой Л.Ф. Влияние света на морфогенез шляпочных грибов. Препринт. Киев, 1989. АН УССР, Институт ботаники им. Н.Г. Холодного. — 44 с.
22. Poyedinok N.L., Potemkina J.V. et al. Stimulation with low-intensity laser light of basidiospore germination and growth of monocaryotic isolates in Medicinal Mushroom *Hericium erinaecus* (Bull.: Fr.) Pers.(Aphyllorphomycetidae) // Inter. J. Med. Mushr. — 2000. — **2**, N. 4. — P. 339—342.
23. Poyedinok N.L., Negrijko A., Potemkina J. Influence of Low-intensity Laser Radiation on the Growth and Development of *Hericium erinaceus* (Bull.:Fr.) Pers. and *Pleurotus ostreatus* (Jacq.:Fr.) Kumm // Inter. J. Med. Mushr. — 2001. — **2**-3. — P. 39—45.
24. Poyedinok N.L., Buchalo A.S. et al. The Action of Argon and Helium-Neon Laser Radiation on Growth and Fructification of Culinary-Medicinal Mushrooms *Pleurotus ostreatus*, *Lentinus edodes* and *Hericium erinaceus* // Inter. J. Med. Mushr. — 2003. — **5**. — P. 251—257.
25. Поєдинок Н.Л., Негреїко А.М. Использование лазерного излучения при культивировании некоторых видов съедобных базидиомицетов // Биотехнология. — 2003. — № 2. — С. 230—238.
26. Poyedinok N.L. Prospects of application low intensity laser light in biotechnologies of cultivation of edible mushrooms // Inter. J. Med. Mushr. — 2005. — **3**. — P. 448—452.
27. Поєдинок Н.Л., Сиваш А.А., Негреїко А.М. Рост *Ganoderma lucidum* в глубинной и поверхностной культуре после световых воздействий. Сб. Современное состояние и перспективы развития микробиологии и биотехнологии. Минск, 2006. — С. 164—169.
28. Поєдинок Н.Л., Негреїко А.М., Бухало А.С. Спосіб активації проростання спор вищого базидіального гриба *Hericium erinaceus* / Деклараційний патент України № 36013 від 16.04.2001, бюл. 3.
29. Поєдинок Н.Л., Негреїко А.М., Бухало А.С. Спосіб активації посівного міцелію їстівного гриба *Agaricus bisporus* / Деклараційний патент України № 53900 від 17.02.2003, бюл. 2.
30. Поєдинок Н.Л., Негреїко А.М., Бухало А.С. Спосіб стимуляції росту, розвитку і плодоносіння вищого базидіального їстівного гриба *Lentinus edodes* (Berk.)Sing / Деклараційний патент України № 53880 від 17.02.2003, бюл. 2.
31. Поєдинок Н.Л., Негреїко А.М., Бухало А.С. Спосіб стимуляції росту, розвитку і плодоносіння вищого базидіального їстівного гриба *Hericium erinaceus* (Bull.: Fr.) Pers / Деклараційний патент України № 53880 від 17.02.2003, бюл. 2.
32. Поєдинок Н.Л., Негреїко А.М., Бухало А.С. Спосіб обробки посівного міцелію вищого базидіального гриба *Pleurotus ostreatus* / Патент України № 76305 від 17.07.2006, бюл. 7.
33. Madelin M.F. The influence of light and temperature on fruiting of *Coprinus lagopus* in pure culture // Ann. Bot. (G.B.). — 1956. — **20**, N 79. — P. 833—834.
34. Robbins W.J., Hervey A. Light and the development of *Poria ambigua* // Mycologia. — 1960. — **52**, N 2. — P. 231—247.
35. Lu B.C. The role of light in the fructification on the basidiomycete, *Cyathus stercoreus* // Amer. J. Bot. — **52**, N 5. — P. 432—437.
36. Бухало А.С., Митропольська Н.Ю., Михайлова О.Б. Каталог колекції культур шапинкових грибів (ІБК). — К.: Альбертпрес, 2011. — 100 с.
37. Bula R.J., Tibbitts T.W., Morrow R.C., Dinauer W.R. Commercial involvement in the development of space-based plant growing technology // Adv. Space Res. — 1992. — **12**. — P. 5—10.

*Н.Л. Поединок, А.М. Негрийко, Н.А. Бисько,
О.Б. Михайлова, В.М. Ходаковский, Ж.В. Потёмкина*

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ
ИСКУССТВЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ
В ТЕХНОЛОГИЯХ ВЫРАЩИВАНИЯ
СЪЕДОБНЫХ И ЛЕКАРСТВЕННЫХ ГРИБОВ

Разработаны научно обоснованные методы интенсификации технологических этапов культивирования съедобных и лекарственных грибов, основанные на применении энергоэффективных систем искусственного освещения на основе твердотельных светодиодных источников света.

Ключевые слова: съедобные и лекарственные грибы, биосинтетическая активность, искусственное освещение, твердотельные светодиоды, спектр излучения, матрицы светоизлучающих диодов.

*N.L. Poyedinok, A.M. Negriyko, N.A. Bisko,
O.B. Mykchaylova, V.M. Khodakovsky, J.W. Potemkina*

ENERGY EFFICIENT SYSTEMS OF ARTIFICIAL
LIGHTING IN TECHNOLOGIES OF EDIBLE
AND MEDICINAL MUSHROOMS CULTIVATION

Scientifically based approach to intensification of technological stages of edible and medicinal mushrooms cultivation using the energy efficient artificial lighting systems on the base of solid-state light emitting diode is developed.

Key words: edible and medicinal mushrooms, biosynthetic activity, artificial lighting, solid-state light-emitting diodes, optical spectrum, light-emitting diodes matrix.

Надійшла до редакції 05.06.12