

Study of the spore-forming activity of the *Blakeslea trispora* mushroom

I. Zubareva | H. Safonova  | O. Dregval | V. Havrylyuk | T. Sklyar

Article info

Correspondence Author

H. Safonova

E-mail:

safonova191@gmail.comOles Honchar Dnipro
National University,
Nauky Ave. 72, Dnipro
49045, Ukraine

Citation: Zubareva, I., Safonova, H., Dregval, O., Havrylyuk, V., & Sklyar, T. (2026). Study of the spore-forming activity of the *Blakeslea trispora* mushroom. *Scientific Progress & Innovations*, 29(1), 87–91. doi: 10.31210/spi2026.29.01.14

Industrial production of carotene-containing preparations of natural origin is an urgent task of modern biotechnology. The importance of this problem is determined by the specificity and diversity of functions performed by carotenoids in living cells. The production of safe natural carotenoid products is possible only by biotechnological means, that is, with the participation of appropriate producer microorganisms. The most promising among various potential carotenoid-producing microorganisms was the mold fungus *Blakeslea trispora*, which was selected in Ukraine as an industrial producer of beta-carotene. But if certain inducing components are used in the nutrient media, the fungus switches to oversynthesis of lycopene or other carotenoids. The production of safe natural carotenoid products is possible only by biotechnological methods with the participation of appropriate producer microorganisms. The most promising among various potential carotenoid producers was the mold fungus *B. trispora*, which was selected in Ukraine as an industrial producer of various carotenoids. A physiological feature of this producer was the instability of sporulation in both (+) and (-) strains of the heterothallic fungus. The aim of the work is to develop methods for increasing the level of sporulation ability of *B. trispora* under surface cultivation conditions. The level of sporulation was estimated by the number of spores per 1 cm². Counting chambers were used to count the number of spores. The work proposed the use of physical and chemical factors to intensify sporulation in *B. trispora*. Thus, the stimulating effect of the duration of visible light illumination on the sporulation ability of *B. trispora* was studied. The influence of different parts of the visible light spectrum on the studied process was also determined: violet, blue, green, yellow and red. It was found that the maximum number of spores is formed when the surface culture is illuminated for at least 4 days at an intensity of 300 lux. The maximum stimulating effect was achieved when illuminating the surface culture of *B. trispora* with red light: the number of spores increased 35 times compared to the dark control. Since repeated light exposure may cause undesirable metabolic processes in fungal cells, the effect of some antioxidants on the growth and carotenogenesis of populations of the fungus *B. trispora* obtained from shoals grown under intense light conditions was tested. Citric acid, ascorbic acid, vitamin E, cysteine, and urea were used as antioxidant nutrient components. It was found that the studied antioxidants do not affect the producer's ability to accumulate biomass and synthesize beta-carotene. The intensity of sporulation also does not change.

Key words: spore-forming ability, sporulation, mucor fungus, surface culture, *Blakeslea trispora*, influence, nutrient media.

Дослідження споруотворюючої активності муковорого гриба *Blakeslea trispora*

I. М. Зубарева | Г. Д. Сафонова | О. А. Дрегваль | В. Г. Гаврилюк | Т. В. Скляр

Дніпровський національний
університет імені Олеся
Гончара,
м. Дніпро Україна

Промислове отримання каротинвмісних препаратів природного походження є актуальною задачею сучасної біотехнології. Важливість даної проблеми визначається особливістю та різноманітністю функцій, які виконують каротиноїди в живих клітинах. Виробництво безпечних природних каротиноїдних продуктів можливе тільки біотехнологічним способом, тобто за участю відповідних мікроорганізмів-продуцентів. Найбільш перспективним серед різних потенційних мікроорганізмів-продуцентів каротиноїдів виявився муковоровий гриб *Blakeslea trispora*, який обрано в Україні в якості промислового продуцента бета-каротину. Але за умов використання певних індукуючих компонентів в складі поживних середовищ гриб переходить до надсинтезу лікопіну або інших каротиноїдів. Фізіологічною особливістю даного продуцента виявилася нестабільність споруотворення як у (+), так і у (-) штамів гетероталічного гриба. Метою роботи є визначення способів підвищення рівня споруотворюючої здатності *B. trispora* в умовах поверхневого культивування. Рівень споруотворення оцінювали за кількістю спор на 1 см². Для підрахунку кількості спор користувалися рахунковими камерами. В роботі для інтенсифікації споруотворення у *B. trispora* запропоновано використання фізичних чинників. Так, вивчено стимулюючий вплив тривалості освітлення видимим світлом на споруотворюючу здатність *B. trispora*. Визначено також вплив на досліджуваний процес різних ділянок спектра видимого світла: фіолетового, синього, зеленого, жовтого і червоного. Виявлено, що максимальна кількість спор утворюється при освітленні поверхневої культури не менше 4 діб при інтенсивності 300 люкс. Максимальний стимулюючий ефект досягнуто при освітленні поверхневої культури *B. trispora* червоним світлом: кількість спор збільшувалася в порівнянні з темновим контролем в 35 разів. Так як багаторазове світлове опромінення може викликати небажані метаболічні процеси в клітинах гриба, було перевірено вплив деяких антиоксидантів на ріст і каротиногенез популяції гриба *B. trispora*, отриманих з косяків, вирощених в умовах інтенсивного освітлення. Як антиоксидантні компоненти в поживних середовищах використовували лимонну, аскорбінову кислоту, вітамін Е, цистеїн та сечовину. Встановлено, що досліджувані антиоксиданти не впливають на здатність продуцента накопичувати біомасу і синтезувати бета-каротин. Інтенсивність споруотворення при цьому також не змінюється.

Ключові слова: споруотворююча здатність, споруотворення, муковоровий гриб, поверхнева культура, *Blakeslea trispora*, вплив, поживні середовища.



Бібліографічний опис для цитування: Зубарева І. М., Сафонова Г. Д., Дрегваль О. А., Гаврилюк В. Г., Скляр Т. В. Дослідження споруотворюючої активності муковорого гриба *Blakeslea trispora*. *Scientific Progress & Innovations*. 2026. № 29 (1). С. 87–91.

Вступ

Необхідність різних галузей господарства в каротинвмісних продуктах і препаратах природного походження є очевидною і актуальною для теперішнього часу. Даний факт пояснюється різноманітністю властивостей та важливістю функцій, які виконують каротиноїди в живих клітинах. Так, найбільш дослідженою є А-провітамінна функція бета-каротину [1, 2]. Лікопін розглядається як цінна та універсальна біологічна сполука з різноманітними властивостями, так як є антиоксидантом, антимутагеном, імуномодулятором; каротиноїди приймають участь у різних обмінних процесах, у перенесенні електронів і протонів через мембрани клітин; а також проявляють радіопротекторні, протиракові, антимутагенні, ювенільні й інші лікувальні властивості [3–5].

Тому перспективним є використання каротиноїдів у харчовій галузі, медицині, фармацевтичній промисловості, косметології, сільському господарстві.

Існують різні способи отримання каротинвмісних препаратів: екстракція із рослинної сировини (обліпиха, морква, гарбуз, люцерна, водорості, інші), хімічний синтез, біотехнологічний спосіб [6, 7]. Кожний із вказаних методів має певні недоліки і переваги, але промислове виробництво безпечних природних каротиноїдних продуктів в даний період можливе тільки за участю відповідних мікроорганізмів-продуцентів, тобто біотехнологічним способом [8].

Найбільш перспективним серед різних потенційних продуцентів каротиноїдів виявився мукоровий гриб *Blakeslea trispora*, який і обрано в Україні в якості промислового продуцента бета-каротину. Даний зігоміцет відрізняється надсинтезом саме бета-каротину, але за умови використання певних індукуючих компонентів в складі поживних середовищ гриб переходить до надсинтезу лікопіну або інших каротиноїдів [9–11].

B. trispora утворює каротиноїди в ході глибинного сумісного культивування двох його статевих (+) і (-) форм. Повна технологічна схема отримання каротиноїдів за допомогою обраного продуцента *B. trispora* передбачає також поверхнєве вирощування гриба, яке є обов'язковим при тривалому збереженні культури на агаризованих поживних середовищах та на стадії підготовки посівного матеріалу продуцента [12]. На даній стадії (підготовка посівного матеріалу) (+) і (-) штами гриба, які культивують окремо, утворюють спори. Інтенсивність же спорування розглядається як важливий параметр якості та фізіологічної активності посівної культури. Так, виявлено вплив кількості спор продуцента, що вносяться в маточні колби, на якість не тільки посівного матеріалу, але і на інтенсивність каротиногенезу у ферментерах. Встановлено, що при використанні $1 \cdot 10^6$ – $1 \cdot 10^8$ спор на 100 мл середовища утворюються дрібнодисперсний, фізіологічно активний міцелій. Причому виявлена залежність між кількістю спор і якістю міцелію гриба властива і для (+), і для (-) форм досліджуваного продуцента. Встановлено також позитивний вплив оптимальної кількості спор в

інокулюмі ($1 \cdot 10^6$ – $1 \cdot 10^8$) на каротинсинтезуючу здатність гриба *B. trispora* на стадії ферментації [13].

Але основною проблемою, яка була виявлена в ході багаторічної практичної роботи з даним продуцентом, виявилася нестабільність спорування як у (+) так і у (-) штамів гетероталічного гриба. Так, у поверхневій культурі на агаризованому живильному середовищі спори або практично відсутні, або ж утворюються у великих кількостях – до $3 \cdot 10^7$ шт на 1 см^2 . При цьому здатність до спорування (+) до (-) форм змінюється не пропорційно [14]. Тому важливо підтримувати у гриба здатність до спорування на стабільному і достатньо високому рівні.

Мета дослідження

Мета роботи полягає у виявленні способів підвищення рівня спорування здатності гриба *Blakeslea trispora* в умовах поверхневого культивування.

Завдання роботи:

- визначити вплив на рівень спорування у (+) та (-) штамів мукорового гриба *B. trispora* такого фізичного фактора, як тривалість освітлення видимим світлом;

- виявити вплив на досліджуваний процес різних ділянок спектру видимого світла;

- визначити залежність розвитку популяцій *B. trispora*, отриманих з косяків, вирощених в умовах інтенсивного освітлення в присутності деяких речовин-антиоксидантів.

Матеріали і методи

Роботу виконана в умовах науково-дослідної лабораторії «Молекулярної біології та мікробної біотехнології» відповідно до НДР «Взаємовідносини мікроорганізмів в біоценозах» (державний реєстраційний номер – 0125U002226).

(+), (-) штами гриба-продуцента вирощували роздільно на сусло-агарових косяках [14, 15]. Неохмілене пивне сусло розбавлялося водопровідною водою до 7° по Баллінгу; рН до 6,5 доводили 33 %-ним їдким натром. До нагрітого на водяній бані розчину додавали 2,5 % агар-агару, після розплавлення якого середовище розливали по 7–10 мл в пробірки ТБ 18–80. Пробірки з середовищем закривали ватно-марлевими пробками і піддавали обов'язковій термічній обробці (стерилізували) тривалістю 45 хв. у стерилізаторі паровому електричному ВК–75 при 1,5 атмосферах [16]. Гарячі після стерилізації пробірки встановлювали під кутом 30 – 35° і витримували при 27°C протягом 1–3 діб для перевірки стерильності готового поживного середовища [14, 16].

Посів на косяки проводився сумішню спор і вегетативного міцелію, знятих з поверхні музейного косяка мікологічним гачком. Музейна культура зберігалася на агаризованих поживних середовищах. Засіяні косяки витримували при 28°C протягом 7–10 діб. В пробірки з готовим посівним матеріалом заливали по 10 мл стерильної дистильованої води

і за допомогою мікологічного гачка з насічками ("граблі") суспендували спори і вегетативний міцелій. Отриману споро-міцеліальну суспензію використовували для засіву пробірок або чашок Петрі.

Середовища для поверхневого культивування продуцента агаризували і стерилізували аналогічно середовищам для музейних і робочих косяків. Стерильне середовище в гарячому стані розливали в чашки Петрі шаром 2–3 мм і витримували 1–3 доби при 27 °С. При роздільному вирощуванні засів проводився 0,5–1 мл споро-міцеліальної суспензії (+) або (-) штаму. Для порівняння зростання різностатевих штамів чашки Петрі засівали в протилежних кінцях споро-міцеліальною сумішшю, знятою мікологічним гачком з поверхні робочих косяків відповідного штаму.

Спороутворюючу здатність гриба в поверхневій культурі оцінювали за кількістю спор на 1 см². Для підрахунку кількості спор користувалися рахунковими камерами [16].

У ході статистичної обробки отриманих результатів використовували програмне забезпечення Microsoft Excel [17]. При цьому визначали середні арифметичні вибірки та стандартне відхилення. Оцінка достовірності результатів проводилася з урахуванням t-критерія Стьюдента. За достовірність відмінностей дослідних параметрів приймали $p < 0,05$.

Результати та їх обговорення

Процес інтенсифікації спороутворення у грибів тісно пов'язаний з екологічним оточенням. Стимулами в цьому випадку можуть бути різні фактори зовнішнього середовища, серед яких суттєве значення мають і фізичні, і хімічні впливи [18]. Так, в роботі [19] досліджено вплив лазерного опромінення не тільки на швидкість радіального росту, а й на морфологічні особливості міцелію досліджених грибів та на вміст каротиноїдів в міцелії грибів *Laetiporus ulfureus*. Підібрані також дози світла різних спектрів з однаковою щільністю енергії, які проявляли позитивну дію на розвиток грибів-базидіоміцетів [20]. Також представлена інформація про позитивний вплив різних технологічних режимів аерації на біосинтетичні процеси в клітинах гриба *B. trispora* [21]. В роботі [22] досліджено залежність ростових та метаболічних процесів каротиногенезу у *Rhodosporidium diobovatum* ІМВ Y–5023 від складу культурального середовища та від інтенсивності освітлення.

Так як в науковій літературі практично відсутні дані про вплив такого фізичного фактора, як світло, на спороношення гриба *B. trispora*, були проведені досліді по вивченню цієї залежності.

Для освітлення поверхневої культури досліджуваного гриба-продуцента використовували сонячне освітлення і лампи денного світла інтенсивністю близько 300 люкс. Культуру вирощували протягом семи діб, інтенсивність спороношення оцінювали за кількістю спор, що утворилися на 1 см² субстрату. Як контроль використовували косяки, які були вирощені в темряві.

Вивчено вплив тривалості освітлення видимим світлом на спороутворюючу здатність *B. trispora*. Косяки піддавалися освітленню з моменту їх засіву протягом 1–7 діб.

Результати досліджень представлені графічно на **рисунку 1**.

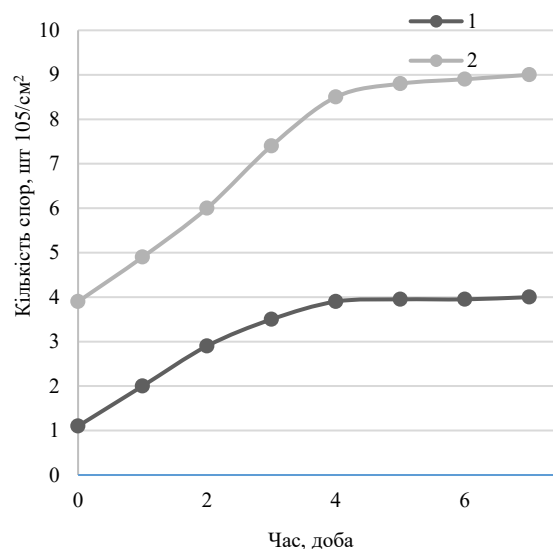


Рис. 1. Залежність спороутворюючої здатності гриба в поверхневій культурі від терміну освітлення видимим світлом: 1 – (+) штаму, 2 – (-) штаму

Як видно із **рисунку 1**, інтенсивність спороношення при збільшенні тривалості освітлення від 1 до 4 діб зростає і далі практично не змінюється.

Встановлено, що під впливом видимого світла змінюється також і морфологія

спор у обох форм гриба. Спори, що виростили в темряві, дрібні, неоднорідні. Спори ж, вирощені на світлі, однорідні за морфологічними ознаками і мають значно більші розміри.

Таким чином, для отримання максимальної кількості спор поверхневу культуру гриба необхідно висвітлювати не менше 4 діб.

Враховуючи, що видиме світло охоплює досить широку ділянку електромагнітних коливань від 400 до 760 нм [23], серед яких можуть бути не тільки ініціюючі, а й інгібуючі спороношення, було вивчено вплив на досліджуваний процес різних ділянок цього спектру: фіолетового ($\lambda = 430$ нм), синього ($\lambda = 470$ нм), зеленого ($\lambda = 550$ нм), жовтого ($\lambda = 600$ нм) і червоного ($\lambda = 650$ нм).

Отримані результати представлені в **таблиці 1**.

Таблиця 1

Вплив окремих ділянок спектра видимого світла на спороутворення у *Blakeslea trispora*

№ з/п	Довжина хвилі, нм	Кількість спор, шт/см ²
1	Темрява	$1 \cdot 10^6 \pm 0,05 \cdot 10^6$
2	430 (фіолетовий)	Практично немає
3	470 (синій)	$10 \cdot 10^6 \pm 0,50 \cdot 10^6$
4	550 (зелений)	$13 \cdot 10^6 \pm 0,65 \cdot 10^6$
5	580 (жовтий)	$23 \cdot 10^6 \pm 0,92 \cdot 10^6$
6	600 (помаранчевий)	$24 \cdot 10^6 \pm 0,96 \cdot 10^6$
7	650 (червоний)	$37 \cdot 10^6 \pm 1,48 \cdot 10^6$

Як видно з приведеної **таблиці 1** інгібуючу дію на процес спороутворення у *B. trispora* надає тільки фіолетове світло. Всі інші ділянки спектра видимого світла стимулюють спороношення. Причому зі збільшенням довжини хвилі спороутворююча здатність гриба підвищується. Максимальний стимулюючий ефект отримано при висвітленні косяків з культурою гриба червоним світлом. Кількість спор в цьому випадку збільшилася в порівнянні з темновим контролем в 37 разів.

Таким чином, світло є фактором, що дозволяє значно інтенсифікувати процес спороутворення у *B. trispora*.

Однак, світло здатне викликати ланцюгові радикальні процеси окислення в клітині [24]. Процес починається окисленням ненасичених жирних кислот в клітинних мембранах, потім передається на сусідні молекули, в тому числі білки, що призводить до порушення функціонування клітини і в кінцевому підсумку до її загибелі. Показано, наприклад, що під впливом світла відбувається руйнування мембран лізисом з наступним виділенням лізосомних ферментів [24]. Токсичну дію світла, звичайно, пригнічують внесенням в живильне середовище для вирощування мікроорганізмів речовин-антиоксидантів. Як антиоксиданти застосовують токоферол (вітамін Е), аскорбінову, лимонну кислоти, цистеїн, сечовину.

У досліджуваного продуцента в результаті багаторазового світлового опромінення можуть виникати небажані процеси, які порушують метаболізм клітини. Тому вивчено вплив різних антиоксидантів на ріст і каротиногенез популяцій *B. trispora*, отриманих з косяків, вирощених в умовах інтенсивного освітлення. Лимонну, аскорбінову кислоти, вітамін Е, цистеїн та сечовину вводили в кількості 0,1 % в щільне агаризоване середовище для вирощування гриба. Контролем служили косяки з сушло-агаровим середовищем без добавок цих речовин.

Встановлено, що досліджувані антиоксиданти не впливають на здатність продуцента накопичувати біомасу і синтезувати бета-каротин. Інтенсивність спороношення при цьому також не змінюється.

Таким чином, введення антиоксидантів в живильне середовище на стадії поверхневого культивування не призводить до зміни фізіологічної активності продуцента і, отже, не впливає на результат ферментації. Це свідчить про те, що світлове опромінення посівного матеріалу з метою ініціювання спороношення не викликає помітних радикальних окислювальних процесів в клітинах гриба і не призводить до втрати продуцентом його активності.

Висновки

В роботі визначені способи підвищення рівня спороутворюючої здатності гриба *Blakeslea trispora* в умовах поверхневого культивування: світло є фактором, що дозволяє значно інтенсифікувати процес спороутворення у продуцента. Для отримання максимальної кількості спор поверхневу культуру

гриба необхідно освітлювати не менше 4 діб при інтенсивності 300 люкс.

Встановлено, що інгібуючу дію на процес спороутворення у *B. trispora* надає фіолетове світло. Максимальний стимулюючий ефект отримано при висвітленні косяків з культурою гриба червоним світлом. Кількість спор в цьому випадку збільшилася в порівнянні з темновим контролем в 37 разів.

Негативного впливу використаних речовин-антиоксидантів (лимонна, аскорбінова кислоти, вітамін Е, цистеїн, сечовина) на спороутворення і розвиток глибинної культури гриба не виявлено.

Перспективами подальших досліджень передбачається визначити способи інтенсифікації спороутворення у гриба *B. trispora* з використанням хімічних факторів.

ДЕКЛАРАЦІЇ

Етична заява

Не застосовується.

Фінансування

Дослідження не отримувало зовнішнього фінансування.

Конфлікт інтересів

Автори стверджують про відсутність конфлікту інтересів.

Подяки

Немає.

Декларація щодо використання ШІ та технологій на основі ШІ

Автори заявляють, що не використовували штучний інтелект або технології на основі ШІ під час підготовки цього рукопису.

References

- Green, A. S., & Fascetti, A. J. (2016). Meeting the vitamin A requirement: The efficacy and importance of β -Carotene in animal species. *The Scientific World Journal*, 2016, 1–22. <https://doi.org/10.1155/2016/7393620>
- Shin, K.-C., Seo, M.-J., Kim, Y.-S., & Yeom, S.-J. (2022). Molecular properties of β -carotene oxygenases and their potential in industrial production of vitamin A and its derivatives. *Antioxidants*, 11 (6), 1180. <https://doi.org/10.3390/antiox11061180>
- Simakhina, H. O. (2010). Funktsionalna rol karotynoidiv ta osoblyvosti yikh vykorystannia u kharchovykh tekhnolohiiakh [Functional role of carotenoids and features of their use in food technologies]. *Naukovi Pratsi Natsionalnoho Universytetu Kharchovykh Tekhnolohii*, 33, 45–48. [in Ukrainian]
- Avalos, J., & Carmen Limón, M. (2014). Biological roles of fungal carotenoids. *Current Genetics*, 61 (3), 309–324. <https://doi.org/10.1007/s00294-014-0454-x>
- Mata-Gómez, L. C., Montañez, J. C., Méndez-Zavala, A., & Aguilar, C. N. (2014). Biotechnological production of carotenoids by yeasts: an overview. *Microbial Cell Factories*, 13 (1), 12. <https://doi.org/10.1186/1475-2859-13-12>
- Šovljanski, O., Saveljić, A., Tomić, A., Šeregelj, V., Lončar, B., Cvetković, D., Ranitović, A., Pezo, L., Četković, G., Markov, S., & Čanadanović-Brunet, J. (2022). Carotenoid-producing yeasts: selection of the best-performing strain and the total carotenoid extraction procedure. *Processes*, 10 (9), 1699. <https://doi.org/10.3390/pr10091699>

7. Saini, R. K., & Keum, Y.-S. (2018). Carotenoid extraction methods: A review of recent developments. *Food Chemistry*, 240, 90–103. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.099>
8. Shevchenko, L. V., Mykhalska, V. M., Yaremchuk, O. S., Kaminska, O. V., & Baier, O. V. (2018). Dzherela karotynoidiv ta yikh kharakterystyka (ohliad) [Sources of carotenoids and their characteristics (review)]. *Science Review*, 8 (15), 19–26. [in Ukrainian]
9. Krychkovska, L. V., Birta, H. O., & Karpushyna, S. A. (2025). Pidvyshchennia biosyntetychnoi aktyvnosti mikrohyrba *Blakeslea trispora* [Increasing the biosynthetic activity of the microfungus *Blakeslea trispora*]. In *Problemy ta dosiahnennia suchasnoi biotekhnolohii: V mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia* [Problems and achievements of modern biotechnology: 5th International Scientific and Practical Conference] (pp. 235–236). Natsionalnyi farmatsevtichnyi universytet [in Ukrainian]
10. Wang, H.-B., Xu, R.-G., Yu, L.-J., Luo, J., Zhang, L.-W., Huang, X.-Y., Zou, W.-A., Zhao, Q., & Lu, M.-B. (2014). Improved β -Carotene and lycopene production by *Blakeslea trispora* with ultrasonic treatment in submerged fermentation. *Zeitschrift Für Naturforschung C*, 69 (5-6), 237–244. <https://doi.org/10.5560/znc.2013-0122>
11. Bindea, M., Rusu, B., Rusu, A., Trif, M., Leopold, L. F., Dulf, F., & Vodnar, D. C. (2018). Valorification of crude glycerol for pure fractions of docosahexaenoic acid and β -carotene production by using Schizochytrium limacinum and *Blakeslea trispora*. *Microbial Cell Factories*, 17 (1), 97–110. <https://doi.org/10.1186/s12934-018-0945-4>
12. Sandmann, G. (2022). Carotenoids and their biosynthesis in fungi. *Molecules*, 27 (4), 1431. <https://doi.org/10.3390/molecules27041431>
13. Zubareva, I. M., Skliar, T. V., & Mitina, N. B. (2022). Vplyv yakosti posivnoi kultury na rostovi i biosyntetychni kharakterystyky produktenta beta-karotynu *Blakeslea trispora*. In *Suchasni dosiahnennia farmatsevtichnoi tekhnolohii i biotekhnolohii: Zbirnyk naukovykh prats X Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii* (pp. 125–126). Natsionalnyi farmatsevtichnyi universytet. [in Ukrainian].
14. Breitenbach, J., Fraser, P. D., & Sandmann, G. (2012). Carotenoid synthesis and phytoene synthase activity during mating of *Blakeslea trispora*. *Phytochemistry*, 76, 40–45. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2011.12.017>
15. DP "UkrNDNTs". (2018). *Solod pyvovarnyi iachminnyi. Zahalni tekhnichni umovy* [Barley malt for brewing. General specifications] (DSTU 4282:2018). Ministry of Economic Development and Trade of Ukraine. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79566 [in Ukrainian]
16. Solomon, A. M., & Bondar, M. M. (2022). *Mikrobiolohiia. Metodychni vkazivky do vykonannia praktychnykh robot dlia pidhotovky zdobuvachiv vyschoi osvity pershoho (bakalavrskoho) osvitnoho rivnia* [Microbiology. Methodological instructions for practical work for the preparation of applicants for higher education of the first (bachelor's) educational level]. Vinnytsia National Agrarian University. [in Ukrainian]
17. Petrovska, I. R., Salyha, Yu. T., & Vudmaska, I. V. (2022). *Statystychni metody v biolohichnykh doslidzhenniakh: navchalno-metodychnyi posibnyk* [Statistical methods in biological research: A textbook]. Ahrama Nauka. [in Ukrainian]
18. Fuller, K. K., Loros, J. J., & Dunlap, J. C. (2014). Fungal photobiology: visible light as a signal for stress, space and time. *Current Genetics*, 61 (3), 275–288. <https://doi.org/10.1007/s00294-014-0451-0>
19. Reshetnyk, K. S. (2020). Vplyv lazernoho vprominiuvannia ta kontsentratsii hliukozy na vmist karotynoidiv u mitselii hrybiv [Influence of laser radiation and glucose concentration on the content of carotenoids in mushroom mycelium]. *Chornomorski Botanical Journal*, 16 (4), 333–342. <https://doi.org/10.32999/ksu1990553x/2020-16-4-6>
20. Reshetnyk, K., & Prysedsyky, Y. (2020). Vplyv lazernoho oprominennia na nakopychennia biomasy ta ekzopolisakharydiv hrybha *Schizophyllum commune* Fr. [Influence of laser irradiation on biomass and exopolysaccharides accumulation of *Schizophyllum commune* Fr. fungus]. *Notes in Current Biology*, 1 (389), 25–30. <https://doi.org/10.29038/2617-4723-2020-1-389-25-30> [in Ukrainian]
21. Anatskyi, A. S., & Kunshchukova, Ye. O. (2009). Vplyv stupenia aeratsii kulturalnoi ridyny na biosyntetychnu aktyvnist hrybnoi kultury *Blakeslea trispora* [Influence of cultural fluid aeration stage on biosynthetic activity of *Blakeslea trispora* fungus culture]. *Visnyk Dnipropetrovskoho universytetu. Biolohiia. Ekolohiia*, 17 (2), 15–19. [in Ukrainian]
22. Ielchishcheva, I., Stachowiak, B., Szwengiel, A., & Bozhkov, A. (2017). Growth and carotenogenesis in *Rhodospiridium diobovatum* IMB Y-5023: effects of culture medium and illumination intensity. *FEMS Microbiology Letters*, 365 (1), 261. <https://doi.org/10.1093/femsle/fnx261>
23. Arnautov, A. (2023). Nash novyi spektr vydymoho svitla – rezultat povtornoii dyspersii klasychnoho spektra Niutona: Povidomlennia piate pro novyi spektr vydymoho svitla [Our new spectrum of visible light is the result of re-dispersion of Newton's classical spectrum: Fifth message about the new spectrum of visible light]. *Nauka i Tekhnika Sohodni*, 10 (24), 350–370. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-10\(24\)-350-370](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-10(24)-350-370) [in Ukrainian]
24. Corrochano, L. M. (2019). Light in the fungal world: From photoreception to gene transcription and beyond. *Annual Review of Genetics*, 53 (1), 149–170. <https://doi.org/10.1146/annurev-genet-120417-031415>

ORCID

- I. Zubareva  <https://orcid.org/0000-0002-8160-6519>
- H. Safonova  <https://orcid.org/0009-0004-8306-6060>
- O. Dregval  <https://orcid.org/0000-0002-0560-5514>
- V. Havrylyuk  <https://orcid.org/0000-0003-0112-3275>
- T. Sklyar  <https://orcid.org/0000-0003-0224-2460>



2026 by the author(s). This is an open-access article distributed under the Creative Commons Attribution License <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.