

ЕКОЛОГІЧНА ФІЗІОЛОГІЯ І БІОХІМІЯ ВОДНИХ РОСЛИН

УДК 556.314:582.263

Ю.Г. КРОТ, к. б. н., ст. наук. співроб., в.о. зав. відділу,
Інститут гідробіології НАН України,
просп. Володимира Івасюка, 12, Київ, 04210, Україна
e-mail: yuriikrot@ukr.net
ORCID 0000-0001-8732-1322

Т.О. ЛЕОНТЬЄВА, доктор філософії, мол. наук. співроб.,
Інститут гідробіології НАН України,
просп. Володимира Івасюка, 12, Київ, 04210, Україна
e-mail: leontieva3394@gmail.com
ORCID 0000-0003-4482-328X

О.М. УСЕНКО, к. б. н., ст. наук. співроб., ст. наук. співроб.,
Інститут гідробіології НАН України,
просп. Володимира Івасюка, 12, Київ, 04210, Україна
e-mail: oleg.mikh.usenko@gmail.com
ORCID 0000-0002-0782-7292

Ю.М. КРАСЮК, к. б. н., наук. співроб.,
Інститут гідробіології НАН України,
просп. Володимира Івасюка, 12, Київ, 04210, Україна
e-mail: j-krasyuk@ukr.net
ORCID 0000-0002-8148-3168

І.М. КОНОВЕЦЬ, к. б. н., ст. наук. співроб., зав. лаб.,
Інститут гідробіології НАН України,
просп. Володимира Івасюка, 12, Київ, 04210, Україна
e-mail: i.m.konovets@gmail.com
ORCID 0000-0003-4234-5026

Л.С. КІПНІС, к. б. н., ст. наук. співроб., ст. наук. співроб.,
Інститут гідробіології НАН України,
просп. Володимира Івасюка, 12, Київ, 04210, Україна
e-mail: kipnisludmila@gmail.com
ORCID 0000-0002-4008-5120

ОСОБЛИВОСТІ ЗМІН ХІМІЧНОГО СКЛАДУ КУЛЬТУРАЛЬНОГО СЕРЕДОВИЩА В ПРОЦЕСІ РОСТУ ЗЕЛЕНИХ МІКРОВОДОРОСТЕЙ В ШТУЧНИХ УМОВАХ¹

*Досліджено особливості змін хімічного складу поживного середовища в процесі
росту і відмирання культур зелених мікроводоростей *Tetrademus dimorphus* (Tur-*

¹ Стаття є другою в циклі публікацій, присвячених вивченню впливу продуктів метаболізму і поживних речовин на стан зелених мікроводоростей та якість культурального середовища при їх штучному вирощуванні.

Ц и т у в а н н я: Крот Ю.Г., Леонтьєва Т.О., Усенко О.М., Красюк Ю.М., Коновець І.М., Кіпніс Л.С. Особливості змін хімічного складу культурального середовища в процесі росту зелених мікроводоростей в штучних умовах. *Гідробіол. журн.* 2025. Т. 61. № 1. С. 77—89.

pin) M.J. Wynne (= *Acutodesmus dimorphus* (Turpin) P. Tsarenko) HPDP-108 і *Desmodesmus brasiliensis* (Bohlin) E. Hegew. HPDP-102). Показано, що упродовж експоненційної фази росту за умов високої чисельності клітин водоростей і приросту їхньої біомаси, у культуральному середовищі зменшувалась концентрація нітратного азоту та фосфору фосфатів на фоні накопичення амонійного і нітритного азоту. На стадії відмирання культури, у середовищі з низькими вихідними концентраціями сполук неорганічного азоту та фосфору відмічено повне їх поглинання та скорочення тривалості даного періоду, в той час як при вищому біогенному навантаженні, зафіксовано менш стрімке зменшення вмісту амонійного азоту і фосфору фосфатів, накопичення нітритів та незначне коливання кількості нітратів.

Ключові слова: зелені мікроводорості, хімічний склад середовища, сполуки неорганічного азоту та фосфору, штучні умови вирощування.

При масовому вирощуванні мікроводоростей в штучних умовах хімічний склад і властивості культурального середовища трансформуються під впливом процесів їхньої життєдіяльності. Ці зміни залежать насамперед від початкової кількості, форми та співвідношення внесених речовин, зокрема біогенних елементів, і впливу абіотичних чинників. За принципом зворотного зв'язку, середовище впливає на функціональний стан мікроводоростей, регулюючи процеси їхнього росту.

Основними біогенними елементами у культуральному середовищі при вирощуванні мікроводоростей є мінеральні форми азоту та фосфору, кількісний склад і співвідношення яких змінюється в залежності від виду та знаходиться під впливом абіотичних чинників [13, 16, 25].

У процесі життєдіяльності водорості, залежно від виду та на різних фазах росту культур, споживають мінеральні сполуки неорганічного азоту (нітрати, нітрити, амоній) або органічний азот (наприклад, сечовина) [11, 17, 24], а в процесі загибелі та лізису клітин виділяють низку речовин, серед яких є і вищенаведені сполуки, що змінюють хімічний склад культурального середовища.

Масове культивування зелених мікроводоростей в штучних умовах характеризується високими показниками їхнього росту та розмноження. З огляду на значну пластичність до змін абіотичних чинників, пов'язану з унікальним набором адаптивних механізмів і реакцій, можливість зміни морфології та анатомії ультраструктур, метаболізму і енергетики фотосинтезуючих систем [22], зелені мікроводорості можна віднести до найбільш перспективних об'єктів вирощування.

Метою даної роботи було дослідження особливостей змін вмісту неорганічних сполук азоту та фосфору у культуральному середовищі в процесі життєдіяльності та відмирання клітин зелених мікроводоростей при вирощуванні в штучних умовах.

Матеріал і методика досліджень

Об'єктами досліджень були найбільш продуктивні [18], альгологічно чисті культури зелених мікроводоростей (Chlorophyta) з колекції культур (HPDP) Інституту гідробіології НАН України [2], а саме: *Desmodesmus*

brasiliensis (Bohlin) E. Hegew HPDP—102 і *Tetrademus dimorphus* (Turpin) M.J. Wynne (= *Acutodesmus dimorphus* (Turpin) P. Tsarenko) HPDP—108.

Дослідження проводили в аквакамерах з регульованим температурним режимом ($27,5 \pm 0,5$ °C) та інтенсивністю освітлення $47,5$ мкмоль/м² за співвідношення світла і темряви — 16 : 8 год. Перемішування культур здійснювали шляхом подачі у культиваційні ємності атмосферного повітря (38 дм³/хв).

Посів водоростей здійснювали шляхом додавання інокуляту культур, що знаходилися на експоненційній фазі росту, до поживного середовища, з доведенням чисельності клітин до $0,5$ млн/см³.

Склад культуральних середовищ для вирощування мікроводоростей наведено у першій роботі даного циклу [3].

До складу поживного середовища входили водопровідна вода, біогенні елементи у співвідношенні азот і фосфор 11:1 та інші неорганічні речовини [3]. Біогенні елементи представлені азотом нітратів та фосфором фосфатів у середовищі № 1 відповідно у концентрації $81,7$ мг N/дм³ і $7,1$ мг P/дм³, а у середовищі № 2 — $692,7$ мг N/дм³ і $60,0$ мг P/дм³.

Функціональний стан клітин водоростей визначали за допомогою люмінесцентного аналізу з використанням мікроскопу Axio Imager-2 та світлофільтрів № 15 (excitation BP 546/12, beamsplitter FT 580, emission LP 590) і № 49 (excitation G 365, beamsplitter FT 395, emission BP 445/50). Кількість живих і мертвих клітин розраховували у відсотках [6].

Тривалість експозиції протягом усіх фаз росту *T. dimorphus* та *D. brasiliensis* дорівнювала 70 діб.

Аналіз хімічного складу культурального середовища проводили стандартними гідрохімічними методами [4]. Рівень аміаку обчислювали за допомогою програми, що враховує рівень pH та вміст амонійного азоту [7].

Експериментальні дані опрацьовували загальноприйнятими методами варіаційної статистики у програмі Microsoft Excel 2010. Вірогідність різниці середніх величин визначали із застосуванням *t*-критерію Стьюдента на рівні значущості $p \leq 0,05$.

Результати досліджень та їх обговорення

Дослідження хімічного складу культурального середовища в процесі вирощування зелених мікроводоростей *T. dimorphus* та *D. brasiliensis* проводили на різних фазах їх росту.

Встановлено, що лаг-фаза культур зазначених видів водоростей характеризувалася короткотривалістю ($0,6$ — $1,2$ доби), а також наступним швидким переходом на експоненційну фазу росту включно до 39-ї доби (рис. 1).

Показники чисельності та приросту біомаси, що були розраховані наприкінці експоненційної фази росту, виявили високу продуктивність цих видів і залежність від вихідної концентрації біогенних елементів у поживному середовищі [3]. За цих умов, *T. dimorphus* віддавав перевагу ку-

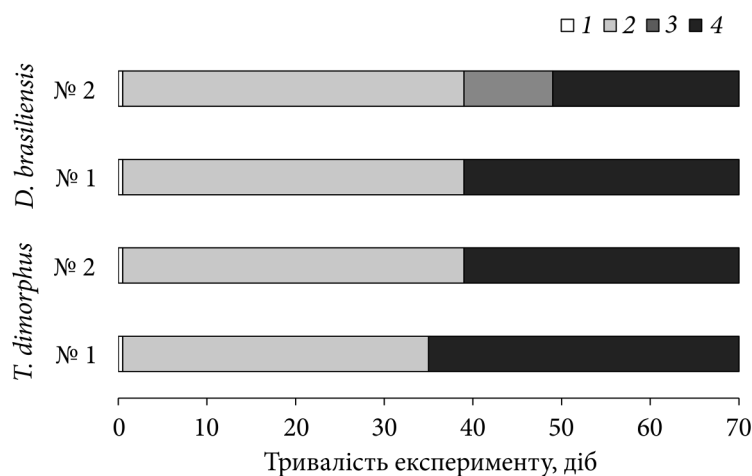


Рис. 1. Фази росту культур зелених мікроводоростей *T. dimorphus* та *D. brasiliensis* при вирощуванні на середовищах № 1 і № 2: 1 — лаг-фаза; 2 — експоненційна фаза; 3 — стаціонарна фаза; 4 — фаза відмирання

льтуральному середовищу з більш високими вихідними концентраціями азоту нітратів та фосфору, в той час як *D. brasiliensis* — з більш низькими.

Одним із важливих показників стану мікроводоростей при їх штучному вирощуванні є співвідношення клітин з активною і пригніченою функціональною активністю. Останнє очевидно свідчить про низьку інтенсивність фотосинтезу, що є наслідком переходу клітин у стадію спокою або їх загибелі. Незначна частка таких клітин спостерігається на різних фазах росту водоростей, однак при переході культури на стаціонарну фазу росту їхня кількість зазвичай підвищується [6].

Так, в процесі вирощування *T. dimorphus* та *D. brasiliensis* на культуральних середовищах з оптимальним для даного виду складом біогенних елементів [3], упродовж експоненційної фази росту кількість клітин з пригніченою функціональною активністю складала 2,0—8,0 %. При цьому для культури *T. dimorphus*, порівняно *D. brasiliensis*, зазначений показник був у 2 рази вищим ($p \leq 0,05$) (рис. 2).

З виходом на стаціонарну фазу росту (39-та доба) зафіксовано підвищення кількості клітин із пригніченою функціональною активністю, найімовірніше, пов'язано з переходом більшості з них у стадію спокою. Так, для *T. dimorphus* ця різниця становила 3 рази ($p \leq 0,05$), а для *D. brasiliensis* — 3,2 рази ($p \leq 0,05$) (див. рис. 2). Можна припустити, що дана закономірність пов'язана з лімітуванням у культуральному середовищі поживних речовин, зокрема біогенних елементів.

Фаза відмирання характеризувалася переважанням швидкості загибелі клітин мікроводоростей над їх поділом. Значно вища швидкість відмирання культури спостерігалася при вирощуванні на середовищі менш збагаченому азотом нітратів та фосфором фосфатів. Можна припу-

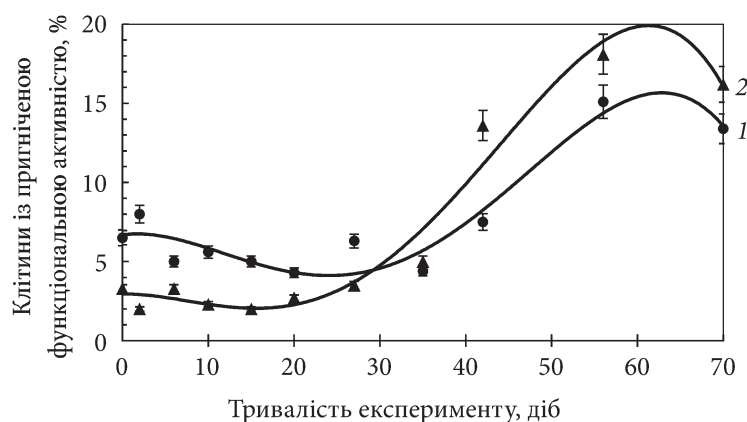


Рис. 2. Кількість клітин (%) зелених мікроводоростей *T. dimorphus* (1) та *D. brasiliensis* (2) із пригніченою функціональною активністю

стити, що концентрація поживних речовин є лімітуючим чинником упродовж стаціонарної фази росту мікроводоростей. Протягом усього зазначеного періоду культури характеризувалися поступовим підвищенням кількості клітин з пригніченою функціональною активністю. При цьому різниця в кінці експозиції (70-та доба), порівняно з експоненційною фазою (39-та доба) становила 3 та 3,2 рази ($p \leq 0,05$) відповідно для *T. dimorphus* та *D. brasiliensis*.

Вивчення особливостей хімічного складу поживного середовища в процесі життєдіяльності та відмирання культур *T. dimorphus* і *D. brasiliensis* проводили на різних фазах їх росту за вмістом йонів NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- і PO_4^{3-} , а також за показниками рН і O_2 .

Встановлено, що на початку лаг-фази досліджувані середовища (№ 1 і № 2) характеризувалися низькою концентрацією йонів амонію та нітритів. При цьому вміст нітратного азоту і фосфору фосфатів у середовищі № 2 був у 8,5 раза вищим, ніж у середовищі № 1.

На початку експоненційної фази росту спостерігалось поступове накопичення йонів NH_4^+ . Так, при вирощуванні *T. dimorphus* вміст амонійного азоту у середовищах № 1 і № 2 в її першу половину (14-та доба), порівняно з лаг-фазою підвищився відповідно у 32,4 та 28,0 разів із подальшим збільшенням (39-та доба) ще у 1,5 і 2,2 рази (порівняно з 14-ою добою) ($p \leq 0,05$). При культивуванні *D. brasiliensis* вміст NH_4^+ у середовищах № 1 і № 2 мав подібну динаміку: у першу половину зазначеної фази (14-та доба) він збільшувався відповідно у 23,0 та 26,8 рази, а наприкінці (32-та доба) — у 2,2 і 2,2 рази (порівняно з 14-ою добою) ($p \leq 0,05$) (рис. 3).

Також необхідно відмітити, що перша половина експоненційної фази росту характеризується значним підвищенням величини рН (рис. 4), супроводжуючись переходом частини йонів NH_4^+ у неіонізовану форму

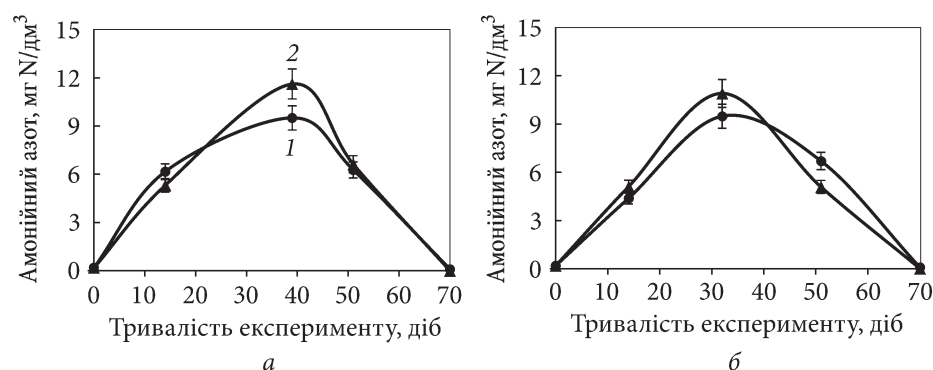


Рис. 3. Вміст амонійного азоту у культуральних середовищах № 1 і № 2 при вирощуванні зелених мікродоростей *T. dimorphus* (а) та *D. brasiliensis* (б)

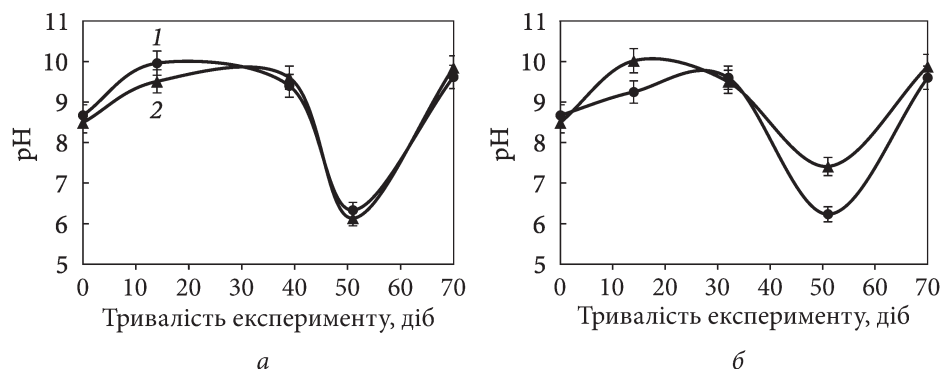


Рис. 4. Водневий показник (рН) культурального середовища № 1 і № 2 при вирощуванні зелених мікродоростей *T. dimorphus* (а) та *D. brasiliensis* (б)

NH_3 , яка може інгібувати фотосинтетичний процес і значно знижувати інтенсивність перебігу метаболічних процесів [12, 23, 27].

Зокрема, при вирощуванні *T. dimorphus* і *D. brasiliensis* на середовищі № 1 відбувалося збільшення величини рН з 8,7 до 10,0 та 9,3 відповідно, що свідчить про перехід більшої частини амонійного азоту у NH_3 (з 23 % до 86 і 54 %). Водночас при їх культивуванні на середовищі № 2 зафіксовано підвищення водневого показника з 8,5 до 9,5 та 10,0 відповідно для *T. dimorphus* і *D. brasiliensis*, з переходом частини NH_4^+ у NH_3 (з 17 % до 68 і 87 %).

У другій половині експоненційної фази росту при вирощуванні *T. dimorphus* на середовищі № 2 та *D. brasiliensis* на середовищі № 1 зафіксовано підвищення водневого показника до 9,6. Слід зазначити, що на даних середовищах досліджувані види мали найвищу чисельність клітин [3]. При цьому для культури *T. dimorphus* на середовищі № 1 та *D. brasiliensis* — на середовищі № 2 спостерігалася зворотна тенденція — зниження величини рН відповідно до 9,4 і 9,5.

У роботі [15] показано, що зниження величини рН культурального середовища відбувається внаслідок більш значного рівня відмирання клітин мікрободоростей, що супроводжується підвищенням концентрації органічних сполук та росту чисельності бактерій. З іншого боку, підвищена активність клітин водоростей до споживання CO_2 і поглинання амонійного азоту теж може викликати коливання величини рН [15]. Величина рН також пов'язана з карбонатною рівновагою культурального середовища, де основними її компонентами є іони H^+ , HCO_3^- , CO_3^{2-} [8].

Дослідження вмісту нітритного азоту у культуральних середовищах виявило подібну тенденцію їх накопичення при порівнянні з іонами амонію. Зокрема, при вирощуванні культур *T. dimorphus* та *D. brasiliensis* на середовищі № 1 його вміст у першу половину експоненційної фази росту (14-та доба) підвищувався відповідно у 1,7 ($p \leq 0,05$) та 3,8 рази ($p \leq 0,05$) з наступним збільшенням наприкінці (35-та доба) у 34,3 ($p \leq 0,05$) і 35,6 разів ($p \leq 0,05$), порівняно з початковими значеннями.

Водночас у середовищі № 2 вміст нітритів у першій половині даного періоду експоненційної фази був у 5,1 ($p \leq 0,05$) та 23,5 ($p \leq 0,05$) рази вищим порівняно з початковими величинами відповідно для *T. dimorphus* та *D. brasiliensis*, з подальшим його збільшенням наприкінці зазначеної фази у 60,8 ($p \leq 0,05$) та 68,7 разів ($p \leq 0,05$) (рис. 5).

При цьому збільшення вмісту нітритного азоту було помітнішим при вирощуванні *T. dimorphus* та *D. brasiliensis* на середовищі № 2 відповідно у 1,8 ($p \leq 0,05$) та 1,9 рази ($p \leq 0,05$) порівняно із середовищем № 1 (див. рис. 5).

Варто зазначити, що характерною рисою росту культур зелених водоростей за наявності у поживному середовищі нітратного азоту є його трансформація у нітритний азот з подальшим накопиченням у культуральному середовищі [1].

Вміст нітратів при проходженні експоненційної фази росту культур *T. dimorphus* та *D. brasiliensis* мав тенденцію до зменшення. Зокрема, у середовищі №1 їхня концентрація на середину даного періоду (14-та доба) була нижчою порівняно з лаг-фазою у 3,5 ($p \leq 0,05$) та 1,2 рази ($p \leq 0,05$), а наприкінці — у 4,5 ($p \leq 0,05$) і 16,3 ($p \leq 0,05$) рази відповідно для *T. dimorphus* та *D. brasiliensis* (рис. 6).

Водночас у середовищі № 2 концентрація нітратного азоту на середину експоненційної фази росту порівняно з лаг-фазою знижувалась у 1,3 ($p \leq 0,05$) і 1,2 ($p \leq 0,05$) рази, а наприкінці — у 1,4 ($p \leq 0,05$) та 1,3 ($p \leq 0,05$) рази відповідно для *T. dimorphus* і *D. brasiliensis* (див. рис. 6).

Через те, що представники родини Scenedesmaceae, до якої відносяться *T. dimorphus* і *D. brasiliensis*, характеризуються активним приростом біомаси та високою антибактеріальною активністю [9, 21], редукція нітратного азоту у нітритний здійснюється у клітинах водоростей, а його надлишки надходять у культуральне середовище.

Отже, зменшення концентрації нітратного азоту у поживному середовищі відбувається за рахунок його асиміляції клітинами мікрободоро-

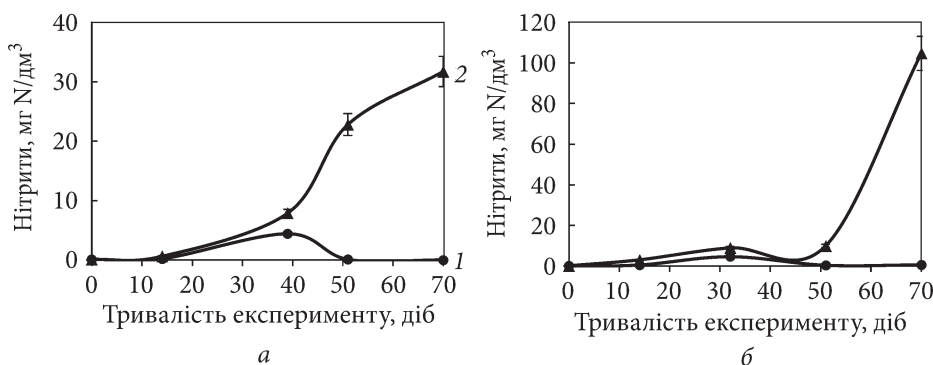


Рис. 5. Вміст нітратного азоту у культуральних середовищах № 1 і № 2 при вирощуванні зелених мікроводоростей *T. dimorphus* (а) та *D. brasiliensis* (б)

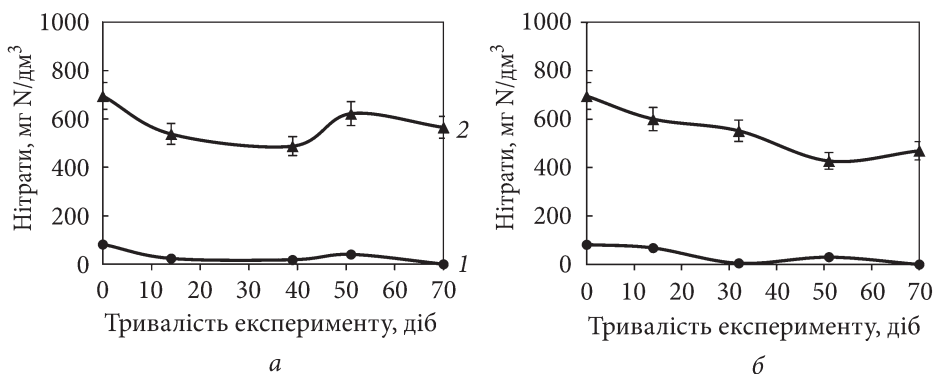


Рис. 6. Вміст нітратів у культуральних середовищах № 1 і № 2 при вирощуванні зелених мікроводоростей *T. dimorphus* (а) та *D. brasiliensis* (б)

стей шляхом відновлення іонів NO_3^- за участі нітрат- та нітритредуктази до амонію, з подальшим включенням останнього у глутамат та білок [19, 20].

Вміст фосфору фосфатів при проходженні експоненційної фази росту культур *T. dimorphus* та *D. brasiliensis* мав тенденцію до стрімкого зниження. Зокрема, при вирощуванні на середовищі № 1 його кількість на середину даного періоду порівняно з лаг-фазою була на 99 % нижчою для *T. dimorphus* та *D. brasiliensis*, з подальшим його підвищенням наприкінці (35-та доба) у 4,6 ($p \leq 0,05$) та 2,0 ($p \leq 0,05$) рази. Водночас у середовищі № 2, що характеризувалося підвищеною початковою концентрацією, відбувалося зниження вмісту фосфору фосфатів на середину експоненційної фази росту (14-та доба) у 6,7 ($p \leq 0,05$) і 15,7 ($p \leq 0,05$) разів, а наприкінці (35-та доба) — у 23,7 ($p \leq 0,05$) і 31,0 ($p \leq 0,05$) рази відповідно для *T. dimorphus* та *D. brasiliensis* (рис. 7).

Стрімке видалення з середовища фосфору фосфатів відбувається внаслідок його адсорбції та асиміляції клітинами мікроводоростей [10,

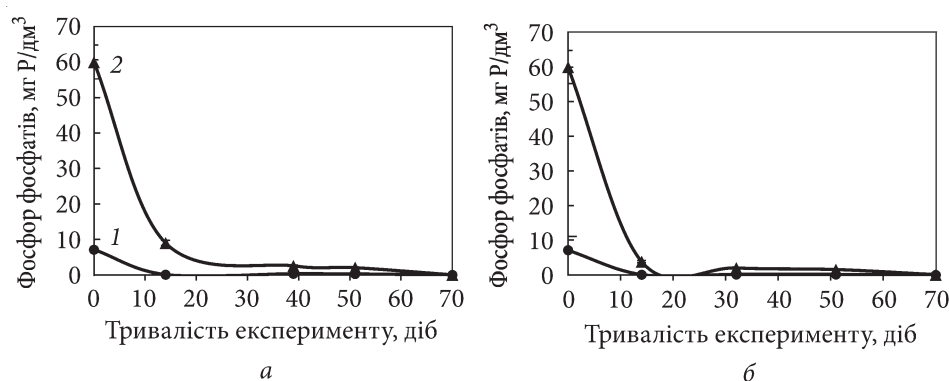


Рис. 7. Вміст фосфору фосфатів у культуральних середовищах № 1 і № 2 при вирощуванні зелених мікроводоростей *T. dimorphus* (а) та *D. brasiliensis* (б)

14]. Крім того, цей елемент може накопичуватись у поліфосфатних гранулах, які часто з'являються у нормальних клітинах під час росту за достатньої кількості фосфату, але зникають, коли він стає дефіцитним [13].

Дослідження хімічного складу культурального середовища у фазі відмирання зелених мікроводоростей, яка супроводжувалась підвищенням кількості клітин, що зазнають лізису, та збагаченням середовища «клітинним екстрактом», проведено на середовищах № 1 і № 2 при вирощуванні *T. dimorphus* та *D. brasiliensis*.

Так, середовище з низькою концентрацією біогенних елементів (№ 1) характеризувалося зменшенням вмісту всіх форм неорганічного азоту до мінімальних значень ($<0,6$ мг/дм³) (див. рис. 3, 5, 6). Водночас більш збагачене поживне середовище (№ 2) характеризувалося тенденцією до підвищення концентрації нітритів, незначного коливання нітратів та повного видалення амонійного азоту.

Зокрема, вміст азоту нітритів у середовищах культивування *T. dimorphus* та *D. brasiliensis* збільшився відповідно у 4,0 ($p \leq 0,05$) та 11,7 разів ($p \leq 0,05$).

Динаміка фосфору фосфатів у культуральному середовищі упродовж фази відмирання мікроводоростей характеризувалася його вилученням в повному обсязі наприкінці експозиції (70-та доба).

За цих обставин зменшення його вмісту у більш збагаченому середовищі відбувалося повільніше. Зокрема, упродовж першої частини фази відмирання (51-та доба) його концентрація у середовищі №1 порівняно із середовищем №2 була у 8,5 та 11,0 разів ($p \leq 0,05$) меншою відповідно у *T. dimorphus* та *D. brasiliensis*.

Зниження функціональної активності мікроводоростей у цей період певною мірою може залежати від кисневого режиму культурального середовища.

Встановлено, що упродовж експоненційної фази росту концентрація кисню у культуральних середовищах *T. dimorphus* та *D. brasiliensis* по-

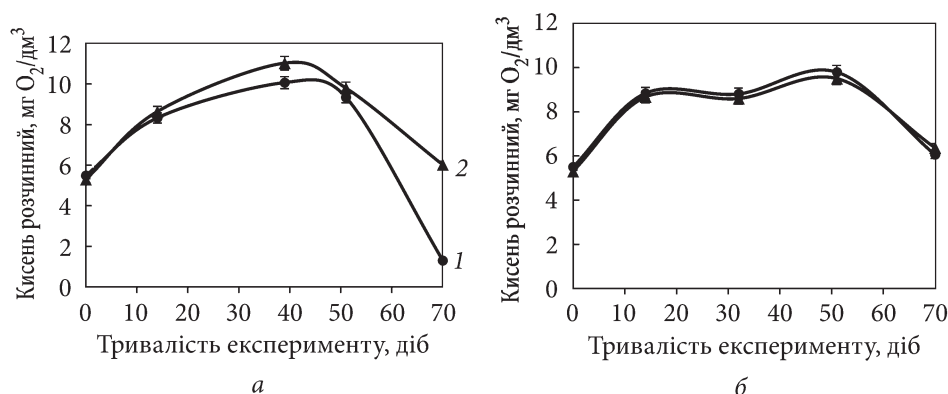


Рис. 8. Вміст розчиненого кисню у культуральних середовищах № 1 і № 2 при вирощуванні зелених мікроводоростей *T. dimorphus* (а) та *D. brasiliensis* (б)

рівняно з лаг-фазою мала тенденцію до поступового підвищення відповідно у 1,6—2,0 ($p \leq 0,05$) рази (рис. 8). При цьому для *T. dimorphus* даний показник був дещо вищим у середовищі № 2, а для *D. brasiliensis* — у середовищі № 1, що позитивно корелює з показниками їхніх чисельності та біомаси [3].

На фазі відмирання мікроводоростей в обох культуральних середовищах спостерігалось падіння концентрації розчиненого кисню. Найбільш вагоме його зменшення (70-та доба) зафіксовано при вирощуванні *T. dimorphus* на середовищі № 1 — у 7,7 рази ($p \leq 0,05$), разом з тим на середовищі № 2 — у 1,8 рази ($p \leq 0,05$). Водночас для *D. brasiliensis* зниження величини цього показника становило 1,4 рази ($p \leq 0,05$) (див. рис. 7). Слід зазначити, що даний період до того ж має тенденцію до зниження величини водневого показника — з 9,5—9,6 до 9,1.

Висновки

Інтенсивне вирощування зелених мікроводоростей *T. dimorphus* та *D. brasiliensis* в штучних умовах характеризується короткотривалим періодом проходження лаг-фази, високою функціональною активністю на експоненційній фазі росту, підвищеною кількістю відмираючих клітин на стаціонарній фазі та їх переважанням на фазі відмирання.

Упродовж експоненційної фази росту зелених мікроводоростей *T. dimorphus* та *D. brasiliensis* характерною особливістю хімічного складу культурального середовища є зменшення вмісту азоту нітратів та фосфору фосфатів з одночасним підвищенням вмісту амонійного і нітритного азоту.

Вирощування *T. dimorphus* та *D. brasiliensis* на середовищі з низькими концентраціями біогенних елементів призводить до скорочення тривалості фази відмирання і повного видалення амонійного азоту та фосфору фосфатів. Натомість за високих концентрацій спостерігається їх поступове поглинання на фоні незначного накопичення нітритів.

Підвищення концентрації розчиненого кисню у культуральному середовищі та величини рН на експоненційній фазі росту *T. dimorphus* і *D. brasiliensis* може свідчити про їхню високу функціональну активність, в той час як зниження величин даних показників на фазі відмирання — про лізис клітин та створення сприятливих умов для розвитку бактерій.

Список використаної літератури

1. Клоченко П.Д., Медведь В.А., Борисова Е.В., Царенко П.М. Особенности накопления нитритного азота в культурах хлорококковых (Chlorococcales, Chlorophyta) водорослей. *Альгология*. 2000. Т. 10, № 3. С. 257—264.
2. Колекція культур мікроводоростей HPDP / Білоус О. П., Незбрицька І. М., Клоченко П.Д., Кірпенко Н.І. Київ : Альтерпрес, 2018. 36 с.
3. Леонтьева Т.О., Крот Ю.Г., Усенко О.М. Фізіолого-біохімічний стан зелених мікроводоростей (Chlorophyta) за різного навантаження культурального середовища біогенними елементами. *Гідробіол. журн.* 2024. Т. 60, № 3. С. 50—61.
4. Методи гідроекологічних досліджень поверхневих вод / за ред. В.Д. Романенка. Київ : Логос, 2006. 408 с.
5. Методы физиолого-биохимического исследования водорослей в гидробиологической практике / Отв. ред. А.В. Топачевский. Киев : Наук. думка, 1975. 248 с.
6. Общая и экспериментальная альгология / Т.В. Догадина, В.П. Комаристая, О.С. Горбулин, А.Н. Рудась. Харьков : ХНУ имени В. Н. Каразина, 2013. 148 с.
7. Програма обчислення концентрації аміаку (для прісної води). URL: <https://uzv.su/programma-vychisleniya-konzentratsii-ammiaka-dlya-presnoj-vody/>
8. Сніжко С.І. Теорія і методи аналізу регіональних гідрохімічних систем. Київ : Ніка-Центр, 2004. 394 с.
9. Тиберкевич Н.Я., Сакевич А.И. Бактерии-спутники в культурах цианопрокариот и зелёных водорослей. *Гідробіол. журн.* 2001. Т. 37, № 1. С. 54—63.
10. Abdelaziz A.E. M., Leite G.B., Hallenbeck P.C. Addressing the challenges for sustainable production of algal biofuels: I. Algal strains and nutrient supply. *Environ. Technol.* 2013. Vol. 34. P. 1783—1805.
11. Arumugam M., Agarwal A., Arya M.C., Ahmed Z. Influence of nitrogen sources on biomass productivity of microalgae *Scenedesmus bijugatus*. *Bioresour. Technol.* 2013. Vol. 131. P. 246—249.
12. Collos Y., Harrison P. J. Acclimation and toxicity of high ammonium concentrations to unicellular algae. *Mar. Pollut. Bull.* 2014. Vol. 80. P. 8—23.
13. Dyhrman S.T. Nutrients and their acquisition: phosphorus physiology in microalgae. *The Physiology of Microalgae*. Cham: Springer, 2016. P. 155—183.
14. Eladel H., Esakkimuthu S., Abomohra A. et al. Dual role of microalgae in wastewater treatment and biodiesel production. *Application of Microalgae in Wastewater Treatment*. Cham : Springer, 2019. P. 85—121.
15. Jia H., Yuan Q. Removal of nitrogen from wastewater using microalgae and microalgae-bacteria consortia. *Cogent Environ. Sci.* 2016. Vol. 2, N. 1.
16. Klochenko P.D., Grubinko V.V., Gumenyuk G.B., Arsan O.M. Peculiarities of ammonium nitrogen assimilation in green and blue-green algae. *Hydrobiol. J.* 2003. Vol. 39, N 6. P. 102—108.
17. Kumar A., Bera S. Revisiting nitrogen utilization in algae: A review on the process of regulation and assimilation. *Bioresour. Technol. Rep.* 2020. Vol. 12. 100584.
18. Leontieva T., Krot Yu., Usenko O.M. et. al. Criteria for evaluation the production potential of green microalgae (Chlorophyta) for mass cultivation *Hydrobiol. J.* 2024. N 2. P. 57—65.
19. Monier A., Edgar R. E., Lovejoy C. Diversity of nitrogen assimilation pathways among microbial photosynthetic eukaryotes. *J. Phycol.* 2015. Vol. 51. P. 490—506.
20. Nezbyrtska I.M., Shamanskyi S.Y., Boichenko S.V., Kharchenko G.V. Some problems of the use of microalgae for nitrogen and phosphorus removal from wastewater (a review). *Hydrobiol. J.* 2021. Vol. 57, N 2. P. 62—78.

21. Pina-Pérez M.C., Rivas A., Martínez A., Rodrigo D. Antimicrobial potential of macro and microalgae against pathogenic and spoilage microorganisms in food. *Food Chem.* 2017. Vol. 235. P. 34—44.
22. Richmond A., Hu Q. Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology and Biotechnology. Oxford : Wiley-Incorporated, 2013. 736 p.
23. Rossi S., Dñez-Montero R., Rueda E. et al. Free ammonia inhibition in microalgae and cyanobacteria grown in wastewaters: Photo-respirometric evaluation and modelling. *Bioresour. Technol.* 2020. Vol. 305. 123046.
24. Ruangsomboon S. Effects of different media and nitrogen sources and levels on growth and lipid of green microalga *Botryococcus braunii* KMITL and its biodiesel properties based on fatty acid composition. *Bioresour. Technol.* 2015. Vol. 191. P. 377—384.
25. Sinyuk O.V., Grubinko V.V., Klochenko P.D., Vasilchuk T.A. Peculiarities of energetic, nitrogen, and phosphorus metabolism in green and blue-green algae under the influence of humic acids. *Hydrobiol. J.* 2008. Vol. 44, N 6. P. 74—82.
26. Unnithan V. V., Unc A., Smith G. B. Mini-review: A priori considerations for bacteria-algae interactions in algal biofuel systems receiving municipal wastewaters. *Algal Res.* 2014. Vol. 4. P. 35—40.
27. Wang J., Zhou W., Chen H. et al. Ammonium nitrogen tolerant *Chlorella* strain screening and its damaging effects on photosynthesis. *Front. Microbiol.* 2019. Vol. 9. 3250.

Надійшла 12.03.2024

Yu.G. Krot, PhD (Biol.), Senior researcher, Head of Department,
Institute of Hydrobiology of the NAS of Ukraine,
Volodymyr Ivasyuk Avenue, 12, Kyiv, 04210, Ukraine
e-mail: yuriikrot@ukr.net
ORCID 0000-0001-8732-1322

T.O. Leontieva, PhD (Biol.), Junior researcher,
Institute of Hydrobiology of the NAS of Ukraine,
Volodymyr Ivasyuk Avenue, 12, Kyiv, 04210, Ukraine
e-mail: leontieva3394@gmail.com
ORCID 0000-0003-4482-328X

O.M. Usenko, PhD (Biol.), Senior researcher, Senior researcher,
Institute of Hydrobiology of the NAS of Ukraine,
Volodymyr Ivasyuk Avenue, 12, Kyiv, 04210, Ukraine
e-mail: oleg.mikh.usenko@gmail.com
ORCID 0000-0002-0782-7292

Yu.M. Krasnyuk, PhD (Biol.), Researcher,
Institute of Hydrobiology of the NAS of Ukraine,
Volodymyr Ivasyuk Avenue, 12, Kyiv, 04210, Ukraine
e-mail: j-krasnyuk@ukr.net
ORCID 0000-0002-8148-3168

I.M. Konovets, PhD (Biol.), Senior researcher, Head of Laboratory,
Institute of Hydrobiology of the NAS of Ukraine,
Volodymyr Ivasyuk Avenue, 12, Kyiv, 04210, Ukraine
e-mail: i.m.konovets@gmail.com
ORCID 0000-0003-4234-5026

L.S. Kipnis, PhD (Biol.), Senior researcher, Senior researcher,
Institute of Hydrobiology of the NAS of Ukraine,
Volodymyr Ivasyuk Avenue, 12, Kyiv, 04210, Ukraine
e-mail: kipnisludmila@gmail.com
ORCID 0000-0002-4008-5120

PECULIARITIES OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF THE CULTURAL MEDIUM IN THE PROCESS OF GROWTH OF GREEN MICROALGAE IN ARTIFICIAL CONDITIONS

The peculiarities of the formation of the quality of the cultural medium in the process of vital activity and death of the green microalgae *Tetradismus dimorphus* and *Desmodesmus brasiliensis* were investigated. It was shown that during the exponential phase of growth, under the conditions of their high number and increase in biomass, the concentration of nitrates and phosphorus phosphates in the culture medium decreased against the background of the accumulation of ammonium nitrogen and nitrites. In the dying phase of the culture, in medium with low initial concentrations of inorganic nitrogen and phosphorus phosphate compounds, their complete removal and reduction of the duration of this period was noted, while at a higher biogenic load, a less rapid decrease of ammonium nitrogen and phosphorus phosphates, accumulation of nitrites, and a slight fluctuation of nitrates were recorded.

Key words: green microalgae, chemical composition of the medium, compounds of inorganic nitrogen and phosphorus, artificial cultivation