

Журнал «Альгологія» – орган Відділення загальної біології Національної академії наук України та Інституту ботаніки ім. М.Г. Холодного – публікує статті за такими рубриками: «Загальні проблеми альгології», «Морфологія, анатомія, цитологія», «Размноження та цикли розвитку водоростей», «Генетика», «Фізіологія, біохімія, біофізика», «Екологія, ценологія, охорона та роль водоростей у природі», «Флора та географія», «Викопні водорості», «Систематика, філогенія, питання еволюції водоростей», «Нові та рідкісні таксони», «Прикладна альгологія», «Дискусії», «Короткі повідомлення», «Методика», «Огляди. Історія альгології», «Персоналії», «Хроніка та інформація», «Рецензії», «Нові книги»

Journal Algologia (Algae) is sponsored by the Department of General Biology of National Academy of Sciences of Ukraine and M.G. Kholodny Institute of Botany. It embraces the following subjects: General Problems of Algae; Morphology, Anatomy, Cytology; Reproduction and Life Cycles of Algae; Genetics; Physiology, Biochemistry, Biophysics; Ecology, Cenology, Conservation of Algae and their Role in Nature; Flora and Geography; Fossil Algae; Systematics, Phylogeny and Problems of Evolution of Algae; New Taxa and Noteworthy Records; Applied Algae; Discussions, Short Communications; Procedure; Surveys. History of Algae; Personalia; New Items and Information; Review; New Books

Головний редактор ВАСЦЕР С.П. (Україна)

Заст. головного редактора
Виноградова О.М. (Україна)

Відповідальний секретар редакції
Алейнікова М.Д. (Україна)

Editor-in-Chief WASSER S.P. (Ukraine)

Deputy Editor
Vinogradova O.M. (Ukraine)

Managing Editor
Aleinikova M.D. (Ukraine)

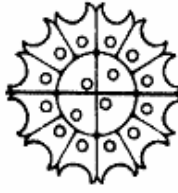
Редакційна колегія

Бланко С. (Іспанія)
Божков А.І. (Україна)
Золотарьова О.К. (Україна)
Мінічева Г.Г. (Україна)
Михайлюк Т.І. (Україна)
Нево Е.Д. (Ізраїль)
Окоłodков Ю.Б. (Мексика)
Ольштинська О.П. (Україна)
Садогурська С.С. (Україна)
Семенюк Н.Є. (Україна)
Холзингер А. (Австрія)
Шалигін С.С. (США)

Editorial Advisory Board

Blanco S. (Spain)
Bozhkov A.I. (Ukraine)
Zolotareva O.K. (Ukraine)
Minicheva G.G. (Ukraine)
Mikhailyuk T.I. (Ukraine)
Nevo E.D. (Israel)
Okolodkov Yu.B. (Mexico)
Olshtynska O.P. (Ukraine)
Sadogurska S.S. (Ukraine)
Semenyuk N.E. (Ukraine)
Holzinger A. (Austria)
Shalygin S.S. (USA)

Том 35
3 • 2025



АЛЬГО
ЛОГІЯ

МІЖНАРОДНИЙ
НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ
ЖУРНАЛ

ALGOLOGIA

ЗАСНОВАНИЙ У БЕРЕЗНІ 1991 р.

• ВИХОДИТЬ 1 РАЗ НА ТРИ МІСЯЦІ • КИЇВ

ЗМІСТ

Екологія, ценологія, охорона та роль водоростей у природі

- 173 Давидов О.А., Щербак В.І., Семенюк Н.Є., Козійчук Е.Ш. Структура мікрофітобентосу пелагіалі та літоралі Київського водосховища

Флора та географія

- 194 Ле Дінх Хун, Во Тхі Дьєу Транг, Хоанг Тхі Транг Нгуєн, Дінх Тхань Трунг, Нго Тхі Дуї Нгок; Фан Тхі Хоай Трін. Новий член родини лектинів ОААН з культивованої у В'єтнамі червоної водорості *Eucheuma denticulatum*

Систематика, філогенія, питання еволюції водоростей

- 210 Брянцева Ю.В., Гірі М.Д. Ревізія чек-листа динофлагелят Чорного моря

Прикладна альгологія

- 236 Чандра Хас, Руші Пател, Хітеш Падхіяр. Порівняльне дослідження очищення промислових стічних вод мікрowodоростями *Chlorella vulgaris* та *Scenedesmus quadricauda*

ДО УВАГИ ПЕРЕДПЛАТНИКІВ!

Передплата журналу «Альгологія» здійснюється тільки через
ПЕРЕДПЛАТНЕ АГЕНТСТВО «УКРІНФОРМНАУКА»
(<https://u-i-n.com.ua/>)

Наукові редактори випуску:

ВИНОГРАДОВА О.М., СЕМЕНЮК Н.Є.

Редактори

В.В. Несчетна, О.С. Бондаренко

Адреса редакції: 01601 Київ, вул. Терещенківська, 2,
Інститут ботаніки ім. М.Г. Холодного НАНУ

Address of the Editorial Office: M.G. Kholodny Institute of Botany, NAS of Ukraine,
2 Tereschenkivska Str., Kyiv 01601

e-mail: algologia@ukr.net

сайт: www.algologia.co.ua

Ідентифікатор медіа R30-03013

Затверджено до друку вченою радою Інституту ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України
(протокол № 8 від 09 вересня 2025 р.)

Підп. до друку 15.09.2025. Формат 70×108/16. Ум.-друк. арк. 9,8. Обл.-вид. арк. 13,72.

Тираж прим. Зам. №

Віддруковано ВД «Академперіодика» НАН України, вул. Терещенківська, 4, Київ 01024
Свідцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 544 від 27.07.2001

ДАВИДОВ О.А.* (<https://orcid.org/0009-0004-2381-723X>)

ЩЕРБАК В.І. (<https://orcid.org/0000-0002-1237-6465>)

СЕМЕНЮК Н.Є. (<https://orcid.org/0000-0003-4447-3507>)

КОЗІЙЧУК Е.Ш. (<https://orcid.org/0009-0002-5762-938X>)

*Інститут гідробіології НАН України,
просп. Володимира Івасюка, 12, Київ 04210, Україна*

* Адреса для листування: davydovoleg01@gmail.com

СТРУКТУРА МІКРОФІТОБЕНТОСУ ПЕЛАГІАЛІ ТА ЛІТОРАЛІ КИЇВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА

Реферат. Встановлено спільності та відмінності в структурній організації мікрофітобентосу літоралі та пелагіалі Київського вдсх у сучасний період. Оцінено можливість використання отриманих результатів для більш точного визначення якості води в придонних шарах мілководних і глибоководних ділянок. За результатами ретроспективного аналізу показано, що впродовж 60-річного періоду існування Київського вдсх мікрофітобентос був представлений полідомінантним комплексом *Bacillariophyta—Chlorophyta—Cyanobacteria*. Упродовж досліджень мікрофітобентосу з 1966 по 1984 рр. його видове і внутрішньовидове багатство коливалося в межах 104 видів (146 внутрішньовидових таксонів, ввт) — 165 видів (234 ввт), а за оригінальними даними 2021 р. нараховує 194 види (199 ввт), що свідчить про багаторічну стабільність структури донних альгогрупвань. На найвищих щаблях таксономічної ієрархії (відділ—порядок) структурна організація мікрофітобентосу літоралі та пелагіалі є аналогічною, а відмінності реєструються на рівні родин — видів (ввт). Найвищою частотою трапляння в літоралі (17–100%) та пелагіалі (33–100%) характеризувалися 22 види, серед яких переважали *Bacillariophyta*, представлені в основному пенатними формами. Із загальної кількості видів лише 4 види характеризувалися 100%-вою частотою трапляння як у літоралі, так і в пелагіалі. Це свідчить про своєрідність таксономічного складу мікрофітобентосу літоралі та пелагіалі

Надійшла до редакції 21.05.2025. Після доопрацювання 16.06.2025. Підписана до друку 12.08.2025.

Опублікована 20.09.2025

Цитування. Давидов О.А., Щербак В.І., Семенюк Н.Є., Козійчук Е.Ш. 2025. Структура мікрофітобентосу пелагіалі та літоралі Київського водосховища. *Альгологія*. 35(3): 173–193. <https://doi.org/10.15407/alg35.03.173>

This is open access article under the CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

й гетерогенність його структури. Відмінності в частоті трапляння, величинах множинних індексів видової подібності Серенсена, коефіцієнтів Кендела свідчать про більш виражену гетерогенність мікрофітобентосу пелагіалі. За співвідношенням видів-індикаторів мікрофітобентосу та за індексами Пантле-Букк у модифікації Сладечека якість водного середовища досліджених ділянок у цілому характеризується як помірно забруднені води, β -мезосапробна зона, III клас якості води. Результати паралельного дослідження таксономічної структури донних альгоугруповань Київського вдсх свідчать про їхню своєрідність у літоралі та пелагіалі, високе різноманіття та важливу роль у функціонуванні автотрофної ланки екосистеми водосховища.

Ключові слова: мікрофітобентос, Київське водосховище, літораль, пелагіаль, таксономічне різноманіття, якість води

Вступ

У публікаціях, присвячених вивченню гідробіологічного режиму Дніпра та його водосховищ, починаючи з етапу незарегульованої річки, наголошується, що важливим компонентом автотрофної ланки головного в Дніпровському каскаді Київського вдсх є угруповання донних мікроскопічних водоростей — мікрофітобентосу (Hydrobiological..., 1967; Kyiv Reservoir, 1972; Vegetation..., 1989). Упродовж останніх трьох десятиліть основна увага гідробіологів була приділена вивченню фітопланктону та фітоепіфітону Київського вдсх, а дослідження мікрофітобентосу було поновлено лише в останні роки (Davydov, Koziyuchuk, 2024, 2025).

Мікрофітобентос в екологічному сенсі — складне альгоугруповання, яке включає як автохтонні, так і алохтонні компоненти та вегетує на розділі двох фаз: рідина — м'який субстрат і залежить від впливу різних абіотичних та біотичних чинників (Shcherbak, 2006; Oksiyuk et al., 2009).

Київське вдсх, як головне у Дніпровському каскаді, формується дніпровськими та прип'ятськими водами з відповідним гідрологічним, гідрохімічним та термічним режимом. Особливістю Київського вдсх є те, що площа літоралі в ньому в порівнянні з іншими водосховищами Дніпровського каскаду доволі значна й займає до 40% акваторії (Kyiv Reservoir, 1972).

На даний час літораль Київського вдсх інтенсивно заростає повітряно-водними рослинами (рогоз, очерет, комиш) та рослинами з плаваючим листям (Tsaplina et al., 2014), які є вагомим біологічним чинником, що суттєво лімітує розвиток мікрофітобентосу.

У пелагіалі таксономічне різноманіття та кількісний розвиток мікрофітобентосу значною мірою залежать від інтенсивності осідання з водної товщі планктонних форм. Це пов'язано:

– зі зміною гідрологічного режиму при надходженні планктостоку з річкової частини до Основного плеса водосховища, де швидкість течії значно сповільнюється;

– з особливостями вегетації планктонних форм на різних етапах їхньої життєдіяльності (в товщі води та на дні).

Ретроспективний аналіз свідчить, що таксономічне різноманіття мікрофітобентосу Київського вдсх розглядалося для водосховища в цілому, а відповідна інформація окремо для літоралі та пелагіалі в опублікованих джерелах відсутня.

У цілому оцінка впливу абіотичних, біотичних, кліматичних, антропогенних та інших чинників на різноманіття мікрофітобентосу потребує спеціальних комплексних досліджень. Тому першим кроком у цьому напрямку має бути встановлення спільностей та відмінностей між донними альгоугрупованнями літоралі та пелагіалі.

Мета роботи — порівняти структурну організацію мікрофітобентосу літоралі та пелагіалі Київського вдсх й оцінити можливість використання отриманих результатів для більш точного визначення якості води та виявлення точкових чи розсіяних джерел забруднення на дні мілководних і глибоководних ділянок.

Матеріали та методи

Дослідження мікрофітобентосу проводили в середній та нижній ділянках Основного плеса водосховища (Kyiv Reservoir, 1972) в літній період 2021 р. Важливою особливістю цієї акваторії є:

– поєднання алохтонного фітостоку з річкових плесів Дніпра та Прип'яті, водні маси яких розтікаються по ложу водосховища;

– формування автохтонного мікрофітобентосу Основного плеса водосховища;

– наявність як пелагіалі (від 3,0 м і глибше), так і літоралі (від урізу до 3,0 м);

– відмінності в гідрологічних, гідрохімічних та гідрофізичних характеристиках пелагіалі та літоралі (Shcherbak, 1989; Vegetation..., 1989; Shcherbak et al., 2019).

Проби мікрофітобентосу відбирали на шести полігонах, які включали станції як на літоралі, так і в пелагіалі середньої та нижньої ділянок Основного плеса водосховища (Kyiv Reservoir, 1972). Географічні координати станцій відбору проб представлені в опублікованій раніше роботі (Davydov, Koziychuk, 2024). Альгологічні проби на літоралі відбирали у місцях, вільних від заростей вищих водних рослин з глибини

0,5 м мікробентометром МБВ, а в пелагіалі — на глибинах 4,5–6,0 м мікробентометром МБ-ТЄ (Shcherbak, 2006).

Камеральне опрацювання альгологічних проб виконували за загальноприйнятими методами із застосуванням камери Нажотта об'ємом 0,02 см³ (Shcherbak, 2006). Для ідентифікації *Bacillariophyta* виготовляли постійні препарати (Торачевський, Оксіук, 1960) з використанням синтетичної діатомової смоли Naphrax з індексом заломлення світла 1,74 та імерсійного об'єктиву 90[×].

Частоту трапляння виду визначали як відсоток альгологічних проб, у яких даний вид зустрічався, від загальної кількості проб (Shcherbak, 2002).

Коефіцієнти таксономічної подібності на рівні родин і родів визначали згідно Kendall (1955), а множинний коефіцієнт видової подібності Серенсена (K_S), який відображає ступінь «співпадіння» або «перекривання» (англ. *overlap*) видів у межах всієї акваторії (у нашому випадку літоралі чи пелагіалі), — за формулою (Baselga, 2010):

$$K_{SOR} = 1 - \frac{[\sum_{i<j} \min(b_{ij}, b_{ji})] + [\sum_{i<j} \max(b_{ij}, b_{ji})]}{2[\sum_i S_i - S_T] + [\sum_{i<j} \min(b_{ij}, b_{ji})] + [\sum_{i<j} \max(b_{ij}, b_{ji})]}$$

де S_i — кількість видів в угрупованні i ; S_T — загальна кількість видів в усіх порівнюваних угрупованнях; b_{ij} , b_{ji} — кількість видів, які трапляються лише в локальних угрупованнях i та j відповідно при попарному порівнянні.

Таксони водоростей, незалежно від рангу, наведені згідно з міжнародним електронним каталогом *AlgaeBase* (Guiry, Guiry, 2023).

Сапробіологічну характеристику якості водного середовища літоралі та пелагіалі за мікрофітобентосом визначали:

- за співвідношенням видів-індикаторів від χ -сапробів до α -сапробів;
- за величинами індексу сапробності Пантле-Букк у модифікації Сладечека за чисельністю (S_N) та біомасою (S_B) видів-індикаторів сапробності (Shcherbak et al., 2023b).

Результати та обговорення

Характеристика структури мікрофітобентосу на різних етапах існування водосховища

Згідно з Odum (1953), поняття «структура» включає характеристику будь-якого альгоугруповання на всіх щаблях систематичної ієрархії — від найвищого таксономічного рангу (відділу) до видів із внутрішньовидовими таксонами (ввт) включно як за абсолютними показниками (кількість

таксонів), так і за їхнім співвідношенням (%). Важливим методичним підходом, особливо при виконанні порівняльного аналізу та узагальнення, використання великого масиву літературних даних, для отримання більш репрезентативних результатів бажано використовувати не абсолютні, а відносні (%) показники.

Проведений ретроспективний аналіз флористичних спектрів мікрофітобентосу за період 1961–2021 рр. на різних етапах існування водосховища (незарегульована річкова ділянка Верхнього Дніпра, періоди становлення, стабілізації екосистеми водосховища та сучасний етап) для водосховища в цілому дозволяє стверджувати наступне:

– таксономічне різноманіття мікрофітобентосу в 1976, 1977 і 1984 рр. коливалось у межах від 165 видів (234 ввт) до 104 (146), тоді як за оригінальними даними (2021 р.) воно нараховувало 194 (199) відповідно¹;

– упродовж усього періоду досліджень, проведених співробітниками Інституту гідробіології НАН України, відмічалось, що у мікрофітобентосі домінують *Cyanobacteria*, *Bacillariophyta* та *Chlorophyta* в різних відсотках (табл. 1);

– флористична частка *Cyanobacteria* та *Chlorophyta* була найбільшою на ділянці незарегульованого Верхнього Дніпра, акваторія якого характеризувалася високим різноманіттям біотопів, оскільки окрім річкового русла включала низку заплавних озер, стариць і рукавів. На сьогодні спостерігається зниження частки цих відділів у флористичному спектрі мікрофітобентосу;

– аналогічні закономірності характерні також для представників інших відділів;

– на всіх етапах існування водосховища, починаючи з періоду становлення і до сучасного періоду, провідна роль належала *Bacillariophyta*.

Наведені показники видового багатства досить близькі в межах значного часового інтервалу (більш ніж 40-річний період) і свідчать про закінчення періоду формування та стабілізації донних альгогрупвань.

Таким чином, на всіх етапах, що охоплюють 60-річний період існування Київського вдсх, мікрофітобентос незмінно був представлений полідомінантним комплексом *Bacillariophyta*—*Chlorophyta*—*Cyanobacteria*, що свідчить про його важливе значення у формуванні як біорізноманіття, так і стійкості до впливу різних екологічних чинників. Відповідно,

¹ Повний список таксономічного різноманіття мікрофітобентосу літоралі та пелагіалі Київського вдсх у літній період 2021 р. наведено в електронному доповненні до статті на сайті (<https://doi.org/10.15407/alg35.03.173>).

мікрофітобентос є важливим компонентом автотрофної ланки, яка забезпечує життєдіяльність біоти Київського вдсх.

Таблиця 1. Флористичні спектри (%) провідних відділів мікрофітобентосу на різних етапах існування Київського вдсх

Відділ	Верхній Дніпро до зарегулювання ¹	Період становлення Київського вдсх ¹	Період стабілізації ²		Сучасний період ³
	1961–1963 рр.	1966–1967 рр.	1976 р.	1977 р.	2021 р.
<i>Cyanobacteria</i>	17	13	9	11	11
<i>Bacillariophyta</i> ⁴	23	37	36	39	68
<i>Chlorophyta</i>	33	32	29	38	16
Інші	27	18	26	12	5
Σ	100%	100%	100%	100%	100%

Примітки: 1 — дані К.С. Владимірової (Vladimirova, 1978); 2 — дані Л.В. Скорик (Skorik, 1989); 3 — оригінальні дані; 4 — представлена кількість видів, а також ті, що були ідентифіковані при використанні постійних препаратів *Bacillariophyta*.

Таксономічна структура мікрофітобентосу літоралі та пелагіалі водосховища

На доцільності виділяти в дніпровських водосховищах окремо мікрофітобентос літоралі та пелагіалі наголошувала К.С. Владимірова (Vladimirova, 1978), але спеціальні дослідження з цього питання не проводилися. Тому було проведено порівняльний аналіз оригінальних даних за таксономічною структурою мікрофітобентосу літоралі та пелагіалі на всіх щаблях систематичної ієрархії водоростей.

Так, за флористичними спектрами в літоралі та пелагіалі чільне місце, практично в рівних частках, займали *Bacillariophyta*. Для інших відділів отримані дещо відмінні результати. Зокрема, для *Chlorophyta* та *Euglenozoa* характерні більші частки у флористичному спектрі мікрофітобентосу в пелагіалі, а для *Cyanobacteria* — в літоралі. Цікаво, що *Charophyta* (рід *Cosmarium*) були зареєстровані лише в літоралі, а *Ochrophyta* (роди *Kephyrion*, *Ochromonas*) і *Cryptista* (рід *Cryptomonas*) — тільки в пелагіалі (див. рисунок).

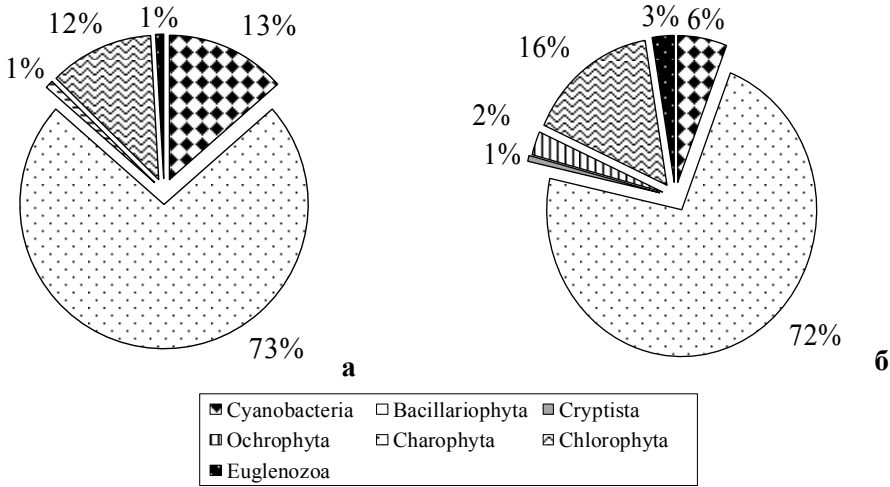


Рисунок. Порівняльна характеристика флористичних спектрів структури мікрофітобентосу літоралі (а) та пелагіалі (б) Київського вдсх

Характерною ознакою флористичних спектрів мікрофітобентосу Київського вдсх у сучасний період, незалежно від того, літораль це чи пелагіаль, є домінування водоростей трьох відділів, частки яких можна розташувати у вигляді ранжируваного ряду: *Bacillariophyta* > *Chlorophyta* > *Cyanobacteria*. Аналогічна картина характерна для річкової ділянки Верхнього Дніпра та Київського вдсх на етапах становлення (Vladimirova, 1978) і стабілізації (Skorik, 1989). Представлений ранжируваний ряд притаманний також флористичному спектру наведених відділів фітопланктону верхньокаскадних дніпровських водосховищ — Київського та Канівського (Shcherbak et al., 2023a, 2024b).

Наведені вище результати досліджень є ще одним незаперечним підтвердженням постійного взаємозв'язку різних альгоугруповань: фітопланктону та мікрофітобентосу в єдине ціле — автотрофну ланку дніпровських водосховищ.

Порівняльний аналіз таксономічного різноманіття мікрофітобентосу літоралі та пелагіалі на всіх щаблях систематичної ієрархії показав цілковиту ідентичність структури мікрофітобентосу на рівні відділ — порядок для *Cyanobacteria*, *Bacillariophyta* та *Chlorophyta*. Відмінності в їхній структурній організації досить показово проявляються на рівні родин, родів та, особливо, в кількості видів (ввт). Для *Bacillariophyta* це, зокрема, представники порядків *Stephanodiscales*, *Fragillariales*, *Eunotiales*, *Cymbellales*, *Achnanthes*, *Naviculales*, *Bacillariales*, *Rhopalodiales*, для *Cyanobacteria* — *Oscillatoriales*, *Chlorococcales*, *Nostocales*, для *Chlorophyta* — *Chlamydomonales* і *Sphaeropleales* (табл. 2).

Таблиця 2. Порівняльна характеристика таксономічного різноманіття мікрофітобентосу літоралі та пелагіалі Київського водос у літній період 2021 р.

Літораль	Відділ	Клас		Порядок		Родина (вуг)		Види (вуг)				
		Літораль	Пелагіаль	Літораль	Пелагіаль	Літораль	Пелагіаль	Літораль	Пелагіаль			
				Літораль	Пелагіаль	Літораль	Пелагіаль	Літораль	Пелагіаль			
Cyanobacteria	Cyanobacteria	Cyanophyceae	Cyanophyceae	Pseudanabaenales	Pseudanabaenales	1	1	1	1	1		
				Leptodngyhyales	-	1	-	1	-	3	-	
				-	Geitlerinematales	-	1	-	1	-	1	-
				Oscillatoriales	Oscillatoriales	1	1	2	1	3	1	
				-	Coleofasciculales	-	1	-	1	-	1	-
				Chroococcales	Chroococcales	1	1	4	3	5	3	
				Nostocales	Nostocales	1	1	2	2	3	2	
				Meiostrales	Meiostrales	1	1	1	1	1	1	
				Aulacoseirales	Aulacoseirales	1	1	1	1	3	3	
				Thalassiosirales	-	1	-	1	-	1	-	
				Stephanodiscals	Stephanodiscals	1	1	1	2	1	4	
				Fragilariales	Fragilariales	2	2	6	7	9	13	
				Rhabdonematals	Rhabdonematals	1	1	1	3	1	4	
Bacillariophyta	Bacillariophyta	Bacillariophyceae	Bacillariophyceae	Licnophorales	Licnophorales	1	1	1	2	3		
				-	Eimnolales	-	1	-	1	-	6	
				Mastogloiales	Mastogloiales	1	1	1	1	1	1	
				Cymbellales	Cymbellales	3	5	7	8	20	21	
				Achnanthes	Achnanthes	2	2	3	3	10	9	
				Naviculales	Naviculales	5	5	7	8	21	22	
				Thalassiosiphyscales	Thalassiosiphyscales	1	1	1	1	3	2	
				Bacillariales	Bacillariales	1	1	1	2	4	14	
				Rhopalodiales	Rhopalodiales	1	1	1	1	2	5	
				Sarivellales	Sarivellales	1	1	1	2	2	3	

-					Rhopalodiales	Rhopalodiales	1	1	1	1	1	2	5
	Cryptista	-			Surirellales	Surirellales	1	1	1	2	2	3	
	Ochromophyta			Cryptophyceae		Cryptomonadales	-	1	-	1	-	1	
				Chrysophyceae		Chromulinales	-	2	-	2	-	2	
				Eustigmatophyceae		Ochromonadales	-	1	-	1	-	1	
Chlorophyta						Goniocladoriales	-	1	-	1	-	1	
			Zygnematales		Desmidiates		1	-	1	-	1	-	
			Trebouxiophyceae		Chlorellales	Chlorellales	1	1	3	2	3	2	
Chlorophyta				Trebouxiophyceae		Prasiotales	-	1	-	1	-	1	
				Chlorophyceae		Chlamydomonadales	-	1	-	2	-	3	
Euglenozoa					Sphaeropleales	Sphaeropleales	4	4	7	9	10	18	
				Euglenophyceae	Euglenales	Euglenales	1	2	1	2	1	4	

Примітка: «-» — представники даного таксону відсутні.

Для більш детальної характеристики таксономічного різноманіття мікрофітобентосу літоралі та пелагіалі проведено порівняльний аналіз на рівні провідних родин і родів, які мали ранг вище 10-го (табл. 3, 4).

Таблиця 3. Порівняльна характеристика провідних родин мікрофітобентосу літоралі та пелагіалі Київського вдех

Родина	Літораль		Пелагіаль	
	Кількість ввт	Ранг	Кількість ввт	Ранг
<i>Naviculaceae</i>	15	1	14	1,5
<i>Bacillariaceae</i>	4	8,5	14	1,5
<i>Cymbellaceae</i>	10	2	10	4
<i>Gomphonemataceae</i>	9	3	6	7
<i>Staurosiraceae</i>	7	4	7	5
<i>Scenedesmaceae</i>	6	5,5	11	3
<i>Achnanthesiaceae</i>	6	5,5	5	9,5
<i>Microcystaceae</i>	5	7	3	*
<i>Fragilariaceae</i>	2	*	6	7
<i>Eunotiaceae</i>	–	–	6	7
<i>Cocconeidaceae</i>	4	8,5	4	*
<i>Rhopalodiaceae</i>	1	*	5	9,5

Примітка. Жирним шрифтом позначено родини, які займають перші рангові місця; * — рангове місце родини знаходиться після 10-го, «—» — представників родини не виявлено.

Так, структурна організація мікрофітобентосу літоралі на рівні родин має вигляд наступного ранжируваного ряду: *Naviculaceae* > *Cymbellaceae* > *Gomphonemataceae* > *Staurosiraceae* > *Scenedesmaceae* та *Achnanthesiaceae*.

В структурній організації мікрофітобентосу пелагіалі два перші рангові місця займають дві родини з однаковою кількістю видів (по 14). Тому ранжируваний ряд провідних родин для пелагіалі має вигляд: *Bacillariophiaceae* та *Naviculaceae* > *Scenedesmaceae* > *Cymbellaceae* > *Staurosiraceae*.

Спільною ознакою представлених ранжируваних рядів є те, що найвищі ранги у літоралі та пелагіалі притаманні видам з еколого-топічними уподобаннями до вегетації на різнотипних субстратах. У той же час типово планктонні форми (родина *Microcystaceae*) займають значно нижче рангове місце в літоралі, а в пелагіалі навіть не входять до десяти провідних родин.

Таблиця 4. Порівняльна характеристика провідних родів мікрофітобентосу літоралі та пелагіалі Київського вдсх

Рід	Літораль		Пелагіаль	
	Кількість ввт	Ранг	Кількість ввт	Ранг
<i>Nitzschia</i>	4	5,5	13	1
<i>Navicula</i>	11	1	9	2
<i>Desmodesmus</i>	4	5,5	7	3
<i>Gomphonema</i>	7	2	6	4,5
<i>Eunotia</i>	—	—	6	4,5
<i>Placoneis</i>	5	3	3	*
<i>Epithemia</i>	2	*	5	6
<i>Cocconeis</i>	4	5,5	4	7,5
<i>Planothidium</i>	4	5,5	2	*
<i>Fragilaria</i>	1	*	4	7,5

Примітка. Жирним шрифтом позначено роди, які займають перші рангові місця; * — рангове місце роду знаходиться після 10-го, «—» — представників роду не виявлено.

Ранжируваний ряд провідних родів у мікрофітобентосі літоралі (табл. 4) має вигляд: *Navicula* > *Gomphonema* > *Placoneis* > *Cocconeis* — *Nitzschia* — *Planothidium*; а в пелагіалі: *Nitzschia* > *Navicula* > *Desmodesmus* > *Gomphonema* — *Eunotia*. Як і для родин, чільні рангові місця за кількістю видів у літоралі та пелагіалі займали роди, види яких приурочені до вегетації на різних субстратах.

Отже, проведений порівняльний аналіз показав як спільності, так і відмінності в структурній організації мікрофітобентосу літоралі та пелагіалі на рівні провідних родин і родів.

Встановлено, що структурній організації мікрофітобентосу літоралі та пелагіалі на рівні провідних родин і родів притаманна гетерогенність, яка проявляється особливо на рівні родин, родів та видів (ввт), що є важливою адаптаційною ознакою водоростевих угруповань у сучасних умовах.

Частота трапляння видів та оцінка подібності таксономічного складу мікрофітобентосу літоралі та пелагіалі

Важливими показниками таксономічного різноманіття альгоугруповань є частота трапляння (%) конкретних видів та оцінка подібності мікрофітобентосу літоралі та пелагіалі на рівні родин, родів і видів (ввт).

Проведений аналіз частоти трапляння 194 види (199 ввт) показав, що найвищою частотою трапляння характеризувалися 22 таксони. Серед них переважали *Vacillariophyta*, які за морфологічними ознаками налічували: пенатних форм — 15, а центричних — 5. *Cyanobacteria* та *Chlorophyta* представлені лише одним видом кожен (табл. 5).

Таблиця 5. Види водоростей з найбільшою частотою трапляння у мікрофітобентосі літоралі та пелагіалі Київського вдсх

Таксон	Частота трапляння, %	
	Літораль	Пелагіаль
<i>Amphora ovalis</i> (Kützing) Kützing	100	100
<i>Aneumastus tusculus</i> (Ehrenberg) D.G.Mann & A.J.Stickle	100	50
<i>Aulacoseira granulata</i> (Ehrenberg) Simonsen	100	100
<i>Cocconeis placentula</i> Ehrenberg	100	100
<i>Surirella librile</i> (Ehrenberg) Ehrenberg	100	33
<i>Navicula reinhardtii</i> (Grunow) Grunow	100	67
<i>Staurosira construens</i> Ehrenberg	100	83
<i>Staurosira binodis</i> (Ehrenberg) Lange-Bertalot	100	100
<i>Staurosirella martyi</i> (Héribaud) E.A.Morales & K.M.Manoylov	100	83
<i>Ulnaria ulna</i> (Nitzsch) Compère	100	83
<i>Merismopedia elegans</i> A.Braun ex Kützing	83	–
<i>Cyclotella meneghiniana</i> Kützing	83	100
<i>Navicula cryptocephala</i> Kützing	83	67
<i>Placoneis elginensis</i> (W.Gregory) E.J.Cox	83	67
<i>Planothidium rostratum</i> (Østrup) Lange-Bertalot	83	33
<i>Stephanodiscus hantzschii</i> Grunow	83	100
<i>Fragilaria vaucheriae</i> (Kützing) J.B.Petersen	67	83
<i>Desmodesmus communis</i> (E.Hegewald) E.Hegewald	50	83
<i>Nitzschia vermicularis</i> (Kützing) Hantzsch	33	83
<i>Opephora martyi</i> var. <i>polymorpha</i> (Jouravleva) Proshkina-Lavrenko	33	83
<i>Aulacoseira distans</i> (Ehrenberg) Simonsen	17	100
<i>Stephanodiscus binderanus</i> (Kützing) Krieger	–	83

«–» – вид не виявлено.

Подібна тенденція до домінування пенатних форм у мікрофітобентосі спостерігалась як у лентичних екосистемах (Канівське вдсх), так і в лотичних (р. Західний Буг з допливами) (Shcherbak et al., 2023a, 2024a).

Проведене ранжирування 22 видів з найвищою частотою трапляння у мікрофітобентосі за їхніми частотами трапляння дозволило виділити 8 груп:

1. Частота трапляння як у літоралі, так і в пелагіалі — 100% (4 види: *Amphora ovalis*, *Aulacoseira granulata*, *Cocconeis placentula* та *Staurosira binodis*).

2. Частота трапляння у літоралі — 100%, у пелагіалі — 50–99% (5 видів: *Aneumastus tusculus*, *Navicula reinhardtii*, *Staurosira construens*, *Staurosirella martyi* та *Ulnaria ulna*).

3. Частота трапляння у літоралі — 50–99%, у пелагіалі — 100% (2 види, які є типово планктонними формами: *Cyclotella meneghiniana* та *Stephanodiscus hantzschii*).

4. Частота трапляння як у літоралі, так і в пелагіалі — 50–99% (4 види: *Navicula cryptocephala*, *Placoneis elginensis*, *Fragilaria vaucheriae* та *Desmodesmus communis*).

5. Частота трапляння в літоралі 100%, у пелагіалі менше 50% (1 вид: *Surirella librile*).

6. Частота трапляння у літоралі менше 50%, у пелагіалі — 100% (1 вид: *Aulacoseira distans*).

7. Частота трапляння у літоралі 50–99%, у пелагіалі — менше 50% (2 види: *Merismopedia elegans*, *Planothidium rostratum*).

8. Частота трапляння у літоралі менше 50%, у пелагіалі — 50–99% (3 види: *Nitzschia vermicularis*, *Opephora martyi* var. *polymorpha* та *Stephanodiscus binderanus*).

Цікаво, що *Merismopedia elegans* траплялася лише в літоралі, а *S. binderanus* — у пелагіалі (див. табл. 5).

Отже, за частотою трапляння видів у літоралі та пелагіалі домінували *Vacillariophyta*, представлені переважно пенатними формами. За результатами аналізу частоти трапляння встановлено, що мікрофітобентосу притаманна певна гетерогенність у просторовому розподілі таксономічного різноманіття.

За результатами досліджень мікрофітобентосу Київського вдсх у сучасний період були наведені значення коефіцієнтів видової подібності Серенсена (K_S), та Кендела (τ) для пар локальних угруповань лише для літоралі (Davudov, Koziychuk, 2024, 2025). Проте, з огляду на завдання даної роботи, більш інформативним та доцільним є порівняння кількох (більше двох) альгоугруповань за множинним індексом видової подібності

Серенсена (K_S). Це зумовлено тим, що K_S характеризує ступінь співпадіння або «перекривання» (англ. overlap) видового складу множини угруповань за рахунок видів, які є спільними для двох та/або більше альгоугруповань. Розрахований множинний індекс подібності K_S для мікрофітобентосу літоралі водосховища становив 0,33, для пелагіалі — 0,28. Тобто, ступінь співпадіння видового складу мікрофітобентосу літоралі складає 33%, а пелагіалі — 28%.

Встановлені відмінності у видовому складі мікрофітобентосу літоралі та пелагіалі за величинами K_S свідчать про більшу гетерогенність глибоководних (руслувих) ділянок, ніж літоральних. Частковим підтвердженням цих закономірностей є також те, що у пелагіалі кількість видів (ввт) є більшою, ніж у літоралі.

Вважаємо, що це зумовлено кількома чинниками:

- привнесення в руслові акваторії середньої та нижньої ділянки Основного плеса водосховища водоростей із дніпровського, прип'ятського і, меншою мірою, тетерівського річкових плес;

- у донних альгоугрупованнях пелагіалі присутня більша кількість видів, які за несприятливих умов або через природні особливості циклу розвитку осідають із товщі води на дно;

- у літоралі спостерігається зворотній процес — надходження водоростей у водну товщу внаслідок більш інтенсивної динаміки водних мас, особливо при вітрохвильовому перемішуванні;

- зменшення видового складу мікрофітобентосу літоралі зумовлено прямим та опосередкованим впливом заростей вищої водяної рослинності, які займають значні площі мілководь та є конкурентами за біогенні елементи.

Результати проведеного аналізу подібності флористичної структури за коефіцієнтом Кендела (τ) показали, що на рівні родин для літоралі величини τ коливались у межах від 0,34–0,37 до 0,63–0,64, для пелагіалі — від 0,38–0,39 до 0,65–0,68.

На рівні родів величини τ для літоралі коливались у межах від 0,24–0,33 до 0,56–0,57, для пелагіалі — від 0,26–0,30 до 0,51–0,56.

Отже, на рівні родин і родів коефіцієнти Кендела коливались у досить широких межах, що свідчить про високу флористичну різноманітність мікрофітобентосу. При цьому, як і для величин множинного індексу видової подібності Серенсена (K_S), спостерігається певна тенденція до більш низьких показників τ у пелагіалі, що вказує на більшу гетерогенність (відмінність між собою) таксономічного різноманіття цих акваторій на рівні родин, родів, видів та внутрішньовидових таксонів.

Таким чином, проведений порівняльний аналіз таксономічного складу за частотою трапляння, коефіцієнтів Кендела для родин, родів і множинного коефіцієнта видової подібності Серенсена (K_S) показав, що мікрофітобентос на сучасному етапі існування Київського вдсх характеризується високим таксономічним багатством як на літоралі, так і в пелагіалі. Разом з тим спостерігається тенденція до більшої гетерогенності донних альгоугруповань пелагіалі. Отримані дані підтверджують специфічність донних альгоугруповань, що порівнювалися, та їхній постійний взаємозв'язок з іншими компонентами автотрофної ланки Київського вдсх.

Сапробіологічна оцінка якості водного середовища літоралі та пелагіалі

Застосована у роботі методологія паралельного дослідження таксономічного різноманіття мікрофітобентосу літоралі та пелагіалі має ще одну перевагу. Антропогенне забруднення літоралі визначається в основному надходженням органічних та токсичних речовин з прилеглих водозбірних площ, а мікрофітобентос літоралі одним із перших досить показово реагує на алохтонні речовини.

У пелагіалі на мікрофітобентос загалом впливають забруднюючі речовини, які знаходяться у водному потоці. У випадку Київського вдсх це стік із Дніпровського та Прип'ятського річкових плес.

Проведений сапробіологічний аналіз мікрофітобентосу виявив 163 ввт (83% загальної кількості водоростей мікрофітобентосу водосховища), які були видами-індикаторами різних зон сапробності: χ -о — 64 ввт (39%), β -мезосапроби — 85 ввт (52%) і α -сапроби — 14 ввт (9% загальної кількості видів-індикаторів).

За оригінальними даними, серед ідентифікованих 199 ввт мікрофітобентосу водосховища не було зареєстровано жодного представника р-сапробної зони (дуже брудні води), V клас якості води. Це свідчить про відсутність у літній період 2021 р. «точкових» чи «розсіяних» джерел забруднення у місцях, де проводилися дослідження. Отримані дані співпадають з результатами сапробіологічної оцінки якості води за фітопланктоном у середній та нижній ділянках Київського вдсх (Shcherbak et al., 2024b).

Проведена оцінка якості водного середовища за співвідношенням (%) видів-індикаторів характеризувалася наступними закономірностями (табл. 6):

– літораль: χ -о — 27–44%, S_N — 1,48–1,80, S_B — 1,85–2,08–45–57%, α — 7–14%;

– пелагіаль: χ -о — 35–48%, β — 45–58%, α — 6–9%.

Таблиця 6. Оцінка якості водного середовища літоралі та пелагіалі Київського вдсх у літній період 2021 р.

Показник	с. Страхолисія		о. Хільча		с. Сухолуччя		с. Ровжі		с. Глібівка		с. Козаровичі	
	Літо- раль	Пела- гіаль	Літо- раль	Пела- гіаль	Літо- раль	Пела- гіаль	Літо- раль	Пела- гіаль	Літо- раль	Пела- гіаль	Літо- раль	Пела- гіаль
χ-о- сапроби	$\frac{15}{40}$	$\frac{26}{39}$	$\frac{18}{44}$	$\frac{19}{48}$	$\frac{17}{39}$	$\frac{25}{48}$	$\frac{18}{39}$	$\frac{22}{34}$	$\frac{10}{36}$	$\frac{12}{35}$	$\frac{8}{27}$	$\frac{20}{41}$
β- сапроби	$\frac{17}{46}$	$\frac{37}{55}$	$\frac{20}{49}$	$\frac{18}{45}$	$\frac{21}{49}$	$\frac{24}{46}$	$\frac{25}{54}$	$\frac{37}{58}$	$\frac{14}{50}$	$\frac{19}{56}$	$\frac{17}{57}$	$\frac{25}{51}$
α- сапроби	$\frac{5}{14}$	$\frac{4}{6}$	$\frac{3}{7}$	$\frac{3}{7}$	$\frac{5}{12}$	$\frac{3}{6}$	$\frac{3}{7}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{4}{14}$	$\frac{3}{9}$	$\frac{5}{17}$	$\frac{4}{8}$
Усього	$\frac{37}{100}$	$\frac{67}{100}$	$\frac{41}{100}$	$\frac{40}{100}$	$\frac{43}{100}$	$\frac{52}{100}$	$\frac{46}{100}$	$\frac{64}{100}$	$\frac{28}{100}$	$\frac{34}{100}$	$\frac{30}{100}$	$\frac{49}{100}$
Індекс сапробності Пантле-Букк у модифікації Сладечека												
S_N	1,80	1,77	1,48	1,81	1,49	1,99	1,67	2,02	1,81	1,82	1,80	2,08
S_B	1,93	1,90	1,51	2,01	1,51	1,85	1,90	1,99	1,87	2,11	1,69	2,14

Примітка. Над рискою — кількість видів-індикаторів даної зони сапробності, під рискою — відсоток загальної кількості видів-індикаторів.

Оцінка якості водного середовища за Пантле-Букк у модифікації Сладечека з використанням величин чисельності (S_N) та біомаси (S_B)² видів-індикаторів мала вигляд:

- літораль: S_N — 1,48–1,80, S_B — 1,85–2,08;
- пелагіаль: S_N — 1,77–2,08, S_B — 1,69–2,14.

Результати оцінки якості водного середовища Київського вдсх, отримані за допомогою двох методів (за співвідношенням видів-індикаторів та за індексом сапробності), дозволяють зробити наступні узагальнення:

– як у літоралі, так і в пелагіалі в період дослідження були відсутні точкові чи розсіяні джерела забруднення алохтонними органічними речовинами;

² Величини чисельності та біомаси мікрофітобентосу приведені згідно: Davydov, Koziyshuk, 2024.

– β -мезосапробні види переважали у літоралі та пелагіалі, величини індексів сапробності були характерні для β -мезосапробної зони «помірно забруднених» вод, III клас якості води, що є характерним для більшості водойм і водотоків України та країн ЄС;

– отримані дані в цілому співпадають з результатами оцінки якості водного середовища за видами-індикаторами фітопланктону;

– відмічено погіршення якості водного середовища в літоралі та пелагіалі в нижній частині водосховища поблизу сіл Глібівка та Козаровичі.

Отже, застосована методологія дозволяє отримати репрезентативні результати паралельної оцінки якості водного середовища літоралі та пелагіалі за мікрофітобентосом і, відповідно, допомагає виявити наявність чи відсутність точкових чи розсіяних джерел забруднення.

Висновки

За результатами ретроспективного аналізу, який охоплює період з 1961 р. (незарегульована річкова ділянка Верхнього Дніпра) до сучасного стану Київського вдсх у 2021 р., показано, що впродовж 60-річного періоду мікрофітобентос представлений полідомінантним комплексом *Bacillariophyta—Chlorophyta—Cyanobacteria*. Упродовж досліджень мікрофітобентосу з 1966 по 1984 рр. його видове та внутрішньовидове багатство коливалося в межах 104 види (146 ввт) — 165 видів (234 ввт), а за оригінальними даними 2021 р. нараховує 194 види (199 ввт), що свідчить про багаторічну стабільність структури донних альгоугруповань як важливого компонента біорізноманіття автотрофної ланки головного водосховища Дніпровського каскаду.

Застосований методичний підхід, який полягає в паралельному дослідженні донних водоростевих угруповань літоралі та пелагіалі, дозволив встановити спільності та відмінності в їхній структурній організації.

Доведено, що на найвищих щаблях (відділ — порядок) структурна організація мікрофітобентосу літоралі та пелагіалі є аналогічною, а відмінності рееструються на рівні родин — видів (ввт).

Найвищою частотою трапляння в літоралі (17–100%) та пелагіалі (33–100%) характеризувалися 22 види, серед яких переважали *Bacillariophyta*, представлені в основному пенатними формами. Встановлено, що із загальної кількості видів лише 4 види характеризувалися 100%-ою частотою трапляння як у літоралі, так і в пелагіалі. Це свідчить про

своєрідність таксономічного складу мікрофітобентосу літоралі та пелагіалі та гетерогенність його структури.

Множинний індекс видової подібності Серенсена (K_S) для мікрофітобентосу літоралі становив 0,33, пелагіалі — 0,28. Відповідно, ступінь співпадіння видового складу літоралі був дещо вищим, ніж пелагіалі.

Встановлені відмінності в частоті трапляння (%), величинах множинних індексів видової подібності Серенсена (K_S), коефіцієнтів Кендела (τ) свідчать про більш виражену гетерогенність мікрофітобентосу пелагіалі. Це зумовлено комплексом абіотичних і біотичних чинників, серед яких: привнесення водоростей з дніпровського, прип'ятського і тетерівського річкових плесів, осідання водоростей з товщі води на дно за несприятливих умов або внаслідок природних процесів їхньої вегетації, значно менший рівень конкуренції за біогенні елементи з вищими водними рослинами, ніж у літоралі.

Сапробіологічний аналіз за мікрофітобентосом, проведений паралельно для літоралі та пелагіалі, дозволяє репрезентативно оцінити якість водного середовища кожної з цих акваторій.

Важливо, що як за співвідношенням видів-індикаторів мікрофітобентосу, так і за індексами Пантле-Букк у модифікації Сладечека, якість водного середовища характеризується як «помірно забруднені» води, β -мезосапробна зона, III клас якості води, що притаманно більшості водойм і водотоків України і країн ЄС.

Таким чином, результати паралельного дослідження таксономічної структури донних альгоугруповань головного водосховища Дніпровського каскаду свідчать про їхню своєрідність в літоралі та пелагіалі, високе біорізноманіття та важливість у функціонуванні автотрофної ланки Київського вдсх.

Список літератури

- Baselga A. 2010. Partitioning the turnover and nestedness components of beta diversity. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 19(1): 134–143.
- Davydov O.A., Koziychuk E.Sh. 2024. Peculiarities of the formation of benthic algae communities in the Kyiv Reservoir (Ukraine). *Hydrobiol. J.* 60(6): 22–32.
- Davydov O.A., Koziychuk E.Sh. 2025. Taxonomic diversity of microphytobenthos in the shallow water zone of the Kyiv Reservoir (Ukraine). *Ukr. J. Nat. Sci.* 11: 27–34. [Давидов О.А., Козійчук Е.Ш. 2025. Таксономічне різноманіття мікрофітобентосу мілководної зони Київського водосховища (Україна). *Укр. журн. природ. наук.* 11: 27–34.]
- Guiry M.D., Guiry G.M. 2023. *AlgaeBase*. World-wide electron. publ. Nat. Univ. Ireland, Galway.

- Hydrobiological regime of the Dnieper under the conditions of flow regulation.* 1967. Ed. Ya.Ya. Tseeb. Kyiv: Nauk. Dumka. 387 p. [*Гидробиологический режим Днепра в условиях зарегулированного стока.* 1967. Отв. ред. Я.Я. Цееб. Киев: Наук. думка. 387 с.]
- Kendall M.G. 1955. *Rank correlation methods.* London: Griffin. 196 p.
- Kyiv Reservoir.* 1972. Ed. Ya.Ya. Tseeb, Yu.G. Maystrenko. Kyiv: Nauk. Dumka. 460 p. [*Киевское водохранилище.* 1972. Под ред. Я.Я. Цееба, Ю.Г. Майстренко. Киев: Наук. думка. 460 с.]
- Odum E.P. 1953. *Fundamentals of ecology.* Philadelphia, London: WB. Saunders Co. 384 p.
- Oksiyuk O.P., Davydov O.A., Karpezo Yu.I. 2009. Ecological and morphological structure of microphytobenthos. *Hydrobiol. J.* 45(2): 13–23.
- Shcherbak V.I. 1989. Phytoplankton of the Dnieper and its reservoirs. Kyiv Reservoir. In: *Vegetation and bacterial population of the Dnieper and its reservoirs.* Kiev Reservoir. In: *Vegetation and bacterial population of the Dnieper and its reservoirs.* Eds L.A. Sirenko, I.L. Koreliakova, L.Ye. Mikhaïlenko. Kyiv: Nauk. Dumka. Pp. 81–86. [Щербак В.И. 1989. Фитопланктон Днепра и его водохранилищ. Киевское водохранилище. В кн.: *Растительность и бактериальное население Днепра и его водохранилищ.* Под ред. Л.А. Сиренко, И.Л. Корелякова, Л.Е. Михайленко и др. Киев: Наук. думка. С. 81–86.]
- Shcherbak V.I. 2002. Methods of studying phytoplankton. In: *Methodical fundamentals for hydrobiological studies of aquatic ecosystems.* Kyiv. Pp. 41–47. [Щербак В.И. 2002. Методи досліджень фітопланктону. У кн.: *Методичні основи гідробіологічних досліджень водних екосистем.* Київ. С. 41–47.]
- Shcherbak V.I. 2006. Phytomicrobenthos. In: *Methods of hydroecological investigations of surface waters.* Kyiv: Logos. Pp. 28–32. [Щербак В.И. 2006. Фітомікробентос. В кн.: *Методи гідроекологічних досліджень поверхневих вод.* Київ: Логос. С. 28–32.]
- Shcherbak V.I., Maystrova N.V., Zadorozhna H.M. 2019. The Dnieper phytoplankton diversity. In: *Biodiversity and bioresource potential of the Dnieper water reservoirs under conditions of climate change and biological invasion.* Kyiv: Nauk. Dumka. Pp. 67–78. [Щербак В.И., Майстрова Н.В., Задорожна Г.М. 2019. Різноманіття дніпровського фітопланктону. У кн.: *Біорізноманіття та біоресурсний потенціал екосистем дніпровських водосховищ в умовах кліматичних змін і розвитку біологічної інвазії.* Київ: Наук. думка. С. 67–78.]
- Shcherbak V.I., Semeniuk N.Ye., Davydov O.A., Larionova D.P. 2023a. Present-day characteristics of phytoplankton, microphytobenthos and phytoepiphyton of the Kaniv Reservoir. Report 1: Taxonomic, ecological diversity and spatial patterns. *Algologia.* 33(3): 147–184. [Щербак В.И., Семенюк Н.Є., Давидов О.А., Ларіонова Д.П. 2023а. Сучасна характеристика фітопланктону, мікрофітобентосу та фітоепіфітону Канівського водосховища. Повідомлення 1: Таксономічне, екологічне різноманіття та просторовий розподіл. *Альгологія.* 33(3): 147–184.] <https://doi.org/10.15407/alg33.03.147>

- Shcherbak V.I., Semeniuk N.Ye., Davydov O.A., Larionova D.P. 2023b. Present-day characteristics of phytoplankton, microphytobenthos and phytoepiphyton of the Kaniv Reservoir. Report 2: Abiotic variables, quantitative diversity, dominant species complex, trophic state, water quality. *Algologia*. 33(4): 247–277. [Щербак В.І., Семенюк Н.Є., Давидов О.А., Ларіонова Д.П. 2023b. Сучасна характеристика фітопланктону, мікрофітобентосу та фітоепіфітону Канівського водосховища. Повідомлення 2: Абіотичні чинники, кількісне різноманіття, домінуючий комплекс, трофічність та оцінка якості водного середовища. *Альгологія*. 33(4): 247–277.] <https://doi.org/10.15407/alg33.04.247>
- Shcherbak V.I., Semeniuk N.Ye., Davydov O.A., Koziychuk E.Sh. 2024a. Plankton and contour algal communities in the Ukrainian section of the Western Bug River and its tributaries. Report 1: Abiotic variables, taxonomic, ecological characteristics and floristics specifics of phytoplankton, microphytobenthos, phytoperiphyton. *Algologia*. 34(2): 130–159. [Щербак В.І., Семенюк Н.Є., Давидов О.А., Козійчук Е.Ш. 2024a. Планктонні та контурні угруповання водоростей української ділянки р. Західний Буг та її допливів. Повідомлення 1. Абіотичні складові, таксономічна, екологічна характеристика та флористичні особливості фітопланктону, мікрофітобентосу, фітоперифітону. *Альгологія*. 34(2): 130–159.] <https://doi.org/10.15407/alg34.02.130>
- Shcherbak V.I., Semenyuk N.Ye., Kutishchev P.S., Lutsenko D.A., Koziychuk E.Sh. 2024b. Phytoplankton characteristics in various ecosystems of the Dnieper River: Abiotic factors and phytoplankton taxonomic diversity. *Hydrobiol. J.* 60(4): 3–23.
- Skorik L.V. 1989. Phytomicrobenthos of the Dnieper and its reservoirs. In: *Vegetation and bacterial population of the Dnieper and its reservoirs*. Eds L.A. Sirenko, I.L. Koreliakova, L.Ye. Mikhailenko et al. Kyiv: Nauk. Dumka. Pp. 113–129. [Скорик Л.В. 1989. Фитомікробентос Дніпра и его водохранилищ. В кн.: *Растительность и бактериальное население Днeпра и его водохранилищ*. Под ред. Л.А. Сиренко, И.Л. Корелякова, Л.Е. Михайленко и др. Киев: Наук. думка. С. 113–129.]
- Topachevskiy O.V., Oksiyuk O.P. 1960. Diatoms – *Bacillariophyta*. In: *Identification manual of the freshwater algae of Ukrainian RSR*. Kyiv: Nauk. Dumka. Issue 9. 411 p. [Топачевський О.В., Оксіюк О.П. 1960. Діатомові водорості – *Bacillariophyta*. У кн.: *Визначник прісноводних водоростей Української РСР*. Київ: Наук. думка. Вип. 9. 411 с.]
- Tsaplina Ye.N., Kholodko O.P., Linchuk M.I. 2014. Thickets of higher aquatic plants in the estuarine sections of the rivers flowing into the Kiev Reservoir. *Hydrobiol. J.* 50(6): 17–31. *Vegetation and bacterial population of the Dnieper and its reservoirs*. 1989. Eds L.A. Sirenko, I.L. Koreliakova, L.Ye. Mikhailenko et al. Kyiv: Nauk. Dumka. 232 p. [*Растительность и бактериальное население Днeпра и его водохранилищ*. 1989. Под ред. Л.А. Сиренко, И.Л. Корелякова, Л.Е. Михайленко и др. Киев: Наук. думка. 232 с.]
- Vladimirova K.S. 1978. *Phytomicrobenthos of the Dnieper, its reservoirs and the Dnieper-Bug Estuary*. Kyiv: Nauk. Dumka. 365 p. [Владимирова К.С. 1978. *Фитомікробентос Дніпра, его водохранилищ и Днепро-Бугского лимана*. Киев: Наук. думка. 365 с.]

Davydov O.A. (<https://orcid.org/0009-0004-2381-723X>)

Shcherbak V.I. (<https://orcid.org/0000-0002-1237-6465>)

Semeniuk N.Ye. (<https://orcid.org/0000-0003-4447-3507>)

Koziychuk E.Sh. (<https://orcid.org/0009-0002-5762-938X>)

Institute of Hydrobiology of the NAS of Ukraine,
12 Prosp. Volodymyra Ivasiuka, Kyiv 04210, Ukraine

Structure of microphytobenthos in the pelagic and littoral areas of Kyiv Reservoir

The paper considers the common features and differences in the microphytobenthos structure in the littoral and pelagic areas of Kyiv Reservoir. The findings may be used for more precise water quality assessment in the bottom layers of shallow and deep-water areas. The retrospective data overview shows that for 60 years of Kyiv Reservoir's existence the bottom algal communities has been represented by polydominant complex of *Bacillariophyta*—*Chlorophyta*—*Cyanobacteria*. During the period of microphytobenthos studies since 1966 to 1984 its species and intraspecies diversity varied within 104 species (146 ist) — 165 species (234 ist), and according to our field data includes 194 species (199 ist), which is indicative of the the bottom algal communities' long-term stability. The microphytobenthos structure in the littoral and pelagic areas is similar at the highest taxonomic levels (phylum — order), and differences are evident at the family – species levels. The highest occurrence rate in the littoral area (17–100%) and pelagic area (33–100%) was observed for 22 species, among which pennate diatoms prevailed. Out of the total species number only 4 species had 100% occurrence rate both in the littoral and pelagic area. This is indicative of the distinctness of the microphytobenthos taxonomic composition in the littoral and pelagic areas and heterogeneity of its structure. The differences in the occurrence rate (%), multiple indices of Sørensen similarity, Kendall coefficient show more pronounced heterogeneity of microphytobenthos in the pelagic area. According to the ratio of indicator species of saprobity and Pantle-Buck indices in Sladeček modification the water quality of the areas under study is characterized as “moderately polluted”, β -mesosaprobic zone, 3rd class of water quality. The findings of the parallel studies on the taxonomic structure of bottom algal communities in Kyiv Reservoir show their distinctness in the littoral and pelagic areas, high diversity and important role in the autotrophic link functioning.

Key words: microphytobenthos, Kyiv Reservoir, littoral area, pelagic area, taxonomic diversity, water quality

Citation. Davydov O.A., Shcherbak V.I., Semeniuk N.Ye., Koziychuk E.Sh. 2025. Structure of microphytobenthos in the pelagic and littoral areas of Kyiv Reservoir. *Algologia*. 35(3): 173–193. <https://doi.org/10.15407/alg35.03.173>

ЛЕ ДІНЬ ХУН^{1*}
ВО ТХІ ДЬЄУ ТРАНГ¹
ХОАНГ ТХІ ТРАНГ НГУЄН²
ДІНЬ ТХАНЬ ТРУНГ¹
НГО ТХІ ДУЙ НГОК¹
ФАН ТХІ ХОАЙ ТРІН¹

НОВИЙ ЧЛЕН РОДИНИ ЛЕКТИНІВ ОААН З КУЛЬТИВОВАНОЇ У В'ЄТНАМІ ЧЕРВОНОЇ ВОДОРОСТІ *EUCHEUMA DENTICULATUM*

¹Інститут океанографії В'єтнамської академії науки і технологій,
вул. Кауда, 1, Нячанг, Провінція Кханьхоа, В'єтнам

²Університет Нячанг,

вул. Нгуєн Дінь Чіу, 2, Нячанг, Провінція Кханьхоа, В'єтнам

* Адреса для листування: ledinhhungims@yahoo.co.uk

Реферат. Червона водорість *Eucheuma denticulatum* є економічно важливим харчовим продуктом, що широко культивується у В'єтнамі. У цьому дослідженні комплементарне клонування ДНК (кДНК) на основі методів швидкої ампліфікації кінців кДНК (RACE) дозволило з'ясувати повнорозмірну послідовність нового лектиноподібного білка (названого EDL) з цієї водорості. Клонування кДНК лектиноподібного білка кодувало поліпептид з 268 амінокислот, включаючи ініціюючий метіонін. Встановлена амінокислотна послідовність лектиноподібного білка, що складається з чотирьох тандемних повторюваних доменів приблизно з 67 амінокислот і має 45% ідентичності послідовності. Первинна структура лектиноподібного білка EDL дуже схожа на структуру антивірусних і протиракових лектинів з високим вмістом манози N-глікану в нижчих організмах, включаючи *Oscillatoria agardhii* NIES-240 (OAA) з ціанобактерій, *Burkholderia oklahomensis* EO147 (BOA), *Mycococcus xanthus* (MBHA) і *Pseudomonas fluorescens* Pf0-1 (PFL) з протеобактерій, *Eucheuma serra* (ESA-2), *E. denticulatum* (EDA-2), *Kappaphycus striatus* (KSA-1 і KSA-2), *K. alvarezii* (KAA-1 і KAA-2) і *Solieria filiformis* (SfL-1 і SfL-2) з карагенофітових червоних водоростей. Висока схожість у структурі з

Надійшла до редакції 20.12.2024. Після доопрацювання 21.04.2025. Підписана до друку 20.08.2025.

Опублікована 20.09.2025

Ц и т у в а н н я . Ле Дінь Хун, Во Тхі Дьєу Транг, Хоанг Тхі Транг Нгуєн, Дінь Тхань Трунг, Нго Тхі Дуй Нгок, Фан Тхі Хоай Трін. 2025. Новий член родини лектинів ОААН з культивованої у В'єтнамі червоної водорості *Eucheuma denticulatum*. *Альгологія*. 35(3): 194–209. <https://doi.org/10.15407/alg35.03.194>

This is open access article under the CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

антивірусними та протираковими лектинами свідчить про те, що культивована червона водорість *E. denticulatum* також може стати хорошим джерелом функціонального білка (лектину) для медичного застосування.

Ключові слова: амінокислотна послідовність, карагенофіти, кДНК лектиноподібного білка, EDL, *Eucheuma denticulatum*

Вступ

Лектини, або вуглеводзв'язуючі білки, присутні в різних організмах від вірусів до ссавців і служать молекулами розпізнавання між клітинами, клітиною та матриксом, а також організмами. Завдяки здатності розрізняти вуглеводні структури лектини використовуються не лише як цінні біохімічні реагенти в багатьох галузях досліджень, включаючи глікоміку, але й як перспективні кандидати для медичного та клінічного застосування (Sharon, Lis, 2003).

Морські водорості є перспективними джерелами нових лектинів. Водоростеві лектини мають унікальну молекулярну структуру та важливу біологічну активність. Біохімічні дослідження показали, що багато лектинів, виділених з морських червоних водоростей, мають спільні властивості з лектинами прокаріотів (Hori et al., 2000). Лектини з червоних водоростей можна об'єднати в сімейство лектинів, відоме як сімейство лектинів гомологів аглютиніну *Oscillatoria agardhii* (ОААН) (Koharudin et al., 2012). ОАА містить 132 залишки з двома тандемно повторюваними доменами (Sato et al., 2007), подібно до PFA з бактерії *Pseudomonas fluorescens* (Sato et al., 2012). З іншого боку, лектини з бактерій, таких як BOA з *Burkholderia oklahomensis* EO147 (Whitley та ін., 2013), MBHA з *Mycococcus xanthus* (Romeo та ін., 1986); з червоних морських водоростей, ESA-2 з *Eucheuma serra* (Hori та ін., 2007), EDA-2 з *E. denticulatum* (Hung et al., 2015a), KSL і KSA-2 з *Kappaphycus striatus* (Hung et al., 2015b; Hung, Trinh, 2021), KAA-1/-2 з *K. alvarezii* (Hirayama et al., 2016) і SfL-1/-2 з *Solieria filiformis* (Chaves et al., 2018), усі вони містять 267–268 залишків із чотирма доменами тандемного повторення. Члени родини ОААН мають високу ідентичність амінокислотних послідовностей та мають дубльовані або чотириразові домени в своїх послідовностях, що призводить до топології типу «сингулярна бочка», що бере участь у щільному зв'язуванні з олігоманнозидами (Sato et al., 2009; Koharudin et al., 2011).

Нещодавно було виявлено та ідентифіковано кілька лектинів з високим вмістом манози, що зв'язують N-глікан, як потенційні противірусні агенти, здатні блокувати реплікацію різних вірусів з оболонкою (включаючи віруси грипу та герпесу, BJI-1 та SARS-CoV-2) (Koharudin, Gronenborn,

2014; Varre et al., 2019, 2020; Romero et al., 2021). Ці сполуки виявлені у представників різних груп нижчих організмів, зокрема, ціанобактерій: ОАА з *O. agardhii* (Sato et al., 2007; Koharudin et al., 2011), ціановірин-N (CV-N) з *Nostoc ellipsosoprum* (Boyd et al., 1997; Helle et al., 2006), сцитовірин (SVN) з *Scytonema varium* (Bokesch et al., 2003) та MVL з *Myrocystis viridis* (Bewley et al. al., 2004), актиноміцетів: актинохівін (АН) з *Longispora albida* (Chiba et al., 2001), протеобактерій: PLA з *P. fluorescens* (Sato et al., 2012), BOA з *B. oklahomensis* (Whitley et al., 2013), MBHA з *M. xanthus* (Koharudin et al., 2012) та морських водоростей: GRFT з *Griffithsia* sp. (Mori et al., 2005; O'Keefe et al., 2010), ESA-2 з *E. serra* (Hori et al., 2007), КАА-1 і КАА-2 з *K. alvarezii* (Sato et al., 2011a; Hirayama et al., 2016), ВСА з *Boodlea coacta* (Sato et al., 2011b) і HRL40 із зеленої водорості *Halimeda renschii* (Mu et al., 2017).

Ці лектини виявляють сильну антивірусну активність, блокуючи проникнення вірусів у клітини господаря через зв'язування з манозидними структурами в глікопротеїнах вірусної оболонки, які є критичними для первинної інфекції вірусів (Balzarini, 2007). Крім того, лектини морських водоростей мають протиракову активність. Зокрема, ESA з *E. serra* продемонстрували сильну активність проти ракових клітин людини, таких як клітини Colo201, HeLa, MCF-7 (Sugahara et al., 2001; Omokawa et al., 2010), Colon26 (Fukuda et al., 2006), OST (Hayashi et al., 2012), та індукували апоптотичну загибель клітин при карциномі, але не впливали на нормальні клітини, такі як нормальні фібробласти молочної залози людини MCF10-2A (Sugahara et al., 2001). SfL-лектини з *S. filiformis* продемонстрували індукцію апоптозної загибелі клітин на клітинах MCF-7 (Chaves et al., 2018); Лектин KSL з *K. striatus* продемонстрував дозозалежну протипухлинну дію з лініями ракових клітин HT29, HeLa, MCF-7, AGS та SK-LU-1 (Hung, Trinh, 2021). Це свідчить про те, що лектини червоних водоростей, карагенофітів, мають противірусну та інші види активності, що перспективно для їхнього використання як нових противірусних та протипухлинних засобів.

Раніше ми повідомляли про гени, що кодують лектини у культивованих у В'єтнамі червоних водоростей, а саме EDA-2 з *E. denticulatum* (Hung et al., 2015a), а також KSL та KSA-2 з *K. striatus* (Hung et al., 2015b; Hung, Trinh, 2021). У цьому дослідженні ми клонували кДНК, що кодує лектин-подібний білок EDL, та з'ясували структуру виведеного EDL лектину. Отримані результати можуть надати цінну інформацію щодо взаємозв'язку між лектинами червоних водоростей для майбутніх застосувань.

Матеріали та методи

Червону водорість *Eucheuntha denticulatum* було зібрано в провінції Нінътхуан, В'єтнам, у березні 2015 року. Невелику частину водоростей зберігали при температурі $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ у розчині RNAlater (Invitrogen, США) до використання для екстракції РНК. Набір GeneRacer було отримано від Life Technologies (Invitrogen, США).

Швидка ампліфікація кінців 3'-кДНК (3'RACE) EDL

Загальну РНК *E. denticulatum* було екстраговано з 2 грамів свіжої тканини кожного талому, обробленої RNAlater, за допомогою реагентів для виділення рослинної РНК (Invitrogen, США). Матричну РНК (мРНК) було очищено із загальної РНК за допомогою набору для очищення мРНК Oligotex™-dT30 (TaKaRa, Японія). Комплементарні ДНК (кДНК) були синтезовані зі 120 нг мРНК за допомогою набору GeneRacer (Invitrogen) згідно з інструкцією виробника.

Першу полімеразну ланцюгову реакцію (ПЛР) для швидкої ампліфікації 3'-кінця кДНК (3'RACE) EDL було проведено з використанням 50 мкл реакційної суміші, що містила 5 мкл буфера 10×Blend Taq (Toyobo, Японія), 10 пмоль кожного дезоксинуклеотидтрифосфату (dNTP), 30 пмоль GeneRacer_3'_Primer, 10 пмоль праймера EDA_common_F1, який був розроблений на основі N-кінцевої амінокислотної послідовності лектину EDA-2 (Hung et al., 2015a) (див. таблицю), 1 мкл 10-кратно розведеної синтезованої кДНК та 1,25 одиниць ДНК-полімерази Blend Taq (Toyobo).

Таблиця. Послідовність праймерів, що використовувались для клонування кДНК ED

Праймер	Послідовність (від 5' до 3')
EDL_common_F1	AGAACCAGTGGGGAGGATCT
EDL_3'RACE_d_F1	AUCAITAYAAAYGTIGARAAAYCARTGGGG
EDL_3'End_R	GTGTGTAACCTTAATCCTAAAAGC
EDL_R1	TTGGAATGAAAGGCGAGAAC
EDL_5'End_F	AGCAGATACCCTTCCAATCGGC
GeneRacer 3' Primer ^a	GCTGTCAACGATACGCTACGTAACG
GeneRacer 3' Nested Primer ^a	CGCTACGTAACGGCATGACAGTG
GeneRacer 5' Primer ^a	CGACTGGAGCACGAGGACACTGA
GeneRacer 5' Nested Primer ^a	GGACTGACATGGACTGAAGGAGTA

^a Ці праймери були взяті з набору GenRacer (Invitrogen).

Умовні позначення дегенерованих нуклеотидів: I — інозин; Y — означає C та T; R — означає A та G.

Реакції проводили у термоциклері T Gradient (Biometra, Німеччина) за таких умов: денатурація при 94 °C протягом 5 хв, потім 30 циклів, що склалися з денатурації при 94 °C протягом 30 с, відпалу при 60 °C протягом 30 с, подовження при 72 °C протягом 1 хв та завершального етапу подовження при 72 °C протягом 5 хв. Продукти ПЛР об'єднували, розводили у 100 разів, а потім використовували як шаблон для гніздової ПЛР. Гніздову ПЛР проводили тим самим методом, як і першу ПЛР, за винятком того, що як матрицю використовували 1 мкл 100-кратно розведеного розчину, що містить перший продукт ПЛР, 5 мкл буфера 10×Blend Taq, 10 пмоль кожного dNTP, 2 пмоль GeneRacer_3'_Nested_Primer, 50 пмоль дегенерованого праймера EDA_3'RACE_d_F1, який був розроблений на основі консервативної послідовності серед родини лектинів з високим вмістом манози, включаючи ESA-2 (Hori et al., 2007), та 1,25 одиниць ДНК-полімерази Blend Taq. Продукти гніздової ПЛР субклонували у вектор pGEM-T Easy (Promega). Секвенування ДНК проводили за допомогою набору BigDye Terminator Cycle Sequencing Kit версії 3.1 з ДНК-секвенатором ABI 3130xl (Life Technologies).

Швидка ампліфікація кінців 5'- кДНК (5'RACE) EDL

Першу ПЛР 5'RACE EDL проводили так само, як і 3'RACE, як описано вище, за винятком того, що використовували GeneRacer_5'_Primer та праймер EDL_3'End_R, розроблені з 3'-кінцевої послідовності кДНК EDL, отриманої за допомогою 3'RACE (таблиця). Гніздову ПЛР проводили тим самим методом, за винятком використання 100-кратного розведення перших продуктів ПЛР як матриці, а GeneRacer_5'_Nested_Primer та праймера EDL_R1, розроблених з послідовності кДНК EDL, отриманої за допомогою 3'RACE, як пари праймерів (таблиця). Субклонування та секвенування ДНК проводили, як описано вище.

Перевірка точності послідовності повнорозмірної кДНК EDL

Для перевірки точності послідовності повнорозмірну кДНК EDL додатково ампліфікували за допомогою пар праймерів EDL_5'End_F та EDL_3'End_R відповідно, які були розроблені з 5'- та 3'-кінцевої послідовності кДНК EDL, отриманої за допомогою 5'RACE та 3'RACE. Потім було проведено субклонування та секвенування ДНК, як описано вище.

Порівняння амінокислотних послідовностей з гомологічними білками

Гомологічні послідовності були ідентифіковані за допомогою інструменту пошуку базового локального вирівнювання (BLAST). Порівняння амінокислотних послідовностей з гомологічними білками різних організмів було проведено за допомогою Clustal Omega (Sievers et al., 2011).

Результати та обговорення

Клонування кДНК, що кодує лектиноподібний білок (EDL)

Ізольована повнорозмірна кДНК EDL складалася з 1076 п.н., що містила 102 п.н. 5'UTR, 804 п.н. ORF та 170 п.н. 3'UTR (рис. 1). ORF кодувала поліпептид з 268 амінокислот, включаючи ініціюючий метіонін. Розрахована молекулярна маса виведеної амінокислотної послідовності EDL становила 27 812,34 Да. 20 N-кінцева амінокислотна послідовність EDL (GRYTVQNQWGGSSAPWNDAG), яка була визначена за допомогою деградації Едмана, була знайдена у виведеній амінокислотній послідовності кДНК EDL (Hung et al., 2015a). Первинна структура EDL має чотири тандемно повторювані домени, кожен з яких складається з 67 амінокислот та має 45% ідентичності послідовності (рис. 2).

AGCAGATACCSTTCCAATCGGCACATCTCCAATTCGTCGCAGTCTGTAATCAATTTTTATACC	63
AAAAAGACTCSTTTAGGCAGACAAAAACSTAATCAAAACATGGGTCGTTACACAGTTCAG	123
M G R Y T V Q	7
AACCAGTGGGGAGGTTCTTCTGCTCCATGGAATGACGCTGGCTTGTGGATTTTAGGTAGC	183
<u>N Q W G G S S A P W N D A G L W I L G S</u>	27
CGCGGGAACCAAAACGTGATGCCATCGACGTTTCTTCCAGCGATGTTGGCGSTAATCTC	243
R G N Q N V I A I D V S S S D V G A N L	47
AAAGGAACAATGACGTACTCTGGTGAGGGCCCATCGGTTTCAAAGGGTACGTCGTGGC	303
K G T M T Y S G E G P I G F K G V R R G	67
GATTCAAACGTTTACGAAGTCGAAAATCAGTGGGGAGGATCTTCAGTCCCTGGCATCCT	363
D S N V Y E V E N Q W G G S S A P W H P	87
GGTGGTGATTCGTTATCGGTTCTAGGGCAGGGCAAGGAGTAACGAAGTAAAAATTTCG	423
G G D F V I G S R A G Q G V T E V K I S	107
TCCTCGGATGGAGGCAAAACCATGACAGGAACAATGACTTATGAGGGCGAAGGTCCATC	483
S S D G G K T M T G T M T Y E G E G P I	127
GGGTTCAAAGGATCCAAGTCCGGCGGAGACAGCTATAATGTGAAGAACAGTGGGGGGG	543
G F K G S K S G G D S Y N V K N Q W G G	147
TCCTCTGCCCATGGAATAAGGCTGGCATCTGGGCGCTCGGGGATCGCAGTGGACAAGGG	603
S S A P W N K A G I W A L G D R S G Q G	167
GTTGTTAGCATCGATGTGACSTCGTCGGATGGGGTAAGACGCTTGGGGGACGATGCAG	663
V V S I D V T S S D G G K T L E G T M Q	187
TATACGGGAGAGGGGCCGATTGGATTTCAGGGGCAGGTTAGGGGACGCTAACAAATACAST	723
Y T G E G P I G F R G R L G D A N N Y T	207
GTGAAAACAGTGGGGCGGATCTTCTGCACSTTGAACAAAGCAGGTAACSTGGTTGATT	783
V E N Q W G G S S A P W N K A G N W L I	227
GGAGACCGTTACAATCAAAACATTTATCGCGGTGAAAATATCATCAAGCGATAATGGAAG	843
G D R Y N Q N I I A V K I S S S D N G K	247
AACATGGATGGTACSTTGCACSTTACGCGAATGAGGGCCCAATCGGATTTAAGGGTGCCGCT	903
N M D G T C T Y A N E G P I G F K G A A	267
GTGTGAAGGCATGACCAAACTATATAGAAAAGGTTTGCSTCGACATGAGCAGAGGCTGCA	963
V *	268
TTCTCCSTATCGATTTATTTAGTATTGCGTTTGTCTTTCCSTTTCGTTCTCGCSTTTTCATT	1023
CCAATTCATAGGCCAGTAAAACSTCGTTGCTTTTAGGATTAAGTTTTACACAC	1076

Рис. 1. Нуклеотидна та виведена амінокислотна послідовності лектиноподібного білка (EDL) з *Eucheuma denticulatum*. Стоп-кодон TGA показано зірочкою. Підкреслення вказує на 20 N-кінцевих амінокислотних послідовностей, визначених методом деградації Едмана (Hung et al., 2015a). Цифри, виділені та не виділені курсивом, позначають положення нуклеотидів та амінокислот відповідно

```

GRYTVQNQWGGSSAPWNDAGLWILGSRGNQNVIAIDVSSSDVGANLKGTMYSGEGPIGFKGVRRGDS 68
NVYEVENQWGGSSAPWHPGGDFVIGSRAGQGVTEVKISSSDGGKMTGTMTYEGEGPIGFKGSKSGG- 67
DSYNVKNQWGGSSAPWNKAGI WALGDRSGQGVVSIDVTSSDGGKTLEGTMQYTGEPIGFRGRLGDA- 67
NNYTVENQWGGSSAPWNKAGNWLIGDRYNQNI IAVKISSSDNGKNMDGTCTYANEGPIGFKGAAV--- 65
    
```

Рис. 2. Порівняння тандемно-повторюваних послідовностей лектиноподібного білка (EDL). Ідентичні амінокислоти у молекулі лектиноподібного білка у чотирьох повторюваних доменах заштриховані

Клонування кДНК також з'ясувало, що транскрипти EDL не містять області, що кодує сигнальний пептид, який спрямовує трансльовані поліпептиди з цитозолу до цитоплазматичної мембрани (прокаріоти) або до мембрани ендоплазматичного ретикулуму (еукаріоти) (Imai, Nakai, 2010), як повідомлялося для ОАА з ціанобактерій (Sato, Hori, 2009) та КАА з червоної водорості *K. alvarezii* (Hirayama et al., 2016). Крім того, невідомі сигнали клітинної локалізації в первинних структурах EDL. Це свідчить про те, що EDL також синтезується на вільних рибосомах і знаходиться в нуклеоцитоплазмі. Тому необхідно з'ясувати детальну клітинну локалізацію лектинів з червоних водоростей, карагенофітів, і отримана інформація допоможе передбачити їхні функції в тілах водоростей.

Передбачувана вторинна структура EDL

Аналіз передбачуваної вторинної структури EDL за допомогою програми прогнозування PSIPRED (<http://bioinf.cs.ucl.ac.uk/psipred>) показав двадцять β -ланцюгів. Кожен повторюваний домен складається з п'яти β -ланцюгів, позначених як $\beta 1$ до $\beta 5$, $\beta 6$ до $\beta 10$, $\beta 11$ до $\beta 15$ та $\beta 16$ до $\beta 20$ для першого, другого, третього та четвертого повторів відповідно. $\beta 5$ -ланцюг першого повторюваного домену був з'єднаний з $\beta 6$ -ланцюгом другого через лінкер з чотирьох залишків від гліцину 66 до аспарагіну 69. $\beta 10$ -ланцюг другого повторюваного домену був з'єднаний з $\beta 11$ -ланцюгом третього повторюваного домену через лінкер з чотирьох залишків від серину 133 до аспарагінової кислоти 136. $\beta 15$ -ланцюг третього повторюваного домену був з'єднаний з $\beta 16$ -ланцюгом четвертого повторюваного домену через лінкер з чотирьох залишків від гліцину 200 до аспарагіну 203 (Рис. 3). Передбачувана вторинна структура EDL добре узгоджувалася з вторинною структурою лектину BOA з *B. oklahomensis* EO147 (276 амінокислот) (ZP_02360833). Кількість β -ланцюгів EDL відповідає кількості лектину BOA (Whitley et al., 2013).

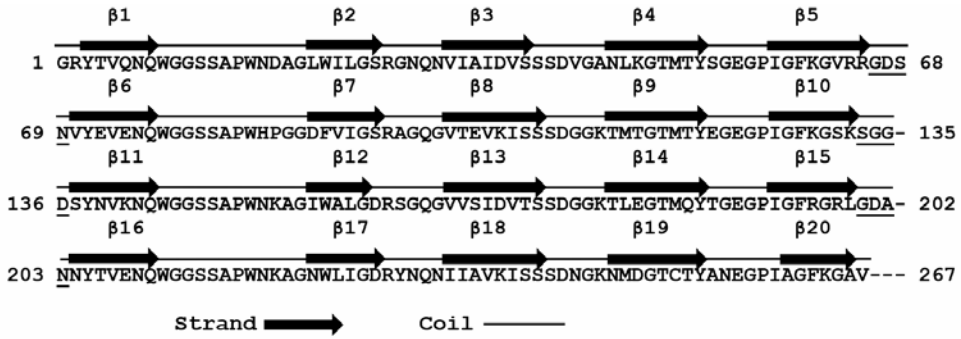


Рис. 3. Аналіз передбаченої вторинної структури EDL за допомогою програми прогнозування PSIPRED (<http://bioinf.cs.ucl.ac.uk/psipred>). Вирівнювання амінокислотної послідовності повторюваних доменів та передбачена вторинна структура EDL. Підкресленням позначено з'єднані лінкери залишків між ланцюгами β5 та β6; β10 та β11; β15 та β16

Гомологічні послідовності лектинів родини OAAH

Порівняно з дванадцятьма іншими гомологічними послідовностями, включаючи вісім лектинів з морських червоних водоростей, а саме ESA-2 (268 амінокислот) (P84331) з *E. serra*, KAA-1 (267 амінокислот) (LC007080) та KAA-2 (268 амінокислот) (LC007081) з *K. alvarezii*, EDA-2 (268 амінокислот) (BAR91516) з *E. denticulatum*, KSL (267 амінокислот) (LC517330) та KSA-2 (268 амінокислот) (BAR91206) з *K. striatus*, Sfl-1 (267 амінокислот) (C0HL89) та Sfl-2 (267 амінокислот) (C0HL90) з *S. filiformis*, один лектин з ціанобактерії *O. agardhii* (P84330) OAA (132 амінокислоти), три лектини з бактерій: BOA (276 амінокислот) (ZP_02360833) з *B. oklahomensis* EO147, PFA (133 амінокислоти) (YP_346241) з *P. fluorescens* Pf0-1 та MBHA (267 амінокислот) (M13831) з *M. xanthus*, всі вони містять чотири тандемно повторювані гомологічні домени приблизно з 67 амінокислот, за винятком OAA та PFA, які складаються лише з двох тандемно повторюваних гомологічних доменів (рис. 4). Ступінь ідентичності амінокислотних послідовностей EDL з EDA-2, KSL, KSA-2, ESA-2, KAA-1, KAA-2, Sfl-1, Sfl-2, BOA та MBHA становив 82,8%, 83,5, 83,9, 83,2, 83,5, 84,3, 79,4, 75,7, 57,4 та 59,8% відповідно, тоді як OAA та PFA (кожна з яких містить 132 залишки в N-кінцевих частинах) показали нижчу подібність послідовностей до EDL зі значеннями 61,4 та 60,6% відповідно. Цікаво, що 23 амінокислотні залишки в одному повторюваному домені абсолютно консервативні в усіх доменах серед 13 лектинів, показаних на рис. 4. Сім амінокислотних залишків на один повторюваний домен «WGGREGP», які взаємодіють з манопентаозою (Man α 1-6(Man α 1-3)Man α 1-6(Man α 1-3)Man), присутньою на поверхні ракової клітини або глікопротеїнах вірусної оболонки, абсолютно консервативні в усіх повторюваних доменах лектинів (Whitley et al., 2013),

за винятком лише заміни проліну на аланін у четвертому повторюваному домені лектину KSL.

	***	*	***					
EDL	GRYTVQ	NQWGGSSAPW	NDAGLWILGSRGNQ	NVIAIDVSSSDVGANL	KGTM	YSGEGPIGFKG	VRRGD	67
EDA-2	GRYTVQ	NQWGGSSAPW	NDAGLCLILGSRGNQ	NVIAVDVTS	SDGGANLGGT	M	YSGEGPIGFKGARRGE	67
KSL	GRYTVQ	NQWGGSSAPW	NDAGLWILGSRGNQ	NVMAIDVNS	SDGGANLNGT	M	YSGEGPIGFKGARRGE	67
KSA-2	GRYTVQ	NQWGGSSAPW	NDAGLWILGSRGNQ	NVMAIDVNS	SDGGANLNGT	M	YSGEGPIGFKGARRGE	67
ESA-2	GRYTVQ	NQWGGSSAPW	NDAGLWILGSRGNQ	NVMAVDVNS	SDGGANLNGT	M	YSGEGPIGFKGARRGE	67
KA-1	GRYTVQ	NQWGGSSAPW	NDAGLWILGSRGNQ	NVMAIDVNS	SDGGANLNGT	M	YSGEGPIGFKGARRGE	67
KA-2	GRYTVQ	NQWGGSSAPW	NDAGLWILGSRGNQ	NVMAIDVNS	SDGGANLNGT	M	YSGEGPIGFKGARRGD	67
SFL-1	GRYTVQ	NQWGGSSAPW	NDAGLWLLGSRANQ	NVMDVSVT	SDGGATL	T	MTYSGEGPIGFKTRRGD	67
SFL-2	GRYTVQ	NQWGGSSAPW	NDAGVFLGGRANQ	NVMAIDVSS	DGGKTL	T	GMTYSGEGPIGFKTRRGE	67
BOA	NLQHVQ	NQWGGSSAPW	HEGGMVLCGRSQ	NVVALNIKSD	GGRTLT	T	GMTYVYEGPIGFRATLTQ-	75
MBHA	AAYLQ	NQWGGSSAPW	NPGLWILIGARDK	QNVVALDIKSD	DGGKTL	K	GMTYNGEGPIGFRGTLSS-	66
OAA	ALYNVENQ	WGGSSAPW	NEGQWEIGSRSD	QNVVAINVE	SGDGT	L	NGTMTYAGEGPIGFRATLLG-	66
PFL	SKYAVANQ	WGGSSAPW	HPGGT	VVLGARDN	QNVVAIEIKSD	GGK	SFTGMTYAGEGPIGFKAQRTG-	66
	***	*	***					
EDL	SNVYEVENQ	WGGSSAPW	HPGGDFVIGSRAGQ	GVTEVIKISS	DGGKTM	T	GMTYEGEGPIGFKGSKSG	134
EDA-2	SNVYDVENQ	WGGSSAPW	HAGGQFVIGSRSGQ	GVLTALSVT	SDGGKTL	T	GMTYEREGPIGFKGTQSG	134
KSL	SNVYDVENQ	WGGSSAPW	HAGGQFVIGSRSGQ	GVLAVNIT	SDGGKTL	T	GMTYEREGPIGFKGTQSG	134
KSA-2	SNVYDVENQ	WGGSSAPW	HAGGQFVIGSRSGQ	GVLAVNIT	SDGGKTL	T	GMTYEREGPIGFKGTQSG	134
ESA-2	SNVYDVENQ	WGGSSAPW	HAGGQFVIGSRSGQ	GVLAVNIT	SDGGKTL	T	GMTYEREGPIGFKGTQSG	134
KA-1	SNVYDVENQ	WGGSSAPW	HAGGQFVIGSRSGQ	GVLAVNIT	SDGGKTL	T	GMTYEREGPIGFKGTQSG	134
KA-2	SNVYDVENQ	WGGSSAPW	HAGGQFVIGSRSGQ	GVLAVNIT	SDGGKTL	T	GMTYEREGPIGFKGTQSG	134
SFL-1	SNVYDVENQ	WGGSSAPW	HAGGTFVIGSRSGQ	GVVAVDVNS	SDGGKTL	T	GMTYANEGPIGFKGTQSG	134
SFL-2	SNVYEVENQ	WGGSSAPW	HPAGTFVIGSRSGQ	AVVAMNVT	SHDGGKTL	S	GHMTYENEGPIGFKGTQAE	134
BOA	SNVYAVENQ	WGGSSAPW	HPGGT	VVICRVNQ	VVALDIES	GD	QATLAGTMTYAGEGPIGFKSQAD	142
MBHA	ANNYTVENQ	WGGSSAPW	QPGVWVVLGARDK	QNIIVAVSIK	SDGGKTL	T	GMTYEREGPIGFKSEVTD	133
OAA	NNSYEVENQ	WGGSSAPW	HSGGNWILGSR	ENQNVVAINVE	SGDGT	L	NGTMTYAGEGPIGFKGTLT-	132
PFL	QNYNVENQ	WGGNDAPW	HPGGK	WVIGGRDN	QNVVALSVT	SDGGK	NLSGNTYANEGPIGFRGQIE-	132
	***	*	***					
EDL	GDSYNVKNQ	WGGSSAPW	NKAGI	WALGDRSGQ	GVVSDIVT	SDGGKTL	LEGTMOYTGEGPIGFRGLGD	201
EDA-2	GDTYNVENQ	WGGSSAPW	NKAGI	WALGDRNGQ	AMIAMDVSS	SDGGQTL	LEGTMOYKGEPIGFRGKLSG	201
KSL	GDTYNVENQ	WGGSSAPW	NKAGI	WALGDRSGQ	AMIAMDVSS	SDGGKTL	LEGTMOYKGEPIGFRGKLSG	201
KSA-2	GDTYNVENQ	WGGSSAPW	NKAGI	WALGDRSGQ	AMIAMDVSS	SDGGKTL	LEGTMOYKGEPIGFRGKLSG	201
ESA-2	GDTYNVENQ	WGGSSAPW	NKAGI	WALGDRSGQ	AMIAMDVSS	SDGGKTL	LEGTMOYKGEPIGFRGKLSG	201
KA-1	GDTYNVENQ	WGGSSAPW	NKAGI	WALGDRSGQ	AMIAMDVSS	SDGGKTL	LEGTMOYKGEPIGFRGKLSG	201
KA-2	GDTYNVENQ	WGGSSAPW	NKAGI	WALGDRSGQ	AMIAMDVSS	SDGGKTL	LEGTMOYKGEPIGFRGKLSG	201
SFL-1	GDSYNVENQ	WGGSSAPW	NKAGAWAL	GDRD	GQGVIGVDVT	SDGGKTL	TGMTMOYQNEGPIGFKGTSTG	201
SFL-2	GDTYNVENQ	WGGSSAPW	NKAGVWAL	GSRASQ	GVVKLDVSS	SDGGKTL	TGMTMOYQNEGPIGFRGTLTG	201
BOA	GGVYAVENQ	WGGSSAPW	HNGVWVIGARDQ	-AVVAVS	IGSTDS	GKTL	NGNMTYAGEGPIGFKGNSVA	208
MBHA	GDTYSVENQ	WGGSSAPW	HSGVWVVLGTRGK	QNVINVD	AKSNDGGKTL	S	GMTYNGEGPIGFRGTLTS	200
	***	*	***					
EDL	ANNYTVENQ	WGGSSAPW	NKAGN	WILGDRY	QNIIVAVKISS	SDNGK	NMDGTCTYANEGPIGFKGAAV--	267
EDA-2	ANNYAVENQ	WGGSSAPW	NKAGDWL	IGDRY	QNIIVAVKSS	SDNDG	KNLDDGTCTYEREGPIGFKGVATS-	268
KSL	ANNYSVENQ	WGGSSAPW	NKAGDWL	IGDRHN	QNIIVAVKSS	SDNDG	KNLDDGTCTYEREGPIGFKGVATS-	267
KSA-2	ANNYSVENQ	WGGSSAPW	NKAGDWL	IGDRHN	QNIIVAVKSS	SDNDG	KNLDDGTCTYEREGPIGFKGVATS-	268
ESA-2	ANNYSVENQ	WGGSSAPW	NAAGDWL	IGDRHN	QNIIVAVKSS	SDNDG	KNLDDGTCTYEREGPIGFKGVATS-	268
KA-1	ANNYSVENQ	WGGSSAPW	NKAGDWL	IGDRHN	QNIIVAVKSS	SDNDG	KNLDDGTCTYEREGPIGFKGVATS-	267
KA-2	ANNYSVENQ	WGGSSAPW	NKAGDWL	IGDRHN	QNIIVAVKSS	SDNDG	KNLDDGTCTYEREGPIGFKGVATS-	268
SFL-1	GSNYKVENQ	WGGSSAPW	NPAGN	WILGDRHN	QNIIVAVKVT	SDNGKTL	LGDTCTYEREGPIGFKGTAI--	267
SFL-2	ANNYKAENQ	WGGSSAPW	NPAGL	WILGDRHN	QNIIVAVKVT	SDNGKTL	LEGTCTYEREGPIGFKGVAN--	267
BOA	GNVYAVENQ	WGGT	SAPWHPGGI	WLLGCRSQ	QNVVELYIT	SGDNG	NTYFPGSMYSGEGPIGFRAMALPQ	276
MBHA	PDTYTVENQ	WGGSTAPW	NPGGF	WMI	GARNQ	NVVALN	VASDGGKTL	L

Рис. 4. Множинні вирівнювання EDL зі спорідненими білками. Ідентичні амінокислоти заштриховані. Залишки, позначені зірочками, є сайтом зв'язування амінокислот з вуглеводами згідно з Whitley et al. (2013)

Ця структурна подібність свідчить про те, що ці лектини можуть мати подібну специфічність зв'язування манози та біологічну активність.

Структурний каркас був уперше ідентифікований в лектині ціанобактерій *O. agardhii* (код PDB 3OBL) (Koharudin et al., 2011), а згодом виявлений у різних бактеріальних та родофітових лектинах. Сайти зв'язування вуглеводів на чотирьох тандемно повторюваних доменах лектину ВОА показали, що високоманозоспецифічні лектини з червоних водоростей, карагенофітів, також мають чотири домени розпізнавання вуглеводів, чотиривалентні лектини (Barre et al., 2019).

Висока подібність первинної структури EDL до структури лектинів свідчить про те, що лектин з червоної водорості, *E. denticulatumis*, також, як передбачається, має противірусну та протиракову активність. Відомо, що лектини з червоних водоростей, карагенофітів, проявляють проти-вірусну (Sato et al., 2011a, 2015; Hirayama et al., 2016) та протиракову активність (Sugahara et al., 2001; Fukuda et al., 2006; Omokawa et al., 2010; Hayashi et al., 2012; Chaves et al., 2018; Hung, Trinh, 2021).

Філогенетичне дерево родини лектинів досліджених груп організмів

З філогенетичного дерева, побудованого на основі порівняння амінокислотних послідовностей, лектини ціанобактерій, бактерій та червоних водоростей показали еволюційно прямий зв'язок, як і очікувалося з їхніх таксономічних класифікацій. При цьому лектин ціанобактерії *Oscillatoria agardhii* продемонстрував еволюційно ближчий зв'язок до лектину ВОА з *B. oklahomensis*. Результати показали, що червоні водорості та протео-бактерії тісно пов'язані між собою, оскільки лектини морських водоростей з *K. striatus*, *K. alvarezii*, *E. denticulatum*, *E. serra* та *S. filiformis* показали ближчу еволюційну відстань до бактеріальних лектинів *P. fluorescens* (PFA) та *M. xanthus* (МВНА), ніж лектин ціанобактерій ОАА (рис. 5), і ці лектини, здається, еволюціонували з бактеріального походження.

Згідно з гіпотезою ендосимбіогенезу, хлоропласти червоних водоростей походять від ціанобактеріального симбіонта (Moreira et al., 2000; Cavalier-Smith, 2000). Фактично, значна схожість білкових структур в межах однієї родини з різних біологічних джерел свідчить про їх еволюційну спорідненість. Однак еволюційна лінія лектинів водоростей все ще під питанням. Враховуючи еволюційну відстань між лектинами червоних водоростей, ціанобактерій та бактерій, ми не можемо виключити можливість того, що лектини ціанобактерій та макроводоростей походять від одних і тих самих бактеріальних симбіонтів, оскільки деякі бактерії були виділені з цитоплазматичних рідин макроводоростей, і такі симбіонти часто спостерігаються на поверхнях ціанобактерій (Fourcans et al., 2004).

Наприклад, *P. fluorescens* був знайдений у ризоїдах морських водоростей (Chisholm et al., 1996). Ця ж родина лектинів, виявлена у нижчих організмів, може дати нове розуміння взаємозв'язку між лектинами водоростей, бактерій та ціанобактерій.

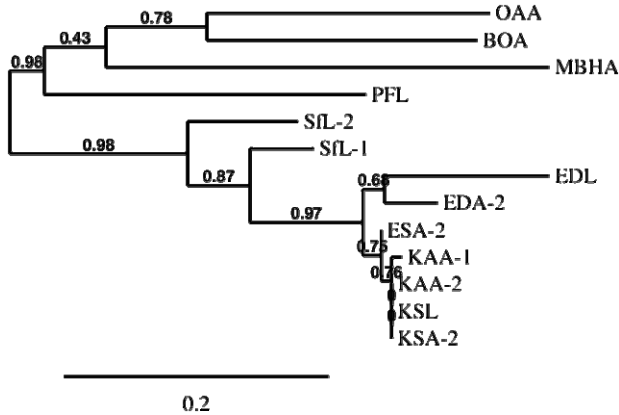


Рис. 5. Філогенетичне дерево, побудоване з множинних вирівнювань амінокислотних послідовностей за допомогою програмного забезпечення Mega версії 6.0 із використанням методів максимальної правдоподібності та бутстрепу з 1000 бутстрепреплікаціями (Tamura et al., 2013). Масштабна шкала представляє 0,2 заміни на сайт. Наведені нижче послідовності були отримані з бази даних GenBank: KSA-2 та KSL з *K. striatum*; KAA-1 та KAA-2 з *K. alvarezii*; ESA-2 з *E. serra*; EDA-2 з *E. denticulatum*; MBHA з *M. xanthus*; BOA з *B. oklahomensis* EO147; OAA з *O. agardhii*; PFA з *P. fluorescens* Pf0-1

Заключення

Первинна структура та амінокислотні залишки на один повторюваний домен, які взаємодіють з манопентаозою лектиноподібного білка (EDL), були схожі та високо збігалися з антивірусною лектиною родиною в нижчих організмах, що свідчить про те, що лектини з культивованої водорості *E. denticulatum* мають потенціал для широкого протиракового та противірусного впливу. Важливо, щоб лектини були виділені з широко культивованих їстівних видів водоростей, на відміну від того факту, що будь-які інші гомологічні лектини походять з бактерій, ціанобактерій та некультивованих водоростей. Ці функціональні лектини стануть потужним інструментом, якщо їх постачати оптом у своїй нативній формі.

Подяки

Це дослідження підтримано фондом В'єтнамської академії наук і технологій (грант VAST03.02/24-25). Ми дуже вдячні професору Кандзі

Хорі та доктору Макото Хіраямі (Університет м. Хіросіма, Японія) за їхню технічну допомогу.

Дотримання етичних норм

Автори повідомляють про відсутність будь-якого конфлікту інтересів.

Список літератури

- Balzarini J. 2007. Carbohydrate-binding agents: a potential future cornerstone for the chemotherapy of enveloped viruses. *Antivir. Chem. Chemother.* 18(1): 1–11.
- Barre A., Simplicien M., Benoist H., Van Damme ElsJM, Rougé P. 2019. Mannose-specific lectins from marine algae: Diverse structural scaffolds associated to common virucidal and anti-cancer properties. *Mar. Drugs.* 17(8): 440.
- Barre A., Van Damme ElsJM, Simplicien M., Benoist H., Rougé P. 2020. Man-Specific, GalNAc/T/Tn-Specific and Neu5Ac-Specific Seaweed Lectins as Glycan Probes for the SARS-CoV-2 (COVID-19) Coronavirus. *Mar. Drugs.* 18(11): 543.
- Bewley C.A., Cai M., Ray S., Ghirlando R., Yamaguchi M., Muramoto K. 2004. New carbohydrate specificity and HIV-1 fusion blocking activity of the cyanobacterial protein MVL: NMR, ITC and sedimentation equilibrium studies. *J. Mol. Biol.* 339(4): 901–914.
- Bokesch H.R., O’Keefe B.R., McKee T.C., Pannell L.K., Patterson G.M., Gardella R.S., Sowder R.C., Turpin J., Watson K., Buckheit R.W., Boyd M.R. 2003. A potent novel anti-HIV protein from the cultured cyanobacterium *Scytonema varium*. *Biochem.* 42: 2578–2584.
- Boyd M.R., Gustafson K.R., McMahon J.B., Shoemaker R.H., O’Keefe B.R., Mori T., Gulakowski R.J., Wu L., Rivera M.I., Laurencot C.M., Currens M.J., Cardellina I.I.J.H., Buckheit Jr.R.W., Nara P.L., Pannell L.K., Sowder I.I.R.C., Henderson L.E. 1997. Discovery of cyanovirin-N, a novel human immunodeficiency virus inactivating protein that binds viral surface envelope glycoprotein gp120: potential applications to microbicide development. *Antimicrob. Agents Chemother.* 41: 1521–1530.
- Cavalier-Smith T. 2000. Membrane heredity and early chloroplast evolution. *Trends Plant Sci.* 5(4): 174–182.
- Chaves R.P., da Silva S.R., Neto L.G.N., Carneiro R.F., da Silva A.L.C., Sampaio A.H., de Sousa B.L., Cabral M.G., Videira P.A., Teixeira E.H., Nagano C.S. 2018. Structural characterization of two isolectins from the marine red alga *Solieria filiformis* (Kützinger) P.W. Gabrielson and their anticancer effect on MCF-7 breast cancer cells. *Int. J. Biol. Macromol.* 107: 1320–1329.
- Chiba H., Inokoshi J., Okamoto M., Asanuma S., Matsuzaki K., Iwama M., Mizumoto K., Tanaka H., Oheda M., Fujita K., Nakashima H., Shinose M., Takahashi Y., Omura S. 2001. Actinohivin, a novel anti-HIV protein from an actinomycete that inhibits syncytium formation: isolation, characterization, and biological activities. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 282(2): 595–601.

- Chisholm J.R.M., Dauga C., Ageron E., Grimont P.A.D., Jaubert J.M. 1996. Roots in mixotrophic algae. *Nature*. 381: 382.
- Fourçans A., De Oteyza T.G., Wieland A., Solé A., Diestra E., Bleijswijk J.V., Grimalt J.O., Kühl M., Esteve I., Muyzer G., Caumette P., Duran R. 2004. Characterization of functional bacterial groups in a hypersaline microbial mat community (Salins-de-Giraud, Camargue, France). *FEMS Microbiol. Ecol.* 51(1): 55–70.
- Fukuda Y., Sugahara T., Ueno M., Fukuta Y., Ochi Y., Akiyama K., Miyazaki T., Masuda S., Kawakubo A., Kato K. 2006. The anti-tumor effect of *Eucheuma serra* agglutinin on colon cancer cells in vitro and in vivo. *Anticanc. Drugs*. 17(8): 943–947.
- Hayashi K., Walde P., Miyazaki T., Sakayama K., Nakamura A., Kameda K., Masuda S., Umakoshi H., Kato K. 2012. Active targeting to osteosarcoma cells and apoptotic cell death induction by the novel lectin *Eucheuma serra* agglutinin isolated from a marine red alga. *J. Drug. Deliv.* <https://doi.org/10.1155/2012/842785> (Online Library).
- Helle F., Wychowski C., Vu-Dac N., Gustafson K.R., Voisset C., Dubuisson J. 2006. Cyanovirin-N inhibits hepatitis C virus entry by binding to envelope protein glycans. *J. Biol. Chem.* 281(35): 25177–25183.
- Hirayama M., Shibata H., Imamura K., Sakaguchi T., Hori K. 2016. High-mannose specific lectin and its recombinants from a Carrageenophyta *Kappaphycus alvarezii* represent a potent anti-HIV activity through high-affinity binding to the viral envelope glycoprotein gp120. *Mar. Biotechnol.* 18(1): 144–160.
- Hori K., Matsubara K., Miyasawa K. 2000. Primary structures of two hemagglutinins from marine red alga *Hypnea japonica*. *Biochim. Biophys. Acta*. 1474(2): 226–236.
- Hori K., Sato Y., Ito K., Fujiwara Y., Iwamoto Y., Makino H., Kawakubo A. 2007. Strict specificity for high-mannose type N-glycans and primary structure of a red alga *Eucheuma serraelectin*. *Glycobiology*. 17(5): 479–491.
- Hung L.D., Trinh P.T.H. 2021. Structure and anticancer activity of a new lectin from the cultivated red alga, *Kappaphycus striatus*. *J. Nat. Med.* 75(1): 223–231.
- Hung L.D., Hirayama M., Ly B.M., Hori K. 2015a. Purification, primary structure and biological activity of high-mannose N-glycan-specific lectin from the cultivated *Eucheuma denticulatum*. *J. Appl. Phycol.* 27(4): 1657–1669.
- Hung L.D., Hirayama M., Ly B.M., Hori K. 2015b. Biological activity, cDNA cloning and primary structure of lectin KSA-2 from the cultivated red alga *Kappaphycus striatum* (Schmitz) Doty ex Silva. *Phytochem. Lett.* 14: 99–105.
- Imai K., Nakai K. 2010. Prediction of subcellular locations of proteins: where to proceed. *Proteomics*. 10(22): 3970–3983.
- Koharudin L.M.I., Gronenborn A.M. 2014. Antiviral lectins as potential HIV microbicides. *Curr. Opin. Virol.* 7: 95–100.
- Koharudin L.M.I., Furey W., Gronenborn A.M. 2011. Novel fold and carbohydrate specificity of from *Oscillatoria agardhii* the potent Anti-HIV cyanobacterial lectin. *J. Biol. Chem.* 286(2): 1588–1597.

- Koharudin L.M.I., Kollipara S., Aiken C., Gronenborn A.M. 2012. Structural insights into the anti-HIV activity of the *Oscillatoria agardhii* agglutinin homolog lectin family. *J. Biol. Chem.* 287(40): 33796–33811.
- Moreira D., Le Guyader H., Philippe H. 2000. The origin of red algae and the evolution of chloroplasts. *Nature.* 405(6782): 69–72.
- Mori T., O'Keefe B.R., Sowder R.C., Bringans S., Gardella R.S., Berg S., Cochran P., Turpin J.A., Buckheit R.W., McMahon J.B.Jr., Boyd M.R. 2005. Isolation and characterization of griffithsin, a novel HIV-inactivating protein, from the red alga *Griffithsia* sp. *J. Biol. Chem.* 280(10): 9345–9353.
- Mu J., Hirayama M., Sato Y., Morimoto K., Hori K.A. 2017. Novel High-Mannose Specific Lectin from the Green Alga *Halimeda renschii* Exhibits a Potent Anti-Influenza Virus Activity through High-Affinity Binding to the Viral Hemagglutinin. *Mar. Drugs.* 15(8): 255. <https://doi.org/10.3390/md15080255>
- O'Keefe B.R., Giomarelli B., Barnard D.L., Shenoy S.R., Chan P.K., McMahon J.B., Palmer K.E., Barnett B.W., Meyerholz D.K., Wohlford-Lenane C.L., McCray P.B.Jr. 2010. Broad-spectrum in vitro activity and in vivo efficacy of the antiviral protein griffithsin against emerging viruses of the family *Coronaviridae*. *J. Virol.* 84(5): 2511–2521.
- Omokawa Y., Miyazaki T., Walde P., Akiyama K., Sugahara T., Masuda S., Inada A., Ohnishi Y., Saeki T., Kato K. 2010. In vitro and in vivo anti-tumor effects of novel Span 80 vesicles containing immobilized *Euclidean serra* agglutinin. *Int. J. Pharm.* 389: 157–167.
- Romeo J.M., Esmo B., Zusman D.R. 1986. Nucleotide sequence of the myxobacterium hemagglutinin gene contains four homologous domains. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 83(17): 6332–6336.
- Romero J.A.F., Paglini M.G., Priano C., Koroch A., Rodríguez Y., James Sailer J., Teleshova N. 2021. Algal and Cyanobacterial Lectins and Their Antimicrobial Properties. *Mar. Drugs.* 19(12): 687. <https://doi.org/10.3390/md19120687>
- Sato T., Hori K. 2009. Cloning, expression, and characterization of a novel anti-HIV lectin from the cultured cyanobacterium *Oscillatoria agardhii*. *Fish. Sci.* 75: 743–753.
- Sato Y., Okuyama S., Hori K. 2007. Primary structure and carbohydrate-binding specificity of a potent anti-HIV lectin isolated from the filamentous cyanobacterium *Oscillatoria agardhii*. *J. Biol. Chem.* 282(15): 11021–11029.
- Sato Y., Morimoto K., Hirayama M., Hori K. 2011a. High mannose-specific lectin (KAA-2) from the red alga *Kappaphycus alvarezii* potently inhibits influenza virus infection in a strain-independent manner. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 405(2): 291–296.
- Sato Y., Hirayama M., Morimoto K., Yamamoto N., Okuyama S., Hori K. 2011b. High mannose-binding lectin with preference for the cluster of α 1–2-mannose from the green alga *Boodlea coacta* is a potent entry inhibitor of HIV-1 and influenza viruses. *J. Biol. Chem.* 286(22): 19446–19458.

- Sato Y., Morimoto K., Kubo T., Yanagihara K., Seyama T. 2012. High mannose-binding antiviral lectin PFL from *Pseudomonas fluorescens* Pf0-1 promotes cell death of gastric cancer cell MKN28 via interaction with $\alpha 2$ -integrin. *PLoS One*. 7(9): e45922.
- Sato Y., Morimoto K., Kubo T., Sakaguchi T., Nishizono A., Hirayama M., Hori K. 2015. Entry inhibition of influenza viruses with high mannose binding lectin ESA-2 from the red alga *Euclima serra* through the recognition of viral hemagglutinin. *Mar. Drugs*. 13(6): 3454–3465. <https://doi.org/10.3390/md13063454>
- Sharon N., Lis H. 2003. *Lectins*. 2nd ed. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ. 454 p.
- Sievers F., Wilm A., Dineen D., Gibson T.J., Karplus K., Li W., Lopez R., McWilliam H., Remmert M., Söding J., Thompson J.D., Higgins D.G. 2011. Fast, scalable generation of high-quality protein multiple sequence alignments using Clustal Omega. *Mol. Syst. Biol.* 7: 539. <https://doi.org/10.1038/msb.2011.75>
- Sugahara T., Ohama Y., Fukuda A., Hayashi M., Kawakubo A., Kato K. 2001. The cytotoxic effect of *Euclima serra* agglutinin (ESA) on cancer cells and its application to molecular probe for drug delivery system using lipid vesicles. *Cytotechnology*. 36(1–3): 93–99.
- Tamura K., Stecher G., Peterson D., Filipski A., Kumar S. 2013. MEGA6: Molecular Evolutionary Genetics Analysis Version 6.0. *Mol. Biol. Evol.* 30(12): 2725–2729.
- Whitley M.J., Furey W., Kollipara S., Gronenborn A.M. 2013. *Burkholderia oklahomensis* agglutinin is a canonical twodomain OAA-family lectin: structures, carbohydrate binding, and anti-HIV activity. *FEBS J.* 280(9): 2056–2067.

Le Dinh Hung¹

Vo Thi Dieu Trang¹

Hoang Thi Trang Nguyen²

Dinh Thanh Trung¹

Ngo Thi Duy Ngoc¹

Phan Thi Hoai Trinh¹

¹ Institute of Oceanography, Vietnam Academy of Science and Technology,
01 Cau da Str., Nhatrang City, Khanhhoa Province, Vietnam

² Nhatrang University,
2 Nguyen Dinh Chieu Str., Nhatrang City, Khanhhoa Province, Vietnam

The new member of OAAH-family lectins from the cultivated red alga *Euclima denticulatum* in Vietnam

The red alga *Euclima denticulatum* is an economically important food species extensively cultivated in Vietnam. In this study, complementary DNA (cDNA) cloning based on the rapid amplification of cDNA ends (RACE) methods elucidated the full-length sequence of a new lectin-like protein (named EDL) from this alga. The cDNA cloning of the lectin-like protein

encoded a polypeptide of 268 amino acids including an initiating methionine. The deduced amino acid sequence of lectin-like protein composed of four tandem repeated domains of about 67 amino acids and sharing 45% sequence identity. The primary structure of the lectin-like protein, EDL, highly resemble with those of the anti-virus and anti-cancer high-mannose N-glycan specific lectins in lower organisms including *Oscillatoria agardhii* NIES-240 (OAA) from cyanobacterium, *Burkholderia oklahomensis* EO147 (BOA), *Myxococcus xanthus* (MBHA) and *Pseudomonas fluorescens* Pf0-1 (PFL) from proteobacteria, *Eucheuma serra* (ESA-2), *Eucheuma denticulatum* (EDA-2), *Kappaphycus striatus* (KSA-1 and KSA-2), *Kappaphycus alvarezii* (KAA-1 and KAA-2) and *Solieria filiformis* (SfL-1 and SfL-2) from carrageenophyte red algae. The high resemblance in structure with anti-virus and anti-cancer lectins suggests that the cultivated red alga *E. denticulatum* could also be a good source of functional protein (lectin) for application.

K e y w o r d s : amino acid sequence, carrageenophytes, cDNA of lectin-like protein, EDL, *Eucheuma denticulatum*

C i t a t i o n . Le Dinh Hung, Vo Thi Dieu Trang, Hoang Thi Trang Nguyen, Dinh Thanh Trung, Ngo Thi Duy Ngoc, Phan Thi Hoai Trinh. 2025. The new member of OAAH-family lectins from the cultivated red alga *Eucheuma denticulatum* in Vietnam. *Algologia*. 35(3): 194–209. <https://doi.org/10.15407/alg35.03.194>

БРЯНЦЕВА Ю.В. ¹* (<https://orcid.org/0000-0002-1790-5944>)

ГІРІ М.Д. ² (<https://orcid.org/orcid.org/0000-0003-1266-857>)

¹ Інститут ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України,
вул. Терещенківська, 2, Київ 01601, Україна

² *AlgaeBase, Ryan Institute, University of Galway,*
Galway H91 TK33, Ireland

* Адреса для листування: brekall5@gmail.com

РЕВІЗІЯ ЧЕК-ЛИСТА ДИНОФЛАГЕЛЯТ ЧОРНОГО МОРЯ

Реферат. У результаті проведення критико-систематичної ревізії суперкласу *Dinoflagellata* Чорного моря оновлено чек-лист, що включає на сьогодні 386 видів (396 внутрішньовидових таксонів), які відносяться до 5 класів, 17 порядків, 51 родини та 95 родів. Серед них: 39 видів космополітів, 17 — широко поширених у світі, 8 — евригалінних, 30 — токсичних та 35 біоломінесцентів. Після 2018 р. було знайдено 28 нових видів, унікальних для кожної акваторії: 14 — для болгарських вод, 6 — для українських, 5 — для турецьких, по одному — для всіх інших. Порівняно з попереднім чек-листом 2018 р. істотно змінилася таксономічна структура динофлагелят, що зумовлено більш жорстким критерієм відбору аналізованих джерел, а також появою нових таксономічних комбінацій. Потребують перевірки та додаткових досліджень 68 видів. Новими для флори Чорного моря є роди: *Acanthogonyaulax* (Kof.) H.W.Graham, *Eleftheros* Tikhonenkov, Hehenberger & Keeling, *Pelagodinium* Siano, Montresor, Probert & Vargas, *Pfiesteria* Steidinger & J.M.Burkholder та *Pseudoadenoides* F.Gómez, R.Onuma, Artigas & T.Horig. Серед них нові для науки види: *Eleftheros karadeniz* Tikhonenkov, Hehenberger & Keeling та *Amphidoma pontica* Tillmann & Dzhembekova. Найбільше видове багатство динофлагелят, як і раніше, відзначено в українському секторі моря (75% загальної кількості), що зумовлено різноманіттям екологічних факторів, а також високим рівнем вивченості акваторії. Друге місце посідають турецькі води (51,5%). Грузинська

Ключові слова: динофлагеляти, Чорне море, таксономічна структура, видове багатство, причорноморські держави, сайт

Надійшла до редакції 09.06.2025. Після доопрацювання 16.08.2025. Підписана до друку 02.09.2025.
Опублікована 20.09.2025

Ц и т у в а н н я . Брянцева Ю.В., Гірі М.Д. 2025. Ревізія чек-листа динофлагелят Чорного моря. *Альгологія*. 35(3): 210–235. <https://doi.org/10.15407/alg35.03.210>

This is open access article under the CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

та румунська акваторії з мінімальними площами (6,0–6,5%) займають останні місця (20,5 і 25,6% відповідно), частка динофлагелят у болгарських та російських водах становила 35 та 40,4% відповідно. Кліматичні зміни та «медитеранізація» Чорного моря прискорюють процес інтродукції видів у цей регіон, водночас інтенсифікація досліджень з більш широким застосуванням сучасних методів сприяє уточненню даних. За останні 18 років кількість загальних для всіх акваторій видів збільшилася вдвічі — з 19 до 39, а кількість збудників «цвітіння» — з 13 до 23. Таксономічний статус 10 видів потребує додаткових досліджень. Для збереження та накопичення інформації щодо видів, необхідно оновити електронну базу даних водоростей Чорного моря, подібно до сайту «Продромус динофлагелят України», створеного на базі двигуна медіовікі в Інституті ботаніки НАН України ім. М.Г. Холодного. При відборі відомостей слід використовувати принцип першоджерел — вносити лише оригінальні дані.

Вступ

У 2024 р. було завершено п'ятирічну роботу над створенням продромусу спорових рослин України, в якому узагальнено ретроспективні та сучасні відомості щодо 6553 видів з усіх відомих відділів водоростей (Prodromus..., 2024). Однією з таких груп є динофлагеляти — одноклітинні еукаріотичні водорості, які відіграють важливу роль у продукційних процесах морських екосистем завдяки широкому спектру харчування (гетеротрофи, фототрофи, міксотрофи). В основному це планктонні, морські, а також симбіотичні та паразитичні види, що мешкають в умовах широкого спектру абіотичних факторів. Великий інтерес до цієї групи викликаний їхньою здатністю до біолюмінесценції, утворення «червоних припливів» та продукування низки токсичних речовин, що негативно впливають як на гідробіонти, так і на людину. Це необхідно враховувати при проведенні природоохоронних та рекреаційних заходів.

Площа Чорного моря, згідно з Конвенцією ООН з морського права (UNCLOS, 1982), поділена на 12-мильні (приблизно 19,3 км від берегів) територіальні води (територіальні моря) шести країн: Туреччини, Грузії, Росії, України, Румунії та Болгарії (див. рисунок). Разом із територіальними водами ще 12 миль моря становлять прилеглу зону (24-мильну зону), а ширина виключно економічної зони (далі ВЕЗ) не перевищує 200 морських миль. Загальна площа ВЕЗ усіх причорноморських країн становить близько 361985 км², 60,1% з яких займають води Туреччини (145000 км²) та України (72658 км²). Частка російських вод складає 17,4% (63 000 км²), а частки інших коливаються від 10% у болгарських водах (36 000 км²) до 6,5% — у румунських (23 627 км²). Найменша — грузинська ВЕЗ становить 21700 км² або 6%.



Рисунок. Мапа Чорного моря з морськими кордонами виключно економічних зон країн (Ustimenko, Ustimenko, 2020)

Окупація Криму Російською Федерацією у 2014 р. та її вторгнення в Україну в 2022 р. унеможливили експедиційні дослідження в акваторії моря, а бойові дії завдають непоправної шкоди екосистемам України, у тому числі Чорного моря. Антропогенний вплив, аж до техногенних катастроф, відбувається на тлі кліматичних змін, коли збільшуються частота та амплітуда природних аномалій (Bryantsev, Bryantseva, 2010; Minicheva et al., 2013). При цьому поєднання антропогенних і кліматичних факторів може мати кумулятивний ефект (Bryantsev, Bryantseva, 1999), з негативними наслідками в майбутньому. Тому дослідження біологічного та видового різноманіття як складової оцінки екологічного стану та стійкості екосистем набули особливої актуальності. Наслідки такого впливу на біорізноманіття Чорного моря були показані на прикладі катастрофічної руйнації греблі Каховського вдсх та реакції на це морської екосистеми (Minicheva et al., 2023). Масштаб такого екоциду досліджуватиметься в наступні десятиліття, але зараз важливо провести критико-систематичну ревізію всіх таксономічних груп гідробіонтів для подальшого порівняльного аналізу. Актуальним завданням на даному етапі є систематизація всіх попередніх відомостей за допомогою створення цифрових баз даних та їхнього оновлення з урахуванням змін у таксономії на основі сайтів, подібних до міжнародних систем AlgaeBase.

Історія досліджень динофлагелат у територіальних водах України, включаючи чорноморський сектор, налічує понад 137 років і докладно описана в багатьох роботах (Krakhmalny, Panina, 2000; Krakhmalny et al., 2006; Krakhmalny, 2011; Bryantseva et al., 2016, Bryantseva, 2023). Більш повний огляд різноманітності динофлагелат усього Чорного моря представлений у роботах: Gómez, Voicenko, 2004; Terenko, 2007; Krakhmalny et al., 2012, 2018. Завдяки комплексним дослідженням у 2009–

2014 рр. кількість видів динофлагелят, відомих у Чорному морі, збільшилась, особливо для його болгарського сектора (Black..., 2019).

Як було показано в огляді, присвяченому історії досліджень динофлагелят (Krakhmalny et al., 2012), кількість видів поступово збільшувалася зі зростанням інтенсифікації досліджень у Чорному морі. Якщо на початку ХХ ст. налічувались десятки видів (44 видів, враховуючи внутрішньовидові таксони, ввт) (Reinhard, 1909), то в зведеннях Морозової-Водяницької (Morozova-Vodyanitskaya, 1948, 1950) вже наведено 146 видів, що належали до 13 родин і 22 родів. До середини 1960-х років їхня кількість зросла до 163, а з урахуванням прісноводних та солонувато-водних видів — до 175 (Ivanov, 1965). У період 1950–1969 рр. було зареєстровано 177 видів та ввт з 17 родин та 25 родів, а в кінці 70-х вже 205 видів та ввт (Pitsyk, 1979).

Початок ХХІ ст. характеризувався розбіжностями в оцінці видового багатства динофлагелят Чорного моря, що пов'язано як з новими знахідками, так і з використанням різних джерел різними авторами в причорноморських країнах. Так, для двох узагальнень по Чорному морю (Gómez, Voicenko, 2004; Terenko, 2007) загальними виявилися лише 14 джерел.

Наша оглядова робота містила дані про 456 видів (467 ввт), що належать до 10 порядків, 37 родин та 79 родів (Krakhmalny et al., 2012). Однак після критичного аналізу частина видів була вилучена як недостовірні або помилкові, в результаті кількість видів знизилася до 418 після приведення у відповідність із сучасними назвами (Krakhmalny et al., 2018). Крім того, використані джерела були проаналізовані відповідно до хронології, а не з територіальним поширенням, що не дозволяє зіставити видове багатство динофлагелят у різних акваторіях моря. На жаль, сайт з фітопланктону Чорного моря, на який ми тоді посилалися, наразі недоступний, оскільки знаходиться на стадії оновлення.

Завдяки ширшому використанню електронної мікроскопії, а також молекулярним та генетичним методам дослідження відбуваються суттєві зміни в таксономічній системі суперкласу *Dinoflagellata*, кількість видів якого зросла від 2377 (Gómez, 2012, 2020) до 4200 (Guiry, Guiry, 2025). Збільшилося також видове багатство динофлагелят територіальних вод України, що зумовлено як новими знахідками, так і появою нових таксономічних комбінацій, які значно розширили їхній родовий спектр (Bryantseva, 2023).

Для порівняння систематичного складу динофлагелят українського сектора Чорного моря із загальною різноманітністю в морі необхідно було провести критико-систематичну ревізію чек-листа видів з урахуванням ретроспективних та сучасних даних. Таким чином, метою роботи було

проаналізувати рівень різноманітності динофлагелят як у морі загалом, так і в акваторіях кожної з причорноморських країн.

Матеріали та методи

При складанні списку видів було створено репозиторій праць, що включають відомості щодо динофлагелят для акваторій кожної причорноморської країни (загалом 203 джерела, з яких 143 стосуються української частини моря). На додаток до 144 джерел, проаналізованих нами раніше, використано 75 нових (24 з них опубліковані в період з 2018 р. до сьогодні).

При аналізі літературних даних дотримувалися принципу першоджерел і використовували оглядові роботи тільки в тому випадку, коли вони містили оригінальні дані авторів.

Склад *Dinoflagellata* представлений по системі Р. Фенсома (Fensome et al., 1993) з урахуванням сучасних номенклатурних змін відповідно до Всесвітньої бази даних водоростей AlgaeBase (Guiry, Guiry, 2025. <https://www.algaebase.org/>).

У порівнянні з попереднім чек-листом усі назви таксонів були оновлені, що дозволило виявити дійсні зміни в його складі та підрахувати реальну кількість видів у таксонах.

Також було включено результати оригінальних досліджень 1992–1993 рр. у всіх районах Чорного моря (Bryantseva, 2000), у його північній частині, включаючи експедиційні (2011 р.) та моніторингові дослідження біля берегів Севастополя (2009–2014 рр.).

Результати та обговорення

У результаті проведення критико-систематичної ревізії суперкласу *Dinoflagellata* Чорного моря та аналізу оригінальних джерел (з 1885 по 2025 рр.) було оновлено чек-лист, що включає на сьогодні 386 видів (396 ввт), які відносяться до 5 класів, 17 порядків, 51 сімейства і 95 родів (Додаток А*, електронне доповнення).

Серед них 10 таксонів, які викликають номенклатурні або таксономічні питання, що вимагають пояснення чи перегляду.

***Dinophysis baltica* (Paulsen) Kof. & Skogsb.**

Кофойд і Скогсберг (Kofoid & Skogsb., 1928: 229) спочатку прокоментували: “Левандер (Levander, 1900a, p. 15, fig. 1) описав і зобразив форму з Фінської затоки, яку назвав *Dinophysis* sp. (?*ovum* Schütt) *baltica*. Питання в тому, чи є ця форма самостійним видом, чи являє собою лише солонуватоводну модифікацію *D. ovum*, на даний час, не розв'язане. Але ці

* Див. сайт: <https://doi.org/10.15407/alg35.03.210>.

дві форми різняться дуже різняться, тому їх слід вважати різними видами, доки не буде доведена їхня генетична ідентичність”.

На перший погляд може здатися, що автори лише тимчасово прийняли цю назву, але на наступних двох сторінках (Kof. & Skogsb., 1928: 230, 235) вони цитують «*D. baltica* Paulsen, 1908 nobis», вказуючи на те, що автори мали на увазі нову назву, яка є допустимою.

Dinophysis rudgei (G.Murr. & Whitting) T.H.Abé.

Ця назва невірна, оскільки Абе (Abé, 1967: 59) не дав повного й прямого посилання на сторінку, де був опублікований передбачуваний базіонім *Phalacroma rudgei* G.Murr. & Whitting. Однак валідна назва в межах роду *Dinophysis* призвела б до появи пізнішого омоніма *Dinophysis rudgei* G.Murr. & Whitting (Murray & Whitting, 1899: 331, табл. 31: рис. 9). Відповідно, необхідна нова назва: ***Dinophysis tohruabei* nom. nov.**

Змінена назва: *Phalacroma rudgei* G.Murr. & Whitting, 1899. Transactions of Linnean Society of London, Botany, Series 2, 5: 331, табл. 31: рис. 9.

Синонім: *Dinophysis rudgei* T.H.Abé (T.H.Abé, 1967: 59, рис. 16 a-j), nom. inval. (номін. недійсний). Типове місцезнаходження: Атлантичний океан.

Лектотип (тут позначено): рис. 9, табл. 31 в: Murray & Whitting, 1899.

Етимологія: Названий на честь Тору Хідеміті Абе (1899–1971), видатного японського фахівця з динофлагелат.

Dinophysis sphaeroidea (Schiller) Balech.

Ця назва (Balech 1967: 84) є пізнішим омонімом *Dinophys sphaeroidea* V.Hensen (Hensen, 1911: 165), але остання назва невірна (без опису). *Dinophys schilleri* Sournia (Sournia, 1973: 24) був запропонований як назва-замінник *D. sphaeroidea* (Schill.) Balech, але вона є зайвою і, отже, незаконною. Правильна назва — *D. sphaeroidea* (Schill.) Balech.

«***Glenodinium apiculatum*** Lachmann».

Це позначення зустрічається в деяких джерелах (Guslyakov, Terenko, 1999; Senichkina et al., 2001, 2004; Terenko, 2005; Nesterova, Terenko, Terenko, 2006), але, ймовірно, є помилкою, оскільки відноситься до виду *Peridinium apiculatum* (Ehrenb.) Clap. & Lachmann (Claparède & Lachmann, 1859: 404, базіонім *Glenodinium apiculatum* Ehrenb.), який тепер називають *Palatinus apiculatus* (Ehrenb.) Craveiro et al. (Craveiro et al., 2009). *Glenodinium apiculatum* Zach. nom. illeg. (Zacharias, 1901) — пізніший омонім *G. apiculatum* Ehrenb., який на сьогодні відомий як *Gyrodinium helveticum* (Penard) Y.Takano & T.Horig. (Takano, Horiguchi, 2004).

Gonyaulax gracilis Schill.

Ця назва неприпустима, оскільки автор її не прийняв: «Unsichere Arten» (Небезпечні типи, тобто таксони). Опису також немає. На рисунку,

представленому Шіллером (Shiller, 1935, рис. 325), може бути зображена *Gonyaulax fragilis* (F.Schütt) Kofoid, 1901 (див. Escalera et al., 2009).

Prorocentrum caspicum (Kisselev) Krakhm.

Ця назва (Krakhmalny, 1993: 88, базіонім *Exuviaella caspica* Kisselev) є пізнішим омонімом *Prorocentrum caspicum* A.G.Henckel (Henckel, 1909: 116), також з Каспійського моря і потребує нової назви, а також подальшої таксономічної деталізації. ***Prorocentrum marecaspicum* nom. nov.** Змінена назва: *Prorocentrum caspicum* A.G.Henckel (Henckel, 1908:28: Figs II, III, VI, VIII, XI).

Синонім: *P. caspicum* (Kisselev) Krakhm. (Krakhmalny, 1993: 88), nom. illeg.

Етимологія: названий за типовим місцезростанням — Каспійське море.

Лектотип (тут позначений): Figs II, III, VI, VIII, XI in pl. 28 (Henckel, 1908).

Tripes falcatus (Kof.) F.Gómez.

Ця назва у Гомеса невірна (Gómez, 2013: 7), оскільки одночасно було введено кілька назв, що базуються на одному типі (Art., 36.3). Згодом назва була валідована Гомесом (Gómez, 2021: 23).

Tripes furca* var. *berghii (Lemmerm.) F.Gómez.

Ця назва недійсна у Гомеса (Gómez, 2013: 9), оскільки він одночасно запропонував як нові комбінації *Tripes berghii* (Lemmerm.) F.Gómez і *T. fusus* var. *berghii* (Lemmerm.) F.Gómez, засновані на *Ceratium tripes* var. *berghii* Lemmerm. (Lemmermann, 1899: 345). Пізніше Гомес (Gómez, 2021: 35) припустив, що цей таксон є синонімом *T. eugrammus* (Ehrenb.) F.Gómez, що було ним підтверджено. Потрібні подальші таксономічні дослідження чорноморського варієтету.

Tripes hexacanthus* var. *contortus (Lemmerm.) F.Gómez.

Ця назва у Гомеса невірна (Gómez, 2013: 10), оскільки він одночасно запропонував як нові комбінації *Tripes hexacanthus* f. *contortus*, *T. hexacanthus* var. *contortus*, *T. reticulatus* f. *contortus*. Гомес (Gómez, 2021: 369–370) дійшов висновку, що повідомлення про «*T. contortus*» від «auct. mult.» (багатьох авторів) є *T. subcontortus* (Schröd.) F.Gómez. Вид *Ceratium hexacanthum* var. *contortum* Lemmerm., базіонім *T. hexacanthus* var. *contortus* походить від Північної Атлантики.

Tripes massiliensis* f. *armatus (Karsten) F.Gomez.

Ця назва у Гомеса (Gomez, 2013: 13) невірна, оскільки він одночасно запропонував *T. massiliensis* f. *armatus*, F.Gomez, *T. massiliensis* var. *armatus* (Karsten) F.Gomez, *T. muelleri* f. *armatus* (Karsten) F.Gómez. Крахмальний А.Ф. (Krakhmalny, 2011a: 146; 2011b:271) запропонував *Neoceratium*

massiliense var. *armatum* (Karsten) Krakhm. Ми пропонуємо нову назву: ***Tripes massiliensis* var. *armatus*** (Karsten) comb. nov.

Базіонім: *Ceratium tripes* f. *armatum* Karsten (Karsten, 1905: 132, pl. XIX: Figs 7, 8).

Лектотип (тут позначений): Figs 7, 8 in pl. XIX (Karsten, 1905).

Потребують додаткових досліджень і перевірки 68 видів (поодинокі згадки, як правило, застарілі, зазначені в оглядових роботах або оригінальних джерелах, відомості про які ми не змогли поки що підтвердити), включені в окремий список (Додаток Б*, електронне доповнення) і в цій роботі не враховуються при підрахунках таксонів.

Виключення цих видів більшою мірою пояснюють незначні відмінності в кількості видів між чек-листами 2018 р. та 2025 р. (табл. 1), але значно суттєвіше змінилася таксономічна структура динофлагелат за рахунок перейменувань ряду видів, перенесення деяких родів в інші родини та порядки, частина яких є новими.

Таблиця 1. Таксономічна структура динофлагелат Чорного моря (ЧМ) в акваторіях причорноморських країн (у межах їхніх ВЕЗ)

Таксон	Кількість видів, %							
	Туреччина	Грузія	Росія	Україна	Румунія	Болгарія	ЧМ 2025	ЧМ 2018
DINOPHYCEAE Pascher	97,0	94,9	96,1	97,6	97,0	96,3	97,1	97,4
Akashiwales Molinari & Guiry	0,5	1,3	0,6	0,3	1,0	0,7	0,3	0,2
<i>Akashiwaceae</i> Cavalier-Smith	0,5	1,3	0,6	0,3	1,0	0,7	0,3	0,2
Amphidinales Cavalier-Smith	1,0	-	1,3	4,8	-	4,4	3,9	4,9
<i>Amphidiniaceae</i> Moestrup & Calado	1,0	-	1,3	4,8	-	4,4	3,9	4,9
Dinophysales Kof.	11,6	13,9	14,7	9,3	11,1	8,8	9,3	10,7
<i>Amphisoleniaceae</i> Er.Lindem.	-	-	-	-	-	-	-	0,2
<i>Dinophysaceae</i> Bütschli	9,0	11,4	12,2	7,2	9,1	7,4	7,2	7,9
<i>DFIS</i> ¹	-	-	-	0,3	-	-	0,3	0,2
<i>Oxyphysaceae</i> Sournia	2,5	2,5	2,6	1,7	2,0	1,5	1,8	2,3

* Див. сайт: <https://doi.org/10.15407/alg35.03.210>.

DOIS²	-	1,3	-	0,3	1,0	1,5	1,0	0,5
<i>Amphidomataceae</i> Sournia	-	-	-	0,3	1,0	1,5	0,8	0,5
<i>DFIS</i>	-	1,3	-	-	-	-	0,3	-
Gonyaulacales F.J.R.Taylor	27,6	15,2	11,5	15,2	19,2	18,4	18,4	18,6
<i>Ceratiaceae</i> Kof.	13,6	7,6	3,2	5,9	8,1	3,7	8,0	7,7
<i>Cladopyxidaceae</i> Kof.	-	-	-	0,7	-	-	0,5	1,2
<i>Gonyaulacaceae</i> Er.Lindem.	5,5	6,3	3,8	3,1	7,1	6,6	3,6	4,0
<i>Lingulodiniaceae</i> W.A.Sarjeant & C.Downie	1,5	1,3	0,6	1,0	1,0	1,5	0,8	0,7
<i>Ostreopsidaceae</i> Gottschling, Tillmann & Elbrächter	-	-	-	-	-	-	-	0,2
<i>Protoceratiaceae</i> Er.Lindem.	1,5	-	0,6	0,7	1,0	1,5	0,8	0,7
<i>Pyrocystaceae</i> (F.Schütt) Lemmerm.	5,5	-	3,2	3,8	2,0	5,1	4,7	4,2
Gymnodinales Apstein	15,1	19,0	18,6	22,1	18,2	19,9	20,5	22,3
<i>Amphitholaceae</i> Poche ex Fensome et al.	0,5	-	-	0,3	-	-	0,3	0,2
<i>Ceratoperidiniaceae</i> A.R.LoebL.	0,5	-	1,3	1,0	1,0	-	0,8	0,9
<i>Gymnodiniaceae</i> Lankester	8,5	11,4	9,6	13,4	10,1	8,1	11,9	13,7
<i>GFIS³</i>	0,5	1,3	0,6	0,7	-	1,5	0,5	0,5
<i>Gyrodiniaceae</i> Moestrup & Calado	3,0	2,5	3,8	4,1	5,1	8,1	4,7	4,7
<i>Kareniaceae</i> Bergholtz, Daugbjerg, Moestrup & Fernández-Tejedor	0,5	-	1,3	-	-	-	0,5	0,5
<i>Polykrikaceae</i> Kof. & Swezy	1,5	3,8	1,3	1,4	2,0	1,5	1,0	1,0
<i>Ptychodiscaceae</i> (F.Schütt) Lemmerm.	-	-	-	0,3	-	0,7	0,3	0,5
<i>Warnowiaceae</i> Er.Lindem.	-	-	0,6	0,7	-	-	0,5	0,5
Peridinales Macalister	25,1	32,9	34,6	28,6	34,3	29,4	27,7	26,5
<i>Ensiculiferaceae</i> Zhun Li, Gottschling, K.N.Mertens, H.Gu & H.H.Shin	-	-	1,9	0,3	-	0,7	0,8	0,7
<i>Glenodiniopsidaceae</i> Schill.	-	-	-	0,3	-	-	0,3	0,2
<i>Heterocapsaceae</i> R.A.Fensome, F.J.R.Taylor, G.Norris, W.A.S.Sarjeant, D.I.Wharton & G.L.Williams	0,5	-	1,3	0,3	-	-	0,5	0,7

<i>Kryptoperidiniaceae</i> Er.Lindem.	1,0	2,5	1,9	1,7	2,0	2,9	1,8	1,6
<i>Lessardiaceae</i> Carbonell- Moore	-	-	-	0,3	1,0	0,7	0,3	0,2
<i>Peridiniaceae</i> Ehrenb.	0,5	2,5	0,6	1,7	2,0	-	1,3	0,9
<i>PFIS</i> ⁴	2,0	6,3	2,6	3,1	5,1	2,9	2,6	2,6
<i>Peridiniopsidaceae</i> Gottschling, Kretschmann & Zerdoner Casalan	-	-	0,6	1,4	-	1,5	1,3	2,3
<i>Podolampadaceae</i> Er.Lindem.	1,5	-	-	0,3	-	-	0,8	0,9
<i>Protoperidiniaceae</i> Bujak & E.H.Davies	19,6	21,5	25,6	19,0	24,2	20,6	18,1	16,1
<i>Thecadiniaceae</i> Balech	-	-	-	-	-	-	-	0,2
Phytodinales A.R.LoebL.	0,5	-	0,6	1,0	2,0	-	0,8	0,7
<i>Phytodiniaceae</i> G.A.Klebs	0,5	-	0,6	1,0	2,0	-	0,8	0,7
Prorocentrales Lemmerm.	13,1	6,3	9,0	9,3	8,1	5,9	9,3	8,6
<i>Prorocentraceae</i> F.Stein	8,5	6,3	6,4	5,9	8,1	5,1	5,4	5,4
<i>Oxytoxaceae</i> Er.Lindem.	4,5	-	2,6	3,4	-	0,7	3,9	3,3
Suessiales Fensome et al.	0,5	2,5	0,6	2,8	-	2,2	2,6	1,4
<i>Borghiellaceae</i> Moestrup, K.Lindberg & Daugbjerg	-	-	-	0,7	-	0,7	0,5	0,2
<i>Hemidiniaceae</i> Bourrelly ex P.C.Silva	-	-	-	0,3	-	-	0,3	0,2
<i>Sphaerodiniaceae</i> Moestrup & Calado	-	-	-	0,3	-	-	0,3	0,2
<i>Suessiaceae</i> Fensome et al.	0,5	2,5	0,6	1,4	-	1,5	1,6	0,7
Thoracosphaerales Tangen	0,5	1,3	1,9	2,1	1,0	2,2	1,8	1,6
<i>Pfiesteriaceae</i> Steidinger & J.M.Burkholder	-	-	0,6	0,3	-	1,5	0,5	0,2
<i>Thoracosphaeraceae</i> Schill.	0,5	1,3	1,3	1,7	1,0	0,7	1,3	1,4
Torodinales Boutrup, Moestrup & Daugbjerg	1,0	-	1,9	0,7	1,0	0,7	0,8	0,7
<i>Kapelodiniaceae</i> Boutrup, Moestrup & Daugbjerg	0,5	-	0,6	0,3	1,0	0,7	0,3	0,2
<i>Torodiniaceae</i> Boutrup, Moestrup & Daugbjerg	0,5	-	1,3	0,3	-	-	0,5	0,5
Tovelliales Moestrup & Calado	0,5	1,3	0,6	1,0	-	2,2	0,8	0,7

<i>Tovelliaceae</i> Moestrup, Lindberg & Daugbjerg	0,5	1,3	0,6	1,0	-	2,2	0,8	0,7
DCIS⁵	-	-	-	0,3	-	-	0,3	-
DOIS⁶	-	-	-	0,3	-	-	0,3	-
<i>DFIS⁷</i>	-	-	-	0,3	-	-	0,3	-
NOCTILUCACEAE R.A.Fensome, F.J.R.Taylor, G.Norris, W.A.S.Sarjeant, D.I.Wharton & G.L.Williams	2,5	3,8	3,2	1,7	2,0	2,9	2,1	2,1
Noctilucales Gervais & van Beneden	2,5	3,8	3,2	1,7	2,0	2,9	2,1	2,1
<i>Kofoidiniaceae</i> (J.Cachon & M.Cachon) F.J.R.Taylor	0,5	-	-	-	-	-	0,3	0,5
<i>Leptodiscaceae</i> Kof.	-	-	-	0,3	1,0	1,5	0,5	0,5
<i>Noctilucaceae</i> Gervais & van Beneden	1,0	1,3	1,3	0,7	1,0	1,5	0,5	0,5
<i>Protodiniferaceae</i> Kof. & Swezy	1,0	2,5	1,9	0,7	-	-	0,8	0,7
OXYRRHINOPHYCEAE Cavalier-Smith	0,5	1,3	0,6	0,3	-	0,7	0,3	0,2
Oxyrrhinales Sournia	0,5	1,3	0,6	0,3	-	0,7	0,3	0,2
<i>Oxyrrhinaceae</i> Sournia	0,5	1,3	0,6	0,3	-	0,7	0,3	0,2
SYNDINIOPHYCEAE A.R.Loeb.	-	-	-	-	1,0	-	0,3	0,2
Syndiniales A.R.Loeb.	-	-	-	-	1,0	-	0,3	0,2
<i>Syndiniaceae</i> Chatton	-	-	-	-	1,0	-	0,3	0,2
Totally species, units (100%)	199	79	156	290	99	136	386	430

Скорочення: DFIS¹ — Dinophysales Familia Incertae Sedis; DOIS² — Dinophysales Ordo Incertae Sedis; GFIS³ — Gymnodiniales Familia Incertae Sedis; PFIS⁴ — Peridinales Familia Incertae Sedis; DCIS⁵ — Dinoflagellata Classis Incertae Sedis; DOIS⁶ — Dinophyceae Ordo Incertae Sedis; DFIS⁷ — Dinophyceae Familia Incertae Sedis.

У всіх досліджених акваторіях найбільшим видовим багатством вирізнялися порядки *Peridinales*, *Gymnodiniales*, *Gonyaulacales*, *Dinophysales* і *Prorocentrales*. Кількість видів першого порядку коливалася залежно від району від 27 до 94, а загалом для моря — 123 видів. Видове

багатство двох наступних за значимістю порядків коливалося від 16 до 62 і від 12 до 55 відповідно, становлячи для моря загалом 78 і 70 видів.

Найбільшою різноманітністю відрізнялися українські територіальні води, за винятком порядку *Gonyaulacales*, який був найбагатше представлений у турецьких водах. Найбідніша — грузинська акваторія.

Завдяки даним морських експедицій в останні 18 років (EMBLAS, 2018a, b; Black..., 2019), а також таксономічним дослідженням, виявлено нові види, які розширили систематичну структуру динофлагелят Чорного моря. Усього було знайдено 28 видів, унікальних для кожної акваторії: 14 — для болгарських вод, 6 — для українських, 5 — для турецьких та по одному для російських, грузинських та румунських (табл. 2). Серед них вперше описано паразитичний вид *Eleftheros karadeniz* (біля берегів Криму), новий для науки (Holt et al., 2023). Рідкісний для Чорного моря рід *Amphidoma* включав лише один вид *A. languida*, описаний В. Великовою із болгарських і румунських вод (Krakhmalny et al., 2018), у даний час поповнився ще одним новим для науки видом, знайденим біля берегів Болгарії — *Amphidoma pontica* Tillmann & Dzembekova (Tillmann et al., 2025).

Таблиця 2. Нові знахідки видів динофлагелят у різних акваторіях Чорного моря після 2018 р.

Джерело	Акваторія	Таксон
EMBLAS, 2018	Грузія	<i>Pseudadenoides kofoidii</i> (Herdman) F.Gómez, R.Onuma, Artigas & T.Horig.
Derezyuk et al., 2018	Україна	<i>Biecheleria ordinata</i> (Skuja) Moestrup; <i>Borghiella tenuissima</i> (Lauterborn) Moestrup, G.I. Hansen & Daugbjerg
Terenko, Krakhmalny, 2019		<i>Peridinium quadridentatum</i> (F.Stein) G.I.Hansen
Krakhmalny, Krakhmalny, Terenko, 2023a		<i>Protoperidinium euxinum</i> Krakhm.
Krakhmalny et al., 2023b		<i>Protoperidinium quadrioblongum</i> C.Sarai, A.Yamaguchi, H.Kawami & K.Matsuoka
Holt et al., 2023		<i>Eleftheros karadeniz</i> Tikhonenkov, Hehenberger & Keeling *
Black..., 2019	Румунія	<i>Acanthogonyaulax spinifera</i> (G.Murr. & Whitting) H.W.Graham

	Болгарія	<i>Alexandrium margalefii</i> Balech; <i>A. mediterraneum</i> U.John; <i>Amphidinium herdmanii</i> Kof. & Swezy; <i>Biecheleria cincta</i> (Siano, Montresor & Zingone) Siano; <i>Gymnodinium dorsalisulcum</i> (Hulburt, J.J.A.McLaughlin & Zahl) Sh.Murray, Salas & Hallegraeff; <i>G. opressum</i> Conrad, <i>Gyrodinium cochlea</i> Lebour; <i>G. dominans</i> Hulburt; <i>G. guttula</i> Larsen; <i>Pelagodinium bei</i> (H.J.Spero) Siano, Montresor, Probert & Vargas; <i>Pfeisteria piscicida</i> Steidinger & J.M.Burkholder; <i>Protoperidinium nux</i> (Schill.) Balech; <i>Unruhadinium niei</i> (G.X.Liu & Z.Y.Hu) Gottschling
Tillman, 2025		<i>Amphidoma pontica</i> Tillman & Dzhenbekova *
Yasakova et al., 2020	Росія	<i>Oblea baculifera</i> Balech
Sahin, 2024	Туреччина	<i>Dinophysis vertex</i> Meunier; <i>Protoperidinium cerasus</i> (Paulsen) Balech; <i>P. obtusum</i> (Karsten) Parke & J.D.Dodge; <i>P. latidorsale</i> (P.J.L.Dangeard) Balech; <i>Pyrocystis robusta</i> Kof.

* Нові для науки види.

На сьогодні новими для флори динофлагелат Чорного моря є роди: *Acanthogonyaulax*, *Eleftheros*, *Pelagodinium*, *Pfeisteria* та *Pseydadenoides* (табл. 3, помічено зірочкою). Роди *Acanthodinium* Kof., *Balechina* A.R.Loeb. & A.R.Loeb., *Centrodinium* Kof., *Palaeophalacroma* Schill. та *Peridiniopsis* Lemmerm. не увійшли до оновленого списку відповідно до критерію відбору джерел, а види родів *Amphisolenia* F.Stein, *Cladopyxis* F.Craveiro, Calado, Daugbjerg & Moestrup, *Plectodinium* Biecheler та *Thecadinium* Kof. & Skogsb. можуть бути включені після додаткової перевірки. Серед них вид *Ellobiopsis chattonii* Caullery, що паразитує на *Acartia clausi* Giesbrecht, знайдений А.І. Івановим у Північно-західному Причорномор'ї (лиман Сасик) (Ivanov, 1982). Вперше цей вид був описаний у 1910 р. як паразит на *Calanus helgolandicus* Claus (Caullery, 1910). Якщо його знахідки в морі підтвердяться, систематична структура динофлагелат може поповнитися ще одним класом, порядком, родиною і родом. У такому випадку в Чорному морі будуть представлені всі відомі на сьогодні у світі класи суперкласу *Dinoflagellata*.

Таблиця 3. Узагальнений родовий (%) спектр динофлагелат територіальних вод причорноморських країн та Чорного моря в цілому

Рід	Туреччина	Грузія	Росія	Україна	Румунія	Болгарія	Чорне море
<i>Acanthogonyaulax</i> (Kof.) H.W.Graham *	-	-	-	-	1,01	-	0,26
<i>Akashiwo</i> G.I. Hansen & Moestrup	0,5	1,27	0,64	0,34	1,01	0,74	0,26
<i>Alexandrium</i> Halim	1,01	-	1,92	1,38	-	2,94	1,81
<i>Amphidinium</i> Clap. & Lachmann	1,01	-	1,28	4,83	-	4,41	3,89
<i>Amphidoma</i> F.Stein	-	-	-	-	1,01	1,47	0,52
<i>Amylax</i> Meunier	0,50	-	-	0,34	-	-	0,26
<i>Apocalathium</i> Craveiro, Daugbjerg, Moestrup & Calado	-	-	0,64	0,34	-	-	0,26
<i>Archaeperidinium</i> Jørg.	-	-	0,64	0,34	1,01	-	0,26
<i>Azadinium</i> Elbrächter & Tillmann	-	-	-	0,34	-	-	0,26
<i>Biecheleria</i> Moestrup, K.Lindberg & Daugbjerg	-	-	-	0,69	-	0,74	0,78
<i>Blixaea</i> Gottschling	-	-	0,64	-	-	-	0,26
<i>Borghiella</i> Moestrup, G.I.Hansen & Daugbjerg	-	-	-	0,69	-	0,74	0,52
<i>Bysmatrum</i> M.A.Faust & Steidinger	-	1,27	-	0,34	-	-	0,26
<i>Ceratium</i> F.Schrank	0,50	1,27	-	0,34	1,01	0,74	0,26
<i>Chimonodinium</i> Craveiro, Calado, Daugbjerg, G.I.Hansen & Moestrup	-	-	-	0,34	-	-	0,26
<i>Cochlodinium</i> F.Schütt	1,51	1,27	-	1,38	-	-	1,04
<i>Corythodinium</i> A.R.Loeb. & A.R.Loeb.	1,50	-	-	-	-	-	0,78
<i>Cystodinium</i> G.A.Klebs	0,50	-	0,64	0,69	1,01	-	0,52
<i>Dinophysis</i> Ehrenb.	9,05	11,39	12,10	7,24	9,09	7,30	7,25
<i>Diplopsalis</i> R.S.Bergh	0,50	1,27	0,64	0,34	1,01	0,73	0,26
<i>Diplopsalopsis</i> Meunier	-	-	0,64	0,34	1,01	-	0,26
<i>Durinskia</i> Carty & El.R.Cox	0,50	1,27	0,64	1,03	1,01	0,73	0,78

<i>Eleftheros</i> Tikhonenkov, Hehenberger & Keeling *	-	-	-	0,34	-	-	0,26
<i>Ensiculifera</i> Balech	-	-	1,28	0,34	-	0,74	0,52
<i>Glenodiniopsis</i> Wolsz.	-	-	-	0,34	-	-	0,26
<i>Glenodinium</i> Ehrenb.	1,01	3,80	1,28	2,07	4,04	2,21	1,55
<i>Glochidinium</i> Boltovskoy	-	1,27	-	0,34	-	-	0,26
<i>Goniodoma</i> F.Stein	-	-	-	0,34	-	-	0,26
<i>Gonyaulax</i> Diesing	5,53	6,33	3,85	3,10	6,06	6,62	3,37
<i>Gymnodinium</i> F.Stein	6,03	10,13	8,33	10,69	10,10	7,35	9,59
<i>Gyrodinium</i> Kof. et Swezy	3,02	2,53	3,85	4,14	5,05	8,09	4,66
<i>Hemedinium</i> F.Stein	-	-	-	0,34	-	-	0,26
<i>Herdmania</i> J.D.Dodge	-	1,27	-	0,34	-	-	0,26
<i>Heterocapsa</i> F.Stein	0,50	-	1,28	0,34	-	-	0,52
<i>Huia</i> H.F. Gu, K.N. Mertens et T.T.Liu	-	-	-	0,34	1,01	0,74	0,26
<i>Hypnodinium</i> G.A.Klebs	-	-	-	0,34	1,01	-	0,26
<i>Jadwigia</i> Moestrup, K.Lindberg & Daugbjerg	-	1,27	-	0,34	-	0,74	0,26
<i>Kapelodinium</i> Boutrup, Moestrup & Daugbjerg	0,50	-	0,64	0,34	1,01	0,74	0,26
<i>Karenia</i> G.I.Hansen & Moestrup	0,50	-	1,28	-	-	-	0,52
<i>Kofoidinium</i> Pavillard	0,50	-	-	-	-	-	0,26
<i>Kolkwitiella</i> Er.Lindem.	-	-	0,64	0,34	1,01	-	0,26
<i>Kryptoperidinium</i> Er.Lindem.	0,50	1,27	0,64	0,34	1,01	0,74	0,26
<i>Lebouridium</i> F.Gómez et al.	-	-	0,64	0,34	-	0,74	0,26
<i>Lessardia</i> Saldarriaga et F.J.Taylor	-	-	-	0,34	1,01	0,74	0,26
<i>Levanderina</i> Moestrup et al.	0,50	1,27	-	0,34	-	0,74	0,26
<i>Lingulaulax</i> M.J.Head, K.N.Mertens & R.A.Fensome	0,50	1,27	0,64	0,34	1,01	0,74	0,26
<i>Margalefidinium</i> F.Gómez, Richlen et D.M.Anderson	0,50	-	1,27	0,69	-	0,74	0,52
<i>Mesoporos</i> Lillick	0,50	1,27	0,64	0,34	-	-	0,26
<i>Micracanthodinium</i> Deflandre	0,50	-	-	0,69	-	-	0,52
<i>Monaster</i> F.Schütt	0,50	-	-	0,34	-	-	0,26
<i>Noctiluca</i> Suriray	0,50	1,27	0,64	0,34	1,01	0,74	0,26
<i>Nusuttodinium</i> Y.Takano et T.Horig.	-	-	-	0,69	-	-	0,78
<i>Oblea</i> Balech	0,50	-	1,28	0,34	1,01	0,74	0,52

<i>Opisthoaulax</i> Calado	0,50	-	0,64	0,34	-	0,74	0,26
<i>Oxyphysis</i> Kof.	0,50	-	-	-	-	0,74	0,26
<i>Oxyrrhis</i> Dujardin	0,50	1,27	0,64	0,34	-	0,73	0,26
<i>Oxytoxum</i> F.Stein	3,02	-	2,56	3,45	-	0,74	3,11
<i>Parvodinium</i> Carty	-	-	0,64	1,38	-	1,47	1,30
<i>Paulsenella</i> Chatton	-	-	-	0,34	-	-	0,26
<i>Pelagodinium</i> Siano. Montresor. Probert & Vargas *	-	-	-	-	-	0,74	0,26
<i>Pentapharsodinium</i> Indelicato & A.R.Loeb.	-	-	0,64	-	-	-	0,26
<i>Peridiniella</i> Kof. & J.R. Michener	1,01	1,27	1,28	0,69	1,01	0,74	0,78
<i>Peridinium</i> Ehrenb.	0,50	1,27	0,64	1,38	2,02	-	1,04
<i>Petalodinium</i> J.Cachon & M.Cachon	-	-	-	-	-	0,74	0,26
<i>Pfeisteria</i> Steidinger & J.M.Burkholder *	-	-	-	-	-	0,74	0,26
<i>Phalacroma</i> F.Stein	2,01	2,53	2,56	1,72	2,02	0,74	1,55
<i>Podolampas</i> F.Stein	1,51	-	-	0,34	-	-	0,78
<i>Polykrikos</i> Butschli	1,51	3,80	1,28	1,38	2,02	1,47	1,04
<i>Preperidinium</i> Mangin	-	-	0,64	0,34	-	0,74	0,26
<i>Pronocutiluca</i> Fabre-Domergue	1,01	2,53	1,92	0,69	-	-	0,78
<i>Prorocentrum</i> Ehrenb.	8,04	5,06	5,77	5,52	8,08	5,15	5,18
<i>Prosoaulax</i> Calado et Moestrup	-	1,27	-	0,34	-	-	0,26
<i>Protoceratium</i> Bergh	1,51	-	0,64	0,69	1,01	1,47	0,78
<i>Protodinium</i> Lohmann	0,50	1,27	0,64	0,34	-	-	0,26
<i>Protoperidinium</i> Bergh	18,59	18,99	21,15	16,21	18,18	17,65	15,80
<i>Pselidinium</i> Sournia	0,50	-	0,64	0,34	1,01	-	0,26
<i>Pseudadenoides</i> F.Gómez, R.Onuma, Artigas & T.Horig.	-	1,27	-	-	-	-	0,26
<i>Pseudophalacroma</i> Jørg.	-	-	-	0,34	-	-	0,26
<i>Ptychodiscus</i> F.Stein	-	-	-	0,34	-	0,74	0,26
<i>Pyrocystis</i> Wyville-Thompson	3,02	-	-	1,03	-	-	1,55
<i>Pyrophacus</i> F.Stein	1,01	-	0,64	0,69	1,01	0,74	0,52
<i>Scaphodinium</i> Margalef	-	-	-	0,34	1,01	0,74	0,26
<i>Scrippsiella</i> Balech	0,50	1,27	0,64	0,34	1,01	0,74	0,26
<i>Sourniaea</i> H.Gu et al.	0,50	-	-	0,34	-	0,74	0,26
<i>Spatulodinium</i> J.Cachon et M.Cachon	0,50	-	0,64	0,34	-	0,74	0,26
<i>Speroidium</i> Moestrup et Calado	-	-	0,64	0,34	-	0,74	0,26
<i>Sphaerodinium</i> Wołosz.	-	-	-	0,34	-	-	0,26

<i>Syndinium</i> Chatton	-	-	-	-	1,01	-	0,26
<i>Torodinium</i> Kof. & Swezy	0,50	-	1,28	0,34	-	-	0,52
<i>Torquentidium</i> H.H.Shin, Z.Li, K.W.Lee et K.Matsuoka	-	-	0,64	0,69	-	-	0,52
<i>Tovellia</i> Moestrup, K.Lindberg et Daunbjerg	-	-	-	0,34	-	0,73	0,26
<i>Triadinium</i> J.D.Dodge	0,50	-	0,64	0,69	1,01	1,47	0,78
<i>Tripos</i> Bory	13,07	6,33	3,21	5,52	7,07	2,94	7,77
<i>Unruhadinium</i> Gottschling	-	-	-	0,34	-	1,47	0,52
<i>Warnowia</i> Er.Lindem.	-	-	0,64	0,69	-	-	0,52
Усього (%)	199	79	156	290	99	136	386

* Нові для флори Чорного моря.

Найрізноманітнішим був рід *Protoperidinium* (15,8%), кількість видів якого в морі становила 60, а в залежності від акваторії коливалася від 16 до 47. Він належить домінуючому в Чорному морі (за кількістю видів) порядку *Peridinales*, частка якого сягає 27,7%. Значно поступалися йому за кількістю видів роди *Gymnodinium* (9,6%) та *Tripos* (7,8%), що відносяться до порядків *Gymnodinales* (20,5%) та *Gonyaulacales* (18,4%) відповідно. Кількість видів роду *Gymnodinium* коливалася від 8 до 29 (всього 39), а *Tripos* — від 5 до 26 (всього 29). Частка решти порядків була незначною.

Серед видів, що увійшли до чек-листа, 39 видів космополітів, 17 широко поширених у світі, 8 евригалінних, 30 токсичних та 35 біоломінесцентів. Число збудників «цвітіння» води збільшилося з 13 до 23 за останні 18 років. До них увійшли види: *Alexandrium ostenfeldii*, *Chimonodinium lomnickii*, *Dinophysis sacculus*, *Diplopsalis lenticula*, *Gyrodinium cornutum*, *Peridinium cinctum*, *Phalacroma rotundatum*, *Tripos furca*, *T. fusus* та *Sphaerodinium limneticum*. Добре відомий збудник «спалахів» біоломінесценції *Noctiluca scintillans* раніше відзначався окремо як представник зоопланктону.

Серед них широко представлені види-космополіти (43,5%) та токсичні види (30,4%). Більшість з 23 видів — морські і солонуватоводно-морські форми, представлені в однаковій кількості (по 34,8%). До прісноводно-солонуватоводного комплексу відносяться 13%, до евригалінних 17,4%. *Peridinium cinctum* широко поширений у світі і має високий рівень адаптації до умов середовища.

У всіх акваторіях Чорного моря протягом століття постійно згадуються види, загальні для всього моря, що становлять «ядро» альгофлори динофлагелат (виділені в таблиці Додатка А літерою «с»), кількість яких

зросла вдвічі за останні 18 років — з 19 (Terenko, 2007) до 39. До них потенційно відносяться ще 28 видів, відсутніх лише в одній з 6 акваторій моря. Ймовірно, в результаті подальших досліджень та перевірки додаткових джерел збільшиться кількість видів, що становлять основу чорноморської альгофлори динофлагелят. Серед них переважали види родів *Protoperidinium* (8) (див. Додаток А), *Dinophysis* (6), *Prorocentrum* (4), *Gymnodinium* (3), *Tripos (Ceratum)* (3), 5 представників моновидових родів: *Akashiwo*, *Diplopsalis*, *Linguaulax*, *Noctiluca*. По два види родів: *Glenodinium* та *Gonyaulax*, а також по одному: *Durinskia*, *Gyrodinium*, *Peridiniella*, *Phalacroma*, *Polykrikos* та *Криптоперидиніум*.

Характерною їхньою рисою є широкі адаптивні здібності та толерантність до солоності води, що зумовлює їхнє широке поширення як у морських, так і в різноманітних континентальних водоймах (річках, водосховищах, мінералізованих водоймах та лиманах).

Серед них є евригаліни, космополіти або значно поширені у світі. Усі види, крім 9 фототрофних, є гетеротрофами (зокрема, фаготрофи) чи міксотрофами, що дозволяє їм переходити на фототрофію у разі наявності достатньої кількості біогенних елементів.

Північно-західна частина моря, значна частина якої відноситься до українських вод, має суттєві відмінності від решти акваторії моря завдяки наявності великого мілководного шельфу та гирл найбільших європейських річок — Дунаю, Дніпра, Дністра та Південного Бугу, що зумовлює значне розпріснення морських вод та їхню високу трофність. Ці відмінності відображаються як у кількісних показниках фітопланктону, так і в структурі та видовому багатстві.

Без урахування видів, що потребують додаткових досліджень і перевірки (68 видів), як і раніше, найбільше видове багатство динофлагелят відзначено в українському секторі моря (290 або 75% загальної кількості в морі), що обумовлено різноманіттям екологічних умов, а також високим рівнем вивченості акваторії. Найбільша за площею турецька акваторія посідає друге місце (199 видів, або 51,5%), найменші за площею грузинська (6% загальної акваторії моря) та румунська (6,5%) акваторії найбідніші за кількістю видів (79 або 20,5% та 99 або 25,6% відповідно). Видове багатство решти акваторії моря коливалося від 136 (35%) у болгарських водах до 156 (40,4%) у російських. У ході подальшої перевірки національних джерел кількість видів зростатиме.

Висновки

У результаті проведеної критико-систематичної ревізії суперкласу *Dinoflagellata* оновлено чек-лист цієї групи водоростей Чорного моря, що включає на сьогодні 386 видів (9,2% відомих у світі), які відносяться до 5 класів, 17 порядків, 52 сімейств та 95 родів. Після 2018 р. було знайдено 28 нових видів, унікальних для кожної акваторії. Незважаючи на незначні розбіжності у кількості видів порівняно з попереднім чек-листом 2018 р., суттєво змінилася таксономічна структура динофлагелат, що зумовлено більш жорстким критерієм відбору джерел, а також появою нових таксономічних комбінацій. Новими для флори Чорного моря є роди *Acanthogonyaulax*, *Eleftheros*, *Pelagodinium*, *Pfeisteria* та *Pseudadenoides*. Серед них є нові для науки види: *Eleftheros karadeniz* Tikhonenkov, Hehenberger & Keeling та *Amphidoma pontica* Tillmann & Dzhembekova.

Кліматичні зміни та «медитеранізація» Чорного моря прискорюють процеси інтродукції видів у цей регіон, частина з них адаптується до умов зниженої солоності та стає постійними представниками чорноморської альгофлори. Водночас прісноводні види дедалі частіше зустрічаються в зоні контакту «суша – море», потрапляючи туди зі стоком річок, і нерідко викликають тут «цвітіння» води. Збільшення числа видів, що становлять основу альгофлори динофлагелат Чорного моря з 19 до 39 за останні 18 років, зумовлено, з одного боку, новими відомостями з різних акваторій моря, а з іншого — розширенням їхніх ареалів проживання. Збільшення числа збудників «цвітіння» (з 13 до 23) свідчить про продовження «експансії» цих видів у Чорному морі.

Інтенсифікація досліджень з широким застосуванням сучасних методів сприяє більш якійсній ідентифікації видів та уточненню їхнього систематичного положення, в результаті чого існуючі дані щодо різноманітності альгофлори Чорного моря постійно поповнюються.

Крім того, наші уявлення про видове багатство динофлагелат акваторій Чорного моря значно залежать від складу аналізованих джерел та критеріїв їх відбору: після критичного підходу до вибору джерел та враховуючи нові знахідки, їхня кількість може коливатися від 386 до 454. Додаткових досліджень потребують, на нашу думку, 68 видів. Найчастіше це поодинокі локальні згадки, опис яких не підтверджений ні фотографіями, ні рисунками.

Дані щодо кількості видів у територіальних водах різних країн також будуть змінюватися в процесі подальших досліджень. Це потребує міжнародної кооперації причорноморських країн.

Для виправлення помилок у багатьох працях і внесення змін, що постійно з'являються в таксономічній системі, необхідне оновлення електронної бази даних водоростей Чорного моря, на зразок сайту продромуса, створеного на базі двигуна медіовіки в Інституті ботаніки НАН України ім. М.Г. Холодного. При внесенні даних слід використовувати принцип першоджерел — вносити тільки оригінальні дані.

Автори висловлюють глибоку подяку нашим колегам: Олександрі Сергєєвій, Ксенії Скуратовій (Швеція), Наталії Дерезюк, Олександрю Крахмальному, Галіні Теренько, Лаурі Бойченко (Румунія), Юрію Околадкову (Мексіка), з вдячністю згадуємо Віолету Великову, якої, на жаль, вже немає з нами (Болгарія), за співпрацю при створенні першої версії чек-листа динофлагелят Чорного моря. Наша щира подяка чл.-кор. НАН України Виноградовій О.М. за корисні поради при роботі над статтею. З сумом і великою вдячністю згадуємо покійного нині чл.-кор. НАН України, шановного П.М. Царенка.

Список літератури

- Abé T.H. 1967. The armoured *Dinoflagellata*. II. *Prorocentridae* and *Dinophysidae* (B). *Dinophysis* and its allied genera. *Publ. Seto Mar. Biol. Lab.* 15(1): 37–78.
- Balech E. 1967. Dinoflagelados nuevos o interesantes del Golfo de México y Caribe. *Revista Museo Argentino Ciencias Naturales "B. Rivadavia". Hydrobiologia.* 2(3): 77–144.
- Black Sea State of Environment report (2009–2014/5)*. 2019. Ed. A. Krutov. Publ. Commis. Protect. Black Sea Against Pollut. (BSC). Istanbul. 811 p.
- Bryantseva Yu. 2000. *Variability of the Black Sea phytoplankton structural characteristics*. PhD (Biol.) Thesis. Sevastopol 178 с. [Брянцева Ю.В. 2000. *Изменчивость структурных характеристик фитопланктона в Черном море*. Дис. ... к. б. н. Севастополь. 178 с.]
- Bryantseva Yu.V. 2023. Current Information on the Diversity of Dinoflagellates of Ukraine. *Int. J. Algae.* 25(1): 5–18. <https://doi.org/10.1615/InterJAlgae.v25.i1.10>
- Bryantsev V.A., Bryantseva Yu.V. 1999. Long-term changes in phytoplankton of the deep-water part of the Black Sea in connection with natural and anthropogenic factors. *Ekol. Mor.* 49: 24–28. [Брянцев В.А., Брянцева Ю.В. 1999. Многолетние изменения в фитопланктоне глубоководной части Черного моря в связи с естественным и антропогенным факторами. *Экол. моря.* 49: 24–28.]
- Bryantsev V.A., Bryantseva Yu.V. 2010. Signs of the influence of global warming on the Black Sea ecosystem. In: *Environmental safety of the coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources*. Sevastopol. Pp. 191–197. [Брянцев В.А., Брянцева Ю.В. 2010. Признаки влияния глобального потепления на экосистему Черного моря. В кн.: *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь. С. 191–197.]

- Bryantseva Yu.V., Krakhmalny A.F., Velikova V.N., 2016. Dinoflagellates in the Sevastopol Coastal Zone (Black Sea, Crimea). *Int. J. Algae*. 18(1): 21–32.
<https://doi.org/10.1615/InterJAlgae.v18.i1.20>
- Caullery M. 1910. *Ellobiopsis chattoni* n. g., n. sp. parasite de *Calanus helgolandicus* Claus, appartenant probablement aux Péridiniens. *Bull. Sci. Fr. Belg.* 44: 201–214.
- Claparède É., Lachmann J. 1859. Études sur les infusoires et les rhizopodes. *Mém. l'Inst. Nat. Gen.* 6: 261–482.
- Craveiro S.C., Calado A.J., Daugbjerg N., Moestrup Ø. 2009. Ultrastructure and LSU rDNA-based revision of *Peridinium* group *Palatinum* (*Dinophyceae*) with the description of *Palatinus* gen. nov. *J. Phycol.* 45(5): 1175–1194.
- Derezyuk N.V., Medinet V.I., Gazetov E.I. 2018. Research on phytoplankton in the coastal waters of Zmiiny Island in 2016–2017. *Lyudina ta dovkillia. Problems of neoecology*. 3–4. Kharkiv: KhNU im. V.N. Karazina. 30: 40–64. [Дерезюк Н.В., Медінець В.І., Газетов Є.І. 2018. Дослідження фітопланктону у прибережних водах острова Зміїний в 2016–2017 рр. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. N 3–4. Харків: ХНУ ім. В.Н. Каразіна. 30: 40–64.]
- EMBLAS II. Georgia. 2018a. Phytoplankton monitoring of the Black Sea Coast of Georgia (2017). 1.2.3. In: *EMBLAS II. Project*. Pp. 28–34.
- EMBLAS II. Ukraine. 2018b. Derezyuk et al. Phytoplankton. III. 4.1. In: *EMBLAS II. Project*. Pp. 232–281.
- Fensome R.A., Taylor F.J.R., Norris G., Sarjeant W.A.S., Wharton D.I., Williams G.L. 1993. *A classification of living and fossil dinoflagellates*. Am. Museum Nat. Hist. Micropaleontol. Press. Spec. Publ. 7. i-viii +1–351 p.
- Gómez F. 2012. A checklist and classification of living dinoflagellates (*Dinoflagellata*, *Alveolata*). *CICIMAR Océánides*. 27(1): 65–140. <https://doi.org/10.37543/oceanides.v27i1.111>
- Gómez F. 2013. Reinstatement of the dinoflagellate genus *Tripes* to replace *Neoceratium*, marine species of *Ceratium* (*Dinophyceae*, *Alveolata*). *CICIMAR Océánides*. 28(1): 1–22.
- Gomez F. 2020. Diversity and Classification of *Dinoflagellates*. In: *Dinoflagellates*. New York: Nova Sci. Publ. Pp. 1–38.
- Gómez F. 2021. Speciation and infrageneric classification in the planktonic dinoflagellate *Tripes* (*Gonyaulacales*, *Dinophyceae*). *Curr. Chin. Sci.* 1(3): 346–372.
- Gómez F., Boicenko L. 2004. An annotated checklist of dinoflagellates in the Black Sea. *Hidrobiologia*. 517: 43–59.
- Guiry M.D., Guiry G.M. 2025. *AlgaeBase*. World-wide electron. publ. Univ. Galway, Ireland.
- Guslyakov N.E., Terenko G.V. 1999. Seasonal dynamics of phytoplankton in the littoral zone of Odessa, a bay of the Black Sea (Ukraine). *Algologia*. 9(4): 10–23. [Гусляков Н.Е., Теренко Г.В. 1999. Сезонная динамика фитопланктона литоральной зоны Одесского залива Черного моря (Украина). *Альгология*. 9(4): 10–23.]
- Escalera L., Italiano A., Pistocchi R., Montesor M., Zingone A. 2018. *Gonyaulax hyalina* and *Gonyaulax fragilis* (*Dinoflagellata*), two names associated with 'mare sporco', indicate the

- same species. *Phycologia*. 57(4): 453–464.
- Henckel A.G. 1909. Materials to the phytoplankton of the Caspian Sea. *Scripta Bot. Horti Univ. Imper. Petropol.* 27: 1–246.
- Hensen V. 1911. *Das Leben im Ozean nach Zählungen seiner Bewohner*. Übersicht und Resultate der quantitativen Untersuchungen. Kiel, Leipzig: Lipsius & Tischer. 406 p.
- Holt C.S., Hehenberger E., Tikhonenkov D.V., Tikhonenkov D.V., Jacko-Reynolds V., Okamoto N., Cooney E., Irwin N., Keeling P. 2023. Multiple parallel origins of parasitic marine *Alveolates*. *Nat. Commun.* 14(7049): 1–14.
- Ivanov A.I. 1965. Characteristics of the qualitative composition of Black Sea phytoplankton. In: *The study of plankton of the Black and Azov seas*. Kiev: Nauk. Dumka. Pp. 17–35. [Иванов А.И. 1965. Характеристики качественного состава фитопланктона Черного моря. В кн.: *Исследования планктона Черного и Азовского морей*. Киев: Наук. думка. С. 17–35.]
- Ivanov A.I., 1982. Phytoplankton of the estuarine regions of the rivers of the North-Western Black Sea region. Kyiv: Nauk. Dumka. 212 p. [Иванов А.И. Фитопланктон устьевых областей рек Северо-западного причерноморья. Киев: Наук. думка. 212 с.]
- Kofoed C.A., Skogsberg T. 1928. The *Dinoflagellata*: the *Dinophysoidae* [No.] XXXV. *Reports on the scientific results of the expedition to the Eastern Tropical Pacific, in charge of Alexander Agassiz*. Memoirs Museum Comparative Zoöl., Harvard College, Cambridge, Mass. 51: 1–766.
- Karsten G. 1905. Das Phytoplankton des Antarktischen Meeres nach dem Material der deutschen Tiefsee-Expedition 1898–1899. *Wissenschaftliche Ergebnisse der Deutschen Tiefsee-Expedition auf dem Dampfer "Valdivia" 1898–1899*. II 2(2): 1–136.
- Krakhmalny A.F. 1993. New nomenclature and taxonomical combinations of *Dinophyta*. *Algologia* 3(4): 88–93. [Новые номенклатурно-таксономические комбинации. *Dinophyta*. *Algologia* 3(4): 88–93.]
- Krakhmalny A.F. 2011a. *Dinophyta of Ukraine: illustrated book for identification*. Ed. P.M. Tsarenko. Kyiv: Alterpres. 444 p. [Крахмальний А.Ф. 2011. *Динофитовые водоросли Украины: иллюстрированный определитель*. Отв. ред. П.М. Царенко. Киев: Альтерпрес. 444 с.]
- Krakhmalny A.F. 2011b. New nomenclature and taxonomical combinations of *Dinophyta*. *Algologia* 21(2): 270–273. [Новые номенклатурно-таксономические комбинации. *Dinophyta*. *Algologia*. 21(2): 270–273.]
- Krakhmalny O.F., Panina Z.A. 2000. *Dinophyta*. Diversity of algae of Ukraine. Eds Wasser S.P., Tsarenko P.M. *Algologia*. 10(4): 68–83. [Крахмальний А.Ф., Панина З.А. 2000. *Dinophyta*. Разнообразие водорослей Украины. Под ред. С.П. Вассера, П.М. Царенко. *Альгология*. 10(4): 68–83.]
- Krakhmalny O.F., Panina Z.O., Krakhmalny M.O. 2006. *Dinophyta*. In: *Algae of Ukraine: Diversity, Nomenclature, Taxonomy, Ecology and Geography*. Eds P.M. Tsarenko, S.P. Wasser, E. Nevo. Pp. 470–531.

- Krakhmalny A., Bryantseva Yu., Velikova V. 2012. Black Sea *Dinoflagellata* (History of the research and current biodiversity). *Turkish J. Fisher. Aquat. Sci.* 12: 539–546.
- Krakhmalny A.F., Okolodkov Y.B., Bryantseva Yu.V. 2018. Revision of the dinoflagellate species composition of the Black. *Альгология.* 28(4): 428–448.
<https://doi.org/10.15407/alg28.04.428>
- Krakhmalny M., Krakhmalny A., Terenko G. 2023a. *Protodinium euxinum* (Protoperidiniaceae, Dinophyceae) a novel Dinoflagellate species from the plankton of the Black Sea. *Phytotaxa.* 598(3): 229–236.
- Krakhmalny A.F., Krakhmalny M.A., Terenko G.V., Goncharenko I.V. 2023b. Dominant species of the genus *Protoperidinium* Berg (*Peridinales: Protoperidiniaceae*) in the Black Sea. *Zootaxa.* 5339(5): 427–448.
- Lemmermann E. 1899. Ergebnisse einer Reise nach dem Pacific (H. Schauinsland 1896/97). *Abhandlungen herausgegeben vom Naturwissenschaftlichen zu Bremen.* 16: 313–398.
- Levander K.M. 1900. Zur Kenntnis des Leban in den Stehenden Kleingewässern auf den Skäreninseln. *Acta Soc. Fauna Flora Fenn.* 18(6): 1–107.
- Minicheva G.G., Tuchkovenko Yu.S., Bolshakov V.N., Zotov A.B., Rusnak E.M. 2013. Response of algal communities of the northwestern Black Sea to local, regional and global factors. *Algologia.* 23(1): 19–36. [Миничева Г.Г., Тучковенко Ю.С., Большаков В.Н., Зотов А.Б., Руснак Е.М. 2013. Реакция альгосообществ северо-западной части Черного моря на локальные, региональные и глобальные факторы. *Альгология.* 23(1): 19–36.]
<https://doi.org/10.15407/alg23.01.019>
- Minicheva G.G., Bondarenko O.S., Bogatova Yu.I., Bolshakov V.M., Bushuev S.G., Garkusha O.P., Dyatlov S.E., Kalashnik K.S., Koshelev O.V., Kudrenko S.A., Kulakova I.I., Marinets G.V., Migas R.V. et al. 2023. The response of the marine ecosystem to the ruins of the Kakhovsky water reservoir. *Mor. Ecol. J.* 1–2: 52–68. [Миничева Г.Г., Бондаренко О.С., Богатова Ю.И., Большаков В.М., Бушуев С.Г., Гаркуша О.П., Дятлов С.Е., Калашник К.С., Кошелев О.В., Кудренко С.А., Кулакова И.И., Маринець Г.В., Мігас Р.В. та ін. 2023. Реакція морської екосистеми на наслідки руйнування греблі Каховського водосховища. *Мор. екол. журн.* 1–2: 52–68.]
- Morozova-Vodyanitskaya N.V. 1948. Phytoplankton of the Black Sea: Pt 1. *Trudy Sevast. Biol. St.* 6: 39–72. [Морозова-Водяницкая Н.В. 1948. Фитопланктон Черного моря: Ч. 1. *Тр. Севаст. биол. ст.* 6: 39–72.]
- Morozova-Vodyanitskaya N.V. 1950. Abundance and biomass of phytoplankton in the Black Sea. *Rep. USSR Acad. Sci.* 73(4): 821–824. [Морозова-Водяницкая Н.В. 1950. Численность и биомасса фитопланктона в Черном море. *Докл. АН СССР.* 73(4): 821–824.]
- Murray G., Whitting F. 1899. New *Peridiniaceae* from the Atlantic. *Trans. Linn. Soc. London. Bot. Ser.* 5: 321–342.
- Nesterova D.A., Terenko L.M., Terenko G.V. 2006. Phytoplankton species list. In: *Northern-West part of the Black Sea: biology and ecology.* Kyiv: Nauk. Dumka. Pp. 557–576. [Нестерова Д.А., Теренко Л.М., Теренко Г.В. 2006. Список видов фитопланктона. В кн.: *Северо-западная часть Черного моря: Биология и экология.* Киев: Nauk. dumka. 557–576.]

- Pitsyk G.K. 1979. Systematic composition of phytoplankton. In: *Fundamentals of biological productivity of the Black Sea*. Kyiv: Nauk. Dumka. Pp. 63–69. [Пицък Г.К. 1979. Систематический состав фитопланктона. В кн.: *Основы биологической продуктивности Черного моря*. Киев: Наук. думка. С. 63–69.]
- Prodromus of Spore Plants of Ukraine: algae*. Book 1. 2024. Ed. P.M. Tsarenko. Kyiv: Nauk. Dumka. 880 p. [Продромус спорових рослин України: водорості. Кн. 1. 2024. За ред. П.М. Царенка. Київ: Наук. думка. 880 с.]
- Reinhard L.V. 1909. The Black Sea phytoplankton from the Kertch Bay, the Bosphorus and Marmara Sea. *Trudy Obsh-va Ispyt. Prirody Khar'k. Univ.* 13: 3–31. [Рейнгард Л.В. 1909. Фитопланктон Черного моря, Керченского пролива, Босфора и Мраморного моря. *Тр. общ-ва испыт. природы при Харьк. ун-те*. 13: 3–31.]
- Sahin N.F. 2024. Structure and Dynamics of Phytoplankton Populations in the Black Sea from 2014 to 2017. *Mediterr. Mar. Sci.* 25(3): 682–697. <https://doi.org/10.12681/mms.37603>
- Schiller J. 1935. *Dinoflagellatae (Peridineae)*. In: *Dr. L. Rabenhorsst's Kryptogamen-Flora von Deutschland, Österreich und der Schweiz*. Leipzig: Akad. Verlag. Pp. 1–320.
- Senichkina L.G., Senicheva M.I., Kostenko N.S. 2004. *Annotated lists of marine flora and fauna (Dinophyte algae)*. Simferopol. Pp. 235–243. [Сеничкина Л.Г., Сеничева М.И., Костенко Н.С. 2004. *Аннотированные списки морской флоры и фауны (Динофитовые водоросли)*. Симферополь. С. 235–243.]
- Senichkina L.G., Altukhov D.A., Kuzmenko L.V., Georgieva L.V., Kovaleva T.M., Senicheva M.I. 2001. Species diversity of Black Sea phytoplankton in the southeastern coast of Crimea. In: *Karadag: history, biology, archaeology*. Simferopol: Sonat. Pp. 119–125. [Сеничкина Л.Г., Алтухов Д.А., Кузьменко Л.В., Георгиева Д.В., Ковалева Т.М., Сеничева М.И. 2001. Видовое разнообразие фитопланктона Черного моря у юго-восточного побережья Крыма. В кн.: *Карадаг: история биология, археология*. Симферополь: Сонат. С. 119–125.]
- Sournia A. 1973. Catalogue des espèces et taxons infraspécifiques de Dinoflagellés marins actuels. I. Dinoflagelles libres. *Beih. Nova Hedw.* 48: 1–92.
- Takano Y., Horiguchi T. 2004. Surface ultrastructure and molecular phylogenetics of four unarmoured heterotrophic dinoflagellates, including the type species of the genus *Gyrodinium (Dinophyceae)*. *Phycol. Res.* 52(2): 107–116.
- Terenko L.M. 2005. *Dinoflagellates of the northwestern Black Sea Coastal Zone: biodiversity and ecology*. PhD (Biol.) Thesis. Appendix A. Sevastopol. Pp. 191–197. [Теренько Л.М. 2005. *Динофлагелляты прибрежной зоны Черного моря: разнообразие и экология*. Дис. д-ра биол. наук. Приложение А. Севастополь. С. 191–197.]
- Terenko L.M. 2007. Species composition and distribution of dinophyte algae (*Dinophyta*). *Algologia*. 17(1): 53–69. [Теренько Л.М. 2007. Видовой состав и распространение динофитовых водорослей (*Dinophyta*). *Альгология*. 17(1): 53–69.]
- Terenko G.V., Krachmalny A.F. 2019. First record of *Peridinium quadridentatum* (F.Stein) Hansen (*Dinoflagellata*) in the Odesa Bay (Black Sea, Ukraine). In: *Achievements in studies*

of marginal effect in water ecosystems and their practical significance. Mat. Int. Sci. Conf. (Odesa, 13–14 June, 2019). P. 57.

Tillmann U., Dzhembekova N., Vlas O., Krock B., Boicenco L., Dursun F. 2025. Diversity of *Amphidomataceae* (*Dinophyceae*) in the Black Sea, including description of *Amphidoma pontica* sp. nov. *Phycol. Res.* <https://doi.org/10.1111/pre.70001>

UNCLOS. *United Nations Convention on the Law of the Sea*. 1982.

https://www.un.org/depts/los/convention_agreements/text/unclos/unclos_e.pdf

Ustimenko B., Ustimenko T. 2020. Maritime cordons as a key element of the Ukrainian government: basic terms and meaning. [Устименко Б., Устименко Т. 2020. Морські кордони як ключовий елемент українського державотворення: основні терміни та визначення.] <https://www.blackseanews.net/images/2020/01/22/323d3beb-4160-45db-88fb-e6e287241a31.jpg>

Yasakova O.N., Makarevich P.R., Okolodkov Y.B. 2020. Long-term changes in community of planktonic algae of the Northeastern Black Sea (2005–2011). In: *International applied research conference «Biological Resources Development and Environmental Management»*. Pp. 569–580. <https://doi.org/10.18502/ks.v5i1.6129>

Zacharias O. 1901. Zwei neue Dinoflagellaten des Süßwassers. *Zool. Anz.* 24(644): 307–308.

Bryantseva Yu.V. ¹ (<https://orcid.org/0000-0002-1790-5944>)

Guiry M.D. ² (<https://orcid.org/0000-0003-1266-857>)

¹ M.G. Kholodny Institute of Botany, Academy of Sciences of Ukraine,
2 Tereshchenkivska Str., Kyiv 01601, Ukraine

² AlgaeBase, Ryan Institute, University of Galway,
Galway H91 TK33, Ireland

Revision of the Black Sea dinoflagellate checklist

As a result of the critical and systematic revision of the Black Sea superclass Dinoflagellata, the checklist was updated. It currently includes 386 species (396 ist), which belong to 5 classes, 17 orders, 51 families and 95 genera. Among them, 39 species are cosmopolitan, 17 are widespread in the world, 8 are euryhaline, 30 are toxic and 35 are bioluminescent. After 2018, 28 new species were found, unique to each water area: 14 for Bulgarian waters, 6 for Ukrainian, 5 for Turkish and 1 each for Russian, Georgian and Romanian. Compared with the previous checklist of 2018, the taxonomic structure of Dinoflagellates has changed significantly due to a more stringent selection criterion for the analyzed sources, as well as the emergence of new taxonomic combinations. New to the Black Sea flora are the genera: *Acanthogonyaulax* (Kof.) H.W.Graham, *Eleftheros* Tikhonenkov, Hehenberger & Keeling, *Pelagodinium* Siano, Montresor, Probert & Vargas, *Pfiesteria* Steidinger & J.M. Burkholder and *Pseudadenoides* F.Gómez, R.Onuma, Artigas &

T.Horig. Among them are new to science species *Eleftheros karadeniz* Tikhonenkov, Hehenberger & Keeling and *Amphidoma pontica* Tillmann & Dzhembekova. The greatest species richness of dinoflagellates, as before, is noted in the Ukrainian sector of the sea (75% of the total number in the sea), which is due to the great diversity of environmental conditions, as well as the high level of study of the water area, the second place is occupied by Turkish waters (51.5%). Georgian and Romanian waters, with minimal areas (6–6.5%) occupy the last places (20.5 and 25.6%, respectively), the share of dinoflagellates in the Bulgarian water area is 35%, and in the Russian — 40.4%. Climate change and the "mediterraneanization" of the Black Sea accelerate the process of introduction of species into this region, in parallel, the intensification of research, with a wider application of modern methods, contributes to the clarification of the data. Over the past 18 years, the number of species common to all water areas has doubled (from 19 to 39), and the number of "blooming" pathogens has increased from 13 to 23. The taxonomic status of 10 species requires additional research. 68 species require verification and additional research. To correct errors that occur in many generalizations, to preserve and accumulate information on species, it is necessary to update the electronic database of Black Sea algae, similar to the site "Prodromus dinoflagellates of Ukraine", created on the basis of the engine mediowiki at the M.G. Kholodny Institute of Botany of the National Academy of Sciences of Ukraine. When entering information, the principle of primary sources should be used (enter only original data).

Key word: dinoflagellates, Black Sea, taxonomic structure, species richness, Black Sea states, website

ЧАНДРА ХАС *
РУШІ ПАТЕЛ
ХІТЕШ ПАДХІЯР

Кафедра хімічної інженерії, Університет GSFC,
Вадодара 391750, Гуджарат, Індія

* Адреса для листування: chandra.has@gsfcuniversity.ac.in

ПОРІВНЯЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ОЧИЩЕННЯ ПРОМИСЛОВИХ СТІЧНИХ ВОД МІКРОВОДОРОСТЯМИ *CHLORELLA VULGARIS* ТА *SCENEDESMUS QUADRICAUDA*

Реферат. Ефективне відновлення стічних вод є важливим для сталого управління водними ресурсами та може допомогти зменшити регіональний або сезонний дефіцит води. Безпосереднє скидання неочищених стічних вод у водойми призводить до значної деградації навколишнього середовища та ризиків для здоров'я, порушуючи водні екосистеми. Впровадження ефективних методів видалення поживних речовин та забруднювачів є важливим для пом'якшення цих негативних наслідків. Таким чином, наші дослідження сприяють захисту навколишнього середовища та збереженню здоров'я населення. Біологічна обробка, зокрема шляхом культивування водних рослин, має переваги порівняно з традиційними методами видалення поживних речовин та зменшення забруднення. Проведено оцінювання ефективності використання *Chlorella vulgaris* Beijer. та *Scenedesmus quadricauda* (Turpin) Gréb. в очищенні промислових стічних вод. З застосуванням вимірювання видалення нітратів, фосфатів, хімічного (ХСК) та біологічного (БПК) споживання кисню здійснено оцінку придатності культивування водоростей як альтернативи традиційним методам очищення рідких стоків.

Ключові слова: стічні води, біологічне очищення, культивування мікроводоростей, видалення поживних речовин, екологічна стійкість

Надійшла до редакції 01.12.2024. Після доопрацювання 25.05.2025. Підписана до друку 20.08.2025.

Опублікована 20.09.2025

Ц и т у в а н н я . Чандра Хас, Руші Пател, Хітеш Падхіяр. 2025. Порівняльне дослідження очищення промислових стічних вод мікроводоростями *Chlorella vulgaris* та *Scenedesmus quadricauda*. *Альгологія*. 35(3): 236–252. <https://doi.org/10.15407/alg35.03.236>

This is open access article under the CC BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Вступ

Промислова діяльність може призвести до викиду шкідливих речовин у навколишнє середовище, що призводить до забруднення (Mojiri, Bashir, 2022). У багатьох країнах, що розвиваються, очищення стічних вод часто досягає лише вторинних рівнів. Навіть після вторинного очищення у стічних водах залишається значна кількість фосфору та азоту, що спричиняє евтрофікацію, підвищення каламутності та утворення токсичних озер (Chen et al., 2020; Wang et al., 2022). За наявності неочищених стічних вод у сусідніх водоймах рівень рН може змінюватися, а концентрація розчиненого кисню знижуватися, що може призвести до загибелі водних організмів. Крім того, висока концентрація нітратів може перешкоджати процесам дезінфекції води. Тому перед скиданням або повторним використанням стічних вод вкрай важливо видалити поживні речовини та токсичні речовини до прийняттого рівня, перш ніж стічні води будуть скинуті або використані повторно (Hena et al., 2021).

Важкі метали, навіть у дуже низьких концентраціях, є одними з найпоширеніших та найнебезпечніших забруднювачів, що становлять серйозну загрозу для здоров'я людей і сприяють погіршенню стану навколишнього середовища. Належне очищення та управління стічними водами є важливими для пом'якшення цих негативних наслідків та забезпечення сталого управління водними ресурсами (Abunada et al., 2020; Chin et al., 2022). Очищення стічних вод має вирішальне значення, що робить вибір оптимальних методів очищення необхідним для відповідності існуючим стандартам. Традиційні методи, що охоплюють різноманітні фізичні та хімічні процеси, були ретельно вивчені та застосовані на практиці (El-Aswar et al., 2022). Високоєфективними визнано хімічні обробки, такі як хлорування, коагуляція/флокуляція, ультрафіолетове випромінювання та озонування (Samer, 2015; Yusuf et al., 2020). Тим не менш, ці технології часто пов'язані з високими витратами, стикаються з проблемами зневоднення та вимагають певного обслуговування (Daud et al., 2022). З іншого боку, біологічні обробки використовують метаболічну активність мікроорганізмів для розкладання та перетворення забруднювачів стічних вод на біомасу та газу, такі як CO₂, CH₄, N₂ та SO₂. Такий біологічний підхід значно знижує рівні БПК та ХСК у стічних водах, тим самим покращуючи їхню якість (Dalvi et al., 2021).

Мікробродорості довели свою ефективність у видаленні азотних, фосфорних та вуглецевих забруднювачів зі стічних вод. Крім того, водорості можна інтегрувати в передові процеси та процеси подальшої очистки для покращення якості води після біологічного очищення (Quijano

et al., 2017). Оскільки мікродоростям для росту потрібні фосфор і азот, вони можуть ефективно очищати стічні води, одночасно виробляючи цінну біомасу водоростей. Цю біомасу можна перетворити на високоцінні продукти, що дає додаткову перевагу (Alazaiza et al., 2023). Крім того, зростаюча маса мікродоростей може служити джерелом енергії, а також сприяти видаленню фосфатів та азоту. Багато видів мікродоростей, включаючи представників родів *Scenedesmus*, *Chlorella*, *Botryococcus*, *Phormidium*, *Limnospira* та *Chlamydomonas* продемонстрували ефективність у біоремедіації поживних речовин, нових забруднювачів та патогенів зі стічних вод (Hashmi et al., 2023). Багато з цих видів процвітають у різних середовищах стічних вод, включаючи муніципальні, промислові та агропромислові стічні води, що привертає до них увагу.

Мікродорості ефективно видаляють фосфор та азот, зменшуючи ризики евтрофікації, одночасно перетворюючи неорганічні та органічні забруднювачі на цінну біомасу (Mastropetros et al., 2022). Біомаса, зібрана зі ставків для очищення стічних вод, може бути використана як їжа та корм, і останніми роками спостерігається значний інтерес до ліпідів мікродоростей, що використовуються як наночастинки, такі як тверді ліпідні везикули (Has and Pan, 2021; Bhatt et al., 2022) для застосування в різних галузях, включаючи харчову, хімічну, фармацевтичну та косметичну промисловість.

Недавні дослідження показали, що різні види водоростей ефективно видаляють забруднювачі стічних вод, такі як ХСК, БПК, азот та фосфор (An et al., 2003; Kim et al., 2010). Основний механізм включає поглинання поживних речовин клітинами водоростей та видалення аміаку через підвищений рН (Aslan, Kapdan, 2006). Наприклад, Tarlan et al. (2022) виявили, що *Chlorella* sp. може видаляти 84% твердих часточок, 58% ХСК та 80% абсорбованих органічних ксенобіотиків з промислових стічних вод. Крім того, було показано, що консорціум *Chlorella* sp. та *Scenedesmus* sp. досяг 78–98% видалення поживних речовин з побутових стічних вод (Silambarasan et al., 2021). Необхідні подальші дослідження для оптимізації культивування водоростей та виробництва біомаси для очищення промислових стічних вод при різних концентраціях та для визначення найкращого часу збору.

Метою даної роботи було оцінити ефективність культур штамів двох видів мікродоростей (*Chlorella vulgaris* та *Scenedesmus quadricauda*) у видаленні неорганічних поживних речовин із промислових стічних вод, пов'язаних з виробництвом барвників/пігментів. Ця ініціатива зумовлена необхідністю розробки стійких методів очищення стічних вод, які можуть пом'якшити вплив промислових стоків на водні екосистеми. На відміну від

попередніх досліджень, в яких переважно вивчали ефективність цих мікроводоростей окремо, в даному дослідженні розглянуто їхню ефективність разом з використанням одного й того ж джерела промислових стічних вод. Результати показують, що хоча *C. vulgaris* перевершує *S. quadricauda* у видаленні деяких забруднювачів, той перевершує її стосовно інших. Використовуючи унікальні переваги кожної мікроводорості, цей порівняльний підхід проливає світло на можливість удосконалення методів очищення стічних вод та розвитку методів сталого управління стічними водами.

Матеріали та методи

У цьому розділі описано експериментальну основу та методологію, що використовуються для оцінки ефективності *C. vulgaris* та *S. quadricauda* для очищення промислових стічних вод. Він включає використані матеріали, підготовку та вирощування мікроводоростей, збір та очищення зразків стічних вод, а також аналітичні методи, що використовуються для оцінки ефективності цього процесу.

Культури водоростей

Матеріалом для дослідження були штами одноклітинних мікроводоростей *C. vulgaris* та *S. quadricauda*, відомі своєю здатністю до вловлювання вуглекислого газу та очищення стічних вод. Ці штами були отримані з Колекції культур водоростей (САС) кафедри ботаніки Мадраського університету, Ченнаї, Індія.

Культивування та нарощування біомаси

Обидва штами спочатку культивували шляхом перенесення їх у пробірки, що містили поживне середовище Болда (BBM; Bischoff, Bold, 1963). Перед інокуляцією пробірки з BBM (придбаним у компанії HiMedia, Махараштра, Індія) для стерилізації автоклаували протягом 10 хв при 121 °С. Пробірки з інокулятом поміщали в добре освітлене місце за температури 28 ± 1 °С, доки культуральна рідина не стала зеленою, що свідчить про достатній ріст водоростей.

Для отримання біомаси 5 мл суспензії водоростей з пробірок переносили до фотобіореакторів періодичної дії (PBR). До пляшки Дюран місткістю 2 л вносили 1,5 л культурального середовища, до якого додавали добриво NPK у концентрації 0,1 мас./об.% (рис. 1). Добриво NPK, надане компанією GSFC Ltd (Гуджарат, Індія), було обрано для низьковитратного виробництва мікроводоростей. Водним розчинником слугувала дистильована вода, яку очищали за допомогою фільтрувального паперу

200 нм для видалення великих домішок. Установа містила трубку з полівінілхлориду (ПВХ), що полегшувала доступ повітря, закриту пластиковою кришкою. Потік повітря спрямовувався за допомогою акваріумного повітряного насоса (Hailea НАР 60, Індія). Для полегшення газообміну між культуральним середовищем та повітрям, запобігання осіданню водоростей, гарантування рівномірного впливу світла та поживних речовин на всі клітини популяції, а також сприяння перемішуванню, трубку подачі повітря було спрямовано під кутом до дна контейнера для вирощування та стратегічно занурено в нього.

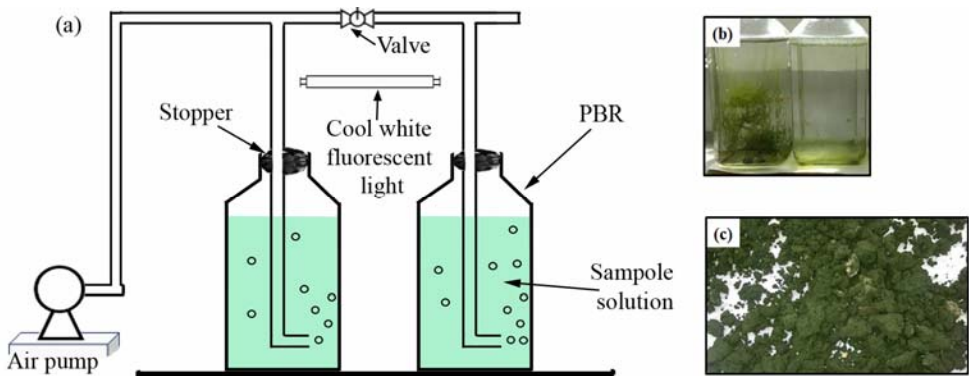


Рис. 1. Культивування мікродоростей: *a* — схема пакетних систем PBR, що містить рідке поживне середовище, доповнене добривом NPK. Дві системи PBR призначені для *Clorella vulgaris* та *Scenedesmus quadricauda*; *b* — показано ріст *C. vulgaris* у лівому контейнері, тоді як контейнер з правого боку без добрив; *c* — біомаса водоростей у твердій формі

Для освітлення культури використовували дві холодні білі люмінесцентні лампи, що забезпечували середню інтенсивність світла 1 klx. Мікродорості вирощували при безперервному освітленні з системою барботування повітрям, що забезпечувала приблизно 1 л/год за кімнатної температури. Ріст водоростей контролювали щодня. Початкова кількість клітин становила $7,8 \times 10^4$ кл/мл для *C. vulgaris* та $3,5 \times 10^4$ кл/мл для *S. quadricauda*. Протягом 10 днів прогрес росту відстежували за допомогою вимірювань оптичної щільності за допомогою спектрофотометра, встановленого на довжину хвилі 750 нм (Chioccioli et al., 2014).

Стічні води

Зразки стічних вод та їхня характеристика

Зразки стічних вод були надані компанією Navin Chemicals, відомим виробником та експертом нефасованих проміжних продуктів (Гуджарат, Індія). Зразки зберігалися в пластикових пляшках при температурі 4 °С,

щоб мінімізувати біорозклад та хімічні реакції в навколишньому середовищі. Перед проведенням експериментів було проведено попередній аналіз для визначення основних параметрів стічних вод. рН зразків було перевірено за допомогою цифрового рН-метра (HANNA Instrument, модель HI98107). Концентрацію розчиненого кисню (РК) вимірювали за допомогою кисневого лічильника (Lutron, модель: PDO-519, Тайвань). Показники зібраних стічних вод представлені в таблиці.

Таблиця. Характеристика зібраних промислових стічних вод

Показник	Значення	Одиниця виміру
рН	7.27	–
Розчинний кисень (РК)	2.0	мг/мл
Хімічне споживання кисню (ХСК)	4670	мг/мл
Біологічне споживання кисню (БПК)	1490	мг/мл
Колір	106	ppm
Нітрати	18	мг/мл
Фосфати	27	мг/мл
Загальний вміст розчинених твердих речовин (РТР)	3800	мг/мл

Підготовка зразка стічних вод для експерименту

Для експериментів використовували боросилікатні флакони об'ємом 500 мл. Кожен флакон містив 450 мл зразка стічних вод, туди ж додавали 5 мл 10-денної суспензії мікроводоростей. Маточний розчин мікроводоростей та зібраний зразок стічних вод ретельно змішували та перемішували до однорідності. Експеримент проводили за контрольованих умов при температурі 28 ± 1 °С протягом 20 днів. Використовуючи стандартні аналітичні методи, зразки відбирали кожні 5 днів для аналізу різних фізико-хімічних параметрів, включаючи рН, розчинений кисень, фосфати, нітрати, БПК та ХСК.

Аналітичні методи

Вимірювання хімічного споживання кисню

Визначення ХСК проводили методом рефлюксу дихроматом з подальшим титруванням стандартним розчином сульфату заліза та амонію (ФАС). У цьому методі зразок об'ємом 50 мл готували в конічній колбі з 10 мл дихромату калію, невеликою кількістю сульфату срібла та сульфату ртуті, а також 30 мл концентрованої сірчаної кислоти. Після ретельного перемішування колбу підключали до холодильника та кип'ятили зі зворотним холодильником при температурі 60 °С протягом 2 год. Після

охолодження суміш розводили до 100 мл дистильованою водою та додавали 2–3 краплі індикатора фероїну. Потім зразок титрували ФАС до зміни кольору з синьо-зеленого на червонувато-синій, що вказувало на кінцеву точку.

Вимірювання біологічного споживання кисню

Для проведення тесту на БПК рН зразка нейтралізували за допомогою буферів та вимірювали початковий розчинений кисень (РК). Потім зразок (50 мл) інкубували в темряві при температурі 20 °С протягом 5 днів, щоб запобігти фотосинтезу. Після інкубації проводили остаточне вимірювання РК. Розраховували БПК шляхом віднімання кінцевого РК від початкового РК, що вказує на NO_3^- — поширену у воді форму азоту, яка легко розчиняється та легко поглинається водоростями та іншими фотосинтезуючими організмами. Фосфат (PO_4^{3-}) — основна форма вимірюваного фосфору, який зв'язується з частинками осаду та розчиняється у воді. Надлишок обох поживних речовин може призвести до «цвітіння» водоростей, порушуючи світловий, температурний та кисневий обмін у воді, а також спричиняючи евтрофікацію та гіпоксію, що створює «мертві зони», де біологічна активність припиняється.

У цьому дослідженні було відібрано 50 мл розчину очищених водоростями стічних вод, а потім проаналізовано на вміст нітратів та фосфатів. Для визначення залишкових нітратів та фосфатів мікрководорості відокремлювали центрифугуванням при 5000 об/хв протягом 15 хв, а отриманий супернатант фільтрували через мембрану 0,45 мкм діаметром 1 дюйм (Shabani, 2016). Концентрації нітратів та фосфатів вимірювали за допомогою спектрофотометра (Shimadzu, Японія) з довжиною хвиль 690 нм для фосфатів та 220–225 нм для нітратів, згідно зі стандартними методами (АРНА, 2017).

Результати

Вплив росту водоростей на рН стічних вод

Рівень рН зразків контролювали через регулярні проміжки часу. На рис. 2 показано зміну рН для обох варіантів із додаванням культури водоростей. Початковий рН стічних вод становив $7,27 \pm 0,58$, після додавання до суміші *C. vulgaris* та *S. quadricauda* він піднявся вище контрольного рівня. Протягом 5-денного періоду спостереження рН клітин *C. vulgaris* підвищився на 6,2%, тоді як *S. quadricauda* до 7,8%. Зазвичай рН стічних вод коливався від 7 до 9, з оптимальним діапазоном 8,2–8,7 (Huang et al., 2017).

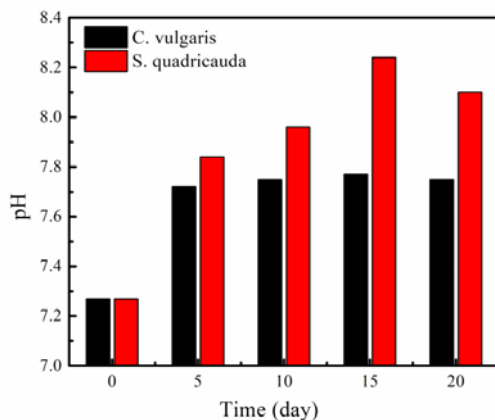


Рис. 2. Рівень рН стічних вод в експерименті зі штамми *Chlorella vulgaris* та *Scenedesmus quadricauda*

Вплив росту водоростей на розчинений кисень (РК) стічних вод

РК — це кисень, присутній у воді, необхідний для життя гідробіонтів та для очищення стічних вод. У цій роботі початкова концентрація РК у стічних водах перед обробкою водоростями становила 2 мг/л. Після додавання культур *C. vulgaris* та *S. quadricauda* рівні РК постійно зростали протягом 20 днів (рис. 3). До 5-го дня експерименту *C. vulgaris* підвищила РК на 2,32 мг/л, а *S. quadricauda* — на 2,28 мг/л. До 20-го дня *C. vulgaris* довів показник РК до 4,36 мг/л, тоді як у розчині із *S. quadricauda* він становив 4,28 мг/л, що показує окиснювальний ефект цих водоростей через фотосинтез. Хлорела та сценедесмус сприяли сталому збільшенню РК, проте суттєвої різниці в їхньому впливі на досліджувані стічні води не було виявлено. Ріст концентрації РК сприяє аеробній мікробній активності, покращуючи розщеплення органічних забруднювачів та підвищуючи ефективність очищення стічних вод.

Вплив росту водоростей на показники біологічного (БПК) та хімічного (ХСК) споживання кисню

БПК — це міра того, скільки кисню потрібно мікроорганізмам для окислення органічних сполук. Низький БПК вказує на високу доступність кисню та прийнятну якість води, тоді як високий БПК свідчить про серйозне органічне забруднення. Процес біологічного окислення відбувається повільно, оскільки мікроорганізми перетворюють органічні забруднювачі на вуглекислий газ та воду, використовуючи розчинений кисень. Рівні БПК можуть відрізнятися залежно від регіону. У цьому дослідженні за 20 днів БПК знизився до 95% для розчину з додаванням *C. vulgaris* та до 90% для суміші із *S. quadricauda*, що свідчить про покращення якості води (рис. 4, а).

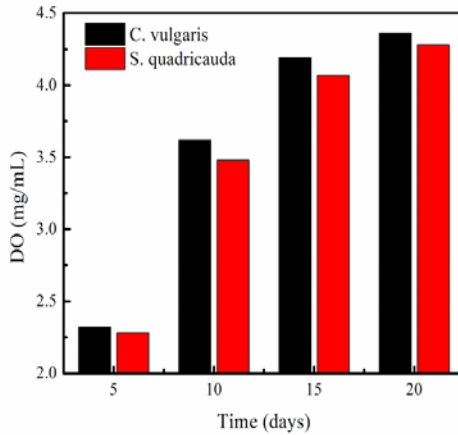


Рис. 3. Збільшення рівня розчиненого кисню у стічних водах протягом 20-денного періоду після обробки *Chlorella vulgaris* та *Scenedesmus quadricauda*

Хімічне споживання кисню показує якість води та рідких стоків, кількісно визначаючи загальну кількість кисню, необхідну для хімічного окислення як органічних, так і неорганічних сполук, присутніх у зразку. Він показує, наскільки добре вода може поглинати кисень, коли органічна речовина розкладається, а неорганічні речовини, такі як нітрати та аміак, окислюються. Високий ХСК свідчить про значну присутність органічних відходів. У цьому дослідженні рівні ХСК обробленого зразка знизилися приблизно на 80% для *C. vulgaris* та приблизно на 90% для *S. quadricauda* за 20 днів (рис. 4, b).

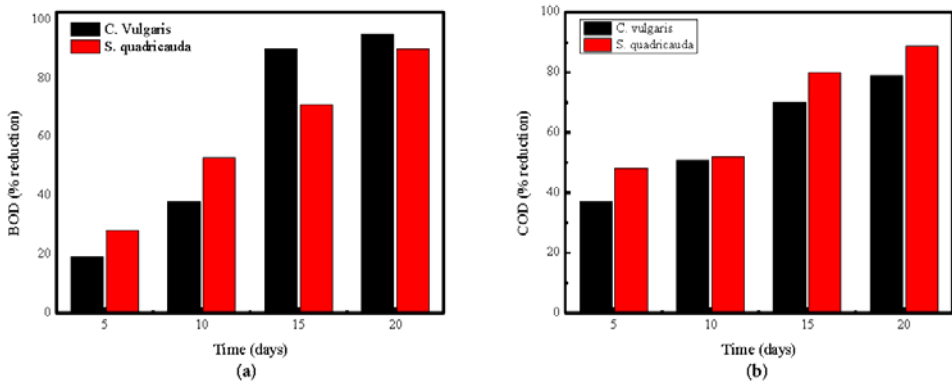


Рис. 4. Відсоткове зменшення значень БПК та ХСК протягом 20 днів для розчинів стічних вод з додаванням культур *Chlorella* та *Scenedesmus*. Обидві мікроводорості сприяють поступовому зниженню рівнів БПК (a) та ХСК (b) відповідно, причому *Chlorella* досягає вищої ефективності видалення БПК на 20-й день, а *Scenedesmus* загалом досягає вищої ефективності видалення ХСК

Аналіз нітратів та фосфатів

Видалення поживних речовин мікрободоростями безпосередньо пов'язане зі щільністю клітин у розчині та метаболічною активністю. У цьому дослідженні вивчали здатність мікрободоростей рости та видаляти нітрати при різних концентраціях NO_3^- та PO_4^{3-} протягом 20-денного періоду, при цьому вимірювання проводили з інтервалами 5, 10, 15 та 20 днів. Протягом 20 днів як *Chlorella*, так і *Scenedesmus* продемонстрували значне видалення нітратів та фосфатів зі стічних вод, причому *Scenedesmus* показав вищу ефективність видалення нітратів (рис. 5, a), а *Chlorella* досягла успіху стосовно фосфатів (рис. 5, b). До 20-го дня *Scenedesmus* видалив 90% нітратів порівняно з 80% *Chlorella*. Натомість *Chlorella* сприяла видаленню фосфатів на 88%, перевершуючи *Scenedesmus*, який видалив 80%. Ця тенденція підкреслює унікальну здатність кожної водорості поглинати поживні речовини, причому *Scenedesmus* ефективніше видаляє нітрати, а *Chlorella* — фосфати.

Обговорення

Усі фізико-хімічні параметри були кількісно визначені на 5-й, 10-й, 15-й та 20-й дні відповідно. Початковий рН стічних вод становив 7,27. Після обробки *C. vulgaris* та *S. quadricauda* рН збільшився порівняно з контролем. Підвищення рН часто відбувається через споживання CO_2 біомасою водоростей.

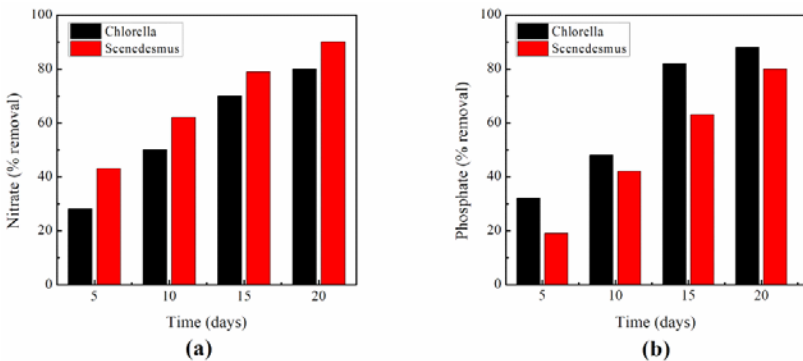


Рис. 5. Процентне зменшення вмісту нітратів (a) та фосфатів (b) у суміші стічних вод з мікрободоростями *Chlorella* та *Scenedesmus* протягом 20 днів

У дослідженні Zamani et al. (2010) різні види мікрободоростей були протестовані на видалення нітратів, азоту та ортофосфатів зі стічних вод протягом 12-денного періоду. Результати показали поступове підвищення рН, що пояснюється поглинанням CO_2 під час фотосинтезу. Недостатня кількість CO_2 може призвести до високих значень рН, часто досягаючи 10

або навіть вище (Oswald, 1988), особливо коли бікарбонат використовується як джерело вуглецю. Це підвищення рН може призвести до осадження фосфатів, зменшуючи розчинений фосфат у середовищі. З іншого боку, надмірне надходження CO₂ може знизити рН до кислого рівня, що призводить до лізису клітин водоростей (Oguganti et al., 2022). Поглинання азоту також впливає на рН: поглинання нітратів підвищує рН, тоді як використання аміаку знижує його до 3, що сприяє росту (Caswell, Zilberman, 2002). Однак надмірний рН може знизити ефективність видалення поживних речовин, обмежуючи ріст водоростей. Тому контроль рН в оптимальному діапазоні є важливим для сприяння здоровому росту водоростей. Турбулентність можна використовувати для збільшення газообміну між водою та повітрям, що допомагає підтримувати рівень рН у воді, тим самим запобігаючи екстремальним значенням рН. По мірі росту водоростей вони засвоюють поживні речовини, що є основним засобом їхнього видалення із середовища. Цьому сприяють також інші явища, зумовлені високим рН, спричиненим водоростями, наприклад, випаровування аміаку та осадження фосфору.

Рівні БПК та ХСК очищених стічних вод були значно нижчими. БПК — показник, що вказує на кількість кисню, необхідну для біологічного окислення органічних речовин мікроорганізмами. До 20-го дня експерименту рівень БПК у досліджуваних стічних водах знизився на 70,91% при обробці культурою *C. vulgaris* та на 89,21% — у варіанті з *S. quadricauda*. До 20-го дня дослідження ці дві водорості сприяли зниженню рівня ХСК на 80,64% та 70,97% відповідно. Завдяки швидкому темпу росту та високому рівню фотосинтетичної активності *C. vulgaris* продемонструвала кращу здатність видаляти ХСК зі стічних вод, що призвело до поступового зниження рівнів БПК та ХСК у стічних водах. Крім того, було встановлено, що *Scenedesmus* має хорошу ефективність видалення неорганічних поживних речовин з побутових стічних вод.

У тому ж експерименті оцінювали видалення нітратів за допомогою *C. vulgaris* та *S. quadricauda*. Видалення нітратів зі стічних вод до 15-го дня становило 78,08% та 70,32% при обробці *C. vulgaris* та *S. quadricauda* відповідно. Штам *C. vulgaris* перевершив штам *S. quadricauda* за здатністю до відновлення нітратів, ефективно видаляючи велику кількість азотистих хімічних речовин зі стічних вод. Щодо фосфатів, дослідження показало, що на 15-й день у варіанті з *C. vulgaris* зі стічних вод було видалено 62,73% фосфатів, а на 20-й день — 79,66%. Ці результати можна порівняти з результатами варіанту з *S. quadricauda*, коли на 15-й день було видалено 81,34% фосфатів, що свідчить про те, що представники *Scenedesmus* та *Chlorella* є найефективнішими мікродоростями для видалення фосфатів з

міських відходів. Як було показано вище, штам *S. quadricauda* продемонстрував ефективне очищення стічних вод від фосфатів, протягом 15 днів досягнувши помітно високих показників видалення. Під час експерименту культура *C. vulgaris*, зростаючи на середовищі зі стічними водами, використовувала фосфор для росту, що призвело до видалення з них 58,7% фосфатів. Найвища ефективність видалення, яка досягла 91,9%, спостерігалася на 20-й день експерименту. Високі відсотки видалення (80,0%) були також виявлені для *S. quadricauda* на 15-й день.

Попередні дослідження показали різну ефективність видалення сполук азоту та фосфору різними мікробдоростями. Sayadi et al. (2016) повідомили про видалення штамом *C. vulgaris* за 8 днів близько 80–90% нітратів/фосфатів з міських стічних вод. Rasolamini et al. (2011) повідомили про видалення 84% азоту *Chlorella* та 100% фосфору *Chlamydomonas* за 14 днів, що перевищує результати поточного дослідження. Штам *Scenedesmus* продемонстрував оптимальне видалення азоту та фосфору (100% та 98% відповідно) за умов інтенсивного перемішування при 25 °C. Dickinson et al. (2013) виявили співвідношення видалення азоту до фосфору від 5:1 до 12:1, при цьому швидкість видалення азоту та фосфору коливалася від 83 до 99%. Tang et al. (2011) підкреслили здатність спіруліни значно знижувати рівень нітратів у стічних водах. У цьому дослідженні *Spirulina platensis* сприяла максимальному видаленню нітратів та фосфатів на рівні 65,78% та 49,81% відповідно за 8 днів культивування, що підтверджує її потенціал як вторинного засобу очищення стічних вод.

Вміст розчинного азоту у стічних водах збільшився з 2 до 4,17 мг/л у варіанті з *C. vulgaris* та до 4,20 мг/л з *S. quadricauda*, оскільки водорості виділяли кисень під час фотосинтезу. У системах очищення на основі водоростей ці організми використовують сонячне світло та поживні речовини (такі, як нітрати та фосфати) для росту, вивільняючи кисень через фотосинтез (Seymour et al., 2017). Цей кисень підтримує аеробні бактерії, які розщеплюють органічні забруднювачі. Однак надмірна кількість водоростей через високий рівень поживних речовин може призвести до евтрофікації — надмірного росту, який знижує рівень розчиненого кисню вночі, оскільки його споживають водорості. Цей дисбаланс може зашкодити ефективності очищення та існуванню гідробіонтів. Таким чином, ключем до ефективного очищення є регуляція концентрації розчинного кисню та поживних речовин у стічних водах.

Ми порівняли результати очищення стічних вод за допомогою водоростей з результатами їхнього очищення традиційними методами (Devi, Dahiya, 2008). Як показано на рис. 6, очищення водоростями показало вищу ефективність, при цьому рівні БПК, ХСК, нітратів та

фосфатів знижувалися ефективніше, ніж за допомогою лише хімічного очищення. Це свідчить про те, що очищення на основі водоростей може бути ефективнішим підходом до видалення ключових забруднювачів порівняно з традиційними методами.

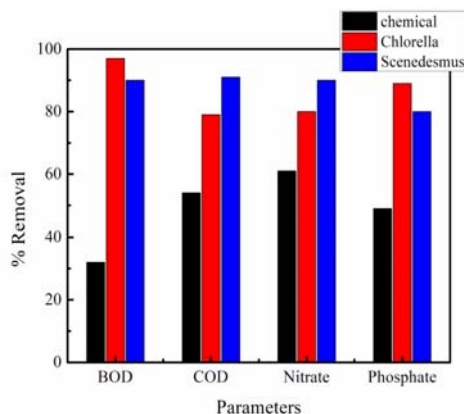


Рис. 6. Порівняння результатів очищення стічних вод за допомогою водоростей з результатами їхнього очищення традиційними методами

Заключення

Експеримент із вирощуванням штамів *C. vulgaris* та *S. quadricauda* на промислових стічних водах показав, що темпи їх росту у стічних водах збільшуються, водночас ефективно зменшуючи кількість різних забруднюючих речовин. *Chlorella vulgaris* була найбільш ефективною у видаленні нітратів та ХСК, тоді як *S. quadricauda* краще видаляє БПК та фосфати. Ці одноклітинні зелені водорості відомі своїм швидким ростом та ефективним видаленням поживних речовин, що робить їх придатними для очищення стічних вод. Очищення стічних вод за допомогою цих водоростей не тільки покращує якість води, але й сприяє переробці поживних речовин, особливо в дрібномасштабних застосуваннях у сільській місцевості. Видобуті поживні речовини можна повторно використовувати для виробництва корму для худоби, добрив та біодизелю, що ще більше сприяє сталому розвитку. Крім того, мікрowodорості, що культивуються на стічних водах, пропонують цінні ресурси для виробництва біодизелю та кормів для тварин, знижуючи виробничі витрати та викиди парникових газів. Це дослідження показує, що вивчення різних штамів водоростей може оптимізувати видалення забруднюючих речовин під час очищення стічних вод, що потенційно може призвести до більш ефективних та сталих рішень.

Подяки

Автори висловлюють щире подяку компанії Navin Chemicals за надання зразків стічних вод та доступ до необхідного обладнання. Щира подяка також висловлюється кафедрі ботаніки Мадраського університету за надання штамів водоростей, використаних у цьому дослідженні. Автори також висловлюють подяку Університету GSFC за їхню підтримку, забезпечену лабораторною інфраструктурою та різними дослідницькими ресурсами.

Дотримання етичних норм

Автори повідомляють про відсутність будь-якого конфлікту інтересів.

Список літератури

- Abunada Z., Alazaiza M.Y., Bashir M.J. 2020. An overview of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in the environment: Source, fate, risk, and regulations. *Water*. 12(12): 3590.
- Alazaiza M.Y., Albahasawi A., Al Maskari T., Abujazar M.S.S., Bashir M.J., Nassani D.E., Abu Amr S.S. 2023. Biofuel production using cultivated algae: technologies, economics, and its environmental impacts. *Energies*. 16(3): 1316.
- An J.Y., Sim S.J., Lee J.S., Kim B.W. 2003. Hydrocarbon production from secondarily treated piggyery wastewater by the green alga *Botryococcus braunii*. *J. Appl. Phycol.* 15: 185–191.
- APHA. 2017. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (23rd ed.). Washington, DC: Am. Publ. Health Ass.
- Aslan S., Kapdan I.K. 2006. Batch kinetics of nitrogen and phosphorus removal from synthetic wastewater by algae. *Ecol. Eng.* 28(1): 64–70.
- Bhatt P., Bhandari G., Turco R.F., Aminikhoei Z., Bhatt K., Simsek H. 2022. Algae in wastewater treatment, mechanism, and application of biomass for production of value-added product. *Environ. Pollut.* 309: 119688.
- Bischoff H.W., Bold H.C. 1963. Some soil algae from Enchanted Rock and related algal species. *Phycol. Stud.* IV. Univ. Texas Publ. No. 6318: 1–95.
- Caswell M., Zilberman D. 2002. *Algal – culture*. Berkeley: Univ. California. 6: 1–12.
- Chen M., Chang L., Zhang J., Guo F., Vymazal J., He Q., Chen Y. 2020. Global nitrogen input on wetland ecosystem: The driving mechanism of soil labile carbon and nitrogen on greenhouse gas emissions. *Environ. Sci. Ecotech.* 4: 100063.
- Chin Y.T., Bashir M.J., Amr S.S.A., Alazaiza M.Y. 2022. Factorial design and optimization of thermal activation of persulfate for stabilized leachate treatment. *Desal. Water Treat.* 250(1): 211–220.
- Chioccioli M., Hankamer B., Ross I.L. 2014. Flow cytometry pulse width data enables rapid and sensitive estimation of biomass dry weight in the microalgae *Chlamydomonas reinhardtii* and *Chlorella vulgaris*. *PLoS One*. 9(5): e97269.
- Dalvi V., Naaz F., Nigam H., Jain R., Samuchiwal S., Kalia S., Kumar R., Mathur M., Bano F., Malik A., Singh A. 2021. Removal of pollutants from wastewater via biological methods and

- shifts in microbial community profile during treatment process. *Wastewater Treatment Reactors*: 19–38.
- Daud N.M., Abdullah S.R.S., Hasan H.A., Dhokhikah Y. 2022. Integrated physical-biological treatment system for batik industry wastewater: A review on process selection. *Sci. Total Environ.* 819: 152931.
- Devi R., Dahiya R.P. 2008. COD and BOD removal from domestic wastewater generated in decentralised sectors. *Biores. Technol.* 99(2): 344–349.
- Dickinson K.E., Whitney C.G., McGinn P.J. 2013. Nutrient remediation rates in municipal wastewater and their effect on biochemical composition of the microalga *Scenedesmus* sp. AMDD. *Algal Res.* 2(2): 127–134.
- El-Aswar E.I., Ramadan H., Elkik H., Taha A.G. 2022. A comprehensive review on preparation, functionalization, and recent applications of nanofiber membranes in wastewater treatment. *J. Environ. Manag.* 301: 113908.
- Has C., Pan S. 2021. Vesicle formation mechanisms: an overview. *J. Liposome Res.* 31(1): 90–111.
- Hashmi Z., Bilal M.R., Fahrurrozi Zaini J., Lim J.W., Wibisono Y. 2023. Recent progress in microalgae-based technologies for industrial wastewater treatment. *Fermentation.* 9(3): 311.
- Hena S., Gutierrez L., Croué J.P. 2021. Removal of pharmaceutical and personal care products (PPCPs) from wastewater using microalgae: A review. *J. Hazard. Mater.* 403: 124041.
- Huang Q., Jiang F., Wang L., Yang C. 2017. Design of photobioreactors for mass cultivation of photosynthetic organisms. *Engineering.* 3(3): 318–329.
- Kim J., Lingaraju B.P., Rheume R., Lee J.Y., Siddiqui K.F. 2010. Removal of ammonia from wastewater effluent by *Chlorella vulgaris*. *Tsinghua Sci. Technol.* 15(4): 391–396.
- Mastropetros S.G., Pispas K., Zagklis D., Ali S.S., Kornaros M. 2022. Biopolymers production from microalgae and cyanobacteria cultivated in wastewater: Recent advances. *Biotechnol. Adv.* 60: 107999.
- Mojiri A., Bashir M.J. 2022. Wastewater treatment: Current and future techniques. *Water.* 14(3): 448.
- Oruganti R.K., Katam K., Show P.L., Gadhamshetty V., Upadhyayula V.K.K., Bhattacharyya D. 2022. A comprehensive review on the use of algal-bacterial systems for wastewater treatment with emphasis on nutrient and micropollutant removal. *Bioengineered.* 13(4): 10412–10453.
- Oswald W.J. 1988. Micro-algae and wastewater treatment. In: *Micro-algal Biotech.* Cambridge: Cambridge Univ. Press. Pp. 305–328.
- Quijano G., Arcila J.S., Buitrón G. 2017. Microalgal-bacterial aggregates: applications and perspectives for wastewater treatment. *Biotechnol. Adv.* 35(6): 772–781.
- Rasoulamini S., Montazeri-Najafabady N., Mobasher M.A., Hoseini-Alhashemi S., Ghasemi Y. 2011. *Chlorella* sp: A new strain with highly saturated fatty acids for biodiesel production in bubble-column photobioreactor. *Appl. Energy.* 88(10): 3354–3356.
- Samer M. 2015. Biological and chemical wastewater treatment processes. *Wast. Treat. Eng.* 150: 61250.
- Sayadi M.H., Ahmadpour N., Fallahi C.M., Rezaei M.R. 2016. Removal of nitrate and phosphate from aqueous solutions by microalgae: An experimental study. *Glob. J. Environ. Sci. Manag.* 2(4): 357–364.

- Seymour J.R., Amin S.A., Raina J.B., Stocker R. 2017. Zooming in on the phycosphere: the ecological interface for phytoplankton-bacteria relationships. *Nat. Microbiol.* 2(7): 1–12.
- Shabani M. 2016. CO₂ bio-sequestration by *Chlorella vulgaris* and *Spirulina platensis* in response to different levels of salinity and CO₂. *Proc. Int. Acad. Ecol. Environ. Sci.* 6(2): 53.
- Silambarasan S., Logeswari P., Sivaramakrishnan R., Incharoensakdi A., Cornejo P., Kamaraj B., Chi N.T.L. 2021. Removal of nutrients from domestic wastewater by microalgae coupled to lipid augmentation for biodiesel production and influence of deoiled algal biomass as biofertilizer for *Solanum lycopersicum* cultivation. *Chemosphere.* 268: 129323.
- Tang D., Han W., Li P., Miao X., Zhong J. 2011. CO₂ biofixation and fatty acid composition of *Scenedesmus obliquus* and *Chlorella pyrenoidosa* in response to different CO₂ levels. *Biores. Technol.* 102(3): 3071–3076.
- Tarlan E., Dilek F.B., Yetis U. 2002. Effectiveness of algae in the treatment of a wood-based pulp and paper industry wastewater. *Biores. Technol.* 84(1): 1–5.
- Wang C., Luo D., Zhang X., Huang R., Cao Y., Liu G., Zhang Y., Wang H. 2022. Biochar-based slow-release of fertilizers for sustainable agriculture: A mini review. *Environ. Sci. Ecotech.* 10: 100167.
- Yusuf A., Sodiq A., Giwa A., Eke J., Pikuda O., De Luca G., Di Salvo J.L., Chakraborty S. 2020. A review of emerging trends in membrane science and technology for sustainable water treatment. *J. Clean. Prod.* 266: 121867.
- Zamani N., Nowshadi M., Amin S., Ghasemi Y., Niyazi A. 2010. Removal of nitrogen-nitrate and ortho phosphate from wastewater using microalgae biotechnology. In: *The Second International Symposium on Environmental Engineering* (Tehran, 18–20 February, 2010).

Chandra Has

Rushi Patell

Hitesh Padhiyar

Department of Chemical Engineering, GSFC University,
Vadodara 391750, Gujarat, India

Comparative study of industrial wastewater treatments by *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus quadricauda* microalgae

Efficient wastewater recovery is essential for sustainable water resource management and can help alleviate regional or seasonal water shortages. Directly discharging untreated wastewater into water bodies leads to significant environmental degradation and health risks, disrupting aquatic ecosystems. Implementing efficient nutrient and pollutant removal techniques is essential to mitigate these adverse effects. Thus, we safeguard the environment and ensure public health by managing water resources sustainably. Biological treatment, particularly by cultivating aquatic plants, offers advantages over conventional methods for nutrient removal and pollution mitigation.

This study evaluates the effectiveness of *Chlorella vulgaris* Beijer. and *Scenedesmus quadricauda* (Turpin) Bréb. in treating industrial wastewater. Using measurements of the removal of nitrates, phosphates, chemical oxygen demand, and biological oxygen demand, this study assesses algae suitability as an alternative to conventional farming.

Keywords: wastewater treatment, biological treatment, microalgae cultivation, nutrient removal, environmental sustainability

Citation. Chandra Has, Rushi Patell, Hitesh Padhiyar. 2025. Comparative study of industrial wastewater treatments by *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus quadricauda* microalgae. *Algologia*. 35(3): 236–252. <https://doi.org/10.15407/alg35.03.236>