УДК 574.52: 581.526.325 *https://doi.org/10.31861/biosystems2026.02.255*

ТРИВАЛЕ «ЦВІТІННЯ» ВОДИ, ВИКЛИКАНЕ *LINGULAULAX POLYEDRA* (DINOPHYCEAE), У ПІВНІЧНО-ЗАХІДНІЙ ЧАСТИНІ ЧОРНОГО МОРЯ

С. Є. НІКОНОВА, О. В. КОШЕЛЕВ, Ю. І. БОГАТОВА

ДУ «Інститут морської біології Національної академії наук України»
вул. Пушкінська, 37, м. Одеса, 65048, Україна
e-mail: niconova.svet@gmail.com

У статті наведено результати дослідження масштабного тривалого «цвітіння» морської води в північно-західній частини Чорного моря у серпні-жовтні 2024 року, викликаного масовим розвитком мікроводорості Lingulaulax polyedra (F. Stein) M. J. Head. et al., 2024 (Dinophyceae). Дослідження проводили в прибережній зоні Одеського морського регіону і на узмор'ї Тилігульського лиману до ізобати 5 м. Розглянуто абіотичні чинники, що супроводжували «цвітіння» води: температура води і повітря, атмосферні опади, вміст основних біогенних елементів, що беруть участь у фотосинтезі. Показано, що «цвітінню» сприяли погодні умови, а вміст мінеральних речовин азоту і фосфору не лімітував його розвиток. В межах зон «цвітіння» чисельність L. polyedra перевищувала 6×10^6 кл./дм^3, біомаса була більша за 120 мг/дм^3, максимальні значення відповідно $7{,}035\times10^6$ кл./дм^3 і 202,198 мг/дм^3. Об'єм клітин L. polyedra становив $22{,}874\times10^3 \pm 1{,}208\times10^3$ мкм^3, що відповідає нижній межі діапазону об'єму клітин цього виду. Штам L. polyedra характеризувався вираженою функціональною активністю завдяки відносно високому співвідношенню площі поверхні клітини до її об'єму.

Під час масового розвитку L. polyedra (II і III декада вересня) відзначали зниження вмісту у воді азоту амонійного і нітратів до нульових значень, що не призвело до припинення «цвітіння» або суттєвого зменшення його інтенсивності. Це обумовлено насамперед такими факторами: штормовою погодою – продовження «цвітіння» забезпечувалось внаслідок переходу біогенних речовин з порових розчинів донних відкладень в водну товщу; фізіологічними особливостями L. polyedra – здібностями виду використовувати альтернативні джерела живлення і мігрувати у придонні шари води, де концентрація біогенних речовин більше.

Lingulaulax polyedra – вид-космополіт з міксотрофним типом харчування, що викликає масштабні «цвітіння» води у багатьох районах Світового океану. Цей вид, як потенційний виробник йєссотоксинів, включений у таксономічний довідковий список МОК-ЮНЕСКО щодо шкідливих мікроводоростей. Дослідження інтегральних токсичних властивостей вторинних метаболітів та токсинів екстракту з мікроводоростей, отриманого нами при надвисоких показниках чисельності L. polyedra в пік розвитку «цвітіння», показало відсутність гострої летальної токсичності штаму.

Ключові слова: «цвітіння» води, фітопланктон, Lingulaulax polyedra, абіотичні показники якості водного середовища, токсичність, північно-західна частина Чорного моря

Вступ. Українська частина північно-західного шельфу Чорного моря – мілководна область, що розташована на північ від умовної лінії, яка з'єднує півострів Тарханкут з дельтою р. Дунай, практично за паралеллю 45 º пн. ш. Евтрофування Чорного моря та його північно-західного шельфу почалося у 70-х роках XX ст. Воно було пов'язане з надмірним надходженням з річковим стоком речовин азоту та фосфору, які почали активно застосовувати у сільському господарстві на водозбірній площі басейну. Відомо, що на 1 м^2 поверхні шельфу північно-західної частини Чорного моря припадає 22 м^2 водозбірної площі суші, з якої надходить 80 % всього прісноводного стоку Чорного моря. Гідрохімічний режим району формується під впливом трансформованих водних мас річок Дніпро, Південний Буг та Дністер, що надходять у море через Дніпровсько-Бузький та Дністровський лимани, а також метеорологічних та гідрологічних умов. Крім того, руйнування греблі Каховського водосховища у червні 2023 р. привело до надходження в акваторію північно-західної частини Чорного моря великої кількості алохтонної та автохтонної речовини, більшість якої осіла на дно. Надходження її неприродної надлишкової кількості не могло не вплинути на процеси, що відбуваються в донних відкладеннях, але спеціальні дослідження порових вод в останній час не проводили, що пов'язано із забороною виходу в море у воєнний час. Однак відомо, що дифузія біогенних речовин з порових розчинів донних відкладень у придонний шар моря може стимулювати розвиток фотосинтетичних процесів.

Найсильніше антропогенне евтрофування

зазнає Одеський морський регіон (ОМР) – частина північно-західного шельфу до глибин 10-20 м, яка з півночі обмежена пригирловою зоною Малого Аджалицького лиману, з півдня – Сухого лиману. Основними постійними джерелами біогенних речовин, що визначають біологічну продуктивність та рівень трофності вод району, є стік річок (~55 км^3/рік), теригенні, дренажні (~25 млн. м^3/рік), комунально-побутові (~20 млн. м^3/рік) стоки мегаполісу Велика Одеса (найбільшого на берегах Чорного моря), атмосферні опади (середнє багаторічне значення 440 мм/рік), донні відкладення, що за роки розвитку евтрофування накопичили значний запас речовин азоту та фосфору.

Негативні наслідки евтрофування південно-західного шельфу супроводжуються епізодично виникаючими явищами «цвітіння» води у поверхневому шарі моря і гіпоксією та заморами організмів у придонному шарі. «Цвітіння» води – масове розмноження мікроскопічних організмів у сприятливих умовах, критерієм якого є граничні кількісні величини: понад 10^6 кл./дм^3 визначається «цвітіння» за чисельністю, понад 1 мг/дм^3 – за біомасою. Розвиток мікроводоростей, що утворюють «цвітіння», регулюється як факторами навколишнього середовища, так і трофічними взаємодіями, але підвищений вміст біогенних речовин, як правило, є необхідною попередньою умовою для ініціювання «цвітіння».

Lingulaulax polyedra – тепловодний вид з міксотрофним типом харчування, здатний викликати масштабні, а іноді і шкідливі, «цвітіння» (так звані «червоні припливи») у багатьох районах Світового океану. Цей від включений у таксономічний довідковий список шкідливих мікроводоростей (Lundholm et al., 2009) як потенційний виробник йєссотоксинів, що передаються по харчовій мережі. Наприклад, у Чорному морі у низьких концентраціях йессотоксини були виявлені в мідіях (Morton et al., 2007). За останні півстоліття у Чорному морі «цвітіння» *L. polyedra* двічі відмічали у берегів Болгарії – в 1987 і 1992 роках (Klisarova et al., 2025) і двічі у північно-західній частині Чорного моря – в 1999 та 2020 роках (Terenko and Krachmalny, 2022), але «цвітіння» не були тривалими.

Мета дослідження – простежити зв'язок масового розвитку *Lingulaulax polyedra* з гідрохімічними умовами середовища, визначити токсичні властивості популяції *L. polyedra*.

Матеріали та методи. Дослідження проводили в прибережній зоні ОМР і на узмор'ї Тилігульського лиману до ізобати 5 м у період з 23 серпня по 17 листопада 2024 р. (рис. 1).

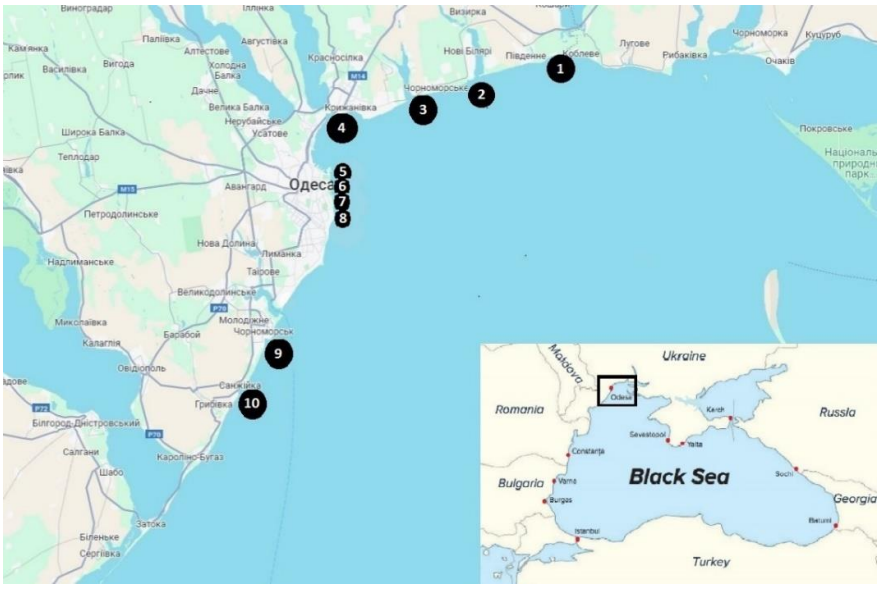


Рис. 1. Схема станцій відбору гідрохімічних та фітопланктонних проб у серпні-жовтні 2024 р.: 1 – узмор'я Тилігульського лиману; 2 – узмор'я Малого Аджалицького лиману; 3 – узмор'я Великого Аджалицького лиману; 4 – Одеська затока, пляж Лузанівка; 5 – мис Ланжерон, Дельфінарій; 6 – мис Ланжерон, пляж; 7 – мис Малий Фонтан; 8 – пляж Аркадія; 9 – пляж м. Чорноморськ; 10 – пляж с. Санжійка

Fig. 1. Scheme of hydrochemical and phytoplankton sampling stations in August-October 2024: 1 – the coastline of the Tyligulsky estuary; 2 – the coastline of the Small Adzhalyk estuary; 3 – the coastline of the Big Adzhalyk estuary; 4 – Odesa Bay, Luzanivka beach; 5 – Cape Lanzheron, Dolphinarium; 6 – Cape Lanzheron, beach; 7 – Cape Maly Fontan; 8 – Arkadiya beach; 9 – Chornomorsk city beach; 10 – Sanzhiyka village beach

Проби морської води для визначення гідрохімічних параметрів, кількісних та якісних характеристик фітопланктону та токсикологічного аналізу були відібрані відповідно до DSTU ISO 5667-9:2005 (2006) з горизонту 0,5 м на відстані до 50 м від берега, що пов'язано із забороною виходу в море у воєнний час. Вміст розчинених біогенних речовин (мінеральних і органічних речовин азоту, фосфору та кремнію) у воді аналізували упродовж 24 годин після відбору проб згідно з прийнятими міжнародними методиками для морських вод з використанням повіреного вимірювального обладнання (RD 52.10.243-92, 1993), солоність і температуру води визначали за допомогою портативного солеміру Hach sens IONTM+EC5 при відборі проб.

Проби фітопланктону обробляли у живому або фіксованому (40 % розчин формаліну) стані. Чисельність фітопланктону підраховували у краплі води об'ємом 0,5 мл. Біомасу розраховували методом вимірів окремих клітин з подальшим розрахунком середнього об'єму та сирої маси, питому вагу фітопланктону приймали за одиницю (Khyzhniak and Yevtushenko, 2014).

Визначення гострої токсичності *L. polyedra* проведено на адаптованій до умов підвищеної солоності (5-7 ‰) лабораторній культурі *Daphnia magna* Straus відповідно до DSTU 4173:2003 (2004). Експозиція дослідів склала 96 годин, критерієм гострої летальної токсичності була загибель ⩾50 % тест-об'єктів у порівнянні з контролем.

Результати та обговорення. У серпні-жовтні 2024 р. в прибережній зоні ОМР «цвітіння» води, що було викликане дінофлагелятой *L. polyedra,* тривало майже 2 місяця і проявлялося у значній зміні кольору моря та його біолюмінесценції вночі. Значення чисельності і біомаси *L. polyedra* наведені у таблиці 1.

Таблиця 1.

Кількісні показники (N – чисельність, 10^6 кл./дм^3; B – біомаса, мг/дм^3) L. polyedra в Одеському морському регіоні у серпні-жовтні 2024 р.

Table 1.

Quantitative indicators (N – number, 10^6 cells/dm^3; B – biomass, mg/dm^3) of L. polyedra in the Odesa sea region in August-October 2024

Дата	Район дослідження	N	B
23.08.2024	мис Ланжерон	0,75	14,18
28.08.2024	мис Ланжерон	0,59	11,15
03.09.2024	мис Ланжерон, Дельфінарій	2,20	41,58
03.09.2024	мис Ланжерон	5,80	109,63
10.09.2024	с. Санжійка	5,70	107,47
17.09.2024	місто Чорноморськ	4,30	81,28
17.09.2024	мис Ланжерон	0,71	13,42
22.09.2024	мис Ланжерон	7,04	202,20
22.09.2024	пляж Аркадія	6,10	115,30
23.09.2024	узмор'я Малого Аджаликського лиману	0,14	2,65
23.09.2024	мис Ланжерон, Дельфінарій	0,99	18,71
23.09.2024	місто Чорноморськ	6,20	117,19
24.09.2024	мис Малий Фонтан	0,85	20,24
25.09.2024	пляж Лузанівка	5,90	140,45
26.09.2024	узмор'я Великого Аджаликського лиману	4,70	104,89
26.09.2024	узмор'я Тилігульського лиману	0,21	5,00
28.09.2024	пляж Лузанівка	6,11	136,36
29.09.2024	узмор'я Великого Аджаликського лиману	6,20	117,19
02.10.2024	пляж Лузановка	1,20	22,68
02.10.2024	узмор'я Великого Аджаликського лиману	0,93	17,58
06.10.2024	узмор'я Великого Аджаликського лиману	0,64	12,10
11.10.2024	узмор'я Великого Аджаликського лиману	1,10	20,79
17.10.2024	узмор'я Великого Аджаликського лиману	0,12	2,27

У другий половині жовтня 2024 р. «червоний приплив» відмічали також на румунському узбережжі.

Діапазон морфологічної мінливості *L. polyedra* включав клітини з лінійними розмірами 22,5-50,0 мкм, середній розмір, розрахований за індивідуальними промірами окремих клітин (n=50), дорівнював 35,75±0,61 мкм, середній об'єм – $22{,}874\times10^3\pm1{,}208\times10^3$ мкм^3. Такі значення відповідають нижній межі діапазону об'єму клітин і підтверджують тенденцію до його зменшення, визначену за тридцятирічний період спостережень у болгарському секторі Чорного моря (Klisarova et al., 2025). Таким чином, у 2024 році в ОМР відбувалося «цвітіння» дрібноклітинної популяції *L. polyedra*, що характеризує її як ту, що має високу функціональну активність завдяки відносно високій для виду питомій поверхні клітин, що може бути пов'язано з реакцією на зміни умов середовища (Zotov, 2014).

Цикл розвитку *L. polyedra* починається в літньо-осінній період після прогріву придонного шару води і проростання цист, що залишаються в донних відкладеннях з минулих генерацій і можуть зберігати життєздатність протягом десятиліть навіть в безкисневих умовах. В північно-західної частини Чорного моря цисти *L. polyedra* зазвичай зустрічаються в донних відкладеннях, їх чисельність може перевищувати 1000 екз./г^1 сухого ґрунту (Nikonova, 2010).

Механізм фізіологічного виходу цист із стану спокою остаточно не вивчений, однак існує припущення (Prego et al., 2024), що антропогенне або природне порушення донних відкладень призводять до початку та збільшення інтенсивності «цвітіння» *L. polyedra*. Штормова погода сприяє потраплянню цист у фотичний шар моря, а прогрів придонного шару води наприкінці літа та восени стимулює проростання цист. Саме такі умови склалися в ОМР у третій декаді серпня 2024 року.

Абіотичні фактори, що сприяли масовому розвитку *L. polyedra.* Гідролого-гідрохімічний режим району досліджень у серпні-жовтні 2024 р. формувався метеорологічними умовами регіону. За даними Гідрометеорологічного центру Чорного та Азовського морів, відхилення температури повітря в м. Одеса від середньомісячної норми в період з другої половини серпня по першу половину жовтня 2024 р. становило +3,3 ºС; середня температура морської води у вересні перевищувала середньомісячні значення на 3,0 ºС і до середини жовтня утримувалася в межах 17-21 ºС. Аналогічні позитивні температурні аномалії супроводжували «цвітіння» *L. polyedra* в ОМР у 2020 році (Terenko and Krakhmalnyi, 2022). Аномальними були також і кількість опадів у вересні – в першу половину місяця випало 186 % місячної норми опадів. Солоність поверхневого шару моря у серпні змінювалась в межах 15,5-17,4 ‰ (середня 16,7 ‰), у вересні 11,0-15,4 ‰ (середня 13,8 ‰), у жовтні 15,0-17,5 ‰ (середня 17,1 ‰). Вміст мінеральних речовин азоту та фосфору – біогенних речовин, що беруть участь у створенні нової органічної речовини фітопланктону – у поверхневому шарі ОМР за період серпень-жовтень 2024 р. відрізнялося великою мінливістю (рис. 2).

У період «цвітіння» на морі переважало активне хвилювання, що руйнувало верхній шар донних відкладень, посилювало дифузію біогенних речовин з порових розчинів донних відкладень у придонний шар моря і приводило до переходу цист в водну товщу. Вертикальна конвекція водних мас забезпечувала товщу води біогенними речовинами і сприяла підвищенню температури води у придонному шарі, шо стимулювало активізацію проростання цист мікроводоростей.

Попередніми роботами (Redfield, 1934; Richards, 1965) встановлено, що в процесі фотосинтезу для створення нової органічної речовини оптимальна наявність C, N та P в атомно-ваговому співвідношенні становить 106 : 16 : 1. З біогенних елементів інтенсивність фотосинтезу може лімітувати тільки фосфор, тому що джерелом вуглецю для створення первинної продукції автотрофів є скрізь присутній вуглекислий газ, азот у водних екосистемах також завжди присутній у вигляді різних неорганічних та органічних речовин. Тому, відповідно до закону мінімуму Лібіха, «життєдіяльність організму залежить від того ресурсу, кількість якого обмежена», і найчастіше елементом, якій лімітує створення первинної продукції у водному середовище, є фосфор. Взагалі, лімітуючими абіотичними і біотичними факторами розвитку фотосинтезу може стати недостатня кількість макро- та мікроелементів, світлової енергії, несприятлива температура води, стратифікація та динаміка водних мас, а також міжвидові відносини, включаючи прес консументів та ін.

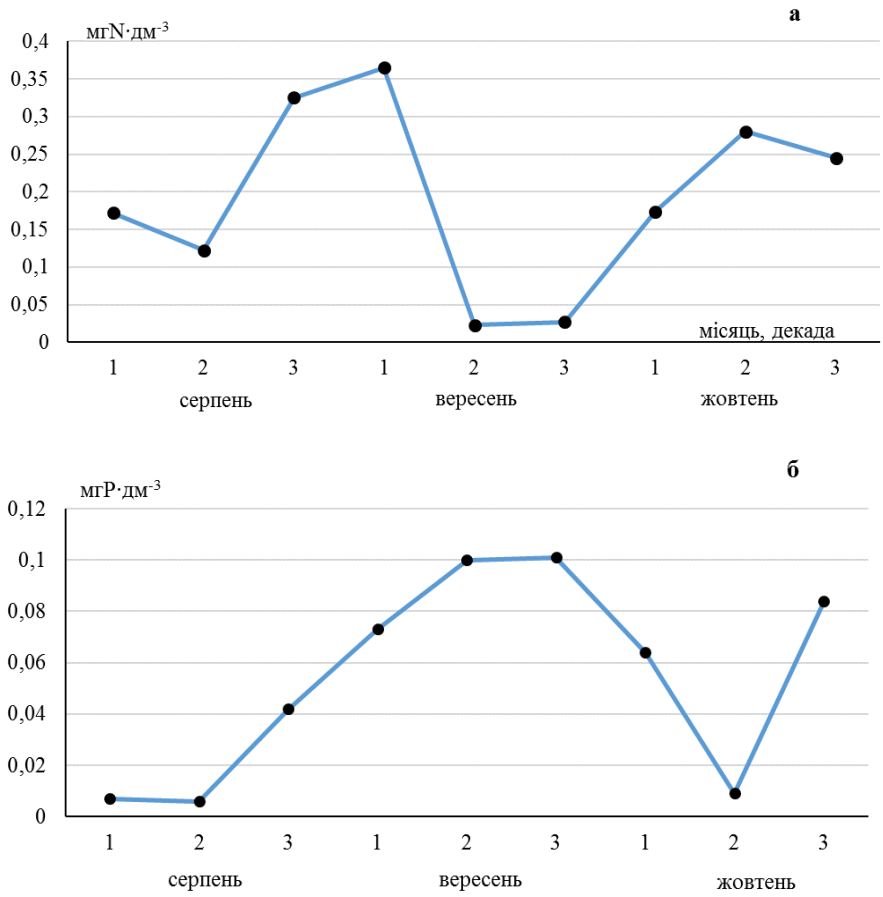


Рис. 2. Мінливість вмісту мінеральних форм азоту (а) та фосфору (б) в поверхневому шарі Одеського морського регіону у серпні-жовтні 2024 р. (середньодекадні значення)

Fig. 2. Variability of the content of mineral forms of nitrogen (a) and phosphorus (b) in the surface layer of the Odesa sea region in August-October 2024 (average decadal values)

Дослідження Elser et al. (1990) встановили, що «цвітіння» стає найбільш ймовірним при сприятливих абіотичних та біотичних умовах, коли атомно-вагове співвідношення азоту до фосфору N : P знаходиться в межах від 10 до 15. Разом з тим вважається, що співвідношення N : P не дають повного уявлення про доступність біогенних елементів, різні форми яких можуть мати видоспецифічну доступність, що дозволяє окремим видам процвітати в умовах, де співвідношення N : P не відповідає пропорції Редфілда (Glibert and Burkholder, 2011).

Для вод ОМР, куди надходять недостатньо очищені комунально-побутові стічні води, характерний підвищений вміст речовин фосфору, тоді як мінеральні речовини азоту потрапляють до району з атмосферними опадами і трансформованими річковими водами. На початку вересня 2024 р. після значних опадів вміст $N_{МІН}$ збільшився з 0,161 мгN/дм^3 до 0,465 мгN/дм^3, з яких 0,435 мгN/дм^3 припадало на амонійний азот – найбільш переважну форму азоту для рослин.

У тривалому періоді масового розвитку мікроводорості *L. polyedra* в 2024 р. можна виділити 3 етапи:

- перший етап (III декада серпня – створення передумов для масового розвитку фітопланктону, I декада вересня – початок «цвітіння»). У III декаді серпня на фоні високого вмісту мінеральних речовин фосфору (рис. 2б) і збільшення мінеральних речовин азоту (рис. 2а) атомно-вагове співвідношення $N_{МІН} : P_{МІН} = 8 : 1$, валових форм (сума мінеральних та органічних речовин азоту та фосфору) $N_{ВАЛ} : P_{ВАЛ} = 4 : 1$, але вже у I декаді вересня на початку «цвітіння» картина змінюються – $N_{МІН} : P_{МІН} = 5 : 1$, $N_{ВАЛ} : P_{ВАЛ} = 10 : 1$ (рис. 3). У III декаді серпня спостерігали зміну кольору води на деякій відстані від берега. В прибережних водах чисельність *L. polyedra* не перевищувала $0{,}75\times10^6$ кл./дм^3, біомаса – 14,18 мг/дм^3, але у I декаді вересня вже спостерігали чисельність до $5{,}8\times10^6$ кл./дм^3, а біомаса досягала 109,63 мг/дм^3;
- другий етап (II і III декади вересня – пік «цвітіння») – масовий розвиток фітопланктону, повна утилізація мінеральних речовин азоту, співвідношення $N_{МІН} : P_{МІН} = 0{,}23 : 1$, $N_{ВАЛ} : P_{ВАЛ} = 0{,}6 : 1$; максимальні значення чисельності і біомаси становили відповідно

$7{,}035\times10^6$ кл./дм^3 і 202,198 мг/дм^3;

- третій етап (кінець III декади вересня - II декада жовтня) – загасання «цвітіння», відмічене зменшення мінеральних форм фосфору (рис. 2б) при збільшенні азотвмісних речовин, співвідношення $N_{МІН} : P_{МІН} = 3 : 1$, $N_{ВАЛ} : P_{ВАЛ} = 3 : 1$. Зниження вмісту речовин фосфору навіть за деякого збільшення речовин азоту лімітувало розвиток мікроводоростей; протягом двох декад жовтня інтенсивність «цвітіння» дещо знизилася – фіксували чисельність від $0{,}12\times10^6$ до $1{,}1\times10^6$ кл./дм^3, але біомаса *L. polyedra* перевищувала 1 мг/дм^3, тобто відповідала рівню помірного «цвітіння» за біомасою. Саме на третьому етапі «цвітіння» на фоні зменшення мінеральних форм фосфору зареєстровано появу новоутворених цист, чисельність яких досягала 30×10^3 кл./дм^3.

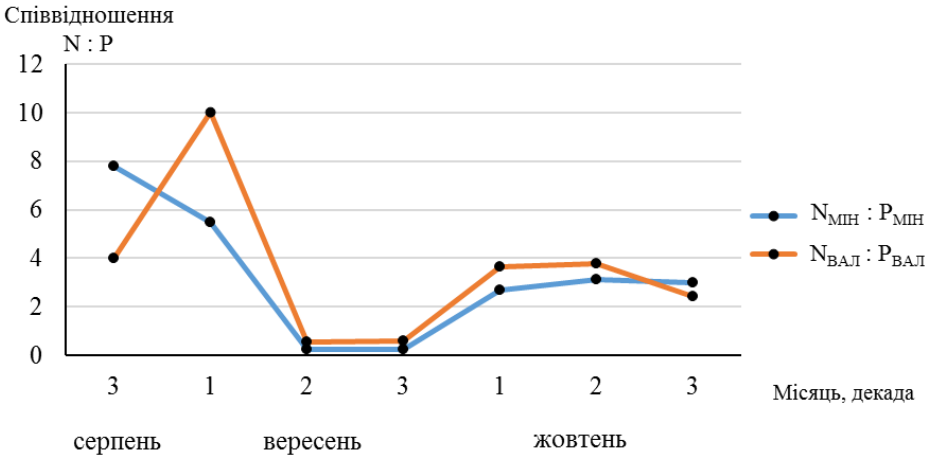


Рис. 3. Співвідношення мінеральних $N_{МІН} : P_{МІН}$ та валових $N_{ВАЛ} : P_{ВАЛ}$ форм азоту та фосфору в поверхневому шарі води Одеського морського регіону у серпні-жовтні 2024 р. (середньодекадні значення)

Fig. 3. The ratio of mineral $N_{MIN} : P_{MIN}$ and the sum of mineral and organic forms of nitrogen and phosphorus $N_{VAL} : P_{VAL}$ in the surface layer of the Odesa sea region in August-October 2024 (average decadal values)

Кореляційний аналіз не виявив достовірного зв'язку між чисельністю водоростей і концентрацією біогенних елементів. Кореляцію чисельності цист з вмістом біогенних речовин у морській воді також не виявлено, але поява цист збігалася зі зниженням мінерального фосфору у воді, що узгоджується з висновками Figueroa and Bravo (2005) про те, що дефіцит фосфатів є умовою, необхідною для злиття пар гамет з утворенням цист *L. polyedra*.

Слід зазначити, що зареєстроване зниження концентрацій азоту амонійного і нітратів майже до нульових значень в період найбільшого розвитку *L. polyedra* не призвело до зменшення інтенсивності «цвітіння». Постійний динамічний процес надходження біогенних речовин з порових вод донних відкладень в штормову погоду і майже повної їх утилізації мікроводоростями на протязі певного періоду часу забезпечував «цвітіння» води. Крім того, як міксотроф, *L. polyedra* характеризується здатністю використовувати альтернативні джерела живлення, у тому числі, може вживати в їжу інші види водоростей (Jeong et al., 2010). Ще слід згадати, що, завдяки наявності джгутиків, клітини *L. polyedra* мігрують у водній товщі в придонні шари води з вищою концентрацією біогенних речовин. Таким чином, певні здібності дозволяють виду не тільки виживати в умовах короткочасних коливань концентрацій біогенних речовин у водній товщі, но й отримувати суттєву перевагу в угрупованні мікроводоростей і успішно конкурувати з іншими видами.

Разом з *L. polyedra* у період «цвітіння» в значної кількості відмічалися інші види водоростей: *Prorocentrum micans, Prorocentrum cordatum, Gonyaulax scrippsae, Protoperidinium steinii, Tripos furca, Pseudopedinella pyriformis*. Чисельність *P. micans* досягала $0{,}2\times10^6$ кл./дм^3, біомаса 1,45 мг/дм^3, тобто також відповідала рівню помірного «цвітіння» за біомасою. Загальна біомаса фітопланктону у вересні досягала 210 мг/дм^3, тобто в 7 разів перевищувала рівень 30 мг/дм^3, що, за даними Velikova et al., (1999), пригнічує розвиток морських організмів і призводить до деградації морської екосистеми.

Токсичність *L. polyedra* відноситься до потенційно-токсичних видів, але незважаючи на здатність цього виду продукувати токсичні речовини під час «цвітіння», йєсотоксини та його аналоги не завжди відзначаються в клітинах водоростей, у воді та у фільтруючих організмів

(Barbosa et al., 2024), або реєструються в кількості значно нижчої за гранично допустимої концентрації. Методом біотестування було проведено дослідження інтегральних токсичних властивостей вторинних метаболітів *L. polyedra* та токсинів екстракту мікроводоростей, отриманого при надвисоких показниках чисельності ($7{,}035\times10^6$ кл/дм^3) та біомасі (202,198 мг/дм^3), яке показало відсутність гострої летальної токсичності штаму *L. polyedra*. Це узгоджується з даними, отриманими Dursun et al. (2025), які прі дослідженні 12 штамів *L. polyedra*, виділених з фітопланктону західної частини Чорного моря, виявили слідові кількості різних форм йєсотоксинів тільки у 9 штамів. Іншими дослідженнями, проведеними в різних регіонах Світового океану, також показано, що утворення токсинів не є облігатною характеристикою *L. polyedra*, і у більшості випадків виникнення «червоних приливів», викликаних *L. polyedra*, токсичний вплив на водні організми не зафіксовано.

Висновки:

1. Восени 2024 р. у прибережній зоні Одеського морського регіону зареєстровано надтривалий «червоний приплив», викликаний *Lingulaulax polyedra*, який продовжувався протягом 2 місяців. Це явище супроводжувалося значною зміною кольору морської води та біолюмінесценцію моря в нічний час. У пік «цвітіння» чисельність *Lingulaulax polyedra* досягала $7{,}035\times10^6$ кл./дм^3, біомаса становила 202,198 мг/дм^3.

2. Масовому розвитку *Lingulaulax polyedra* сприяли: підвищені температури повітря і води (відхилення від середньомісячних кліматичних значень відповідно 3,3 ºС і 3,0 ºС), підвищена кількість опадів (186 % норми у вересні), що викликало надходження біогенних речовин з теригенним і трансформованим річковим стоком на акваторію регіону, а штормова погода сприяла їх додатковому надходженню з порових розчинів донних відкладень.

3. На початку «цвітіння» при максимальному вмісті мінеральних і органічних речовин азоту та фосфору їх атомно-вагове співвідношення становили $N_{МІН} : P_{МІН} = 5 : 1$, $N_{ВАЛ} : P_{ВАЛ} = 10 : 1$ та були сприятливими для розвитку *Lingulaulax polyedra*; на піку «цвітіння» відбувалася майже повна утилізація мінеральних речовин азоту, співвідношення становили $N_{МІН} : P_{МІН} = 0{,}23 : 1$, $N_{ВАЛ} : P_{ВАЛ} = 0{,}5 : 1$; на заключному етапі «цвітіння» вміст мінеральних та органічних речовин азоту зросло, а фосфору – знизилось на порядок, що лімітувало подальший розвиток *Lingulaulax polyedra*, співвідношення азоту і фосфору становили $N_{МІН} : P_{МІН} = 3 : 1$, $N_{ВАЛ} : P_{ВАЛ} = 3 : 1$.

4. Дослідження інтегральних токсичних властивостей вторинних метаболітів екстракту мікроводоростей показало відсутність гострої летальної токсичності штаму *Lingulaulax polyedra* на тест-об'єктах.

Конфлікт інтересів. *Автори заявляють, що дослідження проводилося за відсутності будь-яких комерційних або фінансових відносин, які можна було б витлумачити як потенційний конфлікт інтересів.*

Список літератури / References:

1. Barbosa, M., Costa, P.R., David, H., Lage, S., Amorim, A. (2024). Effect of temperature on growth and yessotoxin production of *Protoceratium reticulatum* and *Lingulodinium polyedra* (Dinophyceae) isolates from the Portuguese coast (NE Atlantic). *Marine Environmental Research*. Volume 194. February 2024. 106321. https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2023.106321
2. DSTU 4173:2003. (2004). The acidity of the water. Assessment of acute lethal toxicity on *Daphnia magna* Straus and *Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg (Cladosera. Crustacea) (ISO 6341:1996. MOD). [Yakist' vody. Vyznachannya hostroyi letal'noyi toksychnosti na *Daphnia magna* Straus ta *Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg (Cladocera, Crustacea) (ISO 6341:1996, MOD)] [valid 2003-06-10]. (2004). *View. official Kiev: State Committee for Standardization of Ukraine*. 17 p. [in Ukrainian].
3. DSTU ISO 5667-9:2005. (2006). The acidity of the water. Sample collection. Part 9. Establish procedures for collecting seawater samples (ISO 5667-9:1992. IDT). [Yakist' vody. Vidbyrannya prob. Chastyna 9. Nastanovy shchodo vidbyrannya prob mors'koyi vody (ISO 5667-9: 1992, IDT)]. (2006). *Kiev: State Committee for Standardization of Ukraine.* 9 p. [in Ukrainian].
4. Dursun F., Dzhembekova N., Krock B., Tebben J., Tillmann U. Morphological, molecular and toxinological characterization of potentially toxigenic microalgal strains from the western Black Sea. *Harmful Algae.* 151 (2026) 103026. pp. https://doi.org/10.1016/j.hal.2025.103026.
5. Elser, J. J., Marzolf, E. R., Goldman, C.R. (1990). Phosphorus and nitrogen limitation of phytoplankton growth in the freshwaters of North America: A review and ritique of experimental enrichments. *Canad. J. Fish. Aquat. Sci.* Vol. 47. pp. 1468-1477.
6. Figueroa, R. I., Bravo, I. (2005). Sexual reproduction and two different encystment strategies of *Lingulodinium polyedrum* (Dinophyceae) in culture. *Journal of Phycology.* 41. 370-379. https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2005.04150. x
7. Glibert, P. M., Burkholder, J. M. (2011) Harmful algal blooms and eutrophication: "strategies" for nutrient uptake and growth outside the Redfield comfort zone.

Chinese J. Oceanol. Limnol. 29(4). pp. 724-738. https://doi.org/10.1007/s00343-011-0502-z
8. Jeong, H. J., Yoo, Y. D., Kim, J. S., Seong, K. A., Seon, N. J. and Kim, H. T. (2010). Growth. Feeding and Ecological Roles of the Mixotrophic and Heterotrophic Dinoflagellates in Marine Planktonic Food Webs. *Ocean Science Journal*. 45. pp. 65-91. http://dx.doi.org/10.1007/s12601-010-0007-2
9. Khyzhniak M. I., Yevtushenko M. Iu. (2014). Methodology for the community of aquatic organisms. [Metodolohiia vyvchennia uhrupovan vodnykh orhanizmiv]. *Kyiv: Ukrainian Phytosociological Center [Ukrainskyi fitosotsiolohichnyi tsentr]*. – pp. 123-144.
10. Klisarova, D., Gerdzhikov, D., Dragomirova, P., Nikolova, N., Gera, M., Veleva, P. (2025). Dynamics of *Lingulodinium polyedra* Development in the Bulgarian Part of Black Sea (1992-2022). *Diversity* 17. 105 p. https://doi.org/10.3390/d17020105
11. Lundholm, N., Bernard, C., Churro, C., Escalera, L., Hoppenrath, M., Iwataki, M., Larsen, J., Mertens, K., Moestrup, O., Murray, S., Salas, R., Tillmann, U., Zingone, A. (Eds) (2009 onwards). IOC-UNESCO Taxonomic Reference List of Harmful Micro Algae. Accessed at https://www.marinespecies.org/hab on yyyy-mm-dd. https://doi.org/10.14284/362.
12. Morton, S. L., Vershinin, A., Leighfield, T., Smith, L., Quilliam, M. (2007). Identification of yessotoxin in mussels from the Caucasian Black Sea Coast of the Russian Federation. *Toxicon.* 50, 581–584. https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2007.05.004
13. Nikonova, S. E. (2010). Dinoflagellate Cysts of Odessa and Tendra regions of the Northwestern Part of the Black Sea. *Scientific Issue Ternopil National Pedagogical University. Series: Biology. Issue: Hydroecology*. 2010. No. 3 (44). pp. 190-192.
14. Prego, R., Bao, R., Varela, M., Carballeira, R. (2024). Naturally and Anthropogenically Induced *Lingulodinium polyedra* Dinoflagellate Red Tides in the Galician Rias (NW Iberian Peninsula). *Toxins*. 2024. 16. 280 p. https://doi.org/10.3390/toxins16060280
15. RD 52.10.243-92. (1993). Marine Water Analysis manual [Nastanova z khimichnoho analizu morskykh vod]. [valid 2024-11-20]. *Hydrometeoyzdat*, 236 p. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=77071
16. Redfield, A. C. (1934). On the proportion of organic derivatives in seawater and their relation to the composition of plankton. *James Johnston Memorial Volume*. University Press. Liverpool. pp. 177-192.
17. Richards, F. A. (1965). Anoxic basins and fjords. *J. Chemical Oceanography*. Vol.1. London. Acad. Press. pp. 611-645.
18. Terenko, G., Krakhmalnyi, A. (2022). Red tide of the *Lingulodinium polyedrum* (Dinophyceae) in Odessa Bay (Black Sea). *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 22(4)*. Pages TRJFAS20312. http://doi.org/10.4194/TRJFAS20312
19. Velikova, V., Moncheva, S., Petrova, D. (1999). Phytoplankton dynamics and Red Tides (1987-1997) in the Bulgarian Black Sea. *Water Sci. Technol.* 39. pp. 27-36. https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00184-5.
20. Zotov, A. B. (2014). Comparative Analysis of National and European Methodologies for Water Quality Assessment Using Phytoplankton Indicators. [Porivnialnyi analiz natsionalnykh i yevropeiskykh metodik otsinky yakosti vodnoho seredovyshcha za dopomohoiu indikatoriv fitoplanktonu]. *Visnyk of the Lviv University. Series BIology*. 2014. Issue 67. P. 3-17 [in Ukranian].

PROLONGED WATER BLOOM CAUSED BY *LINGULAULAX POLYEDRA* (DINOPHYCEAE) IN THE NORTHWESTERN BLACK SEA

S. E. Nikonova, O. V. Koshelev, Yu. I. Bogatova

Institute of Marine Biology National Academy of Sciences of Ukraine
37 Pushkinska Str., Odesa, 65048, Ukraine
e-mail: niconova.svet@gmail.com

This article presents the results of a study of a large-scale and prolonged bloom caused by the mass development of the microalga Lingulaulax polyedra (F. Stein) M. J. Head, K. N. Mertens & R. A. Fensome 2024 (Dinophyceae) in the northwestern part of the Black Sea in August-October 2024. The studies were conducted in the coastal zone of Odesa Sea region and on the coast of the Tylihul liman up to the 5 m isobath. The following abiotic factors accompanying the algal bloom were considered: water and air temperature, precipitation, content of the main biogenic substances involved in photosynthesis. It was shown that the initiation of water bloom was facilitated by optimal weather conditions along with non-limiting content of the mineral substance's nitrogen and phosphorus. Within the bloom zones, the number of L. polyedra exceeded 6 × 10⁶ cells/dm³ and the biomass was greater than 120 mg/dm³, with maximum values of 7.035 × 10⁶ cells/dm³ and 202.198 mg/dm³, respectively. The cell volume of L. polyedra was 22.874×10³±1.208×10³ μm³, which corresponds to the lower limit of the cell volume range for this species. The L. polyedra strain was characterized by pronounced functional activity due to the relatively large cell surface-area-to-volume ratio. Ammonium nitrogen and

nitrate concentrations decreased to zero during the peak of L. polyedra mass development (IInd and IIIrd decade of September) which, however, did not lead to the end of blooming or significant reduction of its intensity. This was primarily due to stormy weather conditions (i.e., the continuation of the bloom was sustained by the transfer of nutrients from the pore waters of bottom sediments into the water column) and the physiological characteristics of L. polyedra; specifically, the species' ability to utilize alternative nutrient sources and migrate to near-bottom water layers, where nutrient concentrations were higher.

Lingulaulax polyedra is a cosmopolitan species with a mixotrophic nutrition causing large-scale algal blooms in many areas of the World Ocean. It is included in IOC-UNESCO Taxonomic Reference List of Harmful Microalgae as a potential producer of yessotoxins. A study of the integral toxic properties of secondary metabolites and toxins of microalgae extract obtained at extremely high L. polyedra abundance and biomass at the peak of bloom development showed the absence of acute lethal toxicity of the strain.

Keywords: water bloom, phytoplankton, Lingulaulax polyedra, abiotic indicators of aquatic environment quality, toxicity, northwestern Black Sea

Отримано редколегією 03.07.2026 р.
Підписано до друку 15.10.2026 р.
Дата публікації 31.10.2026 р.

ORCID ID
Світлана Ніконова: https://orcid.org/0000-0002-7908-7174
Олександр Кошелев: https://orcid.org/0000-0002-8937-2323
Юлія Богатова: https://orcid.org/0000-0003-0753-1122