

ЕКОЛОГІЯ ВОДНИХ РЕСУРСІВ

УДК 502.4:502.5

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.6-57.7>

ШТУЧНІ РИФИ ЯК ІНСТРУМЕНТ ВІДНОВЛЕННЯ МОРСЬКИХ ТА ЛИМАННИХ ЕКОСИСТЕМ

Грубий М.В.¹, Трохименко Г.Г.²¹Регіональний ландшафтний парк «Тилігульський»
вул. Медична, 6, 57400, с.м.т. Березанка²Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
пр. Героїв України, 9, 54007, м. Миколаїв
grubyu@ukr.net, university@nuos.edu.ua

Вивчено формування біотичного співтовариства на штучному рифі у прибережних водах лиманних екосистем на прикладі Тилігульського лиману. Колонізація рифу гідробіонтами є типовою екологічною сукцесією розвитку складного біотичного співтовариства. Досліджено особливості системи забезпечення екологічного моніторингу морських та лиманних акваторій, процес організації системи екологічного моніторингу морських та лиманних акваторій, оцінку ефективності екологічного моніторингу морських та лиманних акваторій, теоретико-методичні основи проведення процесу екологічного моніторингу та основи розвитку екологічного моніторингу як галузі наукового знання. Крім того, було визначено теоретичні та методологічні засади щодо вдосконалення процесу екологічного моніторингу морських та лиманних акваторій. Екологічні розрахунки проводилися з використанням новітніх методів і комп'ютерних технологій обробки статистичного матеріалу.

Розглянуто найбільш доцільні контрукції штучних рифів для їх встановлення у прибережних ділянках Тилігульського лиману. На основі проведеного аналізу встановлено, що вже через 2–3 роки на штучному рифі може зрости видова різноманітність, біомаса гідробіонтів та біоценоз рифу стає потужним біофільтром, який бере участь у процесі самоочищення середовища. Отримані результати про функціонування рифового біоценозу можуть бути основою для використання штучних рифів у біологічному очищенні води у прибережній зоні моря. Запропоновано напрямки вдосконалення системи проведення екологічного моніторингу морських та лиманних акваторій, процес оптимізації організації процесу екологічного моніторингу.

Методологічною основою проведення моніторингу довкілля загалом і акваторій поверхневих водних об'єктів зокрема є дистанційне зондування, спостереження за станом екосистем за допомогою аерофото- та космічних знімків. *Ключові слова:* лиман, моніторинг, штучний риф, гідробіонти, біорізноманіття, оздоровлення екосистем.

Artificial reefs as a tool for restoration of marine and estuary ecosystems. Hrubyi M., Trokhymenko H.

The formation of a biotic community on an artificial reef in the coastal waters of estuarine ecosystems was studied using the example of the Tyligul estuary. Colonization of the reef by hydrobionts is a typical ecological succession of the development of a complex biotic community. The features of the system for ensuring environmental monitoring of marine and estuarine water areas, the process of organizing the system for environmental monitoring of marine and estuarine water areas, the assessment of the effectiveness of environmental monitoring of marine and estuarine water areas, the theoretical and methodological foundations of the process of environmental monitoring and the foundations of the development of environmental monitoring as a field of scientific knowledge were studied. In addition, theoretical and methodological principles for improving the process of environmental monitoring of marine and estuarine water areas were determined. Ecological calculations were carried out using the latest methods and computer technologies for processing statistical material. The most appropriate constructions of artificial reefs for their installation in the coastal areas of the Tyligul estuary were considered. Based on the analysis, it was found that after 2–3 years, species diversity can increase on an artificial reef, the biomass of hydrobionts and the reef biocenosis becomes a powerful biofilter that participates in the process of self-purification of the environment. The results obtained on the functioning of the reef biocenosis can be the basis for the use of artificial reefs in biological water purification in the coastal zone of the sea. Directions for improving the system of environmental monitoring of marine and estuarine water areas, the process of optimizing the organization of the environmental monitoring process are proposed.

The methodological basis for monitoring the environment in general and surface water areas in particular is remote sensing, monitoring the state of ecosystems using aerial and space images. *Key words:* estuary, monitoring, artificial reef, hydrobionts, biodiversity, ecosystem rehabilitation.

Постановка проблеми. Однією з основних завдань під час проведення екологічного моніторингу морських прибережних екосистем, поряд з оцінкою та прогнозом їх стану, є біоремедіація порушених біоценозів. Це стосується в першу чергу добіотичних співтовариств, схильних до впливу антропогенного фактора.

В екологічній реконструкції з метою оптимізації процесу розвитку та їх стійкості особливо потребують бентосні угруповання як найбільш уразливі при забрудненні прибережних вод [1].

Актуальність дослідження. У прибережних морських екосистемах основними первинними продуцентами органічної речовини є бурі, червоні та

зелені багатоклітинні водорості, що забезпечують бентосне співтовариство органічною речовиною, оскільки частка фітопланктону у виробництві продукції прибережної зони моря нижче [2]. Водорості донних фітоценозів у процесі трансформації сонячної енергії вилучають із середовища та акумулюють багато хімічних елементів, включаючи багато ксенобіотиків, та беруть участь у біологічному очищенні води [3].

Штучні рифи успішно застосовуються вже понад 2000 років як у морському, так і в прісноводному аматорському рибальстві, а також для створення рибальських місць. По-друге, штучні рифи за рахунок численного біорізноманіття підвищують здатність моря (водойми) самовідновлюватися, долати забруднення.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. У даній роботі розглядається питання побудови ресурсно-орієнтованих сценаріїв природокористування в лиманних екосистемах, на основі балансу між водоспоживанням та регенерацією. Концепція системного аналізу використовується для розробки інтегрованої моделі природокористування, метою якої є підтримання нормальних умов для відтворення водних ресурсів.

Основна увага в цих дослідженнях приділяється простим у реалізації методам створення комп'ютерних моделей еколого-економічних систем, що дозволяють прогнозувати сценарії розвитку процесів при різних варіантах господарського використання природних ресурсів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Штучний риф – це створена людиною прісноводна або морська бентосна структура [4]. Як правило, будується в районах із загальним невиразним дном для розвитку морського життя, він може бути призначений для боротьби з ерозією, захисту прибережних територій, блокування проходу суден, блокування використання тралових сіток, [5] підтримки відновлення рифів, покращення аквакультури, або покращити підводне плавання та серфінг. Перші штучні рифи були побудовані персами та римлянами.

Можливий штучний риф будується з об'єктів, які були призначені для інших цілей [6], таких як затоплення нафтових вишок (через програму «Вишки до рифів»), затоплення кораблів або шляхом розміщення уламків чи будівельного сміття. Уламки кораблів можуть перетворитися на штучні рифи, якщо вони збережені на морському дні. Звичайний штучний риф використовує такі матеріали, як бетон, який можна формувати в спеціальні форми (наприклад, рифові кулі). Зелені штучні рифи містять поновлювані та органічні матеріали, такі як рослини, волокна та черепашки, щоб покращити стійкість і зменшити споживання енергії, забруднення та викиди парникових газів. У деяких випадках штучні рифи були розроблені як витвори мистецтва.

Штучні рифи зазвичай створюють тверді поверхні, де прикріплюються водорості та безхребетні, такі як вусоногі моллюски, корали та устриці, а також місця, де можуть ховатися риби різного розміру. Накопичення прикріплених морських мешканців, у свою чергу, забезпечує складні структури та їжу для зграй риб [7].

Екологічний вплив штучного рифу залежить від багатьох факторів, у тому числі від місця його розташування, способу його споруди, віку та типів задіяних видів. Хоча штучні рифи сприяють росту коралів, це змінює екосистему, оскільки відносно зростання для різних видів не завжди однакове. Дослідження виявили, що макроводорості, групи ціанобактерій і корали, які швидко ростуть, ростуть у штучних рифах з іншою швидкістю, ніж у природних рифах [8].

Проводяться значні дослідження методів будівництва та впливу штучних рифів. Багато матеріалів, які використовувалися на початку, тепер вважаються небажаними.

Огляд літератури показав, що близько половини вивчених рифів досягли своїх цілей. Довгострокове планування та постійне управління були визначені як важливі фактори успіху. Нещодавній аналіз рифів у всьому світі між 1990 і 2020 роками прийшов до висновку, що штучні рифи можуть бути корисними інструментами для відновлення морських екосистем, якщо вони стратегічно розроблені відповідно до свого конкретного розташування та потреб у ресурсах [9].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Штучні рифові споруди мають різноманітне цільове використання, починаючи від захисту, покращення та відновлення морських екосистем до підтримки людської діяльності, як-от риболовля, рекреаційне дайвінг і серфінг. Штучні рифи можна використовувати як інструменти активного відновлення для пом'якшення шкоди навколишньому середовищу та втрати середовища існування, відновлення деградованих екосистем, таких як ліси водоростей і коралові рифи, а також сприяння біорізноманіттю [10].

Конструкція та конструкція штучного рифу можуть сильно відрізнятися залежно від його запропонованого місця розташування та передбачуваних цілей. Риф, призначений для однієї мети, може виявитися непридатним для іншої. Ранні спроби створити штучні рифи часто зазнавали невдачі або, в кращому випадку, давали неоднозначні результати. Останні огляди робіт за 1990–2020 роки свідчать про те, що правильно створений штучний риф, розроблений відповідно до цільової екосистеми, може бути корисним як інструмент для відновлення морських екосистем. Рецензенти закликають до кращого порівняння штучних і природних рифів до/після та до контролю, посиленого моніторингу рифів протя-

гом їхнього життя та уваги до просторової орієнтації, складності та форми рифового субстрату, серед іншого [11].

Новизна. У контексті досліджень методів для поліпшення біологічного стану Тилігульського лиману вирізняється підхід, який передбачає використання «зелених рифів». Ці конструкції характеризуються виключно природним походженням матеріалів. На даному етапі «зелені рифи» представлені мішками, що наповнені оболонками від устриць. Використовуваний для створення мішків джгутовий канат також є природного походження.

Тилігульський лиман як і більшість лиманів Північного Причорномор'я традиційно відчуває значний антропогенний вплив. Останнім часом, внаслідок прийнятих обмежувальних заходів щодо купання в Чорному морі, цей вплив істотно зріс. Хоча самоочищення лиману може відбуватися за рахунок молюсків-фільтраторів, піщано-мулиста структура дна лиману є непридатною для їхнього розповсюдження та розмноження [12]. Враховуючи ці фактори, стає очевидною потреба в імплементації твердих субстратів – штучних рифів – з метою підтримки біорізноманіття, стимуляції популяцій молюсків-фільтраторів та поліпшення якості води у Тилігульському лимані. У рамках реалізації напрямку поліпшення екологічного стану Тилігульського лиману рекомендується встановлення штучних рифів [13].

Методологічне або загальнонаукове значення.

Одним із варіантів, що масово використовуються для поліпшення стану гідроєкосистем у країнах Європи та Америки є **рифові кулі**. Це штучні структури, які служать захистом для молюсків та інших морських організмів, надаючи їм безпечне середовище для життя та розмноження.

Ці конструкції рекомендовані двома авторитетними міжнародними організаціями, що спеціалізуються на відновленні природних водних екосистем:

– **Міжнародна асоціація «Альянс природного відновлення устриць» (The Native Oyster Restoration Alliance, NORA).** Асоціація NORA працює над захистом і природним відновленням Європейської устриці (*Ostrea edulis*), що є аборигеною для Чорного моря, та її історичних оселищ;

– **Фундація рифових куль (Reef Ball Foundation).** Ця організація запатентувала конструкцію рифових куль і отримала низку екологічних нагород за її впровадження у різних регіонах світу.

Виклад основного матеріалу. Рифові кулі вже успішно встановлено в 62 країнах світу, що підтверджує їхню ефективність та надійність використання (рис. 1) [14].

Ці конструкції виготовляються з цементу, за спеціальним запатентованим рецептом із використанням мікрокремнезему (силікатного пилу). Цей склад забезпечує рівень pH, аналогічний до pH морської води, гарантуючи сумісність з морським середовищем та підвищуючи привабливість конструкцій для колонізуючих організмів. Враховуючи ці чинники, рифові кулі можна вважати конструктивним рішенням для підтримки біорізноманіття та забезпечення ефективного самоочищення Тилігульського лиману [15].

Зважаючи на значний вплив військових дій на морські екосистеми внаслідок війни росії проти України, розробка та впровадження ефективних методів екологічного моніторингу є надзвичайно важливою для відновлення та збереження природного середовища.

На рис. 2 наведено супутникові знімки акваторій лиманів під час їх «цвітіння». Знімки було оброблено за допомогою інструменту *Ulyssys Water Quality Viewer* (осад та вміст хлорофілу у воді) *EO Browser*.

З рисунку видно ділянки «цвітіння», які спостерігались 23 червня 2023 року, в Дніпро-Бузькому лимані та Березанському лимані, а також Чорному морі. Евтрофікаовані ділянки ймовірно були пов'я-



Рис. 1. Карта встановлення рифових куль

зані з потраплянням в воду значної кількості органічних речовин після підризу ГЕС.

Для порівняння наведено знімки, які ідентифікують стан Куяльницького та Хаджибейського лиману Одеської області (рис. 2е), але для цих акваторій зазвичай така картина «цвітіння» характерна. На рис. 2г, д, а також на рис. 3 (4.09.23) наведено евтрофіковані ділянки Тилігульського лиману, що ймовірно пов'язано зі спекотною та сухою погодою, але в цілому не типово для Тилігульського лиману. В цей період на даних ділянках також спостерігався мор риби [16].

Для збереження та відновлення природного стану Березанського та Дніпро-Бузького лиманів та покращення стану евтрофікованих ділянок Тилігульського лиману необхідно впроваджувати комплексні заходи з моніторингу забруднення, впровадження екологічно чистих технологій та стратегій управління водними ресурсами. Одним із таких заходів може бути встановлення штучних рифів. Рифові кулі є ефективними інструментами для заохочення природних процесів самоочищення, стимулюючи розвиток молюсків-фільтраторів та інших морських організмів.

Досвід встановлення штучних рифів був протестований в акваторії Чорного моря поблизу Кінбурнської коси і виявився успішним. За перші шість місяців, після встановлення «зеленого рифу», було зафіксовано появу личинок чорноморської мідії та подальшу колонізацію об'єкта колонією цього

виду. За результатами моніторингу, було виявлено, що новостворений біоценоз відзначався зростанням чисельності двох видів чорноморських крабів, п'яти видів бичків, молоді камбали та глоси, а також трьох видів креветок та інших видів риб та молюсків. Отже, дані свідчать про високий потенціал використання «зелених рифів» для забезпечення біорізноманіття та підтримки процесу самоочищення лиманних акваторій Миколаївщини [17].

При цьому важливо встановити моніторингову систему для постійного контролю за станом рифів та екосистеми в цілому. Це дозволить вчасно виявляти будь-які зміни та реагувати на них, щоб забезпечити успішну імплементацію та ефективність проєкту збереження Тилігульського, Березанського та Дніпро-Бузького лиманів.

У контексті досліджень методів для поліпшення біологічного стану Тилігульського лиману вирізняється підхід, який передбачає використання «зелених рифів». Ці конструкції характеризуються виключно природним походженням матеріалів. На даному етапі «зелені рифи» представлені мішками, що наповнені оболонками від устриць. Використовуваний для створення мішків джгутовий канат також є природного походження (рис. 4).

Крім того, результат наростання біомаси фітопланктону в результаті встановлення штучних рифів наведено на рис. 6.

Отже, динаміка заростання знову підтверджує високий потенціал використання «зелених рифів»

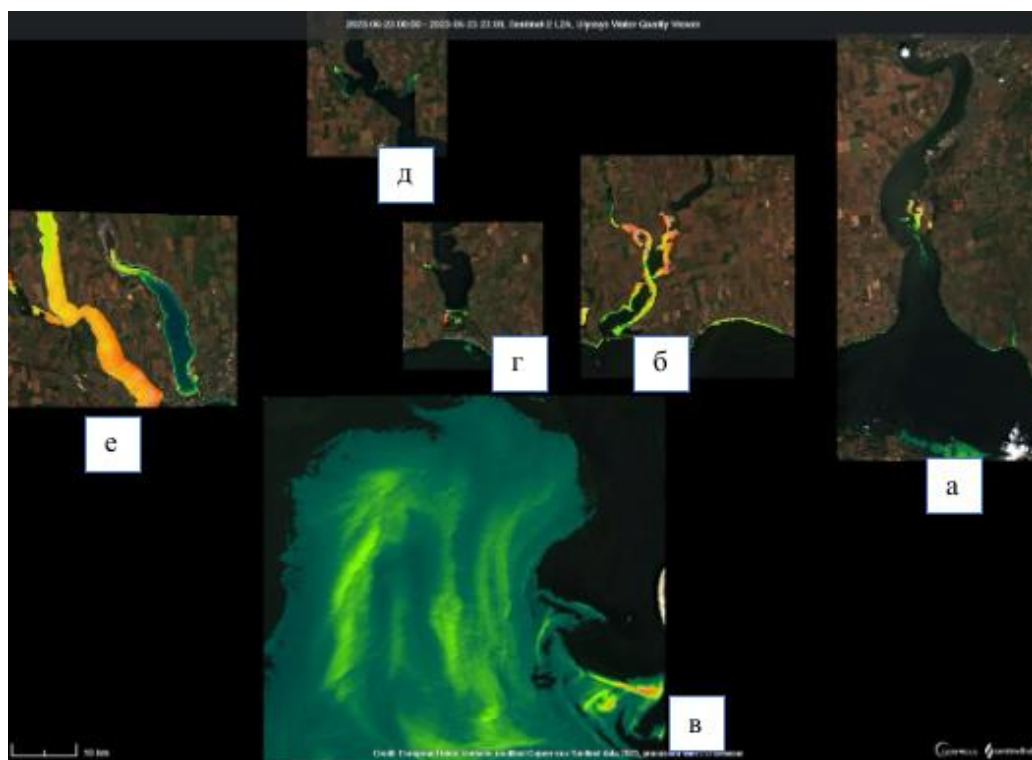


Рис. 2. Евтрофіковані ділянки акваторій, 23.06.23: а – Дніпро-Бузький лиман, б – Березанський лиман, в – Чорне море, г, д – Тилігульський лиман, е – Куяльницький та Хаджибейський лиман

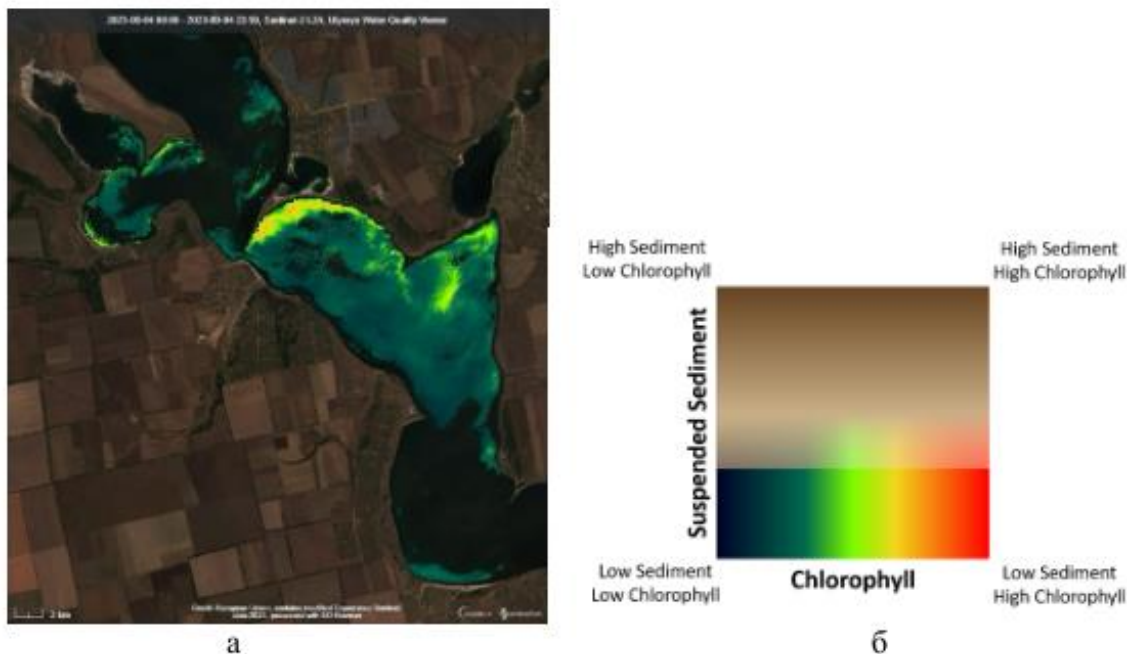


Рис. 3. Евтрофікована ділянка Тилігульського лиману, 4 вересня 2023 року, б – шкала, яка показує вміст хлорофілу та зважених речовин за кольором.



Рис. 4. «Зелений риф» під час встановлення

для забезпечення біорізноманіття Тилігульського лиману, а також підвищення можливостей до самоочищення.

Вплив на формування обростання макробо-бентосу також визначається фізико-хімічними властивостями твердих субстратів. Так, шорсткість субстратів впливає на їх адсорбційні властивості, міцність прикріплення личинок донних безхребетних, а їх хімічний вплив може стимулювати або інгібувати розвиток гідробіонтів. На ряду з твер-

дими субстратами природного походження – вапняком, гранітом, формування угруповання обростання тісно пов'язано з площею доступної поверхні штучного матеріалу – бетону. Значна частка видів макрозообростання у своєму розвитку має планктонну стадію, тож формування даного угруповання залежить і від особливостей просторового розподілу личинок, їх виживання в період планктонного життя, а також від успішного їх осідання на субстрат та подальшого метаморфозу [18].



Рис. 5. «Зелений риф» через рік

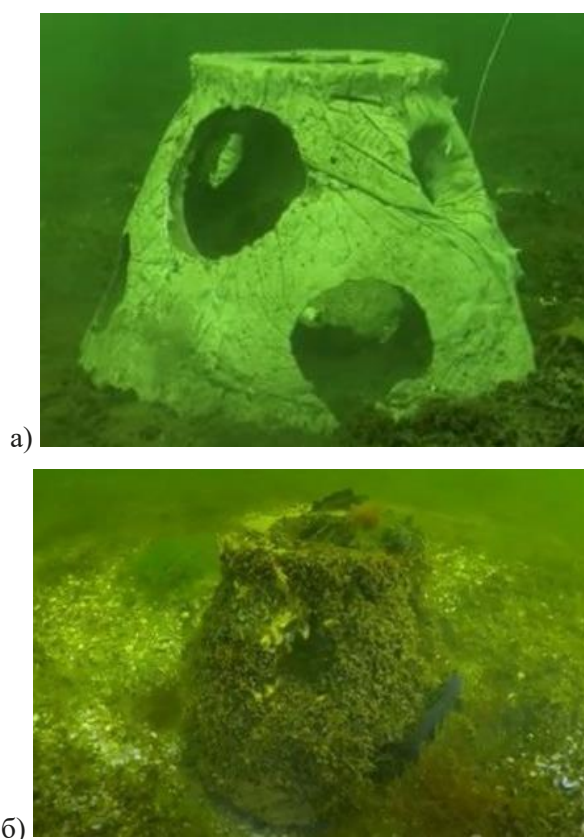


Рис. 6. Динаміка заростання штучних рифів протягом 2022–2023 років: а) зразу після встановлення; б) через 10 місяців після встановлення

Математична структура хіміко-біологічного блоку моделі евтрофікації вод побудована на основі синтезу відомих моделей якості вод (RCA-

HydroQual, 2004; Cerco and Cole – CE-QUAL-ICM, 1995, Ambrose at all – WASP5, 1993) [19].

Хіміко-біологічний блок містить опис динаміки в локальній точці простору наступних екологічних змінних: біомаса фітопланктону (B_{ph}), сталі детритна і розчинена фракції органічного фосфору (P_{prop} , P_{rdop}), лабільні детритна і розчинена фракції органічного фосфору (I_{prop} , I_{dop}), розчинений мінеральний фосфор (P_{dip}) – фосфати $P-PO_4$, стійкі детритна і розчинена фракції органічного азоту (N_{tron} , N_{rdon}), лабільні детритна і розчинена фракції органічного азоту (N_{lron} , N_{ldon}), амонійний азот $N-NH_4$ (N_{nh4}), нітратний (+ нітритний) азот $N-NO_3$ (N_{no3}), стійкі детритна і розчинена фракції вуглецевого біохімічного споживання кисню (BOD_{trc} , BOD_{rdc}) – кисневого еквіваленту органічного вуглецю, лабільні детритна і розчинена фракції вуглецевого біохімічного споживання кисню (BOD_{lpc} , BOD_{ldc}), розчинений кисень (O_2).

Діаграма зв'язків між компонентами хіміко-біологічного блоку моделі евтрофікації наведена на рис. 7 [19].

Біомаса фітопланктону B_{ph} , $mgC \cdot dm^{-3}$.

$$\frac{dB_{ph}}{dt} = [G_p - k_{pr}(T) - k_{grz}(T)] \times B_{ph} \quad (1)$$

де t – час, доб; T – температура води, $^{\circ}C$;

G_p – питома швидкість росту, $доб^{-1}$;

k_{pr} – питома швидкість метаболізму (дихання), $доб^{-1}$;

k_{grz} – питома швидкість споживання зоопланктоном і істотної смертності фітопланктону, $доб^{-1}$, які записуються як функціональні залежності:

$$G_p = G_p^{max} \times G_{pT}(T) \times G_{pl}(I) \times G_{pNP}(N_{min}, P_{min}) \quad (2)$$

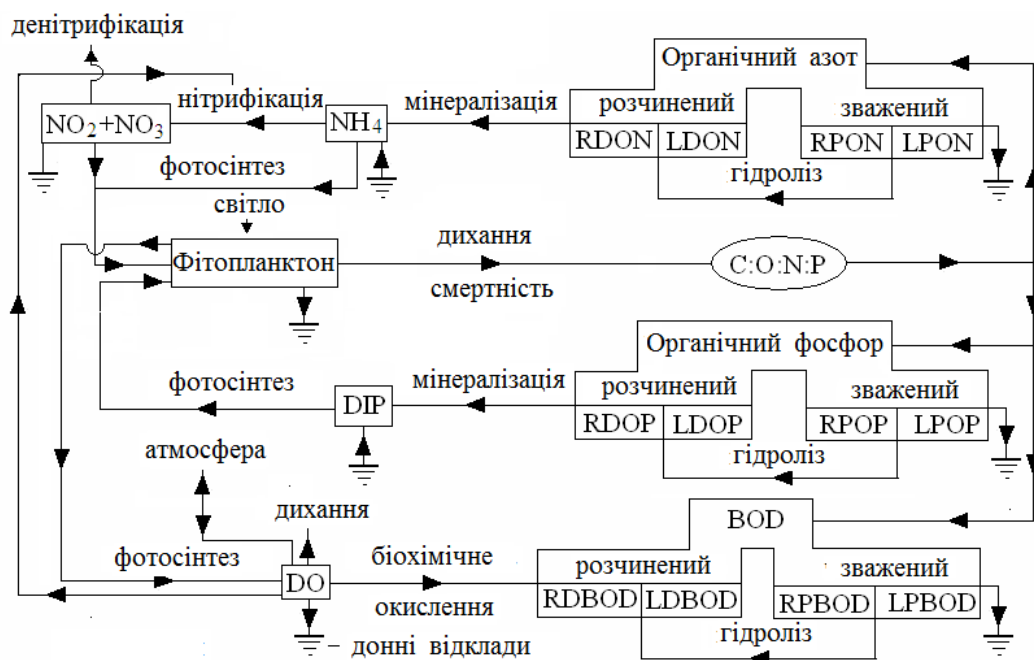


Рис. 7. Структурна діаграма хіміко-біологічного блоку моделі евтрофікації вод

$$G_{pl}(I) = \frac{2.72 f_d}{\alpha \Delta z} (\exp(R_1) - \exp(R_2)) \quad (2a)$$

$$R_1 = -\frac{I_0}{I_{opt}} \exp(-\alpha(z_s + \Delta z)), R_2 = -\frac{I_0}{I_{opt}} \exp(-\alpha z_s)$$

$$G_{pNP}(N_{min}, P_{min}) = \min\left\{\frac{N_{min}}{K_{phn} + N_{min}}, \frac{P_{min}}{K_{phn} + P_{min}}\right\} \quad (2b)$$

$$G_{pT}(T) = \begin{cases} e^{-\zeta_1(T-T_m)^2} & \text{при } T \leq T_m \\ e^{-\zeta_2(T_m-T)^2} & \text{при } T > T_m \end{cases} \quad (2в)$$

$$k_{pr}(T) = r_g G_p + r_b \theta_{pr}^{(T-20)} \quad (3)$$

$$k_{grz}(T) = k_{grz}(20^\circ \text{C}) \theta_{grz}^{(T-20)} \quad (4)$$

де $G_p^{\max}$ – максимальна питома швидкість росту фітопланктону, доб^{-1} ;

I_0 – середній за світловий день потік ФАР, який проникає через поверхню моря, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$;

I_{opt} – оптимальна для фотосинтезу опроміненість, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$;

f_d – доля світлового дня у добі ($0 \leq f_d \leq 1$);

I_z – опроміненість на глибині z , $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$;

α – інтегральний коефіцієнт послаблення інтенсивності ФАР з глибиною, м^{-1} ;

K_{phn} , K_{php} – сталі напівнасичення швидкості процесу утилізації фітопланктоном мінеральних форм азоту і фосфору, $\text{мг} \cdot \text{Н} \cdot \text{дм}^{-3}$ та $\text{мг} \cdot \text{Р} \cdot \text{дм}^{-3}$, відповідно;

T_m – оптимальна для росту водоростей температура води, $^\circ \text{C}$;

ζ_1 , ζ_2 – коефіцієнти, які визначають характер впливу температури на ріст водоростей у діапазонах вище і нижче T_m , $^\circ \text{C}^{-2}$;

r_g – доля продукції водоростей, яка витрачається на енергетичне забезпечення фотосинтезу, доб^{-1} ;

r_b – питома швидкість основного метаболізму водоростей при температурі 20°C , доб^{-1} ;

θ_{pr} – коефіцієнт впливу температури на швидкість метаболізму;

$k_{grz}(20)$ – питома швидкість виїдання і загибелі фітопланктону при температурі 20°C , доб^{-1} ;

θ_{grz} – коефіцієнт впливу температури на швидкість споживання і смертності водоростей;

z_s – відстань від поверхні води до верхньої межі розрахункового шару води, м;

Δz – товщина шару води, м;

N_{min} – розчинений мінеральний азот (DIN);

P_{min} – розчинений мінеральний фосфор (DIP).

Стійкий органічний фосфор детриту (RPOP) $\text{мг} \cdot \text{Р} \cdot \text{дм}^{-3}$ [20]

$$\frac{dP_{rpop}}{dt} = \alpha_{pc} f_{rpop} (k_{pr}(T) + k_{grz}(T)) B_{ph} - k_{rdp} \theta_{rdp}^{(T-20)} P_{pop} \frac{B_{ph}}{K_B + B_{ph}} \quad (5)$$

де

α_{pc} – співвідношення між фосфором і вуглецем в органічній речовині, $\text{мг} \cdot \text{Р} \cdot \text{мг} \cdot \text{C}^{-1}$;

f_{rpop} – частка RPOP у метаболічних виділеннях водоростей, залишках відмерлих і спожитих водоростей;

k_{rdp} – питома швидкість гідролізу RPOP при температурі води 20°C , доб^{-1} ;

θ_{rdp} – температурний коефіцієнт для процесу гідролізу *RPOP*;

K_B – стала напівнасичення, яка визначає лімітуючий вплив наявної біомаси фітопланктону на регенерацію мінеральних сполук фосфору і азоту, мгС·дм⁻³.

Лабільний органічний фосфор детриту (LPOP)

P_{lpop} , мгР·дм⁻³,

$$\frac{dP_{lpop}}{dt} = \alpha_{pc} f_{lpop} (k_{pr}(T) + k_{grz}(T)) B_{ph} - k_{ldp} \theta_{ldp}^{(T-20)} P_{lpop} \frac{B_{ph}}{K_B + B_{ph}} \quad (6)$$

де

f_{lpop} – частка *LPOP* у метаболічних виділеннях водоростей, залишках відмерлих і спожитих водоростей;

k_{ldp} – питома швидкість гідролізу лабільної фракції органічного фосфору детриту *LPOP* при температурі води 20 °С, доб⁻¹;

θ_{ldp} – температурний коефіцієнт для процесу гідролізу *LPOP*.

Стійкий розчинений органічний фосфор (RDOP)

P_{rdop} , мгР·дм⁻³,

$$\frac{dP_{rdop}}{dt} = \alpha_{pc} f_{rdop} (k_{pr}(T) + k_{grz}(T)) B_{ph} - k_{rdp} \theta_{rdp}^{(T-20)} P_{rdop} \frac{B_{ph}}{K_B + B_{ph}} \quad (7)$$

де f_{rdop} – частка *RDOP* у метаболічних виділеннях водоростей, залишках відмерлих і спожитих водоростей;

k_{mrp} – питома швидкість мінералізації стійкої фракції розчиненого органічного фосфору *RDOP* при температурі води 20 °С, доб⁻¹;

θ_{mrp} – температурний коефіцієнт [21].

Для калібрування моделі евтрофікації будуть використані дані гідрохімічних та гідробіологічних спостережень, проведених у Тилігульському лимані. Змодельовавши процес евтрофікації без використання штучних рифів та за їх присутності, зможемо простежити як буде змінюватись стан Тилігульського лиману та його придатність для розвитку зоопланктону.

Збір даних щодо динаміки росту зоопланктону проводився шляхом обліків тварин на досліджуваних площах (ДП), передбачувано придатних для встановлення штучних рифів. Кожна ДП складалася з п'яти пасток (0,5-літрові скляні пляшки), розташованих на відстані 10 м одна від одної. Над пастками був встановлений дах, щоб запобігти потраплянню води в пастки. Тестові ділянки були влаштовані для спостереження за тим, чи залежить просторовий розподіл тварин від ефекту екотону.

Головні висновки. Для забезпечення більшої стабільності гідроекосистеми Тилігульського лиману, збереження і примноження біорізноманіття у зв'язку з експоненційним зростанням рівня антропогенного навантаження буде доцільним використання штучних рифів у формі куль. У подальшому планується науковий експеримент зі встановлення дослідних куль малого діаметру для виявлення швидкості обростання та дослідження видового складу організмів.

Перспективи використання результатів дослідження. Представлене дослідження може в майбутньому бути використане при розробці пропозицій щодо ефективної модернізації систем маркетингового забезпечення промислових підприємств. А також узагальненні та систематизації основних аспектів модернізації систем маркетингового забезпечення промислових підприємств, питанням яких в науковій літературі приділяється недостатньо уваги.

Література

1. Моніторинг довкілля : підручник / Боголюбов В. М. та ін.; за ред. В. М. Боголюбова і Т. А. Сафранова. Херсон: Гринь Д. С., 2011. 529 с.
2. Прилади і методи дослідження стану довкілля : навч. посіб. / Л. С. Старикович, К. П. Дудок, Н. М. Любас. Львів : ЛНУ ім. І. Франка, 2014. 195 с.
3. Сучасні інформаційні технології екологічного моніторингу Чорного моря / Довгий С.О. та ін.; за ред. С.О. Довгого. Київ: Інформаційні технології, 2010. 260 с.
4. Мартін В. Інфраструктура та довкілля. Річний огляд навколишнього середовища та ресурсів. Львів, 2007. С. 349–373.
5. Нові рішення для повернення природи в міський океан. Річний огляд морської науки / Айрольді Л. та ін. Київ, 2017. С. 445–477.
6. Мацура Б. Вплив структурних модифікацій середовища проживання в прибережних помірних системах на поповнення риби: систематичний огляд. Харків: Екологічні докази, 2019. С. 14.
7. Бейн М. Штучні рифи: огляд їх дизайну, застосування, управління та ефективності». Київ: Управління океаном і узбережжям, 2001. С. 241–259.
8. Воробйова Л.В., Кулакова І.І., Бондаренко А.С., Портянко В.В. Контактні зони Чорного моря: мейофауна літоконтура північно-західного шельфу: монографія. Одеса, 2019. 196 с.
9. Alexandrov B.G. Management possibilities of marine coastal waters quality on Odessa Bay example. *Management and conservation of the northern-western Black Sea coast* (sci. publ. proceed. of the EUCC Inter. Symp., Odessa, Ukraine, 1996). Odessa : ASTROPRINT, 1998. P. 7–14.
10. Artificial Reefs in the Black Sea. *Training Reference Book*, 2015. 12 p.
11. Baine M. Artificial reefs: a review of their design, application, management and performance. *Ocean Coast. Manag.* 2001. 44. P. 241–259.

12. Тимченко В.М. Еколого-гідрологічні дослідження водойм Північно-Західного Причорномор'я. Київ, 1990. 240 с.
13. Успішні штучні рифи залежать від правильного контексту через складні соціально-біо-економічні взаємодії / Каплан Д. та ін. Київ: Наукові доповіді, 2021. С. 11.
14. Alexandrov B.G. Management possibilities of marine coastal waters quality on Odessa Bay example. *Management and conservation of the northern-western Black Sea coast* (sci. publ. proceed, of the EUCC Inter. Symp., Odessa, Ukraine, 1996). Odessa : ASTROPRINT, 1998. P. 7–14.
15. Baine M. Artificial reefs: a review of their design, application, management and performance. *Ocean Coast. Manag.* 2001. 44. P. 241–259.
16. Тучковенко Ю.С., Кушнір Д.В., Лобода Н.С. Оценка влияния условий водообмена с морем на изменчивость уровня и солёности воды в Тилигульском лимане. *Український гідрометеорол. журнал.* 2015. № 16. С. 232–241.
17. Fabi G., Scarcella G., Spagnolo A., Bortone S., Charbonnel E., Goutayer J., Gachon C. Practical Guidelines for the Use of Artificial Reefs in the Mediterranean and the Black Sea. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2015. 84 p.
18. Визначення біотехнологічних показників для проектування і розміщення екопозитивних конструкцій в морських екосистемах України : метод. реком. / С. В. Стадніченко та ін. Херсон: Олді-Плюс, 2021. 70 с.
19. Математичне моделювання систем і процесів / Павленко П.М., Філоненко С.Ф., Чередніков О.М., Трейтяк В.В. Київ: НАУ, 2017. 392 с.
20. Павленко П.М. Основи математичного моделювання систем і процесів: навч. посіб. Київ: Книжкове вид-во НАУ, 2013. 201 с.
21. Чуйко Г.П., Дворник О.В., Яремчук О.М. Математичне моделювання систем і процесів: навч. посіб. Миколаїв: Вид-во ЧДУ імені Петра Могили, 2015. 244 с.