

ВПЛИВ ФУНКЦІОНУВАННЯ ФІТОПЕРИФІТОНУ НА МОРСЬКЕ СЕРЕДОВИЩЕ В ЕКОСИСТЕМАХ РІЗНОГО ЕКОЛОГІЧНОГО СТАТУСУ

Мінічева Г.Г. – д.б.н., с.н.с.

ДУ «Інститут морської біології НАН України»
minicheva@ukr.net

Калашнік К.С. – к.б.н., н.с.

ДУ «Інститут морської біології НАН України»
kalashnik.eka@gmail.com

Маринець Г.В. – м.н.с.

ДУ «Інститут морської біології НАН України»
samoylenko_anna@ukr.net

У роботі розглянуто вплив функціонування фітоперифітону на зміну якості водного середовища в чорноморських прибережних акваторіях із різними категоріями екологічних статус-класів. На основі результатів багаторічних досліджень фітообростання твердих субстратів в умовах різних категорій екологічних статусів – Задовільний (Moderate) – Одеське узбережжя і Поганий (Poor) – авандельта р. Дунаю, представлені особливості його розвитку і можливості зміни якості водного середовища.

Виявлена сезонна динаміка структурно-функціональних показників фітообростання (біомаси, питомої поверхні, продукції, виділення кисню, зв'язування азоту і фосфору) у водоймах із різним екологічним станом. Показано, що розміщення екопозитивних конструкцій у прибережних зонах моря з екологічною категорією Поганий у кілька разів інтенсивніше буде впливати на якість морського середовища порівняно з категорією Задовільний за рахунок більш високої інтенсивності функціонування рослинних угруповань.

Встановлено, що в акваторіях зі статус-класом Задовільний переважають макрофіти з відділів *Chlorophyta* і *Rhodophyta*, в акваторії з нижчим статус-класом Поганий – види з відділів *Chlorophyta* і *Cyanobacteria*, що свідчить про підвищену трофічність водойми.

За домінуванням видів у водному тілі з екологічним статусом Задовільний виділені чотири асоціації макрофітів і мікроепіфітів, зростання яких приурочено до різних глибин – 0–3,0 м, 4,0–6,0 м, 7,0–9,0 м, 10,0–11,0 м. Для розвитку угруповань макрофітів і мікроепіфітону оптимальними є глибини від 0 до 3 м, на яких спостерігаються найбільші значення індексів поверхні, продукції біомаси, зв'язування азоту і фосфору. У разі збільшення глибини середня екологічна активність едификаторів асоціацій макрофітобентосу знижується з 30,79 до 24,52 м²·кг⁻¹.

Ключові слова: фітоперифітон, екологічний статус-клас, структурно-функціональні показники, екопозитивні конструкції.

Вступ

Угруповання макро- і мікрофітів, які розвиваються на твердих субстратах у морських екосистемах, виконують первинну автотрофну функцію, в результаті якої синтезується органічна речовина у вигляді рослинної маси, а у водне середовище виділяється кисень (O₂) та поглинаються розчинені поживні сполуки азоту (N) та фосфору (P). Таким чином, рослинність виступає біологічним об'єктом, життєдіяльність якого суттєво змінює хімічний склад морського середовища та впливає на трофічний статус екосистеми. Існує і зворотний зв'язок у системі «рослинність – якість водного середовища»: на інтенсивність функціонування рослинних угруповань у прямій залежності впливає трофічний статус екосистеми (концентрація розчиненої та завислої органічної речовини). Первинна рослинна біомаса, яка синтезується внаслідок фотосинтезу, згодом розкладається та збільшує трофічний статус морського середовища, викликаючи вторинне евтрофування. Проблема збільшення рівня евтрофування морських прибережних екосистем за рахунок розвитку та розкладу макрофітів в останні десятиріччя існує майже для всіх європейських морів (Schramm 1999). Можливий шлях запобігання вторинному евтрофуванню і непогіршенню екологічного стану прибережних морських екосистем внаслідок розкладу рослинної маси – це масштабна культивування макрофітів, яка

вань у прямій залежності впливає трофічний статус екосистеми (концентрація розчиненої та завислої органічної речовини). Первинна рослинна біомаса, яка синтезується внаслідок фотосинтезу, згодом розкладається та збільшує трофічний статус морського середовища, викликаючи вторинне евтрофування. Проблема збільшення рівня евтрофування морських прибережних екосистем за рахунок розвитку та розкладу макрофітів в останні десятиріччя існує майже для всіх європейських морів (Schramm 1999). Можливий шлях запобігання вторинному евтрофуванню і непогіршенню екологічного стану прибережних морських екосистем внаслідок розкладу рослинної маси – це масштабна культивування макрофітів, яка

передбачає вилучення біомаси, за рахунок чого вирішується проблема евтрофування (Fei 2004). Таким чином, природний життєвий цикл фітоперифітону може виступати причиною як погіршення, так і відновлення екологічного стану водойм. Своєю чергою керованість автотрофним процесом і можливість управління рослинною біомасою можливі за наявності прогностичних закономірностей зв'язку між структурно-функціональною організацією рослинних угруповань і екологічним статусом морської екосистеми.

Сучасна методологія оцінки екологічного статусу перехідних і прибережних морських зон керується положеннями, прийнятими європейськими водними директивами, – Водною Рамковою Директивою (WFD, 2000/60/EC) і Морською Стратегією (MSFD, 2008/56/EC), кінцевим завданням яких є поліпшення екологічного стану водних об'єктів Європи. Вимоги директив передбачають узагальнену оцінку екологічного стану водних об'єктів шляхом визначення п'яти категорій екологічного статус-класу – Відмінний (High), Добрий (Good), Задовільний (Moderate), Поганий (Poor) і Дуже поганий (Bad). За стандартами європейських директив занурена водна рослинність (макро- і мікрофітобентос) є екологічним якісним елементом, за станом якого можна оцінювати екологічний статус-клас перехідних, прибережних та шельфових зон. За індикаторами макрофітобентосу і мікроефітону був визначений сучасний екологічний стан водойм північно-західної частини Чорного моря і проведено їх ранжування (Minicheva 2013; Мінічева та ін. 2015; Kalashnik 2018).

Таким чином, угруповання обростання можна розглядати як біологічний інструмент управління якістю водного середовища, рівня евтрофування та екологічного статус-класу. Однак інтенсивність роботи цього інструменту, своєю чергою, залежить від екологічних умов, в яких розвиваються рослинні угруповання. В зв'язку з цим важливо мати кількісну оцінку результатів функціонування фітообростання в екосистемах з різним рівнем первинно-продукційного процесу, який своєю чергою відображає їхній трофічний рівень.

Управління впливом життєдіяльності рослинних угруповань на морське середовище можливо здійснювати методом контрольованого розвитку фітоугруповань певної структури та інтенсивності функціонування. При цьому необхідно враховувати, що основні функції рослинних угруповань змінюються не тільки від трофічного статусу екосистеми, але також від сезону року, міжрічних умов, глибини зростання, експозиції, а також низки інших чинників, які визначають первинно-продукційний процес (Мінічева і др. 1998; Мильчакова і др. 2002; Мінічева і др. 2011; Chang et al. 2006; Choi et al. 2019).

Розвиток фітоугруповань на контрольованих штучних поверхнях дозволяє управляти якістю морського середовища, отримувати корисну рослину біомасу, підвищувати екологічний статус прибережних екосистем. Найбільш відомим способом управління якістю прибережних вод є занурені конструкції – штучні рифи, які являють собою затоплені конструкції, розміщені на морському дні для імітації деяких функцій природних субстратів. Штучні рифи функціонують як частина природної екосистеми, не завдаючи шкоди водному середовищу (FAO 2015). Розміщення штучних споруд для підтримки рибальства та аквакультури широко використовувалося протягом тривалого часу, але тепер розвиваються й інші можливості, такі як відновлення морського середовища, стале управління природними ресурсами, наукові експерименти, а також залучення туристів (Artificial Reefs... 2015). Використання штучних рифів для поліпшення екологічного стану морського середовища, наприклад, використання їх для подолання наслідків евтрофікації і зниження якості води, є відносно новим застосуванням (Artificial Reefs... 2015; Tsiamis et al. 2020).

Натепер стоїть питання проектування та розміщення біопозитивних конструкцій у морських акваторіях для підтримання в них оптимального екологічного режиму (Александров 2008; Александров і др. 2001; Мінічева 1998; Ohno 1993; FAO 2015). Питання ефективності зміни якості морського середовища внаслідок функціонування рослинного обростання є ключовим для вирішення на інженерному рівні питання покращення екологічного стану прибережних морських екосистем методом розташування штучних рифів.

Завдання цієї роботи полягало у виявленні закономірностей впливу функціонування макро- і мікроформ фітообростання на якість морського середовища в екосистемах з різним екологічним статус-класом, а отже, і з різним рівнем евтрофування.

Матеріал та методи досліджень

Для порівняння впливу життєдіяльності угруповань фітообростання твердих субстратів на якість морського середовища у водоймах із різним екологічним станом були вибрані дві чорноморські акваторії, які суттєво відрізняються рівнем первинно-продукційного процесу: авандельта р. Дунай і Одеське узбережжя. Вибрані водні тіла за морфофункціональними індикаторами водної рослинності мають різні категорії екологічного статус-класу: Поганий для авандельти р. Дунай та Задовільний для Одеської затоки (Minicheva 2013; Мінічева та ін. 2015; Калашнік 2019).

Основним біотопом розвитку фітоперифітону в умовах авандельти р. Дунай є портові, навігаційні та інші гідротехнічні споруди, розміщені в аквато-

ріях антропогенного використання. Поверхні гідротехнічних споруд та навігаційних буїв, що мають постійні місця розташування, використовувались як біологічні моніторингові станції для оцінки просторової неоднорідності, сезонної й міжрічної динаміки макрофітобентосу, який формується в акваторіях судноплавного використання (Маринець 2010).

Для дослідження угруповань фітообростання Одеського узбережжя був вибраний полігон «Біостанція» – акваторія міського пляжу, яка розташована біля Гідробіологічної станції Одеського національного університету імені І.І. Мечникова. Дослідницький полігон являє собою закриту морську акваторію (ківш), відокремлену від моря гідротехнічними спорудами – траверсами і хвилеломом. На глибинах від 1 до 12 м є природний твердий субстрат, на якому розвивається фітообростання.

Загальна схема відбору проб на полігоні «Біостанція» і в авандельті р. Дунай наведена на рис. 1.

Для визначення сезонної динаміки впливу макрофітобентосу на якість морського середовища був проаналізований багаторічний матеріал, відібраний у період 2006–2019 рр. в авандельті Дунаю (242 проби) і на полігоні «Біостанція» (684 проби). Розглядалися усереднені значення показників рослинних угруповань, що розвивалися в горизонті 0–0,5 м.

Для визначення особливостей міжрічних коливань інтенсивності функціонування був використаний порівняльний матеріал морфологічної організації макрофітобентосу, відібраний на полігоні «Біостанція» і в авандельті Дунаю в липні 2012 і 2020 рр. Вибрані роки відрізнялися температурою води, в березні 2012 р. вона була найнижчою за

десятиріччя (2,99°C), в 2020 р. – найвищою (6,7°C), що вплинуло на розвиток водоростей. На полігоні «Біостанція» в 2012 р. з перпендикулярного берегу розрізу (трансекти) в межах глибин 2–11 м було відібрано 30 кількісних проб фітоперифітону. В 2020 р. була повторно проведена зйомка на тій самій трансекті, на якій було відібрано 15 кількісних проб фітоперифітону. В авандельті Дунаю в 2012 і 2020 рр. проби фітоперифітону відбиралися з поверхні навігаційних буїв на стандартних горизонтах 0–0,5 м.

Для аналізу угруповань фітообростання (макрофітів і мікроепіфітону) на різних глибинах на полігоні зі статусом Задовільний був використаний матеріал, зібраний з описаного вище розрізу на полігоні «Біостанція» в липні 2020 р. (15 кількісних проб).

У проведених дослідженнях використовувалися класичні методи обліку донної рослинності (Еременко 1980; Гусяков 1980). Окрім стандартних методів оцінки фітобентосу, використовувався комплекс морфологічних показників оцінки водної рослинності (Мінічева 1989). Питома поверхня ($S/W, m^2 \cdot kg^{-1}$) та індекс поверхні (ІП, од.) макрофітів визначалися на основі методів розрахунку параметрів поверхні багатоклітинних водоростей (Мінічева і др. 2003) і мікроепіфітону (Калашнік 2013). Показники впливу угруповань фітобентосу на якість водного середовища (продукція, виділення кисню, зв'язування азоту і фосфору в рослинній біомасі) розраховувалися за моделлю формування структурно-функціональної організації фітобентосу залежно від інтенсивності протікання в екосистемі первинно-продукційного процесу (Мінічева 1998). Статистичну обробку отриманих результатів проводили загальноприйнятими методами (Лакин 1990).

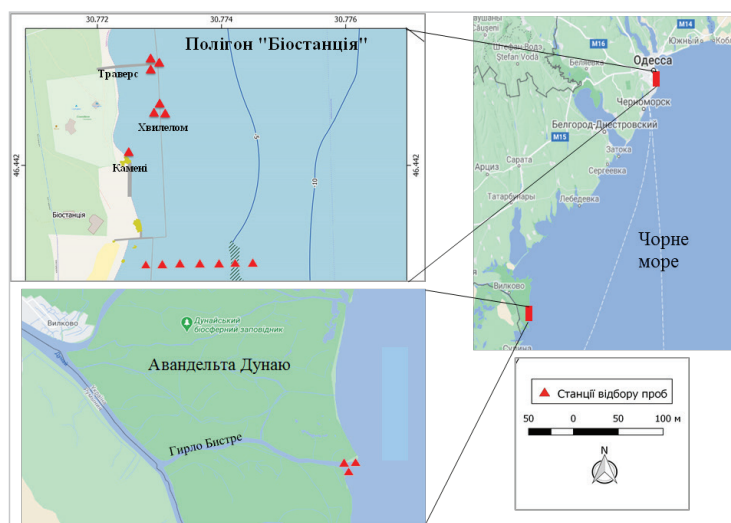


Рис. 1. Схема відбору проб угруповань фітообростання в авандельті р. Дунай (екологічний статус-клас Поганий) і на полігоні «Біостанція» (екологічний статус-клас Задовільний)

Номенклатура водоростей наведена за міжнародним електронним каталогом AlgaeBase (Guiry and Guiry 2021), імена авторів таксонів – у стандартному скороченні (The International... 2020).

Результати та обговорення

1. Особливості сезонної динаміки розвитку перифітону у водних тілах з категоріями Задовільний та Поганий

Інтенсивність функціонування рослинних угруповань та відповідно екологічний стан водних тіл залежить не тільки від антропогенного впливу, а і від сезонних змін абіотичних факторів, які впливають на первинно-продукційний процес. Природна весняна інтенсифікація автотрофного процесу призводить до підвищення евтрофікації і зниження екологічного статусу акваторії. Дослідження сезонної динаміки рослинної біомаси фітообростання у водних тілах з екологічними статус-класами Задовільний та Поганий дозволило порівняти особливості його розвитку у водних тілах з різним екологічним станом.

Екологічна активність макрофітобентосу вища в акваторії з екологічним статусом Поганий, що видно зі середньорічних значень сезонної динаміки питомої поверхні (S/W) (рис. 2).

У водному тілі з гіршим екологічним станом спостерігається більш висока інтенсивність автотрофного процесу, що пов'язано з евтрофуванням водойми. Значення S/W макрофітобентосу у водному тілі з екологічним статус-класом Поганий перевищує значення питомої поверхні у водному тілі зі статусом Задовільний від 2 (весняні місяці) до 14 разів (літні місяці).

Сезонна динаміка виділення кисню макрофітобентосом у водних тілах із різним екологічним станом подібна до сезонної динаміки питомої поверхні (рис. 3а). Оскільки у водоймах з низь-

ким екологічним статусом розвиваються водорості з високою екологічною активністю, яким притаманні швидкі обмінні процеси, то виділення кисню макрофітами в більш евтрофованій акваторії значно вище, ніж в акваторії з екологічним статусом Задовільний.

Рівень евтрофування водних тіл позначається на продукції органічної речовини, яку утворює рослинне обростання у водному тілі зі статусом Поганий, її значення подібні або перевищують у 1,5–2,5 раза значення виділення продукції у водоймі зі статусом Задовільний (рис. 3б). Інтенсивність зв'язування в рослинній біомасі сполуки азоту та фосфору на полігоні зі статусом Поганий у середньому в 1,4 раза вища, ніж в акваторіях зі статусом Задовільний.

Розміщення екопозитивних конструкцій у прибережних зонах моря з екологічною категорією Поганий у середньому в кілька разів інтенсивніше буде впливати на якість морського середовища порівняно з категорією Задовільний за рахунок більш високої інтенсивності функціонування рослинних угруповань.

2. Особливості міжрічних коливань розвитку перифітону у водних тілах з категоріями Задовільний та Поганий

На розвиток фітообростання впливає температурно-світловий режим та інтенсивність фотосинтетичної радіації, які визначаються особливостями погодних умов кожного року. Позаяк в умовах північно-західної частини Чорного моря коливання температури води в різні роки може значно відрізнятися, це впливає на початок інтенсивної вегетації водоростей і їхній подальший розвиток. Дослідження структурно-функціональних показників фітообростання у водних тілах із статус-класами Задовіль-

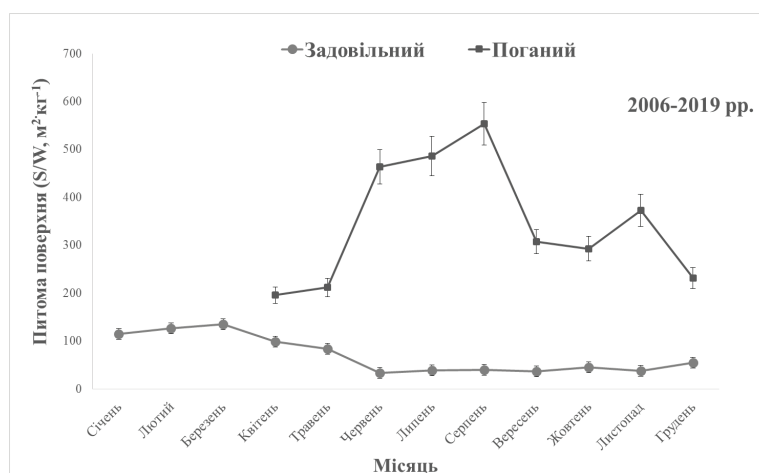


Рис. 2. Середньорічна сезонна динаміка за період 2006–2019 рр. питомої поверхні (S/W) макрофітобентосу у водних тілах з екологічними статус-класами Задовільний і Поганий

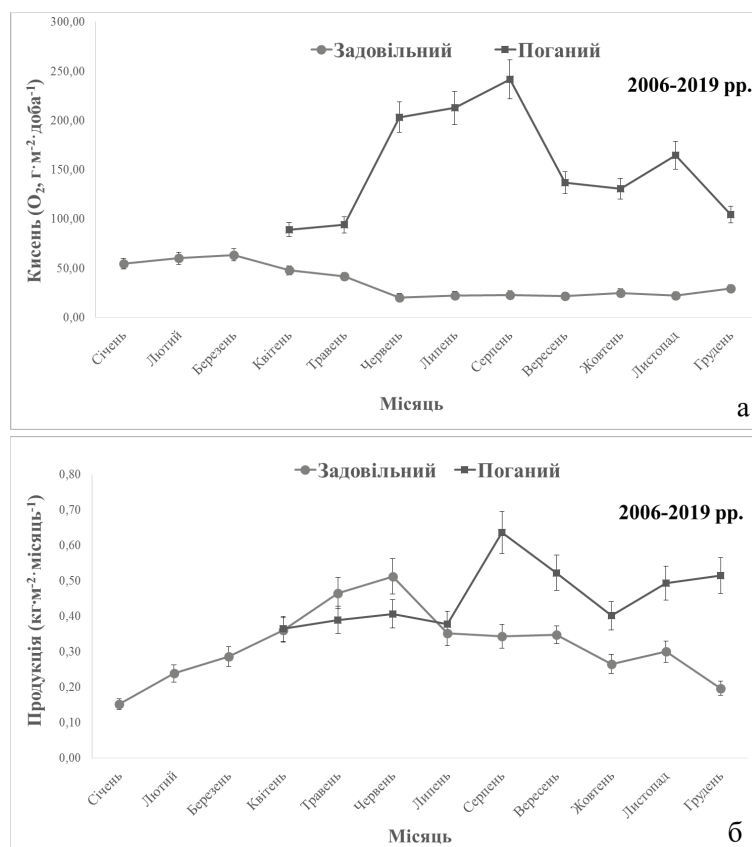


Рис. 3. Багаторічна сезонна динаміка виділення кисню (а), продукції (б) в акваторіях з екологічними статус-класами Задовільний і Поганий

ний (полігон «Біостанція») та Поганий (авандельта Дунаю) у 2012 і 2020 рр., які відрізнялися температурою води у березні (2,99°C і 6,70°C відповідно), дало можливість провести порівняння особливостей його розвитку у водних тілах з різними екологічними статус-класами.

У 2012 р. в акваторії з екологічним статус-класом Задовільний (полігон «Біостанція») було виявлено 14 видів макрофітів, в акваторії з екологічним статусом Поганий (авандельта Дунаю) – 9 видів. У 2020 р. у двох порівнювальних водних тілах виявлена майже однакова кількість видів – 11 і 12 відповідно. На полігоні «Біостанція» зі статус-класом Задовільний переважають види з відділів *Chlorophyta* і *Rhodophyta*, а в авандельті Дунаю з нижчим статус-класом – види з відділів *Chlorophyta* і *Cyanobacteria*.

Як видно з таблиці 1, в акваторії з екологічним статус-класом Поганий у 2012 і 2020 рр. переважають види з високими значеннями питомої поверхні (S/W) *Chaetomorpha gracilis*, *Ulothrix tenuissima*, *Stigeoclonium tenue*, *Kamptonema laetevirens*, *Phormidium nigroviride* та ін., що свідчить про підвищену тропність водойми. У 2012 р. у літній сезон відзначалися види, характерні для зимово-весняного

періоду, і ціанобактерії не набули масового розвитку, що пояснюється особливостями розвитку водної рослинності в цьому році, за більш низьких температур. У 2020 році в обох водних тілах зустрічалися види, які є типовими для досліджуваних водойм у літній період.

Порівняння продукції макрофітобентосу в досліджуваних водних тілах показало, що у 2012 р. вона була вищою, ніж у 2020 р. (рис. 4а). У зв'язку з холодною весною на початку липня 2012 р. ще не відбулася остаточна зміна зимово-весняного комплексу макрофітів на літній, тому у флористичному складі були присутні зимні низькофункціональні види з крупними таломами, високою біомасою, що і підвищило показники продукції.

Виділення кисню макрофітами в досліджувані роки було вищим у водоймі зі статус-класом Поганий (рис. 4б), тому що в ній переважають нитчасті зелені і ціанобактерії з високими значеннями питомої поверхні, і, відповідно, більшою інтенсивністю автотрофного процесу.

Для досліджуваних водних тіл найбільша інтенсивність зв'язування азоту та фосфору в рослинній біомасі були зафіксовані в 2012 р. та становили 1,76 г·м⁻²·добу⁻¹ та 0,16 г·м⁻²·

Видовий склад угруповань макрофітобентосу на Одеському узбережжі
(екологічний статус-клас Задовільний) і в авандельті р. Дунай (екологічний статус-клас Поганий)
у 2012 та 2020 рр.

| № | Види | S/W (м ² кг ⁻¹) | «Біостанція» (екологічний статус-клас Задовільний) | | Авандельта р. Дунай (екологічний статус-клас Поганий) | |
|------------------------|---|--|--|-----------|--|-----------|
| | | | 2012 | 2020 | 2012 | 2020 |
| Chlorophyta | | | | | | |
| 1 | <i>Blidingia marginata</i> (J.Agardh) P.J.L.Dang. ex Bliding | 106,4±1,85 | - | - | - | + |
| 2 | <i>Bryopsis plumosa</i> (Huds.) C.Agardh | 33,06±3,75 | + | + | - | - |
| 3 | <i>Chaetomorpha capillaris</i> (Kütz.) Børgesen | 89,61±1,12 | - | - | + | + |
| 4 | <i>Chaetomorpha gracilis</i> Kütz. | 163,95±3,48 | - | - | + | + |
| 5 | <i>Chaetomorpha linum</i> (O. Mull) Kütz. | 15,35±0,56 | - | + | - | - |
| 6 | <i>Cladophora vagabunda</i> (L.) Van Hoek. | 53,93±2,0 | + | + | + | + |
| 7 | <i>Stigeoclonium tenue</i> (C.Agardh.) Kütz. | 552,63±27,92 | - | - | + | + |
| 8 | <i>Ulotrix implexa</i> (Kütz.) Kütz. | 326,40±5,11 | + | - | - | - |
| 9 | <i>Ulothrix tenuissima</i> Kütz. | 180,24±4,79 | - | - | + | - |
| 10 | <i>Ulva clathrata</i> (Roth) C. Agardh | 61,83±3,54 | + | - | - | - |
| 11 | <i>Ulva intestinalis</i> (Linnaeus) Nees | 35,15±1,04 | - | + | - | - |
| Rhodophyta | | | | | | |
| 1 | <i>Acrochaetium secundatum</i> (Lyngb.) Nägeli | 497,16±33,39 | + | + | + | + |
| 3 | <i>Bangia atropurpurea</i> (Mertens ex Roth) C.Agardh | 135,69±2,27 | - | - | - | + |
| 4 | <i>Callithamnion corymbosum</i> (J. E. Smith.) Lyngb. | 210,4±12,62 | - | + | - | - |
| 5 | <i>Carradoriella denudata</i> (Dillwyn) A.M.Savoie & G.W.Saunders | 46,86±2,31 | + | + | - | - |
| 6 | <i>Carradoriella elongata</i> (Huds.) Savoie & G.W.Saunders | 15,35±1,08 | - | + | - | - |
| 7 | <i>Ceramium siliquosum</i> var. <i>elegans</i> (Roth) G.Furnari | 25,64±1,66 | + | + | - | - |
| 8 | <i>Ceramium virgatum</i> Roth | 23,78±1,91 | + | + | - | - |
| 9 | <i>Lomentaria clavellosa</i> (Lightf. ex Turner) Gaillon | 11,16±0,89 | + | + | - | - |
| Phaeophyta | | | | | | |
| 1 | <i>Desmarestia viridis</i> (O. Müll.) J.V.Lamour. | 31,42±2,22 | + | - | - | - |
| 2 | <i>Ectocarpus siliculosus</i> (Dillwyn) Lyngb. | 152,78±15,33 | + | - | - | - |
| 3 | <i>Stilophora tenella</i> (Esper) P.C.Silva | 22,35±2,56 | + | - | - | - |
| Cyanobacteria | | | | | | |
| 1 | <i>Gloeocapsa</i> sp. | 1261,2±0 | - | - | - | + |
| 2 | <i>Kamptomena laetevirens</i> (H.M.Crouan & P.L.Crouan ex Gomont) Strunecký, Komárek & J.Šmarda | 977,16±110,22 | - | - | + | - |
| 3 | <i>Lyngbya semiplena</i> J.Agardh ex Gomont | 627,26±52,18 | - | - | - | + |
| 4 | <i>Microcoleus</i> sp. | 2717,67±0 | - | - | - | + |
| 5 | <i>Phormidium nigroviride</i> (Thwaites ex Gomont) Anagn. & Komárek | 531,97±15,79 | - | - | + | - |
| 6 | <i>Spirulina tenuissima</i> Kütz. | 872,23±21,51 | + | - | - | - |
| Bacillariophyta | | | | | | |
| 1 | <i>Berkeleya rutilans</i> (Trentep. ex Roth) Grunow | 180,78±7,95 | - | - | + | + |
| 2 | <i>Cymbella</i> sp. | 133,78±3,38 | + | - | - | - |
| Xanthophyta | | | | | | |
| 1 | <i>Vaucheria dichotoma</i> (Linnaeus) Martius | 85,53±1,91 | - | - | - | + |
| Всього: | | | 14 | 11 | 9 | 12 |

добу⁻¹ (у водному тілі зі статус-класом Поганий) й 1,27 г·м⁻²·добу⁻¹ та 0,12 г·м⁻²·добу⁻¹ (у водному тілі зі статус-класом Задовільний). У 2020 р. в обох водних тілах спостерігалися зменшення значень цих показників у 1,5–2 рази.

Вивчення міжрічної динаміки показників макрофітобентосу дає змогу виявити особливості його розвитку в роки, які відрізняються температурним режимом, що впливає на його функціонування у водних екосистемах різного екологічного стану.

3. Горизонтальні відмінності розвитку перифітону у прибережній екосистемі з категорією Задовільний

Глибина зростання визначає розвиток фітоперифітону, що позначається на його флористичному складі і структурно-функціональних показниках. Фітообростання складається із двох різнорозмірних компонентів – багатоклітинних макрофітів і одноклітинних епіфітів. Для визначення відмінностей функціонування складників фітоперифітону залежно від

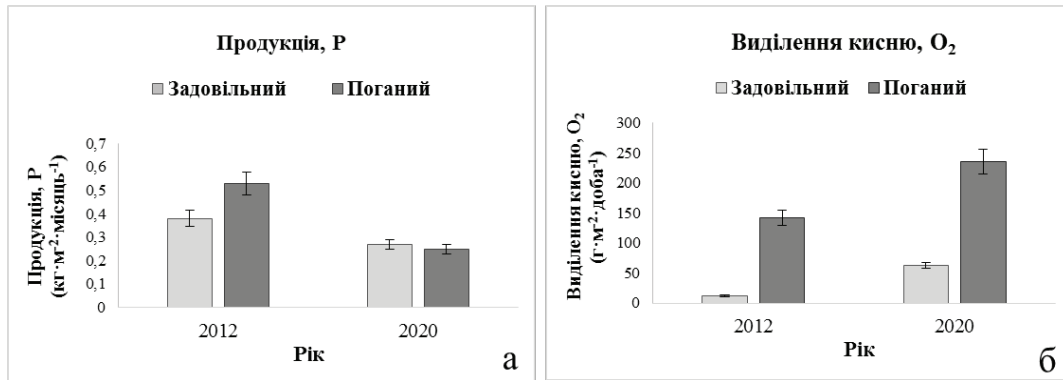


Рис. 4. Продукція (а) та виділення кисню (б) макрофітами у водних тілах з екологічними статус-класами Задовільний і Поганий

глибини зростання у водоймі з екологічним статусом Задовільний був проведений аналіз емпіричного матеріалу з метою виділення природних горизонтів розвитку рослинних асоціацій. За домінуванням видів були виділені чотири асоціації макрофітів і мікроепіфітів, зростання яких приурочено до різних глибин (рис. 5). Для зазначених асоціацій були розраховані індекси поверхні (ІП), за якими визначається інтенсивність автотрофного процесу.

Найбільші значення індексів поверхні угруповань макрофітобентосу і мікроепіфітону спостерігаються на глибині від 0 до 3 м, найменші відзначені на глибині 10–11 м. Зі зростанням глибини середня екологічна активність едіфікаторів асоціацій макрофітобентосу знижується з 30,79 до 24,52 м²·кг⁻¹. Для асоціацій мікроепіфітону не спостерігається зміна екологічної активності з глибиною.

Найбільш «ефективними» для розвитку угруповань макрофітобентосу і мікроепіфітів є глибини від 0 до 3 м, на яких відзначені найбільші величини продукції – 0,48 і 0,32 кг·м⁻²·місяць⁻¹ відповідно (рис. 6а). Виділення кисню макрофітами більше на глибинах від 4 м до 9 м, найменше – на глибинах 10–11 м. Для мікроепіфітів найменше виділення кисню зафіксовано на глибинах 0–3 м, на глибинах від 4 до 11 м не відзначено значних відмінностей у виділенні кисню мікрофітами (рис. 6б).

Зв'язування азоту і фосфору угрупованнями фітобентосу в акваторії з екологічним статусом Задовільний інтенсивніше протікає на глибинах 0–3 м, на яких зафіксовані найбільші значення (рис. 7а, б). На глибинах від 4 до 11 м спостерігалися зменшення значень цих показників у 2 рази.

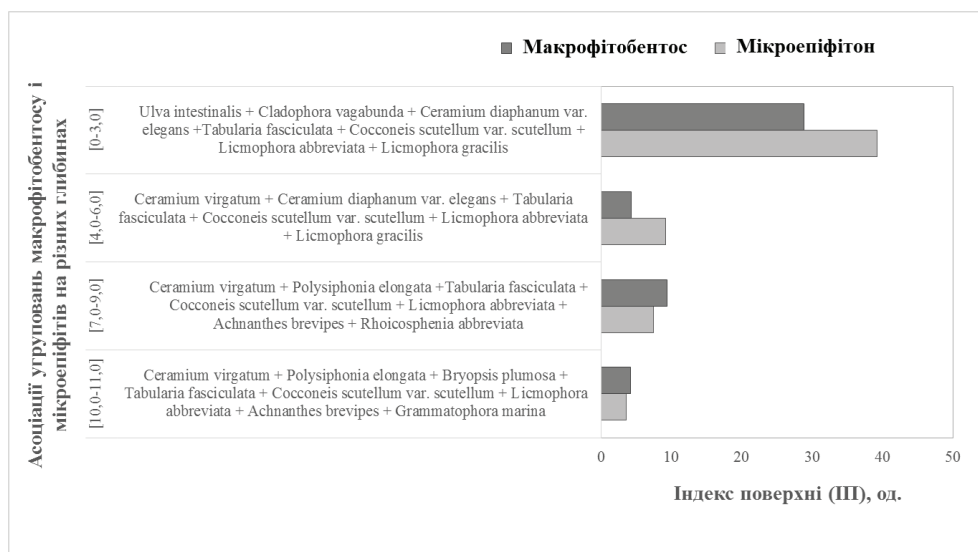


Рис. 5. Асоціації угруповань макрофітобентосу і мікроепіфітону різних глибин та значення їх індексів поверхні (ІП) у водному тілі з екологічним статусом Задовільний

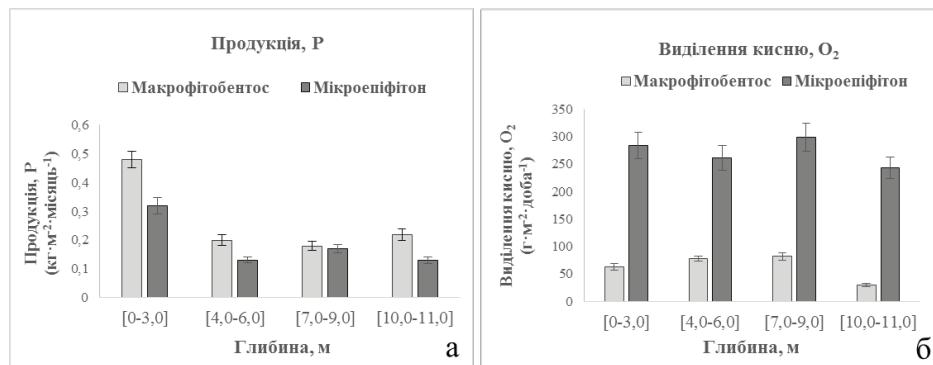


Рис. 6. Продукція (а), виділення кисню (б) угрупованнями макрофітобентосу і мікроепіфітону у водному тілі з екологічним статусом Задовільний залежно від глибини зростання

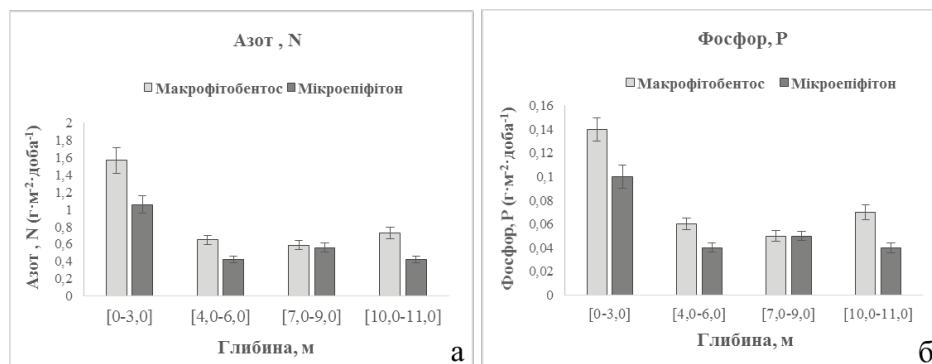


Рис. 7. Зв'язування азоту (а) і фосфору (б) угрупованнями макрофітобентосу і мікроепіфітону у водному тілі з екологічним статусом Задовільний залежно від глибини зростання

Висновки

Порівняння сезонної динаміки рослинного обростання, яке розвивається у водних тілах із різними екологічними статусами, показало, що продукція органічної речовини, а також інтенсивність зв'язування в рослинній біомасі сполуки азоту та фосфору на полігонах Чорноморського узбережжя зі статусом Поганий у середньому в 1,4 раза вища, ніж в акваторіях зі статусом Задовільний. Це означає, що використання екопозитивних конструкцій для відновлення якості морського середовища в екосистемах з проблемним екологічним станом є більш ефективним порівняно з екосистемами з добрими екологічними умовами.

Дослідження флористичного складу макрофітів виявило, що у водному тілі з екологічним статус-класом Поганий переважають нитчасті і тонкорозгалужені водорості з відділів *Chlorophyta* і *Cyanobacteria* з високими значеннями питомої поверхні ($S/W = 89,61-552,63 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$), а у водному тілі зі статус-класом Задовільний – види з відділів *Chlorophyta* і *Rhodophyta* з невисокими значеннями питомої поверхні ($S/W = 23,78-53,93 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$).

У умовах холодної весни 2012 р. у водних тілах різних статус-класів спостерігалися вищі показники продукції, зв'язування азоту і фосфору угрупованнями макрофітобентосу порівняно з 2020 р. Це пояснюється тим, що у структурі угруповань домінували крупні зимові форми водоростей із невеликими значеннями питомої поверхні. У більш теплого 2020 р. виділення кисню було вищим, ніж у 2012 р., що свідчить про більш високу інтенсивність первинно-продукційних процесів, яку забезпечували літні форми водоростей з високими коефіцієнтами питомої поверхні і тонко розгалуженими таломами.

На основі домінантної структури фітоценозів у водному тілі з екологічним статусом Задовільний виділено чотири природних горизонти розвитку фітобентосу: 0–3,0 м, 4,0–6,0 м, 7,0–9,0 м, 10,0–11,0 м. Для розвитку угруповань макрофітів і мікроепіфітону оптимальними є глибини від 0 до 3 м, на яких спостерігаються найбільші високі значення індексів поверхні. З глибиною середня екологічна активність едіфікаторів асоціацій макрофітобентосу знижується з 30,79 до 24,52 $\text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$. Для

асоціацій мікроепіфітону не спостерігається тенденція зміни екологічної активності з глибиною.

Моделний розрахунок функціональних показників угруповань макрофітобентосу і мікроепіфітону, які впливають на якість морського середовища, становили такі середні значення для полігону з екологічним статусом Задовільний: продукція біомаси – 0,270 і 0,096 г·м⁻²·місяць⁻¹; кількість виділення кисню – 63,04 і 234,68 г·м⁻²·добу⁻¹; інтенсивність зв'язування азоту в рослинній біомасі – 0,89 і 0,32 г·м⁻²·добу⁻¹; інтенсивність зв'язу-

вання фосфору в рослинній біомасі – 0,08 і 0,03 г·м⁻²·добу⁻¹ відповідно.

Встановлено, що найбільші значення продукції біомаси, зв'язування азоту і фосфору угрупованнями фітобентосу спостерігаються на глибинах 0–3 м. Виділення кисню макрофітами більше на глибинах від 4 м до 9 м, найменше – на глибинах 10–11 м. Ця інформація необхідна для вирішення оптимальної глибини розташування екопозитивних конструкцій залежно від цільових завдань.

Список використаних джерел

1. Александров Б.Г. Гидробиологические основы управления состоянием прибрежных экосистем Черного моря. Киев : Наукова Думка, 2008. 343 с.
2. Александров Б.Г., Миничева Г.Г., Стрикаленко Т.В. Экологические аспекты использования автопокрышек для создания искусственных рифов. *Биология моря*. 2001. № 2. С. 131–137.
3. Гусяков Н.Е. Микрофитобентос. *Руководство по методам биологического анализа морской воды и донных отложений* / под ред. А.В. Цыбань. Ленинград : Гидрометеиздат, 1980. С. 166–170.
4. Еременко Т.И. Макрофитобентос. *Руководство по методам биологического анализа морской воды и донных отложений* / под ред. А.В. Цыбань. Ленинград : Гидрометеиздат, 1980. С. 170–177.
5. Калашник Е.С. Принципы расчета индексов поверхности эпифитного компонента альгосистемы «базифит-эпифит». *Pontus Euxinus – 2013* : тезисы VIII Международной научно-практической конференции молодых ученых по проблемам водных экосистем (Севастополь, 1–4 октября 2013 г.). Севастополь, 2013. С. 67–69.
6. Калашнік К.С. Морфофункціональна організація альгосистеми «базифіт-епіфіт» північно-західної частини Чорного моря : автореф. дис. ... канд. біол. наук : 03.00.17. Одеса, 2019. 24 с.
7. Лакин Г.Ф. Биометрия : учебное пособие для биологических специальностей вузов, 4-е изд., перераб. и доп. Москва : Высшая школа, 1990. 352 с.
8. Маринець Г.В. Особливості морфофункціональної організації фітообростання авандельти Дунаю та Одеського узбережжя. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету ім. В. Гнатюка. Серія Біологія. Спец. випуск: Гідроекологія*. 2010. № 3 (44). С. 153–156.
9. Мильчакова Н.А., Неврова Е.Л., Евстигнеева И.К. Фитоперифитон на бетонных субстратах в Чёрном море (Украина). *Альгология*. 2002. Т. 12, № 1. С. 96–110.
10. Миничева Г.Г., Большаков В.Н., Хомова Е.С., Швець А.В. Закономерности формирования фитообрастания от ориентации подводных поверхностей. *Морской экологический журнал*. 2011. № 4. Т. X. С. 56–66.
11. Миничева Г.Г. Морфофункциональные основы формирования морского фитобентоса : автореф. дис. на соискание науч. степени д-ра биол. наук : 03.00.17. Севастополь, 1998. 32 с.
12. Миничева Г.Г. Показатели поверхности водорослей в структурно-функциональной оценке макрофитобентоса (на примере северо-западной части Чёрного моря) : дис. на соискание науч. степени канд. биол. наук : 03.02.01. Севастополь, 1989. 19 с.
13. Миничева Г.Г. Проблемы оценки и управления автотрофным процессом в береговых зонах эвтрофируемых экосистем. *Доклады НАН Украины*. 1998. № 12. С. 192–197.
14. Миничева Г.Г., Гусяков Н.Е., Ковтун О.А. Особенности формирования морского микро- и макроперифитона на твердых субстратах различного типа. *Гидробиологический журнал*. 1998. Т. 34, № 3. С. 61–67.
15. Миничева Г.Г., Зотов А.Б., Косенко М.Н. Методические рекомендации по определению морфофункциональных показателей одноклеточных и многоклеточных форм водной растительности. Одесса : ЦНТЕП ОНЮА, 2003. 32 с.
16. Мінічева Г.Г., Зотов А.Б., Большаков В.М., Калашнік К.С., Маринець Г.В., Швець Г. В. Автотрофні поверхні – інструмент фітоіндикації для моніторингу водних екосистем. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: Біологія*. 2015. № 3–4 (64). С. 470–473.
17. Artificial Reefs in the Black Sea. *Training Reference Book*, 2015. 12 p.
18. Chang G.C., Masao Ohno, Chul Hyun Sohn. Algal Succession on Different Substrata Covering the Artificial Iron Reef at Ikata in Shikoku, Japan. *Algae*. 2006. 21(3): 305–310.
19. Choi C.G., Jung S.W., Ahn J.K., Shimazaki Y., Kang I.J. A study on Marine Algal Succession and Community in Pyramid-shaped Artificial Reef. *Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University*. 2019. 64 (1). P. 9–99.
20. DIRECTIVE 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for the Community action in the field of water policy, 23 October 2000. (WFD, 2000/60/EC).

21. DIRECTIVE 2008/56/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for Community action in the field of marine environmental policy, 17 June 2008. (MSFD, 2008/56/EC).
22. FAO. Practical guidelines for the use of artificial reefs in the Mediterranean and the Black Sea / by Fabi G. et al. *Studies and Reviews. General Fisheries Commission for the Mediterranean*. 2015. No. 96. Rome, Italy. 74 p.
23. Fei Xiugeng. Solving the coastal eutrophication problem by large scale seaweed cultivation. *Hydrobiologia*. 2004. 512 (1). P. 145–151.
24. Guiry M.D., Guiry G.M. “AlgaeBase” World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. 2021. URL: <http://www.algaebase.org> (дата звернення: 22.07.2021).
25. Kalashnik E.S. Indices of the basiphyte–epiphyte algal system as indicators of the ecological status of marine coastal ecosystems. *International Journal on Algae (IJA)*. 2018. 20 (3). P. 265–276.
26. Masao Ohno. Succession of Seaweed Communities on Artificial Reefs in Ashizuri, Tosa Bay, Japan. *ALGAE*. 1993. 8 (2). P. 191–198.
27. Minicheva G.G. Use of the macrophytes morphofunctional parameters to assess ecological status class in accordance with the EU WFD. *Морський екологічний журнал*. 2013. Vol. XII, No. 3. P. 5–21.
28. Schramm W. Factors influencing seaweed responses to eutrophication: some results from EU-project EUMAC. *Journal of Applied Phycology*. 1999. 11. P. 69–78.
29. The International Plant Names Index (IPNI), 2017. URL: <http://www.ipni.org> (дата звернення: 22.02.2021).
30. Tsiamis K., Salomidil M., Gerakaris V., Mogg A.O.M., Porter E.S., Sayer M.D.J., Küpper F.C. Macroalgal vegetation on a north European artificial reef (LochLinnhe, Scotland): biodiversity, community types and role of abiotic factors. *Journal of Applied Phycology*. 2020. 32. P. 1353–1363.

References

1. Aleksandrov, B.G. (2008). *Gidrobiologicheskie osnovy upravlenija sostojaniem pribrezhnyh jekosistem Chernogo morja [Hydrobiological bases of management of the Black Sea coastal ecosystems]*. Kyiv: Naukova Dumka [in Russian].
2. Aleksandrov, B.G., Minicheva, G.G. & Strikalenko, T.V. (2001). *Jekologicheskie aspekty ispol'zovanija avtopokryshek dlja sozdanija iskusstvennyh rifov [Environmental aspects of the use of tires to create artificial reefs]*. *Biologija morja – Biology of the sea*, 2, 131–137 [in Russian].
3. Artificial Reefs in the Black Sea (2015). *Training Reference Book*.
4. Chang, G.C., Masao, Ohno & Chul Hyun Sohn (2006). Algal Succession on Different Substrata Covering the Artificial Iron Reef at Ikata in Shikoku, Japan. *Algae*. Volume, 3, 305–310.
5. Choi, C.G., Jung, S.W., Ahn, J.K., Shimasaki, Y. & Kang I.J. (2019). A study on Marine Algal Succession and Community in Pyramid-shaped Artificial Reef. *Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University*, 1, 95–99.
6. DIRECTIVE 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for the Community action in the field of water policy, 23 October 2000. (WFD, 2000/60/EC).
7. DIRECTIVE 2008/56/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for Community action in the field of marine environmental policy, 17 June 2008. (MSFD, 2008/56/EC).
8. Eremenko, T.I. (1980). Makrofitobentos [Macrophytobenthos]. *Rukovodstvo po metodam biologicheskogo analiza morskoi vody i donnykh otlozhenii – Guide to Methods for the Biological Analysis of Seawater and Bottom Sediments.* / A.V. Cibán (Ed.). Leningrad: Gidrometeoizdat [in Russian].
9. FAO (2015). Practical guidelines for the use of artificial reefs in the Mediterranean and the Black Sea / by Fabi G. et al. *Studies and Reviews. General Fisheries Commission for the Mediterranean*. Rome, Italy.
10. Fei Xiugeng (2004). Solving the coastal eutrophication problem by large scale seaweed cultivation. *Hydrobiologia*, 512 (1), 145–151.
11. Guiry, M.D. & Guiry, G.M. (2020). “AlgaeBase” World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. Retrieved from: <http://www.algaebase.org> (Last accessed: 22 February 2021).
12. Gusliakov, N.E. (1980). Mikrofitobentos [Microphytobenthos]. *Rukovodstvo po metodam biologicheskogo analiza morskoi vody i donnykh otlozhenii – Guide to Methods for the Biological Analysis of Seawater and Bottom Sediments.* / A.V. Cibán (Ed.). Leningrad: Gidrometeoizdat [in Russian].
13. Kalashnik, E.S. (2013). Printsipy rascheta indeksov poverkhnosti epifitnogo komponenta algosistemy “bazifit–epifit” [Principles of calculating the surface indices of the epiphytic component of the algal system “basiphyte–epiphyte”]. *VIII Mezhdunarodnaia nauchno-prakticheskaja konferencija molodykh uchenykh po problemam vodnykh ekosistem – VIII International Scientific and Practical Conference of Young Scientists on Problems of Aquatic Ecosystems*, pp. 67–69. Sevastopol [in Russian].
14. Kalashnik, E.S. (2018). Indices of the basiphyte–epiphyte algal system as indicators of the ecological status of marine coastal ecosystems. *International Journal on Algae (IJA)*, 3, 265–276.
15. Kalashnik, E.S. (2019). Morfofunktsionalna orhanizatsiia alhosistemy “bazyfit–epifit” pivnichnozakhidnoi chastyny Chornoho moria [Morphofunctional organization of the algal system “basiphyte–epiphyte” of the North-Western part of the Black Sea]. *Extended abstract of candidate’s thesis*. Odessa [in Ukrainian].

16. Lakin, G.F. (1990). *Biometriia: uchebnoe posobie [Biometrics: a tutorial]*. Moscow: Vysshiaia shkola, 352 p. [in Russian].
17. Marynets, H.V. (2010). Osoblyvosti morfofunktsionalnoi orhanizatsii fitoobrostannia avandely Dunaiu ta Odeskoho uzberezhzhia [Features of the morphofunctional organization of phyto-fouling of the Danube avandelta and the Odessa coast]. *Naukovi zapysky Ternopilskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. Serii: Biolohiia. – Scientific notes of Ternopil National Pedagogical. Volodymyr Hnatiuk University. Series: Biology*, 3, 153–156 [in Ukrainian].
18. Masao Ohno (1993). Succession of Seaweed Communities on Artificial Reefs in Ashizuri, Tosa Bay, Japan. *ALGAE*, 2, 191–198.
19. Milchakova, N.A., Nevrova, E.L. & Evstigneeva, I.K. (2002). Fitoperifiton na betonnykh substratakh v Chernom more (Ukraina) [Phytoperiphyton on concrete substrates in the Black Sea (Ukraine)]. *Algologiya – Algology*, 1, 96–110 [in Russian].
20. Minicheva, G.G. (2013). Use of the macrophytes morphofunctional parameters to asses ecological status class in accordance with the EU WFD. *Marine Ecological Journal*, 3, 5–21.
21. Minicheva, G.G. (1989). Pokazатели poverkhnosti vodoroslei v strukturno-funktsionalnoi otcenke makrofitobentosa (na primere severo-zapadnoi chasti Chernogo moria) [Indicators of the surface of algae in the structural and functional assessment of macrophytobenthos (on the example of the North-Western part of the Black Sea)]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Sevastopol [in Russian].
22. Minicheva, G.G. (1998). Problemy otcenki i upravleniia avtotrofnym protsessom v beregovykh zonakh evtrofiruemykh ekosistem [Problems of assessment and management of autotrophic process in coastal zones of eutrophied ecosystems]. *Doklady NAN Ukrainy – Reports of the NAS of Ukraine*, 12, 192–197.
23. Minicheva, G.G. (1998). Morfofunktsionalnye osnovy formirovaniia morskogo fitobentosa [Morpho-functional bases of the formation of marine phytobenthos]. *Extended abstract of Doctor's thesis*. Sevastopol [in Russian].
24. Minicheva, G.G., Bolshakov, V.N., Khomova, E.S. & Shvets, A.V. (2011). Zakonomernosti formirovaniia fitoobrastaniia ot orientatsii podvodnykh poverkhnostei [Regularities of the formation of phyto-fouling from the orientation of underwater surfaces]. *Morskoi ekologicheskii zhurnal – Marine Environmental Journal*, 4, 56–66 [in Russian].
25. Minicheva, G.G., Guslyakov, N.E. & Kovtun, O.A. (1998). Osobnosti formirovaniia morskogo mikro- i makroperifitona na tverdykh substratakh razlichnogo tipa [Features of the formation of marine micro- and macroperiphyton on solid substrates of various types]. *Gidrobiologicheskii zhurnal – Hydrobiological journal*, 3, 61–67 [in Russian].
26. Minicheva, G.G., Zotov, A.B. & Kosenko, M.N. (2003). Metodicheskie rekomendatsii po opredeleniiu morfofunktsionalnykh pokazatelei odnokletochnykh i mnogokletochnykh form vodnoi rastitelnosti [Methodical recommendations on the morpho-functional indexes define for unicellular and multicellular forms of aquatic vegetation]. Odessa: CNTEPI ONYUA [in Russian].
27. Minicheva, G.G., Zotov, A.B., Bolshakov, V.M., Kalashnik, K.S., Marynets, H.V. & Shvets, H.V. (2015). Avtotrofni poverkhni – instrument fitoindykatsii dlia monitorynhu vodnykh ekosystem. [Autotrophic surfaces are a phytoindication tool for monitoring aquatic ecosystems]. *Naukovi zapysky Ternopilskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. Serii: Biolohiia – Scientific notes of Ternopil National Pedagogical. Volodymyr Hnatiuk University. Series: Biology*, 3–4 (64), 470–473 [in Ukrainian].
28. Schramm, W. (1999). Factors influencing seaweed responses to eutrophication: some results from EU-project EUMAC. *Journal of Applied Phycology*, 11, 69–78.
29. The International Plant Names Index (IPNI) (2017). Retrieved from: <http://www.ipni.org> (Last accessed: 22.02.2021).
30. Tsiamis, K., Salomidi, M., Gerakaris, V., Mogg, A.O.M., Porter, E.S., Sayer, M.D.J. & Küpper, F. C. (2020). Macroalgal vegetation on a north European artificial reef (Loch Linnhe, Scotland): biodiversity, community types and role of abiotic factors. *Journal of Applied Phycology*, 32, 1353–1363.

IMPACT ON THE MARINE ENVIRONMENT OF PHYTOPERIFITON FUNCTIONING IN BLACK SEA ECOSYSTEMS OF DIFFERENT ECOLOGICAL STATUS

Minicheva G.G., Dr. Sc., Senior Scientist
Institute of Marine Biology of the NAS of Ukraine
minicheva@ukr.net

Kalashnik E.S., PhD, Research Scientist
Institute of Marine Biology of the NAS of Ukraine
kalashnik.eka@gmail.com

Marinets A.V., Junior Researcher
Institute of Marine Biology of the NAS of Ukraine
samoylenko_anna@ukr.net

The paper considers the influence of phytoperiphyton functioning on changes in the quality of the aquatic environment in the Black Sea coastal areas with different categories of ecological status class. According to the results of long-term studies of phytofouling of solid substrates under conditions of various categories of ecological state: Moderate – Odessa coast and Poor – delta of the Danube River, the features of its development and the possibility of changing the quality of the aquatic environment are presented.

The seasonal dynamics of the structural-functional indicators of phytofouling (biomass, specific surface area, production, oxygen evolution, nitrogen and phosphorus binding) in water bodies with different ecological state was revealed. It is shown that the placement of ecopositive structures in the coastal zones of the sea with the ecological status Poor will affect the quality of the marine environment several times more intensely than in the status Moderate, due to the higher intensity of the functioning of plant communities.

It was found that in the waters with the status class Moderate, macrophytes from the divisions Chlorophyta and Rhodophyta prevail, in the waters with a lower status Poor – species from the divisions Chlorophyta and Cyanobacteria, which indicates an increased trophicity of the water body.

According to the predominance of species in a water body with an ecological status of Moderate, four associations of macrophytes and micro-epiphytes are distinguished, the growth of which is confined to different depths – 0–3.0 m, 4.0–6.0 m, 7.0–8.0 m, 10.0–11.0 m. For the development of communities of macrophytes and microepiphyton, the optimal depths are from 0 to 3 m, at which the highest values of surface indices, production, biomass, nitrogen and phosphorus binding are observed. With increasing depth, the average ecological activity of edificators of macrophytobenthos associations decreases from 30.79 to 24.52 m²·kg⁻¹.

Key words: phytoperiphyton, ecological status class, structural-functional indicators, ecopositive constructions.