

ВИКОРИСТАННЯ ПІГМЕНТІВ ФІТОПЛАНКТОНУ ЩОДО ОЦІНЮВАННЯ СТУПЕНЮ ЕВТРОФУВАННЯ ВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ

Дмитрієва О.О., Цапко Н.С., Мельнік Л.В., Ємельянов С.П.

Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем»

вул. Бакуліна, 6, 61166, м. Харків

dmitrieva.olena@gmail.com, tsapko@niiep.kharkov.ua, melnik2017@meta.ua, yemelyanov.ce@gmail.com

Розглянуто та систематизовано наукові підходи та принципи дослідження процесів евтрофування складових навколишнього природного середовища. Одним із актуальних питань у створенні екологічної безпеки для здоров'я та життєдіяльності людини є запобігання та зменшення ступеня антропогенного евтрофування водних об'єктів, досягнення якого сприятиме оперативне оцінювання ступеню евтрофування. Найбільш доцільні такі обстеження виконувати методами дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) спільно з методами наземного контролю. Спільне використання цих методів сприятиме підвищенню точності і оперативності спостережень, а, отже, і підвищенню ефективності оперативних управлінських рішень в галузі природокористування, які приймаються на їх основі. Вміст хлорофілу в фітопланктоні можна вважати провідним, поряд з альгологічними показниками, оскільки він прямо характеризує інтенсивність розвитку й накопичення мікродоростей, тоді як гідрохімічні показники евтрофованості вод, такі як вміст біогенних елементів чи лабільної органічної речовини, або насиченості киснем є непрямими. Пропонується використання пігментів фітопланктону з метою визначення інтенсивності процесів евтрофування водних об'єктів. Ці пігменти надають ціанобактеріям характерний синьозелений колір, що використовується для виробництва харчового синього барвника. Це певною мірою детермінує існування досить високого ступеня дослідження методів екстракції, очищення та визначення фікоціаніну з водоростевої маси. наявність даних щодо вмісту цього маркера розвитку ціанобактерій дає реальну можливість прогнозування рівня розвитку «квітучої» біомаси ціанобактерій, у тому числі токсигенних видів, як чинника небезпечного впливу на здоров'я людини. Найбільш перспективним на сучасному етапі запропоновано визначення пігменту – фікоціаніну-маркер ціанобактерій. *Ключові слова:* евтрофування, ціанобактерії, фікоціанін

Use of phytoplankton pigments to assess the degree of eutrophication of water bodies. Dmitrieva O., Tsapko N., Melnik L., Emelyanov S.

The scientific approaches and principles of studying the processes of eutrophication of environmental components are considered and systematized. One of the most pressing issues in creating environmental safety for human health and life is the prevention and reduction of anthropogenic eutrophication of water bodies, which will be facilitated by prompt assessment of the degree of eutrophication. Such surveys are most expediently performed using remote sensing methods in conjunction with ground control methods. The joint use of these methods will help to improve the accuracy and efficiency of observations, and, consequently, increase the effectiveness of operational management decisions in the field of environmental management made on their basis. The chlorophyll content in phytoplankton can be considered the leading indicator, along with algological indicators, since it directly characterizes the intensity of microalgae development and accumulation, while hydrochemical indicators of water eutrophication, such as the content of nutrients or labile organic matter, or oxygen saturation, are indirect. It is proposed to use phytoplankton pigments to determine the intensity of eutrophication processes in water bodies. These pigments give cyanobacteria their characteristic blue-green color, which is used to produce food blue dye. To some extent, this determines the existence of a fairly high degree of research on methods of extraction, purification and determination of phycocyanin from algal mass. the availability of data on the content of this marker of cyanobacterial development provides a real opportunity to predict the level of development of "blooming" cyanobacterial biomass, including toxicogenic species, as a factor of dangerous impact on human health. The most promising at the present stage is the determination of the pigment phycocyanin as a marker of cyanobacteria. *Key words:* eutrophication, cyanobacteria, phycocyanin.

Постановка проблеми. Першочерговими завданнями державної екологічної політики України в забезпеченні сталого розвитку є створення безпеки життя і здоров'я людини, безпечного стану довкілля, доступу до якісної питної води і безпечних харчових продуктів, сприятливих умов для ведення господарської діяльності [1-2].

Здоров'я людини визнано основним критерієм ефективності функціонування усіх без винятку сфер господарської діяльності, а забезпечення населення

якісною і безпечною питною водою в належній кількості визнано основним завданням органів виконавчої влади.

Однією з поширених негативних властивостей водних об'єктів є їх антропогенне евтрофування, яке має значні негативні наслідки у соціальній, технологічній та економічній сферах життєдіяльності населення.

Процеси евтрофування складових навколишнього природного середовища внаслідок військових дій значно посилюються.

Актуальність дослідження. Значним антропогенним евтрофуванням було охоплено основні водні об'єкти різних регіонів України ще з середини ХХ сторіччя. «Цвітуть» водосховища Дніпра, середні та нижні ділянки басейну річки Дністер, Шацькі озера Українського Полісся, Придунайські озера Одеської області, високотрофне озеро Сасик у Причорномор'ї, «цвітінням» ціанобактерій була охоплена Північно-західна частина Чорного моря (особливо Одеська затока) та Азовське море.

Евтрофні водосховища Дніпра є джерелом питного водопостачання для 2/3 населення України. Еколого-соціальну (медичну) небезпеку являють собою токсини ціанобактерій, вміст яких виявлено у багатьох водних об'єктах дніпровського регіону. При дослідженні Київського, Канівського водосховищ, ставків та озер Києва та Київської області, р. Дніпра та його заток у 2009–2010 рр. закордонними екологами у цих водних об'єктах виявлена наявність токсинів ціанобактерій за методом ПЛР (а саме наявність генів, які кодуєть синтез мікроцистинів). Результати цих досліджень у 2009 р. були позитивними для 68%, а у 2010 р. – для 90% обстежених водних об'єктів України [3].

Напруженою екологічною ситуацією внаслідок евтрофування також характеризується низка озер Українського Придунав'я: оз. Кагул (при «цвітінні» домінує ціанобактерія *Aphanocapsa pulverea*), оз. Ялпуг (при «цвітінні» домінує ціанобактерія *Synechocystis salina*), оз. Катлабух (при «цвітінні» домінують ціанобактерії *Spirulina laxissima*, *Merismopedia minima*). Про інтенсивне евтрофування цих озер свідчать визначені рівні чисельності ціанобактерій у водному середовищі [4].

Через слабкий водообмін, стале надходження забруднених дунайських водних мас, активне накопичення азоту та фосфору створено сприятливі умови для щорічних «цвітінь» ціанобактерій в оз. Сасик, яке належить до високотрофних озер. За даними Татарбунарської райСЕС рівень захворюваності дихальних шляхів у мешканців зони оз. Сасик є критично високим порівняно до інших регіонів [5]; дію аерозолізованих токсинів слід обов'язково враховувати для оцінки небезпеки CyanoHABs, особливо для популяцій мешканців узбережжя та рекреаційних користувачів, коли інгаляційне надходження токсинів у вигляді аерозолів часто може виступати у якості вторинного (супутнього) впливу при первинній пероральній дії.

Яскравим прикладом наслідків потужного антропогенного тиску на водні об'єкти та розвитку евтрофування є низка екологічних криз водних екосистем, зокрема, майже повна деградація в кінці ХХ ст. Філофорного поля Зернова (ФПЗ) – унікального біоценозу червоної макроскопічної агароносною водорості *Phyllophora*, яка вегетувала на площі більше 10 тис. км². Через екологічну катастрофу внаслідок антропогенного евтрофування

було знищено 97% запасів філофори внаслідок чого відбулося значне скорочення видового різноманіття унікальної бентосної фауни, пов'язаної з мешканням філофори. Через відсутність сировини було ліквідовано завод з виробництва природного агар-агару (еколого-соціальна складова сталого розвитку).

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Для еколого-соціального (еколого-медичного) оцінювання водних об'єктів, схильних до «цвітіння», необхідне проведення спеціального контролю рівня їх евтрофування. Хронічне надходження ціанотоксинів до організму людини навіть у малих кількостях при питному водоспоживанні потребує подальших ретельних спостережень, адже їм притаманна канцерогенна властивість, а мікроцистин–LR (найпоширеніший гепатотоксин ціанобактерій) Міжнародним агентством з вивчення раку (МАВР) було включено до «Переліку канцерогенних факторів» та віднесено до групи 2В. Кілька років тому повідомлялося про підвищену частоту випадків первинного раку печінки (PLC) у Китаї, пов'язаних зі споживанням неочищеної питної води, що містила мікроцистини. Крім Китаю, є дані про підвищений рівень первинного раку печінки (PLC) серед населення Сербії, що також пов'язується з хронічним токсичним впливом мікроцистинів. Відомим підтвердженням випадком масових смертей людей (понад 60 осіб), безпосередньо пов'язаним з шкідливою дією токсинів ціанобактерій (мікроцистинів), був інцидент у Бразилії (з пацієнтами гемодіалізного центру у м. Каруару у 1996 році, який використовував воду з місцевого «квітучого» евтрофованого водного об'єкту з передбаченим очищенням води за допомогою фільтра з активованого вугілля, який не був вчасно замінений і сам став джерелом вторинного забруднення води небезпечними мікроцистинами). В програмі CYANONET містяться дані щодо 100 випадків смертей людини на озері Ембу, що пов'язується з дією ціанотоксинів [6].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Сучасні методи спостереження за екологічним станом поверхневих вод як складової частини навколишнього середовища умовно можна поділити на дві групи [7]: контактні і дистанційні. Перші ґрунтуються як на прямому вимірюванні параметрів стану поверхневих вод, так і на лабораторних аналізах складу заздалегідь відібраних проб, згідно з відповідними методиками. До другої групи належать різноманітні неконтактні методи, в яких використовують прилади, просторово відділені від об'єкту досліджень, головними можливостями яких є:

- висока оглядовість, можливість отримання миттєвої інформації про процеси, які відбуваються на великих за площею територіях;
- можливість переходу від дискретних вимірювань параметрів стану об'єктів, що зонду-

ються в окремих точках регіону, до безперервного зображення просторового розподілу відповідних показників;

– можливість отримання інформації у важкодоступних місцях.

Найбільш важлива особливість даних дистанційного космічного спостереження – непрямий характер отриманої інформації про об'єкти природного середовища [8].

На сьогодні тільки системи космічного дистанційного зондування завдяки широкому просторовому охопленню найбільш повно описують стан природного і, у тому числі, водного середовища.

Для динаміки процесів евтрофування водних об'єктів характерні значні коливання протягом року [9], а, отже, потрібно проведення частих спостережень.

Контроль за розвитком евтрофування поверхневих вод та антропогенним впливом на нього необхідно проводити досить часто протягом вегетаційного сезону, причому на досить щільній мережі пунктів контролю на водному об'єкті. У зв'язку з цим, проведення спостережень стану поверхневих вод на водосховищах з суттєвим просторовим різноманіттям з урахуванням динаміки рівня евтрофування лише контактними методами викликає суттєві труднощі.

Найбільш доцільні такі обстеження виконувати методами дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) спільно з методами наземного контролю. Спільне використання цих методів сприятиме підвищенню точності і оперативності спостережень, а, отже, і підвищенню ефективності оперативних управлінських рішень в галузі природокористування, які приймаються на їх основі.

Для оцінки інтенсивності процесів евтрофування достатнім є визначення альгологічних або пігментних показників водного середовища. Проте, для докладної характеристики процесу потрібні комплексні дослідження. По-перше, необхідні дані про такі характеристики водного середовища, як прозорість, насиченість киснем, вміст кисню, вміст сполук біогенних елементів, показники окислюваності, мікробіологічні та токсикологічні показники, продукційно-деструкційні характеристики. По-друге, необхідним є аналіз стану донних відкладень за вмістом сполук біогенних елементів і органічних речовин, а також за альгологічними, пігментними, мікробіологічними й токсикологічними показниками.

Незважаючи на пряму кореляцію між вмістом біогенних елементів і біомасою фітопланктону за середніми даними за вегетаційний сезон (за багаторічною динамікою [10]), внутрисезонні та міжводоймові залежності не такі однозначні. Значний вміст біогенних елементів свідчить радше про потенційні можливості виникнення «цвітіння» (приміром, гідрологічні умови конкретного водного об'єкту чи метеорологічні умови конкретного року

«цвітінню» можуть і не сприяти). Безпосередньо під час інтенсивного розвитку фітопланктону швидкість оборту біогенних елементів сягає доби й менше, а, отже, мінеральні форми споживаються досить швидко, а їх вміст не завжди є показовим в такому масштабі часу.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Для оцінки інтенсивності «цвітіння» достатнім є визначення альгологічних або пігментних показників водного середовища.

Вміст біомаси фітопланктону, на відміну від вмісту хлорофілу, є розрахунковим показником (функцією чисельності з урахуванням видового складу й розмірів), а, отже, менш вірогідним.

Таким чином, показник вмісту хлорофілу-А наразі використовується для визначення «цвітіння» води водних об'єктів.

Вміст хлорофілу в фітопланктоні можна вважати провідним, поряд з альгологічними показниками, оскільки він прямо характеризує інтенсивність розвитку й накопичення мікроводоростей, тоді як гідрохімічні показники евтрофованості вод, такі як вміст біогенних елементів чи лабільної органічної речовини, або насиченості киснем є непрямими

Актуальною є необхідність оцінки біомаси та біооб'єму фітопланктону за вмістом пігментів водоростей, зокрема – фікоціаніну, які слугують для поглинання сонячного світла під час процесу фотосинтезу [11], а саме дослідження зв'язку між величиною флюоресценції одного зі специфічних пігментованих білків ціанобактерій – фікоціаніну (*in vivo*) та біооб'ємом ціанобактерій.

На теперішній час розробка та використання інструментів для точної оцінки ціанобактеріального біооб'єму при «цвітінні» евтрофованих водних об'єктів базується на вимірах вмісту фікоціаніну як у лабораторних умовах, так і *in situ*, часто з залученням сучасних методів дистанційного зондування – «Remote Sensing» [12].

Фікоціанін (PC) – один з найважливіших додаткових пігментованих білків – фікобіліпротеїнів (PBP), які належать до фотосинтетичного апарату ціанобактерій (синьо-зелених водоростей), багряннок (червоних водоростей), а також криптофітів (джгутикових водоростей).

Фікобіліпротеїни (PBP) перелічених вище водоростей (а головне – ціанобактерій) збираються у фікобілісоми (PBS) – комплекси, які виконують функцію антен у пігментному апараті фотосинтеза цих водоростей.

PBS є гігантськими надмолекулярними комплексами, маса яких досягає 3000–7000 кДа, та акумулює у собі від 200 до 500 ковалентно пов'язаних з білком фікобілінових хромофорів, PBS ціанобактерій, червоних глаукофітових, та криптофітових водоростей поглинають світло з хвиль довжиною від 400 нм до 750 нм, завдяки чому ці водорості здатні існувати

у середовищах, де інші водорості виживають з великими труднощами.

Новизна. На сьогодні відомо більш десяти фікобіліпротеїнів, які підрозділяються на три класи: фікоеритрини (РЕ), фікоціаніни (РС), та алофікоціаніни (АРС) [13].

Вміст РВР у клітинах відповідних водоростей досягає 60% маси всього водорозчинного білка або 20% сухої ваги. РВР набули відомість з першої половини 19-го сторіччя, коли був одержаний перший з них, фікоціанін [14]. З того часу фікобіліпротеїни водоростей, а в наш час – особливо фікоціанін, є важливим об'єктом досліджень.

Виклад основного матеріалу.

Яскраве забарвлення, високий вміст у клітинах водоростей, водорозчинність, відносна простота вилучення – характерні риси РВР.

Головною ознакою, яка дозволяє вважати той або інший білок – пігмент індивідуальним фікобіліпротеїном (РВР), слугує якісний та кількісний склад хромофорів – структурних одиниць молекул, які відповідають за оптичні властивості тих чи інших речовин. Розподіл фікобіліпротеїнів (РВР) на класи у залежності від кількості хромофорів виглядає наступним чином:

- Алофікоціанін (АРС) – має два хромофори;
- Фікоціаніни (РС) та фікоерітроціанін (РЕС) – мають три хромофори;
- Фікоеритрини (РЕ) – містять п'ять або шість хромофорних груп [13].

Фікобіліпротеїни (РВР) належать до кислих білків. Для РВР притаманна здатність до агрегації. У концентрації, яка наближується до 10^{-7} М, РВР утворюють $(\alpha\beta)$ -1-мономери або докладніше – $(\alpha\beta)$ -гетеродимери. РВР легко кристалізуються; кристали мають вигляд самоцвітів.

РВР різняться не тільки за кількістю хромофорів, а і за спектрами їх поглинання (тобто за максимумами їх хвиль поглинання λ):

- 1) Алофікоціанін (АРС); λ_{\max} = від 650 до 665 нм;
- 2) Фікоціаніни (РС); λ_{\max} = від 590 до 625 нм;
- 3) Фікоерітроціанін (РЕС); λ_{\max} = від 590 до 625 нм;
- 4) Фікоеритрини (РЕ); λ_{\max} = від 490 до 570 нм.

Фікобілісоми (PBS) – це супрамолекулярний світлозбираючий пігментно-белковий комплекс, який утворений шляхом з'єднання полих дисків тримерів та гексамерів фікобіліпротеїнів (РВР) у циліндри, що збираються у фікобілісоми (PBS). Збірка РВР у циліндри відбувається за допомогою безбарвних лінкерних білків.

Типовими для ціанобактерій є напівдископодібні фікобілісоми (PBS). У центрі напівдиска знаходяться три циліндра, довжиною 12–15 нм та діаметром кожен біля 11 нм, які мають у перетині спільний трикутний контур. Перпендикулярно до бокових сторін трикутника примикають шість більш довгих циліндрів того ж діаметру, які роз-

ташовуються у формі напівкола у вигляді віяла. Центральна тригранна частина PBS зветься ядром, а периферична має назву «бокові циліндри». Кожен з трьох циліндрів ядра складається з чотирьох тримерів, а бокові циліндри – з декількох зістикованих гексамерів фікобіліпротеїнів (РВР), причому бокові циліндри не містять алофікоціаніна, якій є цілком зосередженим у ядрі. Зовнішні частини бокових циліндрів PBS складаються з гексамерів фікоеритрина, а проксимальна частина, яка примикає до алофікоціанінового ядра, утворена фікоціаніном (рис. 1) [13].

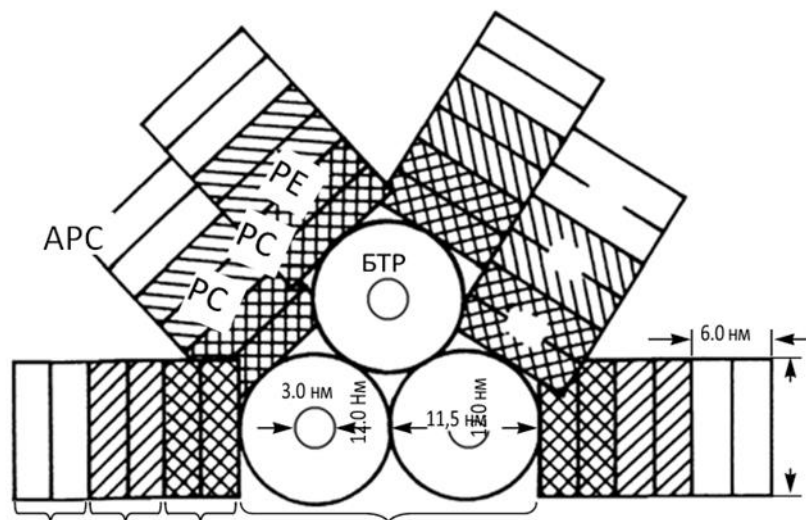
На сьогодні пігментований білок фікоціанін вважається маркерним пігментом ціанобактерій, тобто є індикатором рівня розвитку достатку (великої кількості) ціанобактеріальних «цвітін». Інформація про вміст фікоціаніну дає можливість розрахувати величину біооб'єму та біомаси «квітух» ціанобактерій.

Існує велика множина наукових досліджень [15], у яких поняття «маркерний пігмент ціанобактерій» щодо фікоціаніну набуло характер сталості [12].

Враховуючи існування поняття планктон-еквівалентів [16], поширеними прикладами еквівалентів яких є відомі відповідності: 1 мкг хлорофіла = 34,5 мкг сухої органічної речовини; 1 мкг хлорофіла = $0,139 \text{ мм}^3$ об'єму водоростей тощо, маємо змогу зробити аналіз напрямків досліджень авторів багатьох країн світу, присвячених визначенню фітопланктонних-еквівалентів при дослідженні евтрофованих водних об'єктів за останні 2–3 десятиріччя. В основному мова йде про еволюцію досліджень вмісту важливіших пігментів водоростей – хлорофілу та фікоціаніну – та їх співвідношення з біомасою, біооб'ємом водоростей тощо, що відображено нижче.

Хлорофіл-а широко використовується для оцінки величини біомаси прісноводного та морського фітопланктону, завдяки його наявності у всіх автотрофах та відносно легкості аналізу. В наш час доступними є кілька підходів для вимірювання хлорофілу-а, включаючи високоефективну рідину хроматографію (HPLC), спектроскопію та флуориметрію [17].

Ціанобактерії містять фікобілінові пігменти – фікоціанін (більш притаманний прісноводним таксонам ціанобактерій) та фікоеритрин (більш характерний для морських водоростевих таксонів), які мають максимум поглинання світла у діапазоні від 550 до 650 нм (зокрема, для фікоціаніну – 62 нм; для фікоеритрину – 580 нм). Ці пігменти надають ціанобактеріям характерний синьо-зелений колір, що використовується для виробництва харчового синього барвника, вартість виробництва якого досягає \$10–50 млн./рік. Це певною мірою детермінує існування досить високого ступеня дослідження методів екстракції, очищення та визначення фікоціаніну з водоростевої маси [18].



Бічний циліндр Трициліндрове ядро

Рис. 1. Будова напівдископодібних фікобілісом, які складаються з алофікоціанінового трьохциліндрового ядра та шістьох бокових циліндрів, які утворені зістикованими гексамерами фікоціаніна та фікоеритрина (APC – алофікоціанін, PC – фікоціанін, PE – фікоеритрин)

Зростає інтерес науковців до визначення допоміжних специфічних пігментів ціанобактерій (зокрема, фікоціаніну) для кількісної оцінки біомаси «квітучих» ціанобактерій [19].

При визначенні вмісту фікобіліпротеїнових пігментів та, зокрема, фікоціаніна велику роль відіграє процес (або етап) екстракції бажаного пігмента з відповідної біомаси ціанобактерій.

Увага дослідників до фікоціаніну посилюється, адже наявність даних щодо вмісту цього маркера розвитку ціанобактерій дає реальну можливість прогнозування рівня розвитку «квітучої» біомаси ціанобактерій, у тому числі токсигенних видів, як чинника небезпечного впливу на здоров'я людини.

На теперішній час розроблені різноманітні алгоритми розрахунку біооб'єму (біомаси) «квітучих» ціанобактерій на базі визначення співвідношення вмісту основних фотосинтезуючих пігментів ціанобактерій – хлорофілу-а та фікоціаніну, які наводяться в багатьох дослідженнях

Фікоціанін на теперішній час розглядається закордонними дослідниками як маркерний пігмент для кількісного оцінювання достатку ціанобактеріальних цвітінь, через визначення вмісту якого можливо швидко розрахувати величину біооб'єму ціанобактерій.

Флюорометрія фікоціаніну є життєздатним методом для менеджерів водного господарства з метою швидкої оцінки ціанобактеріальних біооб'ємів при «цвітінні» евтрофованих водних об'єктів.

Методи визначення фікоціаніну доповнюють інші мікроскопічні, молекулярні та хімічні методи і сприяють одержанню більш повної картини СуаноНABs у регіональному та глобальному масштабі.

Перспективи використання результатів дослідження. Майбутні дослідження можуть бути зосереджені на забезпеченні всебічного аналізу інтенсивності СуаноНABs та виявленню потенційно «квітучих» водних об'єктів, що може бути впроваджено з залученням визначення вмісту фікоціаніну як індикатора таких «цвітінь».

Знання ступеня «цвітіння» (достатку) евтрофованих водних об'єктів завдяки визначенню вмісту фікоціаніну дозволяє менеджерам водного господарства визначити дієві стратегії управління водними об'єктами.

Антропогенне евтрофування складових довкілля та його наслідки у вигляді «цвітіння» зрештою може призвести до деградації природних біоценозів, популяцій та навіть екосистем, до порушення процесів гомеостазу, накопичення токсичних метаболітів, що несе загрозу для здоров'я людини. В умовах військових дій, які призводять до екоциду навколишнього природного середовища, масштабних руйнувань, надходжень забруднюючих речовин в атмосферне повітря, водне середовище та ґрунти, значного посилення процесів евтрофування, що обґрунтовує обов'язковість проведення еколого-соціальних (медичних) досліджень їх впливу на умови життєдіяльності населення.

Література

1. Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року: Закон України від 28.02.2019 р. № 2697-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text> (Last accessed: 18.07.2023).
2. Дмитрієва О.О. Екологічно безпечне водокористування у населених пунктах України: монографія. Київ: РВПС України НАН України. 2008. 459 с.
3. Ковальчук Л. Й., Мокієнко А. В. Сучасний еколого-гігієнічний стан водних об'єктів Українського Придунав'я. *Актуальні проблеми транспортної медицини: навколишнє середовище; професійне здоров'я; патологія*. 2014. № 3 (37). С. 171–183.
4. Мокієнко А.В. Ціанобактерії і ціанотоксини: міф чи реальність? Вісник НАН України. 2016. № 4. С. 65–75.
5. Мокієнко А. В., Ковальчук Л. Й. Українське Придунав'я: гігієнічні та медико-екологічні основи впливу води як фактора ризику на здоров'я населення: монографія. Одеса : Прес-кур'єр, 2017. 352 с. URL: <https://www.onmedu.edu.ua/xmlui/bitstream/handle/123456789/10881/Mokiienko.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (Last accessed: 18.07.2023).
6. Codd G.A., Azevedo S.M.F.O., Bagchi S.N. et al. CYANONET: a global network for Cyanobacterial bloom and toxin risk management; initial situation assessment and recommendations. *Int. Hydrol. Progr. VI: Technical Documents in Hydrology*. № 76. Paris: UNESCO, 2005. 138 p.
7. Красовський Г. Я., Петросов В. А. Інформаційні технології космічного моніторингу водних екосистем та прогнозу водоспоживання міст. К. : Наукова думка. 2003. 224 с.
8. Байрак Г.Р., Муха Б.П. Дистанційні дослідження Землі : Навчальний посібник. Львів : Видавничий центр ЛНУ ім'єні Івана Франка, 2010. 712 с.
9. Курейшевич А.В. Пігментні характеристики фітопланктону у практиці екологічного моніторингу дніпровських водосховищ / Тези доп. 1-го з'їзду Гідроекол. т-ва України. К.: Ін-т гідробіології НАН України, 1994. С. 108.
10. Дерезюк Н. В., Медінець В. І., Газетов Є. І Дослідження фітопланктону у прибережних водах острова Зміїний в 2016-2017 рр. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології. Вун.* 30, 2018. С. 40–64.
11. Jo-Marie E. Kasinak, Brittany M. Holt, Michael F. Chislock, Alan E. Wilson. Benchtop fluorometry of phycocyanin as a rapid approach for estimating cyanobacterial biovolume *Journal of Plankton Research*, Vol. 37(1). 2015. P. 248–257. URL: <https://doi.org/10.1093/plankt/fbu096> (Last accessed: 18.07.2023).
12. Sobiechowska-Sasim M., Ston-Egiert J. and Kosakowska, A. (Quantitative analysis of extracted phycobilin pigments in cyanobacteria-an assessment of spectrophotometric and spectrofluorometric methods. *Journal of Applied Phycology*. 2014. Vol. 26, P. 2065–2074. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10811-014-0244-3> (Last accessed: 18.07.2023).
13. Незберицька І. М., Курейшевич А. В., Васильченко О. А., Миненко А. Б. Вміст фікобіліпротеїнів у біомасі синьозеленої водорості *Phormidium autumnale* f. *uncinata* за умов зміни температури культивування. *Проблеми екологічної біотехнології*. 2014. № 2. С. 1–9. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/peb_2014_2_11 (Last accessed: 18.07.2023).
14. Green BR. Was «molecular opportunism» a factor in the evolution of different photosynthetic light-harvesting pigment systems? *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2001. 98(5). P. 2119–2121. URL: [10.1073/pnas.061023198](https://doi.org/10.1073/pnas.061023198) (Last accessed: 18.07.2023).
15. Dmitrieva O., Khorenzaiya I., Vasilyenko V., Teliura N., Lomakina O., Melnik L., Koldoba I. Choosing the phytoremediation technologies for cleaning various types of wastewater. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020. Vol. 2 (10 (104)). P. 27–37. URL: [doi: 10.15587/1729-4061.2020.200591](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.200591) (Last accessed: 18.07.2023).
16. Jo-Marie E. Kasinak, Brittany M. Holt, Michael F. Chislock, Alan E. Wilson. Benchtop fluorometry of phycocyanin as a rapid approach for estimating cyanobacterial biovolume, *Journal of Plankton Research*. 2015. Vol. 37 (1). P. 248–257. URL: <https://doi.org/10.1093/plankt/fbu096> (Last accessed: 18.07.2023).
17. Lorenzen C. A method for the continuous measurement of in vivo chlorophyll concentration. *Deep-Sea Res.* 1966. 13. P. 223–227.
18. Siegelman, H. W. and Kycia, J. H. Algal biliproteins. In Hellebust, J. A. and Craigie, J. S. (eds), *Handbook of Phycological Methods: Physiological & Biochemical Methods*. Cambridge University Press, Cambridge, 1978. P. 72–78.
19. Stewart D. E., Farmer F. H. Extraction, identification, and quantification of phycobiliprotein pigments from phototrophic plankton. *Limnol. Oceanogr.* 1984. 29. P. 392–397.