

«ЦВІТІННЯ» ВОДИ ЦІАНОБАКТЕРІЯМИ ЯК ЕКОЛОГІЧНА НЕБЕЗПЕКА ВОДОЙМ

Л.В. Центило¹, І.М. Стецюк²

¹Національний університет біоресурсів і природокористування України (м. Київ, Україна)
e-mail: 2037127@ukr.net; ORCID: 0000-0002-6546-2826

²Інститут агроєкології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)
e-mail: Stetsyukinna8513@ukr.net; ORCID: 0000-0001-8392-6527

У статті викладено та проаналізовано проблему забруднення ціанотоксинами водних об'єктів України та інших країн світу. Евтрофікація водойм, яка спричинена діяльністю людини та зміна клімату зумовлюють неконтрольований розвиток ціанобактерій, а відповідно — екологічну небезпеку в об'єктах гідросфери. Антропогенна евтрофікація, підвищення температури, збільшення вмісту вуглекислого газу в атмосфері, як наслідок перетворення внесеної органіки у водах, сприяють посиленню домінування ціанобактерій у водних екосистемах. Ціанобактерії продукують різні нейротоксини, гепатотоксини і дерматоксини, зокрема такі відомі, як нодулярин, сакситоксин, мікроцистин, домоєва кислота, гуанітоксин, анатоксини та ін. Перевищення критичної маси водоростей та їх метаболітів активізує процес саморозкладу. Це спричиняє вилучення з води кисню, і натомість виділення метану, сірководню, аміаку, та інших токсичних речовин. Результатом цього є не тільки загибель риби. Крім того, ціанобактерії здатні до природної генетичної трансформації — генетичної зміни клітини в результаті прямого поглинання і включення екзогенної ДНК з її оточення. Ефективним розв'язанням питання контролю активності ціанобактерій є застосування гумінових речовин. Було встановлено, що гумінові кислоти та фульвокислоти у певних концентраціях негативно позначаються на рості, розвитку та активності ціанобактерій. Гумінові речовини, як складова органічної речовини та резерв органічного вуглецю в його глобальному кругообігу, за підвищення їх концентрації у водоймах здійснюють негативний вплив на гідробіонти. Однак, саме гумінові речовини здатні регулювати активність фітопланктону. Внесення гумінових речовин (концентрація 2–5 мг/дм³) у водойму помітно впливають на активність фітопланктону, зокрема пригнічують вегетацію фітопланктону, зменшують слизоутворення ціанобактерій, та, від початку інактивують синтез ціанотоксинів. Цей ефект забезпечується лужним рН гуматів, високим вмістом заліза та міді.

Ключові слова: водні екосистеми, антропогенна евтрофікація, синьозелені водорості, токсини, гумінові речовини, бактерії.

ВСТУП

Антропогенне навантаження на водні екосистеми відображається на якості та безпечності води поверхневих водойм, питної води і населенні водойм. Збільшення обігу водних ресурсів для сільського господарства, рибного господарства призводить до забруднення водних об'єктів. Активне заселення водних екосистем ціанобактеріями континентальних водойм засвідчує зміну клімату та втручання людини у природні ресурси. Інтоксикація водних об'єктів продуктами метаболізму ціанобактерій позна-

чається на здоров'ї й житті людини, може призвести до дефіциту води, безпечних харчових ресурсів та самих водних екосистемах.

Застосування у цілях боротьби із ціанобактеріями хімічних препаратів з групи гербіцидів і біоцидів (альгіцидів) зумовлює тільки погіршення стану водойм — утворення шкідливих галогенвмісних похідних ціанотоксинів, що утворюються у результаті активного галогенування (хлорування) хлорвмісними альгіцидами.

Мета роботи полягала в аналізі літературних джерел щодо впливу токсинів ціанобактерій на водні екосистеми та ви-

користання гумінових кислот і їх сполук для реабілітації водоймищ.

Розв'язання проблеми інтоксикації водойм токсинами ціанобактерій має носити комплексний характер. Комплексність підходу регулювання активності синьо-зелених водоростей включає можливості застосування механічної очистки водойм, трансформації продуктів метаболізму речовинами, які мають основні (лужні) властивості та залучення живих мікроорганізмів (бактерій), які є активними продуцентами ферментів й антибіотичних сполук. Тільки комплекс (система) заходів щодо небезпечних ціанобактерій, які викликають порушення гомеостазу водних екосистем й погіршення якості води, зможе забезпечити позитивний вихід із ситуації, яка склалася останнім часом.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Проблема негативного впливу синьо-зелених водоростей на екосистеми водойм привертає увагу вчених всього світу. Так, українські вчені [3; 4] вивчали негативний вплив ціанобактерій та пропонували їх утилізацію для виробництва біогазу й пригнічення їх розвитку за впливу гумінових речовин. Встановлено, що концентрація гумінових кислот 2 та 5 мг/л води пригнічували активність синьо-зелених водоростей [4]. Однак такі наукові дослідження, на жаль, лише поодинокі.

Використання бактерій із метою знезараження, біоремедіації доведена як нашими, так і зарубіжними вченими. Використання живих організмів для здійснення перетворень органічних сполук, розчинення фосфатів, зменшення токсичного впливу пестицидів, мікотоксинів є прогресивним рішенням.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Водні ресурси були і будуть життєво важливим природним ресурсом, який має особливе значення. Використання води у всьому світі зростає більш ніж удвічі швидше, ніж приріст населення за останнє сто-

річчя. По суті, демографічне зростання і економічний розвиток чинять безпрецедентний тиск на поновлювані, але вичерпні водні ресурси.

Наразі Україна належить до держав із недостатнім забезпеченням водними ресурсами. Внутрішні води України вкривають близько 42,24 тис. км², що сягає практично 7,0% від загальної території (603,548 тис. км²). До цих об'єктів належать річки, озера, водосховища, ставки, канали. Традиційно вода розглядається та використовується тільки як господарський ресурс для промислового і сільськогосподарського виробництва, отримання електроенергії, а також для скидання стічних вод [2]. Забруднення водних екосистем України промисловими, побутовими стоками та викидами сільськогосподарських підприємств наразі є буденністю.

Радикальне погіршення якості більшості вод України, а саме, підвищення концентрації азоту, фосфору, органічних та неорганічних сполук у поверхневих водах, що виникає внаслідок забруднення води викидами, зміни кліматичних умов, ініціює неконтрольований розвиток певних угруповань мікроорганізмів, які становлять екологічну небезпеку.

Такі негативні дії навколишнього природного середовища наслідки впливають на населення водойм, змінюють біоту водойм. Результатом створення нових взаємозв'язків у новій біоті та створення нової біотичної ієрархії став бурхливий неконтрольований розвиток синьо-зелених водоростей, які заповнили водосховища дніпровського каскаду та інших водойм [6].

Питома густина ціанобактерій дещо менша за густину води, тому навіть після сильного шторму вони за незначний час спливають на поверхню води та інтенсивно розвиваються, споживаючи сонячну енергію. Доволі швидко утворюється щільний поверхневий шар із синьо-зелених водоростей, який зменшує коефіцієнт відбивання сонячного проміння. Це, своєю чергою, сприяє додатковому прогріванню поверхневого шару, а отже і прискоренню розвитку водоростей — процес стає автокаталітичним.

Зменшення вмісту кисню у воді під час розкладання ціанобактерій настільки істотно, що в при поверхневому шарі виникають умови для їх безкисневої ферментації. Часті коливання рівня на нижніх б'єфах гідростанцій призводять до затоплення широких прибережних смуг і потрапляння насиченої ціанобактеріями літньої води в інші водойми [3; 6].

Активний розвиток синьозелених водоростей пояснюється не тільки зміною умов клімату, безгосподарським веденням господарства більшістю підприємств, а й суттю самих мікроорганізмів.

Ціанобактерії — одноклітинні нитчасті та колоніальні мікроорганізми, що відрізняються видатною здатністю адаптувати склад фотосинтетичних пігментів до спектрального складу світла, так що колір варіюється від світло-зеленого до темно-синього. Деякі азотофіксуючі ціанобактерії здатні до диференціювання — формування спеціалізованих клітин: гетероцист і гормоніїв. Гетероцисти виконують функцію азотофіксації, в той час як інші клітини здійснюють фотосинтез.

Ціанеї здатні до формування товстих бактеріальних матів. Деякі види анатоксинів токсичні (виділяють такі токсини, як-то, аплізіатоксин, ціліндропермопсин, домоеву кислоту, мікроцистин, нодуларин, неосакситоксин, сакситоксин) й умовно патогенні (наприклад, *Anabaena*). Ці мікроорганізми — головні учасники «цвітіння» води, яке викликає масові замори риби й отруєння тварин і людей. Унікальне екологічне положення зумовлено наявністю двох важкопоєднаних здібностей: до фотосинтетичної продукції кисню і фіксації атмосферного азоту (у 2/3 вивчених видів).

Синьозеленим водоростям властивий гетеро- та хемотрофний спосіб живлення, що дає можливість мікроорганізмам виживати у складних, і, навіть, абіотичних умовах. Продуктування полісахаридів ціанеями надає можливість вбирати різні органомінеральні комплекси, важкі метали й бути так званим «абсорбентом». Ці характеристики носять як позитивний, так

і негативний характер для водойм та гідробіонтів. Активний розвиток ціанеї влітку за сприятливих для них умов (стояча вода, високі температури, наявність органічних азотовмісних та фосфорвмісних сполук) створює на поверхні води «слизову плівку» синьозеленого кольору.

Активізація розвитку мікроорганізмів на поверхні водойм, продукування ними великої кількості кисню спричиняє процеси оксигенації (окислення) органічних сполук водойм, що призводить до утворення великої кількості токсичних для гідробіонтів сполук, у т. ч. безпосередньо, токсинів самих окиснювачів.

Ціанобактерії за загальноприйнятною версією є «творцями» сучасної кисневмісної атмосфери на Землі, що зумовило «кисневу катастрофу» — глобальну зміну складу атмосфери, яка сталася на самому початку протерозою (близько 2,4 млрд років тому). Ці зміни сприяли подальшій розбудові біосфери та глобального гуронського оледеніння.

Ціанобактерії — це глобально поширені фотосинтезуючі прокаріоти, які роблять основний внесок у великі біогеохімічні цикли [7]. Вони — одні з найдавніших організмів на Землі, процвітають в різноманітних і, навіть, екстремальних середовищах існування.

Ціанобактерії, об'єднуючись у великі та величезні колонії на поверхні будь-яких водойм, утворюють ціанобактеріальні мати (ціанобактеріальні спільноти) — високоінтегровані прокаріотні спільноти, часто пов'язані синтрофічними відносинами, в які входять фотосинтезуючі ціанобактерії, факультативні аероби і анаероби.

Продуктом життєдіяльності ціанобактеріальних матів є строматоліти — карбонатні (частіше вапняні або доломітові) споруди з мінералізованих залишків їх нижніх шарів. У найбільш розвинених спільнотах від поверхні мату до підстилаючого субстрату спостерігається диференціація мікробіологічного складу, в якому виділяють кілька функціональних шарів:

- верхній фотосинтезуючий аеробний шар — поверхня зростання, утворена

автотрофними фотосинтезуючими ціано- бактеріями і аеробними гетеротрофами, які утилізують кисень, що виділяється ціано- бактеріями і органічними сполука- ми відмерлих мікроорганізмів;

- проміжний шар, утворений фотосинте- зуючими мікроорганізмами — факультативними анаеробами, що використо- вують світло, яке пройшло крізь верхній шар мату, і гетеротрофними факультативними аеробами. У денний час у про- міжному шарі може бути присутнім кисень, у нічний час — умови стають анаеробними;
- афотична гетеротрофна анаеробна зона, утвореними мікроорганізмами, які здатні мінералізувати органічні залишки.

Отже, розвинені ціано- бактеріальні мати представляють собою фактично замкнуту мікроекосистему з нульовим балансом: продукція кисню та органічних речовин дорівнює їх споживання. Фотосинтезуючі бактерії проміжного шару містять фото- синтезуючі пігменти, що мають макси- мум поглинання світла в спектральних областях, відмінних від максимуму по- глинання ціано- бактеріального хлорофілу. Така відмінність дає змогу їм більш ефек- тивно використовувати світло, яке про- ходить крізь товщу верхнього шару мату. При зміні спектра освітленості («почер- воніння» вранці і ввечері) в маті відбува- ються впорядковані вертикальні міграції бактерій із різними типами пігментів.

Для інтенсивного розвитку синьо-зелені водорості вимагають три головні умови: наявність поживних речовин (азот і фос- фор), тепла вода ($>20^{\circ}\text{C}$) і відсутність течій. Саме ці умови виникають влітку переважно в озерах та водосховищах. За сприятливих умов синьо-зелені водорос- ті діляться двічі–тричі на добу і за три- чотири дні збільшення їх біомаси відбу- вається в 10–12 разів, що може заповнити будь-яку водойму впродовж короткого часу. Ніхто з живих організмів цю біомасу не їсть і не знищує. Ціано- бактеріальна маса відмирає через кілька днів існування, осі- даючи пластівцями на дні водойм, які під час розкладання поглинають кисень, ство-

рюючи безкисневі, «мертві» ділянки дна [1].

«Цвітіння» води — масовий розвиток одного або декількох видів водоростей у водоймі, що супроводжується зміною за- барвлення (кольоровості) води. Вона може бути зеленого, червоного, жовто-ко- ричневого або чорного кольору. «Цвітіння» помітне за концентрації водоростей близь- ко 1 г/м^3 , але влітку їх біомаса нерідко ся- гає $70\text{--}100\text{ г/м}^3$ й більше, що може зумо- вити екологічну небезпеку таких водойм чи ділянок водойм, забруднення джерел питної води тощо.

Антропогенна евтрофікація, підвищен- ня температури, збільшення вмісту вуг- лекислого газу в атмосфері, як наслідок перетворення внесеної органіки у водах, сприяють посиленню домінування ціано- бактерій у водних екосистемах [18].

Окрім гетерогенності живлення та різ- них адаптивних можливостей виживання у складних умовах існування, ціано- бактерії здатні до природної генетичної трансфор- мації — генетична зміна клітини в резуль- таті прямого поглинання і включення екзо- генної ДНК з її оточення. Для того, щоб відбулася бактеріальна трансформація, бак- терії-реципієнти повинні бути в екстре- мальних природних умовах — голод, висо- ка щільність клітин або вплив агентів, що ушкоджують ДНК. За хромосомної транс- формації гомологічна трансформуюча ДНК може бути інтегрована в геном реципієнта за допомогою гомологічної рекомбінації, і цей процес, очевидно, є адаптацією для відновлення пошкоджень ДНК [9].

Останнім часом в Україні відмічаєть- ся літнє «цвітіння» озер, водойм рибогос- подарського призначення, водосховищ, деяких річок й навіть морів, що свідчить про активний розвиток синьо-зелених во- доростей. Під час «цвітіння» вода набуває неприємного запаху, погіршуються її еко- логічні якості. Особливо шкідливим є над- мірне «цвітіння». Шар води, що «цвіте», може досягати 10–15 см завтовшки. Високі концентрації токсинів ціано- бактерій та їх продуктів розпаду присутні у всій товщі забрудненої води.

Перевищення критичної маси водоростей та їх метаболітів активізує процес саморозкладу. Це призводить до вилучення з води кисню, і натомість виділення метану, сірководню, аміаку й інших токсичних речовин. Результатом цього є не тільки загибель риби й інших гідробіонтів. Одним із найбільш важливих процесів, що визначає екофізіологію ціанобактерій, є загибель власних клітин. Дослідження підтверджують існування контрольованої загибелі клітин у ціанобактерій. Різні форми загибелі колоній ціаней були описані як біотичні і абіотичні стреси. Однак дослідження клітинної смерті ціанобактерій є відносно молодою областю і розуміння основних і молекулярних механізмів, що лежать в основі цього фундаментального процесу, залишається значною мірою невловимим. Інформація щодо загибелі клітин морських і прісноводних ціанобактерій вказує на те, що цей процес має серйозні наслідки для екології мікробних спільнот й спостерігаються в стресових умовах. Припускають, що загибель клітин відіграє ключову роль у процесах розвитку, таких як диференціювання акінето і гетероцист [7; 10; 14].

Зміна клімату прямо і опосередковано сприяє інтенсивному розвитку ціанобактерій та, ймовірно, збільшить частоту, інтенсивність і тривалість «цвітіння» в багатьох евтрофних озерах, водосховищах і естуаріях [15; 23].

Ціанобактерії, що викликають «цвітіння», продукують різні нейротоксини, гепатотоксини і дерматоксини, які можуть бути смертельними для гідробіонтів, птахів і ссавців (включаючи водоплавних птахів, велику рогату худобу, собак) та загрожують використанню водойм для водопостачання питної води, рекреації, сільського господарства, іригації, рибориства. Токсичні ціанобактерії викликали серйозні проблеми з якістю води озер Тайху (Китай), Ері (США), Окічобі (США), Вікторія (Африка) й інших водойм [11; 15; 20].

За закінчення вегетації синьозелені водорості спричиняють активні процеси оксигенації, замулення, нестачу кисню у

нижніх шарах води. Масовий ріст та загибель ціаней спричиняє потужну інтоксикацію водойм, накопичення як самих токсинів, так і продуктів їх розпаду. Серед відомих токсинів синьозелених водоростей слід виділити такі [17]:

- нодулярини — сильні небезпечні токсини, які виробляє *Nodularia spumigena*. Цвітіння останніх наприкінці літа є однією із найбільших у світі ціанобактеріальних мас. Нодулярин-R є домінуючим варіантом токсину, серед 10 варіантів нодулярину, які відомі сьогодні. Ці сполуки є відносно стабільними речовинами: світло, температура і мікрохвилі не завдають великої дії для розкладання цих сполук;
- сакситоксин — органічна сполука, пуриновий алкалоїд, нейротоксин небілкової природи, що продукується деякими видами динофлагелят (*Gonyaulax catenella*, *Alexandrium* sp., *Gymnodinium* sp., *Pyrodinium* sp.), а також деякими ціанобактеріями (*Anabaena* sp., *Aphanizomenon* sp., *Cylindrospermopsis* sp., *Lyngbya* sp., *Planktothrix* sp.);
- мікроцистини або ціаногінозини — клас токсинів, що виробляються деякими прісноводними синьозеленими водоростями, з яких мікроцистин-LR є найбільш поширеним. Це загроза для усіх гідробіонтів, питного та іригаційного водопостачання, а також водних екосистем загалом. Ціанобактеріальні плівки, які містять мікроцистин, є проблемою в усьому світі, включаючи Китай, Бразилію, Австралію, Південну Африку, Сполучені Штати Америки і багато країн Європи [22];
- домоева кислота — нейротоксин, у водному середовищі може досягати значних концентрацій за «цвітіння» води в морях; викликає амнезію при отруєнні молюсками з високим вмістом цього нейротоксину;
- гуанітоксин (GNT) — виділяється з ціанобактерій (рід *Anabaena*), викликає надмірне слиновиділення у ссавців, судоми. Лабільний, швидко розкладається в основних (лужних) розчинах, але

відносно стабільний у нейтральних або кислих розчинах;

- анатоксини — алкалоїди, що виробляються виключно ціанобактеріями родів *Anabaena*, *Planktothrix* і *Aphanizomenon*. Сполука дуже полярна і повністю розчиняється у воді, за лужного рН (вище 10) швидко розпадається на нетоксичні аналоги.

Ріст ціанобактерій, їх активність та синтез токсинів піддається регуляції. Основними методами боротьби із нерегульованою активністю ціанобактерій є зменшення евтрофікації водойм. Регуляція росту та активності ціанобактерій також забезпечується зменшенням вмісту органічних та фосфорвмісних сполук. Для зменшення можливості ціанобактеріального забруднення слід здійснювати періодичні чищення водойм (видалення мулу). Таким засобом боротьби можна надавати невеликі водойми. Із ціанобактеріальною активністю у великих водоймах слід боротися іншими засобами.

Методи хімічного очищення є мало ефективними способами як із самими ціанобактеріями, так і їх токсинами (застосування окисів марганцю, хлоридів для окисного розщеплення фрагментів токсинів) і можуть завдавати ще більшої шкоди водоймам та їх мешканцям, а також тваринам і людині.

Безпосереднє видалення ціанобактерій у процесі очищення води шляхом фізичної обробки (мембранної фільтрації) — ще один варіант боротьби, оскільки велика частина ціанотоксинів міститься в клітинах, коли «цвітіння» зростає. Однак смерть клітин мікроорганізмів або їх старіння зумовлює вивільнення їх вторинних метаболітів у воду. При цьому фільтрування не може бути ефективним засобом очищення від самих мікроорганізмів та їх метаболітів [8].

Наразі є доволі ефективне розв'язання питання контролю активності ціанобактерій. Навіть і за значних ризиків (повторна інтоксикація) ефект боротьби є високим. Застосування гуміновмісних препаратів у деструктивних цілях широко застосову-

ється сьогодні. Такі препарати слугують для активзації деструкції поживних речовин, відходів тваринництва, птахівництва. Використання гумінових речовин для знищення токсичних водоростей вивчалось українськими науковцями. Зокрема доведено, що гумінові речовини (гумінові кислоти, фульвокислоти) у певних концентраціях негативно позначаються на рості, розвитку та активності ціанобактерій. Гумінові речовини, як складова органічної речовини та резерв органічного вуглецю в його глобальному кругообігу, за підвищення їх концентрації у водоймах здійснюють негативний вплив на гідробіонти. Однак, саме гумінові речовини здатні регулювати активність фітопланктону. Внесення гумінових речовин (концентрацією 2–5 мг/дм³) у водойми помітно впливає на активність фітопланктону — пригнічення вегетації фітопланктону, зменшення слизоутворення ціанобактерій та інактивація синтезу ціанотоксинів. Пригнічення забезпечується лужним рН гумітів, високим вмістом заліза та міді [4; 5; 16].

Залізо може регулювати експресію генів, що беруть участь у синтезі полісахаридів. Пригнічення можливості синтезу полісахаридів ціанобактеріями забезпечує пригнічення росту та розвитку їх клітин.

Присутність у гуматах лужних речовин (гідроксильних іонів калію, натрію) забезпечує пригнічення активності розмноження ціанобактерій, розчинення, трансформацію їх токсинів.

Застосування гуміновмісних сполук (добрив, регуляторів росту) та актуальне на сьогодні в сфері АПК. Гуміновмісні препарати, добрива є біологічно активними препаратами гумінової природи, які виявляють регулювальні, імуномодельовальні, адаптогенні, антистресові ефекти. Обґрунтовано ефективність використання біологічно активних речовин гумінової природи в сільськогосподарському виробництві:

- у *рослинництві* — з метою підвищення врожайності сільськогосподарських культур, збільшення в них поживних

речовин, зниження залишкових кількостей у продукції гербіцидів, пестицидів, нітратів і підвищення стійкості рослин до несприятливих чинників в умовах ризикованого землеробства;

- *у тваринництві* — з метою підвищення продуктивності тварин за рахунок покращання функціонального стану, підвищення життєдіяльності й реактивності організму тварин до несприятливих чинників навколишнього середовища.

Хелатуюча здатність, спроможність активізувати процеси розщеплення органічних сполук, окисно-відновні властивості, таумерія та терморегулятивна активність гумінових речовин, а також антиоксидантні властивості дають можливість використовувати гуміновмісні сполуки для пришвидшення біорозкладу органічних відходів, органічних речовин, у т. ч. токсинів водойм. Трансформацію утворених токсинів ціанобактерій, що накопичуються у результаті їх життєдіяльності та відмирання, забезпечують як гумати (їх хелатуюча здатність та можливість ініціювати розпад сполук), так і живі мікроорганізми.

Здатність гідролізувати сполуки мають усі мікроорганізми. Однак застосування у біодеградації продуктів метаболізму антибіотикосинтезуючих бактерій (*Bacillus subtilis*, *Bacillus licheniformis*), які використовуються як у медицині, так і ветеринарії, викликає значне зацікавлення у соціумі [18].

Основним джерелом енергії життєдіяльності *Bacillus subtilis* і *Bacillus licheniformis* є органічні речовини, характерні для донних відкладень водойм, такі як листя, фекалії риб і водоплавних птахів, відмерлі водорості, органічні відходи, добрива, і поживні елементи азоту, фосфору, нітратів, фосфатів. Тому бацили можуть бути частиною активного мулу водойм, активізуючись у разі забруднення води. Застосування даних мікроорганізмів та інших корисних бактерій, які здатні трансформувати сполуки фосфору, фосфоліпіди (*B. megaterium*) з метою контролю активності ціанобактерій може розв'язати проблему ціанозабруднення вже сьогодні [18].

ВИСНОВКИ

Цікавими практичними розробками цієї проблеми є застосування гумінових добрив та бактеріальних препаратів на основі мікроорганізмів у водоймах ТОВ «Агрофірми Колос». За участі науково-дослідної лабораторії на підприємстві розробляються безпечні біологічні препарати для боротьби із «цвітінням». Однак це вдається лише за комплексного застосування препаратів.

За використання гуміновмісних препаратів, що виробляються на базі ТОВ «Агрофірми Колос» (добрива «Вермибіогумат» ТУ У 20.1-03754120-002:2018), біологічних препаратів серії Мікробіофіт Органік (біодеструкція), вдається контролювати «цвітіння» водойм. Окрім того, мікроорганізми цих біологічних препаратів ТОВ «Агрофірми Колос» володіють антагоністичною активністю щодо широкого спектра патогенних і умовно-патогенних бактерій, грибів, інтенсивно розкладають органічні забруднювачі водойм, сприяють зменшенню активності синьозелених водоростей і є ефективним засобом біологічної реабілітації слабопроточних водойм, що використовуються для розведення риби.

У боротьбі із синьозеленими водоростями спрацьовують механізми комплексу, а не окремі сполуки. Практично миттєву загибель ціанобактерій викликають гуміновмісні добрива, які вносять у водойми. Наступне внесення бактеріального препарату, призначене для деструкції, забезпечує пришвидшення деструктивних процесів та дезінтоксикацію мінералізації.

Після здійснення пригнічення, знищення ціанобактерій, активації їх біорозпаду можна повторно вносити бактеріальні препарати на основі антагоністів, продуцентів ферментів та антибіотиків, що забезпечить активний розпад токсичних продуктів деградації токсинів.

Фактом, що підтверджує зменшення або знищення ціаней та їх токсинів є планомірне очищення водойм, що забезпечують добрива «Вермибіогумат», біологічний препарат «Мікробіофіт Органік (біодеструкція)», які використовує ТОВ «Агрофірми Колос» для боротьби із «цві-

тінням». Після проведення деструктивних процесів у водойму вносили інокулят на основі *Chlorella vulgaris* (хлорела звичайна з відділу *Chlorophyta*) власного виробництва. Це препарат-біодеструктор практично закінчує боротьбу із ціанобактеріями та бореться із високим вмістом фосфору у водоймах. Ці водорості активно перетворюють як органічні, так і неорганічні речовини водойм й тим самим її очищують.

Позитивний вплив метаболітів бактерій біологічного препарату «Мікробіофіт Органік (біодеструкція)», біоактивних фітохімічних речовин і антимікробних сполук зеленої водорості *Chlorella vulgaris* можуть забезпечити не тільки корисне «цвітіння» водойм, а й сприяти очищенню забруднених вод.

Отже, проведено короткий аналіз досліджень та публікацій щодо синьозелених водоростей, їх здатності активно протистояти природі, при цьому утворювати токсичні речовини. Більшість токсинів

ціанобактерій містять азотисті гетероцикли, фенольні речовини, амінокислоти та за структурою є циклічними. Така будова речовин забезпечує їх стійкість до розпаду. Застосування лужних гуміновмісних речовин з метою зниження активності ціанобактерій та розщеплення токсинів може дозволити використання гуміновмісних сполук у визначених та безпечних для водойм концентраціях для процесу їх очищення. Застосування у комплексі (системі) очисних заходів біологічних препаратів на основі живих бактерій, визнаних наукою як корисних, дасть змогу забезпечити дезінтоксикацію процесів мінералізації, які утворюються внаслідок відмирання клітин синьозелених водоростей, розщеплення органічних сполук водойм та ціанотоксинів. Введення комплексної системи очищення водойм може забезпечити зниження екологічної небезпеки, яка викликана евтрофікацією водойм.

ЛІТЕРАТУРА

1. Вассер С.П., Кондратьєва Н.В., Масюк Н.П. та ін. Водорості: довід. Київ: Наук. думка, 1989. 252 с.
2. Гавришук В.В., Каськів В.І. Обґрунтування доцільності проектування систем поверхневого водовідведення як складової частини комплексу очисних споруд на дорогах. *Дороги і мости*. 2020. Вип. 21. С. 95–109.
3. Мальований М.С., Никифоров В.В., Харламова О.В., Синельников О.Д. Рациональна технологія утилізації синьо-зелених водоростей. *Науковий вісник НЛТУ України*: зб. наук.-техн. пр. 2015. Вип. 25.10. С. 140–149.
4. Клоченко П.Д., Ведмідь В.А., Васильчук Т.А., Василенко О.В. Особливості впливу гумінових кислот на розвиток планктонних водоростей. *Гідробіологічний журнал*. 2010. Т. 46. № 5. С. 102–110.
5. Клоченко П.Д., Васильчук Т.А., Василенко О.В. та ін. Особливості впливу фульвокислот на розвиток планктонних водоростей. *Гідробіологічний журнал*. 2012. Т. 48, № 2. С. 68–76.
6. Синельников О.Д. Забезпечення екологічної безпеки водосховищ шляхом використання мікроводоростей для виробництва енергоносіїв: дис. ... канд. техн. наук: 21.06.01. Львів, 2016. 144 с.
7. Aguilera A., Klemenich M., Sueldo, D.J. et al. Cell death in cyanobacteria: current understanding and recommendation for reaching consensus on its nomenclature. *The frontiers of microbiology*. 2021. Vol. 12. P. 631654. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.631654>.
8. Bauma-Gregson K., Kudela R.M., Power M.E. and Humbert J.F. (Ed.). Wider spread toxoid is found in cyanobacterial mats of benthos throughout the river network. *PLOS ONE*. 2018. Vol. 13 (5). P. 0197669.
9. Bernstein H., Bernstein C. and Michod R.E. Sex with microbial pathogens. *Infect. Genet. Evol.* 2018. Vol. 57. P. 8–25.
10. Claessen Dennis, Rozen Daniel E., Kuipers Oscar P. et al. Bacterial Solutions for Multicellularity: A Story about Biofilms, Filaments and Fruit Bodies. *Reviews of the nature of microbiology*. 2014. Vol. 12 (2). P. 115–124.
11. Cox, Paul Alan; Brand, Larry E.; Murch, Susan J. et al. Public Health Response to Toxic Cyanobacterial Blooms: Perspectives on 2016 Florida Events. *Water policy*. 2018. Vol. 20 (5). P. 919–932.
12. Dawson R.M. The Toxicology of Microcystins. *Toxicol.* 1998. Vol. 36 (7). P. 935–962.
13. Freitas, Hercules Resende. *Chlorella vulgaris* as a Source of Essential Fatty Acids and Micronutrients: A Brief Commentary. *Open scientific journal of plants*. 2017. Vol. 10 (1).
14. Hu Chenlin and Rzimsky Peter. Programmed cell death and concomitant release of microcystin in flowering freshwater cyanobacteria Microcystic: from identification to ecological relevance. *Toxins*. 2019. Vol. 11 (12). P. 706.
15. Huisman Jef, Codd Jeffrey A., Paerl Hans W. et al. Blooming cyanobacteria. *Reviews of the nature of microbiology*. 2018. Vol. 16 (8). P. 471–483.

16. Harrison R.J., Dunin-Borkowski R.E. and Putnis A. Humic acid inhibits the formation of colonies of cyanobacteria *Microcystis* at high iron levels. *Chemosphere* 281. 2021. P. 130742. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130742>.

17. Sivonen K., Kononen K., Carmichael W.W. et al. Occurrence of the hepatotoxic cyanobacterium *Nodularia spumigena* in the Baltic Sea and structure of the toxin. *Appl. Environ. Microbiol.* 1990. Vol. 55(8). P. 1989–1995.

18. Paerle H.W. and Paul V.J. Climate change: link to the global spread of harmful cyanobacteria. *Aquatic research*. 2012. Vol. 46. P. 1349–1363. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2011.08.002>.

19. R. Harwood, Jean-Marie Muillon, Suzanne Paul and Jose Arnau. Secondary metabolite production and safety of industrially important members of the *Haemaphysalis*

coli group *Colin*. *FEMS Microbiology Reviews*. 2018. Vol. 42. Is. 6. P. 721–738.

20. Sitoki L., Kurmayer R. and Rott E. Spatial variation in phytoplankton composition, biomer and resulting microcystin concentrations in Nyanza Bay (Lake Victoria, Kenya). *Hydrobiologia*. 2012. Vol. 691 (1). P. 109–122.

21. Stevens S.E. and Porter R.D. Transformation of *Agmenellum quadrupdatum*. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 1980. Vol. 77 (10). P. 6052–6055.

22. Tanino H., Nakata T., Kaneko T. and Kishi Y. Stereospecific total synthesis of d, l-saxitoxin. *Journal of the American Chemical Society*. 1997. Vol. 99 (8). P. 2818–2819.

23. Visser Petra M., Verspagen Jolanda M.H., Sandrini Giovanni et al. How rising CO₂ and global warming can stimulate harmful cyanobacterial blooms. *Harmful algae*. 2016. Vol. 54. P. 145–159.

REFERENCES

- Vasser, S.P., Kondratieva, N.V., Masyuk, N.P. et al. (1989). *Vodorosti: dovidnyk [Algae: a handbook]*. Kyiv [in Ukrainian].
- Gavryshchuk, V.V. & Kaskiv, V.I. (2020). Obgruntuvannya dotsil'nosti proektuvannya system poverkhnovoho vodovidvedennya yak skladovoyi chastyny kompleksu ochysnykh sporud na dorohakh [Substantiation of the feasibility of designing surface drainage systems as an integral part of the complex of treatment facilities on roads]. *Dorohy i mosty — Roads and Bridges*, 21, 95–109 [in Ukrainian].
- Malyovanyi, M.S., Nikiforov, V.V., Kharlamova, O.V. & Sinelnikov, O.D. (2015). Ratsional'na tekhnolohiya utylizatsiyi syn'o-zelenykh vodorostey [Rational technology of utilization of blue-green algae]. *Naukovyy visnyk NLTU Ukrainy: zbirnyk nauko-tekhnichnykh prats' — Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine: collection of scientific and technical works*, 25 (10), 140–149 [in Ukrainian].
- Klochenko, P.D., Vedmid, V.A., Vasylichuk, T.A. & Vasylenko, O.V. (2010). Osoblyvosti vplyvu huminykh kyslot na rozvytok planktonnykh vodorostey [Features of the influence of humic acids on the development of planktonic algae]. *Hidrobiolohichnyy zhurnal — Hydrobiological Journal*, 46, 5, 102–110 [in Ukrainian].
- Klochenko, P.D., Vasylichuk, T.A., Vasylenko, O.V. et al. (2012). Osoblyvosti vplyvu ful'vokyslot na rozvytok planktonnykh vodorostey [Features of the influence of fulvic acids on the development of planktonic algae]. *Hidrobiolohichnyy zhurnal — Hydrobiological Journal*, 48, 2, 68–76 [in Ukrainian].
- Synelnikov, O.D. (2016). Zabezpechennya ekolohichnoyi bezpeky vodoskhovyshch shlyakhom vykorystannya mikrovdorostey dlya vyrobnytstva enerhonosiyiv [Ensuring the environmental safety of reservoirs by using microalgae for energy production]. *Candidate's thesis*. Lviv [in Ukrainian].
- Aguilera, A., Klemenich, M., Sueldo, D.J. et al. (2021). Cell death in cyanobacteria: current understanding and recommendation for reaching consensus on its nomenclature. *The frontiers of microbiology*, 12. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.631654> [in English].
- Bauma-Gregson K., Kudela, R.M., Power, M.E. & Humbert, J.F. (Ed.). (2018). Wider spread toxoid is found in cyanobacterial mats of benthos throughout the river network. *PLOS ONE*, 13 (5), 0197669 [in English].
- Bernstein, H., Bernstein, C. & Michod, R.E. (2018). Sex with microbial pathogens. *Infect. Genet. Evol.*, 57, 8–25 [in English].
- Claessen, Dennis, Rozen, Daniel E., Kuipers, Oscar P. et al. (2014). Bacterial Solutions for Multicellularity: A Story about Biofilms, Filaments and Fruit Bodies. *Reviews of the nature of microbiology*, 12 (2), 115–124 [in English].
- Cox, Paul Alan, Brand, Larry E., Murch, Susan J. et al. (2018). Public Health Response to Toxic Cyanobacterial Blooms: Perspectives on 2016 Florida Events. *Water policy*, 20 (5), 919–932 [in English].
- Dawson, R.M. (1998). The Toxicology of Microcystins. *Toxicon*, 36 (7), 935–962 [in English].
- Freitas, Hercules Resende (2017). *Chlorella vulgaris* as a Source of Essential Fatty Acids and Micronutrients: A Brief Commentary. *Open scientific journal of plants*, 10 (1) [in English].
- Hu, Chenlin & Rzymisky, Peter (2019). Programmed cell death and concomitant release of microcystin in flowering freshwater cyanobacteria *Microcystis*: from identification to ecological relevance. *Toxins*, 11 (12), 706 [in English].
- Huisman, Jef, Codd, Jeffrey A., Paerl, Hans W. et al. (2018). Blooming cyanobacteria. *Reviews of the nature of microbiology*, 16 (8), 471–483 [in English].
- Harrison, R.J., Dunin-Borkowski, R.E. & Putnis, A. (2021). Humic acid inhibits the formation of colonies of cyanobacteria *Microcystis* at high iron levels. *Chemosphere* 281, 130742. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130742> [in English].
- Sivonen, K., Kononen, K., Carmichael, W.W. et al. (1990). Occurrence of the hepatotoxic cyanobacte-

- rium *Nodularia spumigena* in the Baltic Sea and structure of the toxin. *Appl. Environ. Microbiol.*, 55 (8), 1989–1995 [in English].
18. Paerle, H.W. & Paul, V.J. (2012). Climate change: link to the global spread of harmful cyanobacteria. *Aquatic research*, 46, 1349–1363. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2011.08.002> [in English].
19. R., Harwood, Jean-Marie, Muillon, Suzanne, Paul & Jose, Arnau (2018). Secondary metabolite production and safety of industrially important members of the *Hay coli* group Colin. *FEMS Microbiology Reviews*, 42 (6), 721–738 [in English].
20. Sitoki, L., Kurmayer, R. & Rott, E. (2012). Spatial variation in phytoplankton composition, biomer and resulting microcystin concentrations in Nyanza Bay (Lake Victoria, Kenya). *Hydrobiologia*, 691 (1), 109–122 [in English].
21. Stevens, S.E. & Porter, R.D. (1980). Transformation of *Agmenellum quadrupdcatum*. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 77 (10), 6052–6055 [in English].
22. Tanino, H., Nakata, T., Kaneko, T. & Kishi, Y. (1997). Stereospecific total synthesis of d, l-saxitoxin. *Journal of the American Chemical Society*, 99 (8), 2818–2819 [in English].
23. Visser, Petra M., Verspagen, Jolanda M.H., Sandrini, Giovanni et al. (2016). How rising CO₂ and global warming can stimulate harmful cyanobacterial blooms. *Harmful algae*, 54, 145–159 [in English].

Стаття надійшла до редакції журналу 17.07.2023
