

УДК 574.5 (075)

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.6-51.9>

ВИКОРИСТАННЯ ШТАМУ МІКРОВОДОРОСТІ *CHLORELLA VULGARIS* POLIKARP ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ПРІСНИХ ВОДОЙМ ВІД ТЕХНОГЕННИХ ЗАБРУДНЕНЬ

Улицький О.А., Пашкевич Л.П.

Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, корп. 2, 03035, м. Київ
olegulytsky@gmail.com

Вивчено екологічний стан водних екосистем, що дозволяє визначити структуру розповсюдження різних видів гідробіонтів та їх роль у гідросфері. Зазначено, що інтенсивні антропогенні навантаження, розвиток та досягнення світової науки призвели до створення нових приладів та обладнання, що дозволяють своєчасно здійснювати моніторингові спостереження на водоймах різного призначення, але й вивчати умови та особливості відновлення водних ресурсів та їх властивостей, створення умов, за яких ризик антропогенного впливу на довкілля стане мінімально-можливим завдяки природним та антропогенним чинникам. Для водойм, розташованих в зоні ведення сільського господарства та об'єктів промислового виробництва, характерним є порушення температурного та гідрологічного режимів, накопичення значної маси фітопланктону та збільшення органічного забруднення, накопичення важких металів [1]. У таких водоймах порушуються умови життєдіяльності річної та прибережної зон екосистем, що сприяє масовому розвитку ціанобактерій (синьо-зелених водоростей) на значній частині водойми.

Проаналізувавши останні публікації, в яких описані наукові дослідження щодо застосування штаму мікро-водорості Хлорелла для поліпшення якості води у відкритих водоймах загального користування, зроблено висновок, що використання такої біотехнології для відновлення водного фонду є досить ефективною. Регулярне підселення штаму Хлорелла протягом декількох років дає змогу зменшити вдвічі індекс забруднення води (ІЗВ) і довести водний ресурс до споживчої норми. Запропонований експериментальний метод досліджень, пов'язаний з активним впливом на екосистеми в природних та лабораторних умовах, дозволяє вивчити явища ізольовано та досягати створення стійких продуцентів біомаси залежно від виду призначення водного об'єкту. Окрім традиційних методів очищення водойм широкого застосування набувають такі, що засновані на основі біотехнологічних підходів, зокрема, з використанням мікроводоростей (фітопланктону), вищих водних рослин (макрофітів), об'єктів іхтіофауни (риб з різним спектром живлення), а також молюсків – біомеліорантів. *Ключові слова:* технології очищення, хлорелла, забруднення водойм, індекс забруднення води, альголізація, фітопланктон, індикація екологічного стану.

Use of *Chlorella vulgaris* Polikarp microalgae strain for purification of freshwaters from technological pollution. Ulytsky O., Pashkevich L.

The study of the ecological situation in aquatic ecosystems makes it possible to assess the distribution structure of various types of hydrobionts and their role in the hydrosphere. Meanwhile, the intensive development of anthropogenic loads and the achievements of world science have led to the creation of new devices and equipment that allow to quickly carry out monitoring observations on reservoirs of various purposes, but also to study the conditions for restoring the state of water resources and their properties, creating conditions in which the risk of anthropogenic influence on the environment is minimally possible due to natural and anthropogenic factors. Violations of temperature and hydrological regimes, accumulation of a significant mass of phytoplankton and increase of organic pollution, accumulation of heavy metals are characteristic of reservoirs located in the zone of agriculture and industrial production facilities. In such reservoirs, the living conditions of the river and coastal zone of the ecosystem are disturbed, which contributes to the massive development of cyanobacteria (blue-green algae) in a significant part of the reservoir. Having analyzed the latest publications describing scientific experiments on the use of a strain of *Chlorella* micro-algae to improve the quality of water in public open water bodies, it is possible to draw a conclusion about the effectiveness of such biotechnology for the restoration of the water fund. The use of regular restocking of the *Chlorella* strain over several years can halve the water pollution index (WPI) and bring the water resource to the consumer standard. The proposed experimental method of research is related to the active impact on ecosystems in natural and laboratory conditions. The method makes it possible to study phenomena in isolation and achieve the creation of sustainable biomass producers depending on the type of purpose of the water object. Instead of traditional methods of cleaning, methods based on biotechnological approaches are becoming widely used, in particular, using microalgae (phytoplankton), higher aquatic plants (macrophytes), ichthyofauna objects (fish with a different spectrum of nutrition), as well as molluscs that are bioremediants. *Key words:* purification technologies, chlorella, water pollution, water pollution index, algalization, phytoplankton, indication of ecological state.

Постановка проблеми та актуальність дослідження. Забруднення води шкідливими домішками неорганічної й органічної природи є отруйними і супроводжується кумулятивним ефектом, а в подальшому – зниженням вмісту O_2 у воді, зміною її фізичних властивостей – прозорості і температури. Особливу небезпеку створює теплове забруднення

водойм, істотно змінюючи їх термічний та біологічний режими [1, 2–6]. на сьогодні гідросфера не спроможна самоочищуватися, саморегулюватися й самовідновлюватися – вона дедалі активніше деградує. Нині річки, озера і інші водойми самотужки вже не можуть подолати дедалі зростаюче антропогенне навантаження у вигляді – «цвітіння».

Найвагоміше значення з розвитку фітопланктону до рівня «цвітіння» води мають синьо-зелені водорості. Забруднення водойм внаслідок розкладання великих накопичень маси водоростей характеризується як біологічне самозабруднення. Період домінування синьо-зелених водоростей пов'язаний із пригніченням усіх інших компонентів фітопланктону внаслідок затемнення, перехоплення біогенних елементів і впливу токсичних виділень на інші планктонні види. Під час «цвітіння» води у водоймах поряд з продуктами розкладання синьо-зелених водоростей відбувається активний розвиток патогенних бактерій, що призводить до посилення загальної токсичності водного середовища та загострення епідеміологічної ситуації у водоймі.

Нині інноваційним підходом, що дозволяє істотно зменшити рівень забруднення водойм та поліпшити органолептичні властивості води є біоремедіація водойм суспензією хлорели, яка основана на альголізації водойм планктонними штамами зеленої мікрородості *Chlorella vulgaris* Polikarp [6, 7–9].

Для боротьби із «цвітінням» води рекомендується застосовувати біологічний спосіб боротьби. Технологія заснована на біологічних властивостях живої планктонної хлорели пригнічувати дію синьо-зелених водоростей (ціанобактерій).

Тому суспільство повинно вдатися до заходів для очищення забруднених вод і повернення водойм різного призначення до стану, придатного для подальшого їх використання.

Водні об'єкти України

Поверхневі прісні водні об'єкти України¹ охоплюють 24,1 тис. кв. км, або 4,0 % загальної території (603,7 тис. кв. км) держави. До цих об'єктів належать річки, озера, водосховища, ставки, канали тощо.

Скидання забруднюючих речовин у водні об'єкти та очистка стічних вод

За результатами узагальнення даних державного обліку водокористування у 2021 році у поверхневі водні об'єкти скинуто 4684,6 млн. куб. м стічних вод, у тому числі: забруднені складають 541,5 млн. куб. м (11,6%), нормативно-очищені – 1430 млн. куб. м (30,5%) та нормативно-чисті без очистки – 2712,9 млн. куб. м (57,9%)

Мета роботи та виклад основного матеріалу. Мета роботи полягає у розробці технологій вирощування (на базі високопродуктивного штаму *CHLORELLA VULGARIS POLIKARP*) змішаних штамів із використанням місцевих культур мікрородості для створення стійких продуцентів біомаси залежно від виду призначення водного об'єкту.

Для досягнення мети необхідно:

– проаналізувати антропогенну дію, що чиниться на водні екосистеми ціанобактеріями (синьо-зелені водорості);

– обґрунтувати методику проведення досліджень;

– розробити методологічний підхід до комплексної оцінки екологічного фактору при розробці Технологічних регламентів та Технологічних інструкцій з вирощування і застосування змішаних штамів;

– розробити технологічну інструкцію створення та масштабування змішаних штамів.

Для визначення ступеня забрудненості води використовуються чотири критерії шкідливості, по кожному з яких сформовано певну групу речовин і специфічних показників якості води:

– критерій санітарного режиму (W_s) враховує розчинений кисень, БСК₅, ХСК і специфічні забруднення, що нормуються (W) за впливом на санітарний режим;

– критерій органолептичних властивостей (W_{ϕ}) враховує запах, завислі речовини, ХСК і специфічні забруднення, що нормуються за органолептичною ознакою шкідливості;

– епідеміологічний критерій (W_e) враховує небезпеку мікробного забруднення;

– критерій безпеки санітарно-токсикологічного забруднення (W_{ct}) враховує ХСК і специфічні забруднення, що нормуються за санітарно-токсикологічною ознакою.

Одні й ті ж самі показники можуть водночас відображатися в кількох групах шкідливості. Комплексну оцінку вираховують окремо для кожної лімітуючої ознаки шкідливості (ЛОШ) за формулами:

$$W = 1 + \frac{\sum_{i=1}^n (\delta_i - 1)}{n};$$

$$d_i = C_i / N_i$$

де W – комплексна оцінка рівня забруднення води за даною ЛОШ;

n – кількість показників, що використовуються для розрахунків;

N_i – нормативне значення одиничного показника (найчастіше = ГДК);

d_i – кратність перевищення фактичної концентрації i -го інгредієнта у воді (C_i) до нормативного значення одиничного показника.

Якщо $d_i < 1$, тобто концентрація менше нормативної, то приймається $d_i = 1$.

За відповідними формулами розраховують вміст розчиненого кисню і завислих речовин. Розчинений кисень нормується за нижнім рівнем значення, тобто його вміст має бути меншим за 4 мг/дм³, тому при < 4 мг/дм³ для нього прийнято:

$$d_1 = 1 + 10 \frac{N_1 - C_1}{N_1}$$

Оскільки самі розраховані показники ніщо не стверджують, до формул пропонується традиційна класифікаційна таблиця діапазонів значень комплексних оцінок W (табл. 1).

¹ Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2021 році. URL: <https://mep.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/Natsdopovid-2021-n.pdf>

Ступінь забруднення водойм залежно від значень комплексних показників W

| Рівень забруднення | Критерій забруднення за величинами комплексних оцінок | | | |
|--------------------|---|------------------------------------|--|------------------------------------|
| | Органолептичний (W _ф) | Санітарний режим (W _с) | Санітарно-токсикологічний (W _{ст}) | Епідеміологічний (W _е) |
| Допустимий | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Помірний | 1,0–1,5 | 1,0–3,0 | 1,0–3,0 | 1,0–10,0 |
| Високий | 1,5–2,0 | 3,0–6,0 | 3,0–10,0 | 10,0–100,0 |
| Найвищий | >2,0 | >6,0 | > 10,0 | > 100,0 |

Традиційно для очищення забруднених та стічних вод, а також подолання біологічних перешкод застосовують фізико-хімічні і механічні методи [10–14]. Проте вони не дозволяють у достатній мірі очищати воду від органічних та неорганічних забруднювачів, які потрапляють і накопичуються у поверхневих водоймах та призводять до значних матеріальних затрат на використання спеціальної техніки, обладнання та реагентів. За таких обставин, у багатьох країнах світу, в тому числі і в Україні, протягом останніх років відмовляються від традиційних методів очищення та знезараження стічних вод зважаючи на їх ненадійність та складність у експлуатації, високу вартість та енергоємність. Замість традиційних методів очищення широкого застосування набувають методи, засновані на основі біотехнологічних підходів, зокрема, з використанням мікроводоростей (фітопланктону), вищих водних рослин (макрофітів), об'єктів іхтіофауни (риб з різним спектром живлення), а також моллюсків що є біомеліорантами [15–17]. Проаналізувавши останні публікації, в яких описані наукові дослідження щодо застосування штаму мікро-водорості Хлорелла для антропогенного поліпшення якості води у відкритих водоймах загального користування, можна зробити висновок щодо ефективності такої біотехнології задля відновлення водного фонду. Використання регулярного підселення штаму Хлорелла протягом кількох років може знизити вдвічі ІЗВ (індекс забруднення води) і призвести водний ресурс до споживчої норми [18–20]. Всі ці дослідження корелюються одним і тим же висновком – при використанні біотехнології підселення мікроводорості у відкриті водойми, інгібується розвиток синьо-зеленої та збудників цвітіння *Anabaena flos-aqua* у *Microcystis aeruginosa* водорості і припиняється цвітіння водойм, що, у свою чергу, зменшує забруднення водойм і створює більш толерантне середовище для риби та інших мешканців. Однак, не вирішеним залишається питання – де брати біомасу Хлорели, незабрудненої патогенними та шкідливими мікроорганізмами із урахуванням об'єму прісних водних ресурсів України, щоб у досить короткій перспективі досягти відповідних результатів, описаних у наукових працях.

Технологія швидкого вирощування чистої культури мікроводорості

Мета роботи полягає у розробці технології швидкого вирощування чистої культури мікроводорості, незабрудненої шкідливими та патогенними мікроорганізмами (на базі високопродуктивного штаму *CHLORELLA VULGARIS POLIKARP*) змішаних штамів із використанням місцевих культур мікроводорості для створення стійких продуцентів біомаси залежно від виду призначення водного об'єкту.

Матеріали та методи. Під час досліджень проводилися практичні роботи по створенню та вивченню ефективності біореактора закритого типу BioDrum, виконаного згідно із патентом на корисну модель № 126380 «Автоматизований комплекс по вирощуванню мікроводоростей «BIODRUM».

Мікроводорості вирощувалися у середовищі Тамія. Облік концентрації біомаси виконувався за допомогою камери Горяєва та електронного мікроскопу.

Для досягнення мети використовується штам мікроводорості *Chlorella vulgaris*, який депоновано у колекцію Інституту ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України (акронім IBASU-A), що є складовою Національного гербарію України, під назвою Polikarp. Колекція культур мікроводоростей (IBASU-A) розглядається самостійно як об'єкт національного надбання.

За результатами молекулярно-філогенетичного вивчення отримані нуклеотидні послідовності гену 18S рРНК *Ch. vulgaris* Polikarp, які задепоновані в базі GenBank за № MW008650.1.

Біореактор було обладнано автоматизованою системою керування технологічним процесом вирощування мікроводорості із організацією серверної технології накопичення даних, та віддаленого керування параметрами технологічного процесу без безпосередньої присутності людського персоналу в лабораторії, де експлуатувалась дослідна установка. Роботи проводилися в рамках Меморандуму про співпрацю між ТОВ «Нафтогазінжиніринг» та Державною екологічною академією післядипломної освіти та управління в галузі технологій захисту навколишнього середовища та раціонального природокористування. Створено автономний модульний комплекс BIODrum® з вирощування змішаних штамів мікроводорості *Chlorella* для біологічного очищення поверхневих вод (рис. 1).

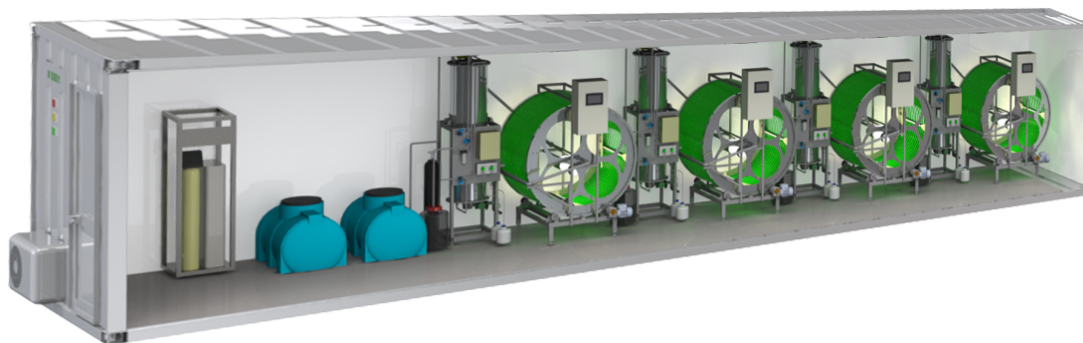


Рис. 1. Автономний модульний комплекс BIODrum®

Склад комплексу:

Модуль біореакторів – 1 од

Модуль підготовки поживного розчину та суспензії – 1 од

Модуль CO₂ – 1 од

Основні технічні характеристики комплексу:

– Потужність виробництва: 162 000 літрів суспензії хлорели на рік

– Утилізація CO₂: 16 200 кг на рік

– Виробництво O₂: 9 600 кг на рік

– Біологічна очистка води: 1 500 000 м³/150 Га

– Максимальна кількість CO₂ в системі: 1350 кг (25 діб безперервної роботи)

Основні екологічні показники:

– Насичення води природними антагоністами, які пригнічують ріст синьо-зелених водоростей, перешкоджаючи «цвітінню», і як наслідок, заморам риби та неприємного запаху.

– Насичення води киснем, поглинаючи вуглекислий газ, який мікрородорість переробляє та виділяє кисень, що сприяє рибі легше дихати, а також переносити підлідну зимівлю та літні надмірні підвищення температури води.

– Хлорела сама по собі є кормом для риби, а також створює сприятливе середовище для розвитку кормових водних організмів, зоо та фіто планктону (дафнії, рачки, коловратки), які, у свою чергу, поїдаються рибою, а також є відмінним стартовим кормом для малька.

– Хлорела – це комплекс із 650 речовин: незамінні амінокислоти, жири, вітаміни, мікро та макро елементи у легкозасвоюваному вигляді. Цей фактор підвищує імунітет риби, зводить до мінімуму захворюваність та відхід молодняка.

– Хлорела виступає як живильне середовище для розвитку біфідобактерій, внаслідок чого всі корми засвоюються набагато краще та швидше, викликаючи прирости до 30–40%.

Впровадження комплексної біоінженерної системи відновлення природних механізмів біотичної саморегуляції поверхневих водойм.

Перші кроки щодо створення експериментальної науково-дослідної ділянки з впровадження автономного біоінженерного комплексу для віднов-

лення природних механізмів біотичної саморегуляції поверхневих водойм були проведені на водоймах села Музичі, Київської області.

Сучасний екологічний стан природних водойм України, вплив на них багаторічного скиду частково очищених скидних вод поступово призводить до екологічної катастрофи. На початку XXI сторіччя екологічна ситуація, в якій опинилися водойми України, викликає серйозну занепокоєність. Однією з основних проблем є біологічне забруднення вод природних водоймищ патогенними та умовно-патогенними мікроорганізмами, що відбувається в результаті надходження в них стічних вод з прибережних населених пунктів, промислових вод, багатих на органічні сполуки з поживними речовинами для мікроорганізмів [17]. В процесі евтрофікації надлишок поживних речовин у водоймах викликає надмірне розмноження водоростей.

Загальна характеристика водойми:

Дві природні водойми площею 8842 м², глибиною 0.5–2 метри.

Ці природні водойми – місцем гніздування великих і дрібних водоплавних птахів ніколи не очищалися. Береги водойм щільно обсажені деревами. Внаслідок накопичення у водоймах фекалій водоплавних птахів і риб, опалого листя та гілок забруднення водойм набуло інтенсивного характеру з такими ознаками:

– донний осад товщиною 1 метр, високий вміст у водоймі органічних речовин наноси, екскрементів риб і водоплавних птахів, листя, гілок;

– неконтрольоване розмноження ціанобактерій, наліт на камінні від спірогіри (*Spirogyra*), перевищення ГДК за різними металами у складі води;

– відчутний анаеробний запах.

У реєстровій документації озеро зазначене як струмок, що пов'язує каскад озер, як відображено на карті.

Рух на невеликому гумовому човні по озеру практично неможливий через підводну рослинність (водорості та підводне коріння очерету).

В озері є карась (до 20 см особини) та щука (невеликого розміру – до 50 см особини).

Дно мулисте з мулу до 20–30 см.

Експеримент з альголізації водойма с. Музичі (Київська область, рис. 2), показав особливості відтворення хлорели (*Chlorella* штаму Polikarp) та можливості її використання для біологічної реабілітації поверхневих вод.

Під час оцінки зміни якості вод використовувався коефіцієнт оптичної щільності, який відображав концентрацію водоростей у воді. Автор виконання робіт (Л. Пашкевич) запатентував спосіб культивування нового штаму зеленої водорості *Chlorella* штаму Polikarp, якою і здійснював альголізацію ставка с. Музичі.

Діапазон зростання цієї одноклітинної водорості досить широкий не тільки на поживних середовищах, але і в природних водах. Вихідним для штаму *Chlorella* штаму Polikarp був штам *Chlorella* ..., який культивувався на стічних водах побутових, промислових і сільськогосподарських підприємств.

За аналізованими критеріям (розмір клітини, зростання на живильному середовищі, здатність до

осадження, прилипання до стінок судини, ставлення до світла) аборигенна форма хлорели за основними показниками поступалася штаму *Chlorella vulgaris* (аборигенний вид Пензенського водосховища, 1998 рік). У наступний період була спроба альголізації у підлідний період. Щорічно у двох місцях водойма вносилися культура хлорели з щільністю клітин 50–60 млн/мл 20 л.

Завдяки цьому стартові умови для розвитку аборигенних та акліматизованих видів ставали ідентичними. У відсотковому відображенні від загальної чисельності клітин фітопланктону хлорела становила 10% навесні та 30% влітку та восени.

Перший етап альголізації

Внесення суспензії здійснено 12.04.2023 р. при температурі води +10° С.

Для альголізації водойми використовували суспензію хлорели з концентрацією водорості 50 млн. кл/мл. Суспензію вносили згідно рекомендації виробника, ТОВ «НАФТОГАЗІНЖИНІРІНГ» із

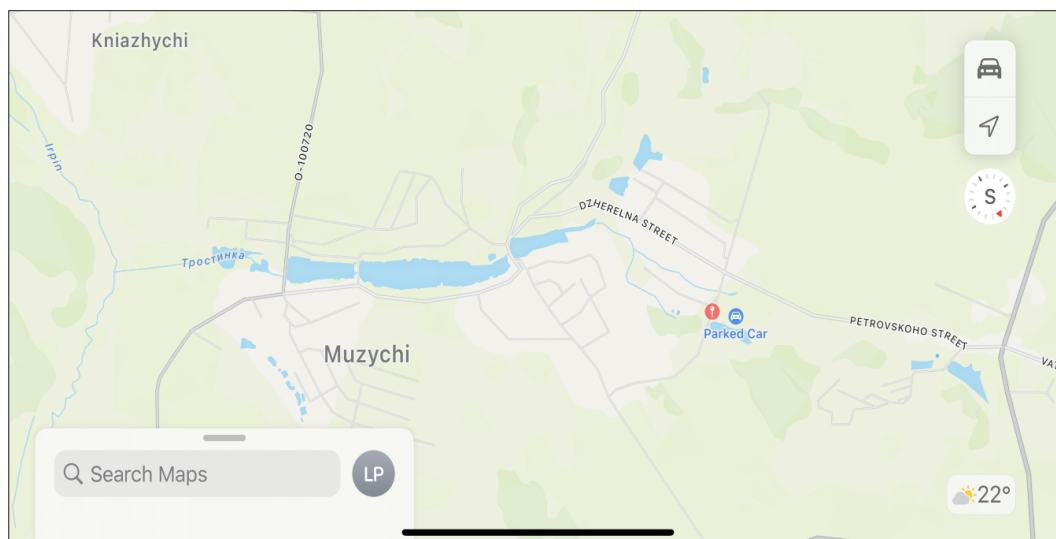


Рис. 2. Водойми поверхневих вод с. Музичі



Рис. 3. Фото. Внесення суспензії хлорели

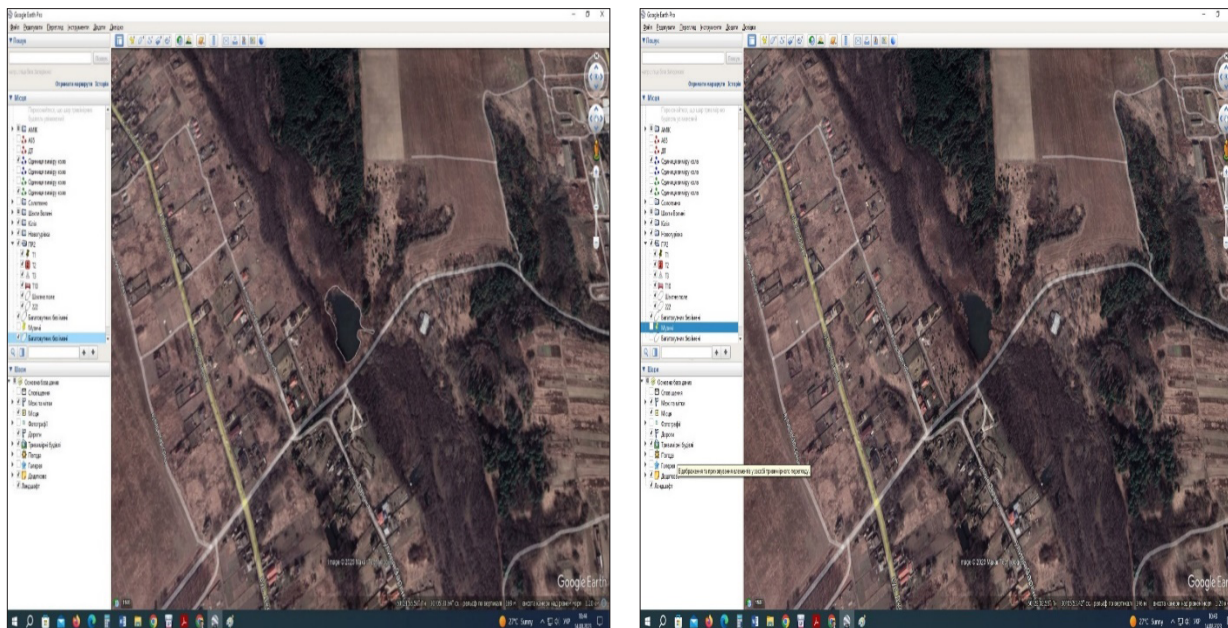


Рис. 4. Знімок 14.08.2023

розрахунку 20 л/га. Суспензія була рівномірно розподілена вздовж всієї водойми (по периметру).

Результати за даними лабораторних досліджень. З метою визначення можливих параметрів зміни якісного стану водних об'єктів за умов вирощування високопродуктивного штаму *CHLORELLA VULGARIS POLIKARP* було здійснено відбір проб із спостережних пунктів різних об'єктів із подальшим виконанням лабораторного аналізу за переліком показників, що використовуються для визначення якості води водних рибогосподарських об'єктів.

Проби відбиралися до введення хлорелли та через 15 днів після її розмноження у водному середовищі.

Визначалися органолептичні показники, сухий залишок, а також виконані дослідження проб води на наявність органічних забруднювачів (зокрема, ПАВ), неорганічних забруднювачів (фториди, азотні солі, нітриту, нітрати), концентрації розчиненого кисню, хімічне споживання кисню та ін.

За результатами аналізу виконаний розрахунок ступеня забруднення водойм (W) за санітарно-токсикологічним критерієм, що дозволив оцінити фактори істотних змін режиму водного середовища у результаті здійснення експерименту.

У якості параметрів, що визначають санітарно-токсикологічний стан водного середовища, відібрані наступні – перманганатна окиснюваність, розчинений кисень, фтор, нітрати, нітриту, амоній (солі амонію). Таблиці 1–3 демонструють фактичні концентрації наявних речовин до та через 15 днів після введення хлорелли у водойми у трьох місцях відбору проб.

Ступінь забруднення водойм за санітарно-токсикологічним критерієм до та після заселення хлорелли наведено у таблиці 4.

Як засвідчують результати, наведені у таблиці 4, рівень забруднення, визначений на основі врахування індексу санітарно-токсикологічного критерію як лімітуючої ознаки шкоди, є досить непоказовим через широкий діапазон розбігу визначених величин. Тому з метою виявлення факторів змін екологічного режиму водних об'єктів під впливом росту колонії хлорелл, були розраховані величини кратності перевищення кожного із досліджуваних показників до гранично допустимих норм. Результати продемонстровані у вигляді діаграм порівняння (рис. 5–7).

Наведені діаграми наочно демонструють факт зменшення або цілковитого вилучення солей амонію та нітратів із вод під впливом життєдіяльності хло-

Таблиця 1

Фактичні концентрації речовин, визначені у пробах води із пункту відбору проб у с. Музичі

| Показник | Фактичні концентрації | | ГДК, мг/дм ³ |
|---|-----------------------|-------|-------------------------|
| | До | Після | |
| Амоній, мг/дм ³ | 0.87 | - | 0.5 |
| Нітрати, мг/дм ³ | 12.3 | 1.1 | 45 |
| Фтор, мг/дм ³ | - | - | 1.5 |
| Розчинений кисень, мг/дм ³ | 5.5 | 6.8 | 4.0 |
| Перманганатна окиснюваність, мг/дм ³ | 7.6 | 5.2 | 5.0 |

Таблиця 2

Фактичні концентрації речовин, визначені у пробах води із пункту відбору проб у Нерушайському водосховищі

| Показник | Фактичні концентрації | | ГДК, мг/дм ³ |
|---|-----------------------|-------|-------------------------|
| | До | Після | |
| Амоній, мг/дм ³ | 0.1 | - | 0.5 |
| Нітрати, мг/дм ³ | 10 | 0.2 | 45 |
| Фтор, мг/дм ³ | - | - | 1.5 |
| Розчинений кисень, мг/дм ³ | 5 | 9.1 | 4.0 |
| Перманганатна окиснюваність, мг/дм ³ | 13.5 | 21.1 | 5.0 |

Таблиця 3

Фактичні концентрації речовин, визначені у пробах води із пункту відбору проб у каналі Дунай-Сасик

| Показник | Фактичні концентрації | | ГДК, мг/дм ³ |
|---|-----------------------|-------|-------------------------|
| | До | Після | |
| Амоній, мг/дм ³ | 0.1 | - | 0.5 |
| Нітрати, мг/дм ³ | 1 | 5.4 | 45 |
| Фтор, мг/дм ³ | - | - | 1.5 |
| Розчинений кисень, мг/дм ³ | 4 | 11.2 | 4.0 |
| Перманганатна окиснюваність, мг/дм ³ | 10.5 | 25 | 5.0 |

Таблиця 4

Оцінка екологічного стану водних об'єктів за розрахованим ступенем забруднення

| Водний об'єкт | Санітарно-токсикологічне забруднення до введення | Рівень забруднення до введення | Санітарно-токсикологічне забруднення після введення | Рівень забруднення після введення |
|-------------------------|--|--------------------------------|---|-----------------------------------|
| Пункт у с. Музичі | 1,65 | Помірний | 1,43 | Помірний |
| Нерушайське водосховище | 1,98 | Помірний | 1,74 | Помірний |
| Канал Дунай-Сасик | 2,02 | Помірний | 2,36 | Помірний |

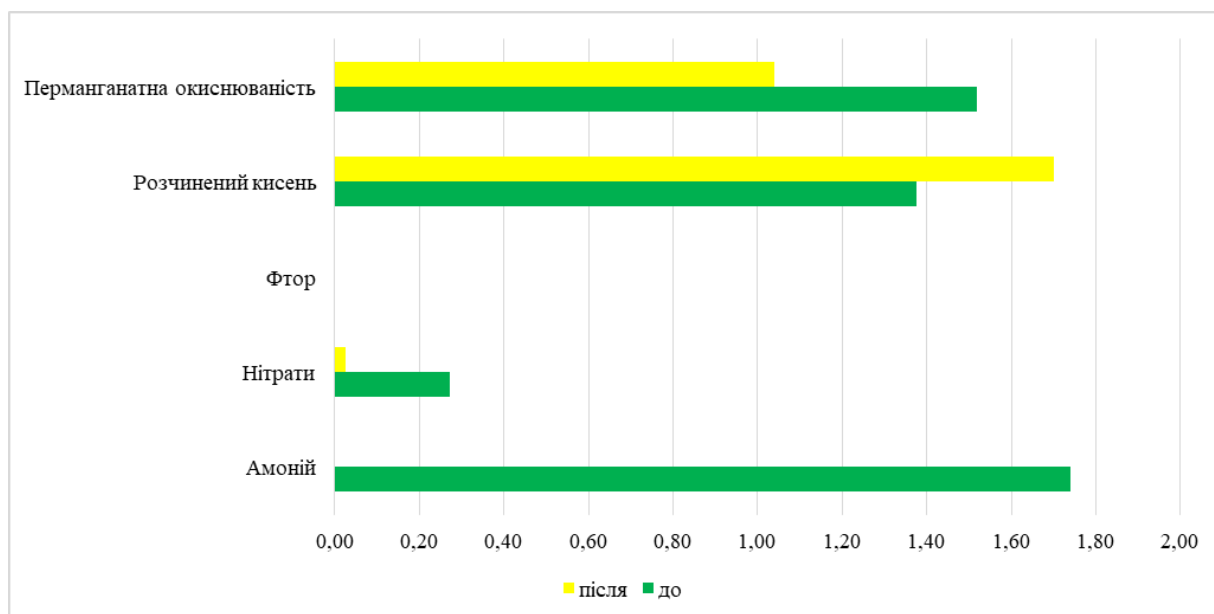


Рис. 5. Порівняльна діаграма кратності забруднення за наведеними показниками у водній масі до та після введення колонії хлорелл у пункті відбору с. Музичі

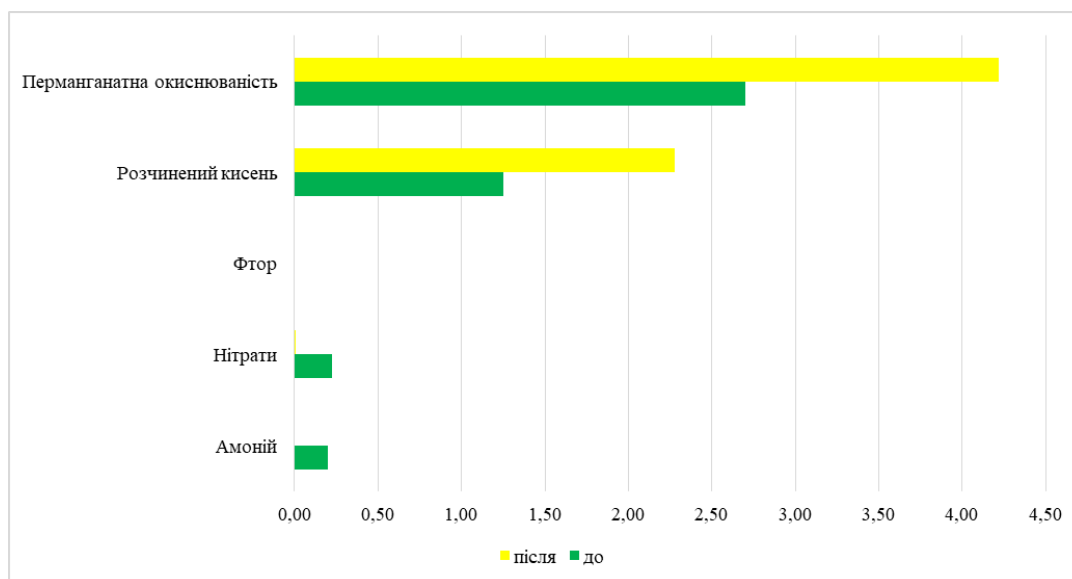


Рис. 6. Порівняльна діаграма кратності забруднення за наведеними показниками у водній масі до та після введення колонії хлорелл у пункті відбору Нерушайське водосховище

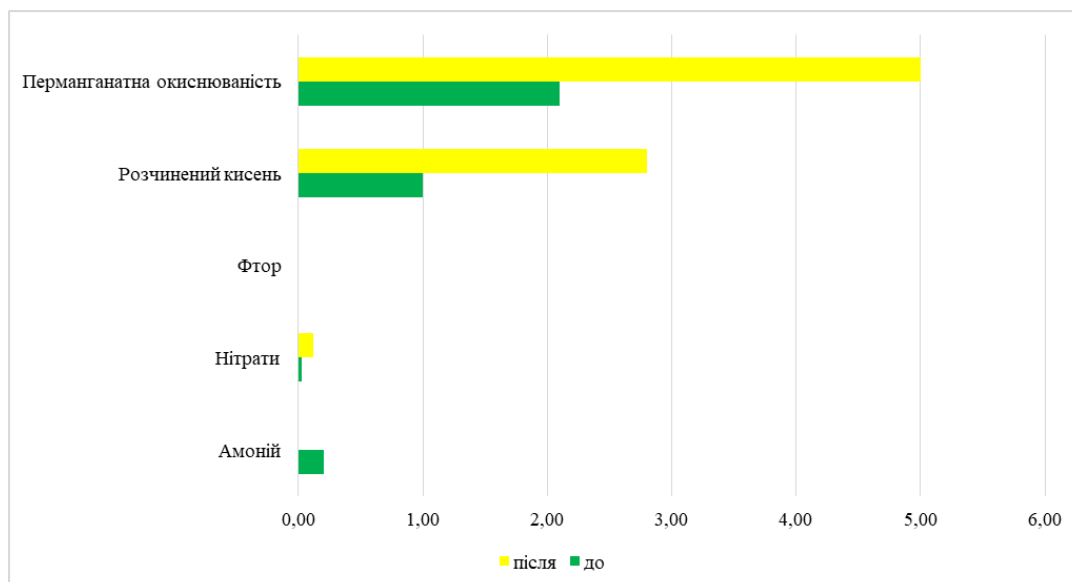


Рис. 7. Порівняльна діаграма кратності забруднення за наведеними показниками у водній масі до та після введення колонії хлорелл у пункті відбору каналу Дунай-Сасик

релл, що були штучно введені у водойми. Вміст розчиненого кисню у всіх спостережних пунктах збільшився у 2–2,5 рази після введення мікроорганізмів. Концентрація розчиненого кисню у водах є маркером якості вод з точки зору їх розгляду як середовища розмноження, проживання і міграції риб та інших водних організмів.

Розчинений у воді кисень витрачається на дихання тварин й окислення органічних речовин. Тому збільшення його концентрації є позитивною ознакою відновлення доброго екологічного стану водного об'єкту.

Разом з тим, варто відмітити виражене зростання перманганатної окиснюваності після введення

і зростання колонії хлорелли у всіх пунктах відбору проб.

Перманганатна окиснюваність – це показник, що відображає загальне органічне забруднення вод. Збільшення концентрацій цього показника ймовірно спричинене культивуванням і розмноженням мікроорганізмів у досліджуваних водних об'єктах, адже розмноження бактерій відбувається інтенсивно із збільшенням популяції майже у два рази (рис. 8).

Враховуючи ймовірний несприятливий вплив росту субстрату на загинелі інших наявних організмів у водоймах, у майбутньому доцільно передбачити проведення експериментальних лабораторних

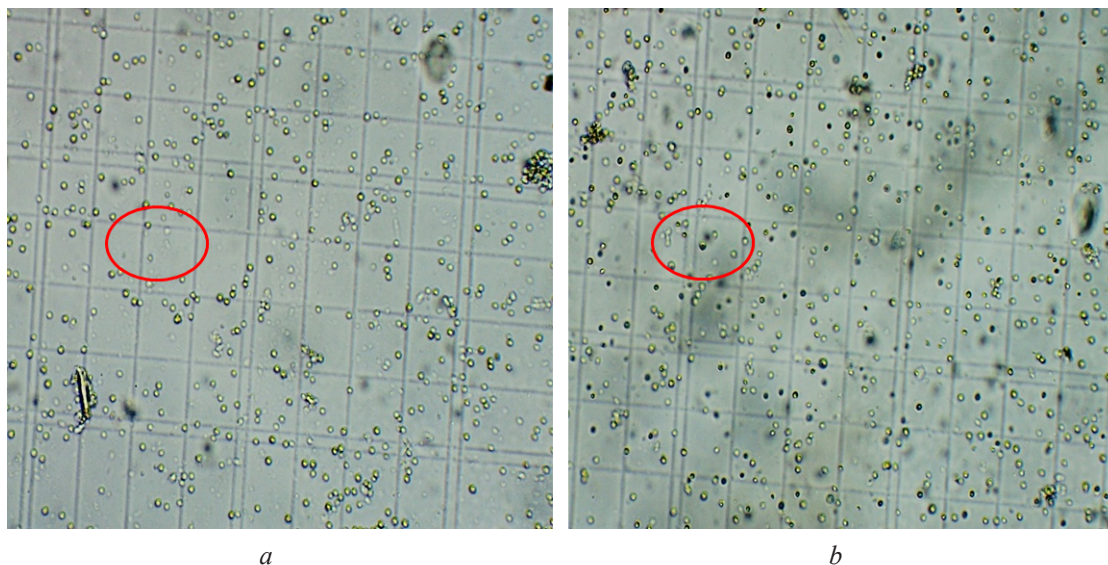


Рис. 8. Демонстрація росту популяції хлорелли на початок введення у водойму (а) та через три дні після введення (b) (мікроскопічні дослідження)

досліджень за мікробіологічними показниками та виконати біотестування.

Очікувані результати: відновлення природних механізмів біотичної саморегуляції поверхневих водойм села Музичі Київської області шляхом застосування технології вирощування мікрородості *Chlorella* штаму Polikarp, як спосіб поліпшення

та індикації екологічного стану водойм. Біологічна реабілітація водосховищ с. Музичі призвела до того, що окрім відсутності «цвітіння» синьо-зеленими водоростями за 2022 рік р. вміст розчиненого кисню у воді був вищим, навіть у найспекотніший місяць літньої пори – липень перевищував мінімально допустимий рівень.

Література

1. Брук В.В. Звіт про НДР за темою № 5/1.2-21 «Розроблення методики віднесення масиву поверхневих вод до одного з класів екологічного та хімічного станів масиву поверхневих вод» (ДР № 0121U09820), Харків : УкрНДІЕП, 2021, 159 с.
2. A Review about Microalgae Wastewater Treatment for Bioremediation and Biomass Production—A New Challenge for Europe Environments 2021, 8, 136. <https://doi.org/10.3390/environments8120136>; <https://www.mdpi.com/journal/environments>
3. Zamalloa, C.; Boon, N.; Verstraete, W. Decentralized two-stage sewage treatment by chemical-biological flocculation combined with microalgae biofilm for nutrient immobilization in a roof installed parallel plate reactor. *Bioresour. Technol.* 2013, 130, 152–160. [CrossRef]
4. Abinandan, S., Shanthakumar, S. Challenges and opportunities in application of microalgae (Chlorophyta) for wastewater treatment: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2015, 52, 123–132. [CrossRef]
5. Європейська комісія. Директива Європейської Комісії 91/271/EEC щодо очищення міських стічних вод. 1991. Доступно онлайн: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?CELEX=31991L0271> (дата доступу 9 липня 2021 р.).
6. Очищення міських стічних вод у Європі — Європейське агентство з навколишнього середовища. Доступно в Інтернеті: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/urban-waste-water-treatment/urban-waste-water-treatment-assessment-5> (дата доступу 9 листопада 2020 р.).
7. Petrini, S.; Foladori, P.; Donati, L.; Andreottola, G. Comprehensive respirometric approach to assess photosynthetic, heterotrophic and nitrifying activity in microalgal-bacterial consortia treating real municipal wastewater. *Biochem. Eng. J.* 2020, 161, 107697. [CrossRef]
8. Mantovani, M.; Marazzi, F.; Fornaroli, R.; Bellucci, M.; Ficari, E.; Mezzanotte, V. Outdoor pilot-scale raceway as a microalgae-bacteria sidestream treatment in a WWTP. *Sci. Total Environ.* 2020, 710, 135583. [CrossRef]
9. Menna, F.Z.; Arbib, Z.; Perales, J.A. Urban wastewater photobiotreatment with microalgae in a continuously operated photobioreactor: Growth, nutrient removal kinetics and biomass coagulation–flocculation. *Environ. Technol.* 2019, 40, 342–355. [CrossRef] [PubMed] *Environments* 2021, 8, 136 20 of 24
10. Miksch, K.; Cema, G.; Corvini, P.F.-X.; Felis, E.; Sochacki, A.; Surmacz-Górska, J.; Wiszniowski, J.; Zabczynski, S. R&D priorities in the field of sustainable remediation and purification of agro-industrial and municipal wastewater. *New Biotechnol.* 2015, 32, 128–132. [CrossRef]
11. Ferro, L.; Gorzsás, A.; Gentili, F.G.; Funk, C. Subarctic microalgal strains treat wastewater and produce biomass at low temperature and short photoperiod. *Algal Res.* 2018, 35, 160–167. [CrossRef]
12. Peralta, E.; Jerez, C.G.; Figueroa, F.L. Centrate grown *Chlorella fusca* (Chlorophyta): Potential for biomass production and centrate bioremediation. *Algal Res.* 2019, 39, 101458. [CrossRef]
13. Sforza, E.; Ramos-Tercero, E.A.; Gris, B.; Bettin, F.; Milani, A.; Bertucco, A. Integration of *Chlorella protothecoides* production in wastewater treatment plant: From lab measurements to process design. *Algal Res.* 2014, 6, 223–233. [CrossRef]

14. Solimeno, A.; García, J. Microalgae and bacteria dynamics in high rate algal ponds based on modelling results: Long-term application of BIO_ALGAE model. *Sci. Total Environ.* 2019, 650, 1818–1831. [CrossRef] [PubMed]
15. Бусса, М.; Zollfrank, С.; Röder, Н. Оцінка життєвого циклу та геопросторовий аналіз інтеграції культивування мікрободоростей у регіональну економіку. *Ж. Чистий. Виробник* 2020, 243, 118630. [CrossRef]
16. Robles, Á.; Capson-Tojo, G.; Galès, A.; Ruano, M.V.; Sialve, B.; Ferrer, J.; Steyer, J.-P. Microalgae-bacteria consortia in high-rate ponds for treating urban wastewater: Elucidating the key state indicators under dynamic conditions. *J. Environ. Manag.* 2020, 261, 110244. [CrossRef] [PubMed]
17. Delrue, F.; Álvarez-Díaz, P.D.; Fon-Sing, S.; Fleury, G.; Sassi, J.-F. The environmental biorefinery: Using microalgae to remediate wastewater, a win-win paradigm. *Energies* 2016, 9, 132. [CrossRef]
18. Romero Villegas, G.I.; Fiamengo, M.; Ación Fernández, F.G.; Molina Grima, E. Outdoor production of microalgae biomass at pilot-scale in seawater using centrate as the nutrient source. *Algal Res.* 2017, 25, 538–548. [CrossRef]
19. Development of an Innovative Algae Based Tertiary Wastewater Treatment and Value Recovery System/INDALG Project/H2020/CORDIS/European Commission. Available online: <https://cordis.europa.eu/project/id/733718> (accessed on 1 August 2021).