

Розробка регламенту гідробіологічного моніторингу в циркуляційній системі охолодження запорізької атомної електростанції

Н. Б. Єсіпова, О. М. Маренков, Т. С. Шарамок, О. С. Нестеренко,
В. О. Курченко

У статті пропонується новий підхід до вирішення проблеми біообростань на спорудах циркуляційної системи охолодження Запорізької атомної електростанції (ЗАЕС) шляхом регламентації гідробіологічних досліджень. У ході проведених досліджень були виявлені 4 види гідробіонтів, які утворювали масові обростання на водопостачальних спорудах: нитчасті водорості *Oedogonium* sp. і *Ulotrix zonata* із загальною біомасою $123,6 \pm 18,44$ г/м², тропічні молюски *Melanoides tuberculata* і *Tarebia granifera* родини *Thiaridae* з біомасою 20,09 г/м². Мушлі відмерлих молюсків з течією води дрейфували по трубах циркуляційної системи і заважали роботі насосних станцій. Також до потенційного утворювача біоперешкод належала синьозелена водорість *Microcystis aeruginosa*, яка домінувала у фітопланктоні водойми-охолоджувача. Гідробіологічний регламент був розроблений з метою своєчасного виявлення гідробіонтів, здатних до активного розмножування і створення біоперешкод. Він передбачає здійснення чотирьох типів моніторингу: поточного (оперативного), екстремального (контрольного), розгорнутого (дослідницького) та фонового (гідробіологічного контролю Каховського водосховища у зоні впливу скидних теплих вод). Для кожного типу моніторингу визначені предмети контролю (угруповання гідробіонтів), параметри контролю (видовий склад, чисельність, біомаса) і частота контролю. Регламент гідробіологічного моніторингу дозволяє мінімізувати наслідки або запобігти виникненню аварійних та надзвичайних ситуацій у роботі циркуляційних систем охолодження ЗАЕС, пов'язаних з біоперешкодами, і може бути використаний як приклад для вирішення подібних проблем на інших енергетичних об'єктах. Стаття також містить практичні рекомендації щодо поліпшення екологічного стану водойми-охолоджувача і запобігання масового розвитку небезпечних гідробіонтів шляхом вселення у водойму риб-біомеліораторів з різним спектром живлення.

Ключові слова: Запорізька атомна електростанція, гідротехнічні споруди, екологічні чинники, проблема біообростання, гідробіологічний моніторинг, біомеліорація.

1. Вступ

Робота атомних і теплових електростанцій пов'язана з використанням значних об'ємів води, необхідних для охолодження енергоблоків. Факти свідчать, що у різних країнах переважна більшість аварійних зупинок атомних електричних станцій та гідроелектростанцій, пов'язаних з водопостачанням, була викликана масовим розвитком гідробіонтів. На Хмельницькій атомно-енергетичній

станції молюск *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771) утворює величезні обростання на поверхнях берегових бетонних споруд і з водою потрапляє на решітки насосних станцій, перешкоджаючи потоку води. Щоб запобігти аварійній ситуації, на станції вимушені кожні два роки призупиняти роботу енергоблоків і проводити механічне очищення підводних споруд від колоній молюска, біомаса якого досягає 900 тонн [1]. На гідроелектростанції Фуніл (штат Ріо-де-Жанейро) аварійні зупинки спричиняє гідроїд *Cordylophora caspia* (Pallas, 1771), який оселяється в системі водного охолодження генеруючих установок і викликає подальше підвищення температури системи [2].

Проблема біоперешкод актуальна і для морських техногенних систем. Масовий розвиток організмів морського перифітону (губок, молюсків, водоростей) у трубопроводах водопостачання викликає скорочення передачі тепла і зниження ефективності охолодження, передчасний знос об'єктів та збільшення витрат на експлуатацію [3].

При застосуванні циркуляційної системи водопостачання основним резервуаром для охолодження слугує водойма-охолоджувач. Саме якість води у водоймі-охолоджувачі впливає на ефективність роботи енергетичної станції. Для водойм-охолоджувачів проблема біобростань особливо актуальна, оскільки підвищений температурний режим і наявність органічних речовин у таких водоймах створюють сприятливі умови для бурхливого розвитку окремих видів. Прикладами подібних явищ можуть служити біоперешкоди, викликані масовим розвитком фітопланктону ("цвітіння" води) внаслідок техногенної термофікації водойми [4]. Найбільш чисельні біоперешкоди створюють тваринні перифітонні організми. Для прісноводних техногенних систем активними об'єктами біобростань є двостулкові молюски р. *Dreissena*. У водоймі-охолоджувачі Хмельницької АЕС дрейсени зустрічаються повсюдно і біомаса їх досягає 5 кг/м². Саме з водойми-охолоджувача дрейсена потрапляє у систему водоподачі і створює там перешкоди [5].

Особливу загрозу в якості біоперешкод уявляють інвазійні види гідробіонтів. Потрапляючи у водойми-охолоджувачі окремі види-саморозселенці за відносно короткий проміжок часу займають домінуюче положення в екосистемі за своєю чисельністю та біомасою. Прикладом є тропічний молюск *Melanoides tuberculata* (р. *Thiaridae*), який антропогенним шляхом опинився і натуралізувався у водоймі-охолоджувачі Південно-Української АЕС. За період з 2005 р. по 2011 р. його чисельність зросла від 400 екз./м² до 5800 екз./м² і складала 86 % від загальної чисельності зообентосу у водоймі [6].

Наслідки проникнення молюсків р. *Thiaridae* у водойму-охолоджувач Запорізької АЕС вражають швидкістю адаптування та масштабами розповсюдження по всій циркуляційній системі охолодження. Майже за 3 роки (2015–2018 рр.) молюски тіариди збільшили свою чисельність у водоймі-охолоджувачі від одиничних екземплярів до 300 екз./м², а в трубопроводах – до 6340 екз./м² і стали причиною їх закупорки [7].

Ще однією важливою гідроекологічною проблемою, пов'язаною з роботою атомних і теплових станцій, є термальне забруднення природних водойм, які приймають до себе стічні підігріті води. Встановлено, що в зонах

впливу підігрітих вод видове біорізноманіття значно бідніше порівняно з природними зонами [1].

Результати багаторічних досліджень функціонування водних техносистем енергетичних станцій вказують на недоцільність використання стандартного підходу для оцінки їх екологічного стану, який базується на порівнянні з еталонними умовами. У багатьох випадках біологічний фактор мав більший вплив на якість води у циркуляційній системі, ніж техногенний [8]. Саме тому, гідробіологічний моніторинг повинен бути невід'ємною частиною у загальному технологічному контролі на гідроенергетичних об'єктах.

Таким чином, для запобігання виникнення надзвичайних ситуацій у роботі енергетичних об'єктів, викликаних біоперешкодами, необхідно розроблення і впровадження в технологічний процес режиму гідробіологічного моніторингу для кожної енергетичної станції. Режим повинен враховувати особливості видового складу і розвитку біоценозів гідротехнічних споруд станції, а також потенціальні ризики виникнення біоперешкод.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Проблема біоперешкод у роботі підводних комунікацій залишається актуальною для багатьох країн, не дивлячись на багаторічний міжнародний досвід її дослідження. Енергетичні станції, які використовують для охолодження морську воду, частіше стикаються з проблемою мікробіологічних обростань. Повідомляється, що колонії бактерій і мікроводоростей викликають накип і корозію градирень і, тим самим, значно погіршують ефективність охолодження води [9]. Морські макрообростання (колонії губок, молюсків) наносять значні збитки системам трубопроводів, викликаючи їх закупорку, а також створюють вихрові вібрації і тим самим знижують коефіцієнт передачі енергії на 15–36 % [10].

У прісноводних водоймах-охолоджувачах України частими винуватцями біоперешкод стають молюски і водорості. Найбільші збитки викликають молюски – представники р. *Dreissena* (*D. polymorpha*, *D. bugensis*). Дрейсена є звичайним мешканцем природних водойм дніпровського басейну. Потрапив у водойми-охолоджувачі, де підвищений температурний режим і практично відсутні риби-молюскофаги, цей молюск починає масового розмножуватись, проникати в інші гідротехнічні споруди системи охолодження і створювати там біоперешкоди. Такі проблеми характерні для Хмельницької АЕС [11].

Інвазійне проникнення у водойми-охолоджувачі молюсків р. *Thiaridae* (*Melanoides tuberculata* і *Tarebia granifera*) описане для Південно-Української АЕС [6] та Запорізької АЕС [7]. У циркуляційній системі охолодження ЗАЕС молюски-вселенці швидко захопили різні біотопи і, внаслідок масового розвитку у трубопроводах, на водопрпускних решітках, сітках і фільтрах, утворюють суттєві біоперешкоди [12].

Існуючі сучасні методи боротьби з водними біообростаннями мають свої переваги і недоліки. Застосування механічних методів очистки водоводів від обростань є екологічно безпечним, але трудомістким і малоефективним, оскільки усуває не проблему, а її наслідки.

Серед хімічних методів найбільш поширеним є вживання препаратів, що містять хлор. Хлорування з метою захисту гідроспоруд від обростання використовується вже багато років і має позитивний ефект [13]. В якості недоліків використання хлоровмісних препаратів вказується їх корозійна дія на підводні металеві споруди [14]. Щоб зменшити корозійний ефект при вживанні хлору, було рекомендовано додавання до хлоровмісних сполук біоцидного препарату на основі броміду [15]. Але головним недоліком застосування хлору та інших хімічних засобів боротьби з біоперешкодами є їх негативний вплив на екологію природних водойм, куди потрапляють стічні води енергетичних об'єктів [16].

Для пошуку нетоксичних методів боротьби з морськими і прісноводними біоперешкодами було запропоновано використовувати фізичні і біологічні методи [17]. Прикладом розробок у цьому напрямі є використання анодного струму для боротьби з обростанням водозабірних решіток молюском дрейсеною [18]. За технологією струм подається на решітки, внаслідок чого в біоплівці утворюються речовини класу фероценів, які забезпечують захист металевих конструкцій від біобростань. Слід враховувати той факт, що на деяких енергетичних об'єктах технологічним режимом заборону використання фізичних засобів боротьби з біобростанням.

Ще одним напрямком боротьби з біоперешкодами є застосування синтетичних полімерних матеріалів для покриття підводних конструкцій. Але всі вони в якості протиобростаючих речовин містять токсичні сполуки (біоциди, солі важких металів тощо), які вивільняються у воді і завдають шкоди навколишньому середовищу. Використання екологічно безпечних біоміметичних полімерних покриттів є перспективним напрямком, але залишаються невирішеними проблеми дефіциту і високої вартості біополімерних матеріалів [19].

Для того, щоб продовжити безпечне виробництво ядерної енергії, важливо розуміти стан ключових конструкцій, систем і компонентів атомних електростанцій. Своєчасне виявлення несправностей технічних споруд АЕС – це стратегія прогнозно-технічного обслуговування, яка ґрунтується на постійному моніторингу та повній обізнаності про стан обладнання [20].

Оскільки водойми-охолоджувачі є складовою техноекосистеми АЕС, необхідно в систему моніторингу технологічних процесів атомних станцій включати гідробіологічний моніторинг, якому присвячено мало уваги у науковій літературі.

У зв'язку з різноманітністю видового складу організмів та особливостей їх існування у водоймах-охолоджувачах не може бути універсального способу профілактики і боротьби з біобростаннями. Тому для своєчасного виявлення гідробіологічних ризиків була запропонована загальна концепція організації гідробіологічного моніторингу у техногенних водоймах теплових і атомних електростанцій [21]. Вона спрямована на виявлення ймовірних і реальних причин біологічних порушень у роботі систем водопостачання АЕС. У концепції застосовані європейські природоохоронні принципи стосовно контролю негативного впливу технічних екосистем на фонові водойми, що розташовані поблизу атомних станцій [22].

Аналіз літератури свідчить, що існуючі методи боротьби з водними біоперешкодами, в тому чи іншому ступені, мають антиобростаючий ефект. Але ряд

недоліків обмежує, а іноді робить неможливим їх застосування. Це відноситься до хімічних і фізичних методів, при яких використовуються сполуки або прилади, що негативно впливають на якість водного середовища і біоту (хлоровмісні сполуки, біоциди, синтетичні полімерні покриття, електричний струм). Перспективи використання екологічно безпечних біоматеріалів обмежуються їх дороговартістю. Механічні методи очищення підводних споруд від біообростаній є трудомісткими і потребують часткового призупинення роботи станції.

Загальним недоліком більшості вищезазначених методів є націленість на боротьбу з біоперешкодами, а не на їх профілактику. Такий підхід не враховує можливість своєчасного виявлення гідробіонтів – потенційних утворювачів біоперешкод. Особливо це стосується видів, які випадково потрапляють у водойми-охолоджувачі і за короткий час масово розповсюджуються по всій системі охолодження.

Таким чином, для ефективного вирішення проблеми біоперешкод у роботі електростанцій необхідний новий підхід, який повинен базуватись на концепції організації гідробіологічного моніторингу. Розробка і впровадження режиму гідробіологічного моніторингу дасть можливість своєчасно виявити і попередити розвиток небезпечних гідробіонтів, які здатні утворювати перешкоди. Застосування системи постійного гідробіологічного контролю на всіх спорудах циркуляційної системи охолодження знизить ймовірність виникнення гідробіологічних і екологічних ризиків у роботі станції. Такий підхід у вирішенні проблеми біоперешкод буде мати певні економічні переваги порівняно з існуючими методами.

3. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є розробка регламенту гідробіологічного моніторингу у техногенних водоймах циркуляційної системи охолодження Запорізької АЕС та фоновій водоймі (Каховське водосховище) на підставі комплексних гідробіологічних досліджень усіх біоценотичних угруповань. Це дасть можливість своєчасно виявити можливі біологічні перешкоди у водоймах системі охолодження і запобігти негативних наслідків їх впливу на роботу Запорізької атомної електростанції, а також на екологічний стан Каховського водосховища як фонові водойми.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- провести оцінку гідроекологічного стану ВО циркуляційної системи ЗАЕС;
- дослідити особливості розвитку гідробіоценозів (угруповання планктону, бентосу, іхтіофауна) водойм гідротехнічної системи ЗАЕС;
- провести аналіз існуючих і можливих біоперешкод у циркуляційній системі водоохолодження ЗАЕС;
- розробити режим здійснення поточного, екстремального і розгорнутого контролю за розвитком гідробіонтів – потенційних утворювачів біоперешкод, а також визначити параметри контролю можливого негативного впливу ЗАЕС на фонову водойму;
- розробити рекомендації щодо поліпшення екологічного стану водойми-охолоджувача ЗАЕС.

4. Матеріали та методи досліджень

Об'єктом досліджень були реальні і потенційні біоперешкоди водойми-охолоджувача і гідротехнічних споруд Запорізької АЕС.

В якості гіпотези вважається, що розробка науково-обґрунтованого режиму гідробіологічного моніторингу та його впровадження будуть сприяти своєчасному виявленню потенційних біоперешкод у системі охолодження ЗАЕС та попередженню негативного впливу масового розвитку гідробіонтів на роботу станції.

Проби води для гідрохімічного аналізу відбирали у поверхневому і придонному шарі, дослідження проводили за стандартними методиками [23]. Екологічну оцінку якості води за різними категоріями проводили відповідно до розробленої методики [24].

Проби донних відкладень для токсикологічного аналізу відбирали у водойми-охолоджувачі Запорізької АЕС з горизонту 0–5 см.

Проби зоопланктону відбирали за допомогою планктонної сітки Апштейна (газ № 71), крізь яку фільтрували 100 л води. Кількісні показники зоопланктону визначали у камері Богорова під бінокулярним стереомікроскопом MICROmed XS-6320 (Китай, 2019), приймаючи до уваги чисельність різних розмірно-вікових груп організмів [25]. Біомасу розраховували за формулою залежності маси від довжини тіла:

$$w=ql^3, \quad (1)$$

де w – маса; q – коефіцієнт пропорційності; l – довжина тіла.

Проби зообентосу збирали дночерпаком Екмана-Берджа і фіксували у 4 %-му формаліні. Визначення видового складу здійснювали за допомогою бінокулярного стереомікроскопу MICROmed XS-6320 (Китай, 2019).

Збір молюсків на гідротехнічних спорудах проводили з використанням гідробіологічного скребка. Підрахунок кількості молюсків на бетонних плитах у каналах АЕС здійснювали за допомогою рамки площею 1 м², яка встановлювалася по краю води і фіксувалася на схилі плит. У межах обмеженого рамкою простору молюсків відбирали власноруч. Отриманий матеріал підраховували на місці, для уточнення видового складу деякі проби фіксували 4 % формаліном.

Проби бактеріопланктону відбирали та опрацьовували відповідно загальноприйнятими гідробіологічними методиками [23].

Проби для вивчення видового складу і кількісних показників фітопланктону відбирали батометром Молчанова [26]. Відібраний матеріал фіксували у 2 %-му формаліні. З метою згущення проби відстоювали в циліндрі протягом 7–10 діб, після чого досліджували пробу у камері Нажотта об'ємом 0,02 см³ під мікроскопом Carl Zeiss JenaVal (Китай, 2019).

Іхтіологічний матеріал збирали з контрольних знарядь лову набором ставних сіток з кроком вічка $a=30$ –110 мм. Збір та опрацювання іхтіологічного матеріалу здійснювали відповідно загальноприйнятими методами [27]. Вік риби визначали по лусці [28].

Паразитологічні дослідження риби здійснювали класичним методом повного паразитологічного розтину [29]. Для кількісної оцінки паразитів викорис-

товували наступні показники: екстенсивність інвазії – ЕІ (відношення кількості заражених риб до загальної кількості дослідних риб одного виду, %); інтенсивність інвазії – ІІ (кількість паразитів одного виду на одну рибу).

Статистичну обробку результатів проводили варіаційно-статистичним методом за допомогою програмного пакета Statistica 6.0.

5. Результати досліджень екологічного стану і гідробіоценозів циркуляційної системи охолодження Запорізької атомно-енергетичної станції

5.1. Оцінка гідроекологічного стану водойми-охолоджувача циркуляційної системи Запорізької атомно-електростанції станції

Водойма-охолоджувач є елементом комплексу гідротехнічних споруд циркуляційної системи технічного водопостачання Запорізької АЕС. Введена в експлуатацію в 1984 р. з пуском енергоблоку № 1 шляхом вигороджування частини Каховського водосховища наливною піщаною греблею. Водойма має наступні параметри: площа дзеркала при НПУ – 8,2 км², об'єм при НПУ – 47,05 млн. м³, середня глибина при НПУ – 5,87 м, максимальна глибина при НПУ – 13,5 м, довжина берегової лінії – 11,2 км [30]. На рис. 1 представлена схема ВО і циркуляційної системи охолодження з контрольними точками відбору проб.

Термальний режим у ВО влітку характеризується підвищеними температури води від +32 °С до +40 °С, при тому, що границя температурного оптимуму для більшості гідробіонтів становить +34 °С. Високі температури прискорюють процеси деградації та окиснення органічної речовини, і тим самим підвищують рівні біологічного споживання кисню (БСК₅) та хімічного споживання кисню (ХСК₅).

Оскільки у ВО вирощують риб з метою біомеліорації, то доцільно здійснювати оцінку якості води за рибогосподарськими критеріями. За даними водно-радіохімічної лабораторії ЗАЕС у ВО відмічається перевищення рибогосподарських ГДК за показниками БСК₅ у середньому на 21 %, ХСК₅ – на 64 %. Також має місце перевищення ГДК за деякими важкими металами: міді – у 1,6 рази; марганцю – у 1,8 рази; цинку – у 4,2 рази та заліза – 1,7 рази. Інші гідроекологічні показники знаходились у межах рибогосподарських норм [31].

Радіаційний стан у ВО задовільний. Вміст природних і штучних радіонуклідів не виходив за межі рибогосподарських ГДК і становив: радій-226 – 0,25 Бк/л, торій-232 – 0,092 Бк/л, калій-40 – 0,7 Бк/л, цезій-137 – 0,014 Бк/л, стронцій-90 – 0,004 Бк/л.



Рис. 1. Схема водойми-охолоджувача і циркуляційної системи охолодження Запорізької атомно-електричної станції з контрольними точками гідробіологічного моніторингу. Райони водойми-охолоджувача: західний: 1 – скид води у Каховське водосховище (система продувки); 2 – літораль (замулений пісок); 3 – літораль (мул); північний: 4 – скид до брызкальних басейнів і градирень; східний: 5 – скид підігрітих вод у водойму-охолоджувач (східна зона); південний: 6 – скид підігрітих вод у водойму-охолоджувач (південна зона); 7 – центральний. Канали: 8 – скидний (вихід води з підземних каналів енергоблоків); 9 – скидний (вихід у водойму-охолоджувач); 10 – скидний (початок розподільного каналу); 11 – скидний (кінець розподільного каналу); 12 – підвідний (початок розподільного каналу); 13 – (біля 6-го енергоблоку); 14 – канал підживлення водойми-охолоджувача; 17 – скидний канал брызкального басейну № 1; 18 – скидний канал брызкального басейну № 2. Каховське водосховище: 15 – водозабір Запорізької тепло-електростанції; 16 – 500 м нижче скиду води з водойми-охолоджувача

5. 2. Особливості розвитку гідробіоценозів водойми-охолоджувача і системи охолодження Запорізької атомної електростанції

Бактеріопланктон. Планктонні організми досліджувались у водойми-охолоджувачі за наступними угрупованнями: бактеріопланктон, фітопланктон і зоопланктон. Загальна чисельність бактеріопланктону у ВО коливалась у широких межах від 3,3 млн. кл./мл до 7,9 млн. кл./мл. Максимальна чисельність бактеріопланктону відмічена в літній період, що супроводжувалось утворенням на поверхні води бактеріальної плівки (рис. 2).



Рис. 2. Бактеріальна біоплівка

За екологічною оцінкою мікробіологічного забруднення це відповідало III–IV класам категорії якості води – помірно забруднені [24].

Фітопланктон. У ВО просторовий розподіл фітопланктону був неоднорідний. Показники чисельності коливались у межах від 13376 млн. екз/м³ до 85724 млн. екз/м³, усереднена біомаса складала 7,53±0,12 г/м³. У складі фітопланктону переважали представники синьо-зелених водоростей: *Microcystis aeruginosa*, *Aphanizomenon flos-aguae*, *Anabaena flos-aguae*. У літній період масовий розвиток *M. aeruginosa* викликав явище «цвітіння води» (рис. 3). У місцях «цвітіння» його біомаса досягала 58,4±8,32 г/м³.



Рис. 3. Скупчення синьо-зелених водоростей на поверхні води

За екологічною класифікацією якості вода ВО ЗАЕС за біомасою фітопланктону відповідала III класу 5 категорії якості – ев-політрофна.

Зоопланктон. Чисельність зоопланктону на різних ділянках ВО коливалась від 30193 екз./м³ до 141580 екз./м³ з мінімумом у точках скиду підігрітих вод.

Усереднені показники біомаси зоопланктону ВО досить низькі і становлять $1,45 \pm 0,09$ г/м³. За кількісними показниками розвитку серед груп зоопланктону домінували представники гіллястовусих ракоподібних (*Diaphanosoma brachyurum*, *D. dubia*, *Moina macroscopa*, *M. micrura* тощо).

У каналах циркуляційної системи охолодження (ЦСО) спостерігається збіднілий розвиток планктонних організмів через велику швидкість течії та високої температури (більш ніж +40 °С влітку).

За класифікацією якості вод стосовно розвитку зоопланктону ВО можна віднести до 2 категорії «низький розвиток» в зоні скиду підігрітих вод і до 3 категорії – в зоні скиду у Каховське водосховище – «розвиток нижче середнього».

Фітобентос та фітоперифітон. Фітобентос у ВО та каналах циркуляційної системи був представлений нитчастими водоростями *Oedogonium sp.* та *Ulothrix zonata* (рис. 4).



Рис. 4. Фітоперифітон

Усереднена чисельність мікрофітобентосу у водоймі-охолоджувачі ЗАЕС становила $32654 \pm 786,9$ млн. кл./м², а біомаса – $5,5 \pm 0,65$ г/м². Максимальна біомаса фітобентосу відмічалась на окремих ділянках каналів ЦСО і досягала $123,6 \pm 18,44$ г/м². Коефіцієнт видової подібності угруповань між фітобентосом ВО ЗАЕС та Каховського водосховища сягнув 0,92 одиниці, що вказує на подібність водоростей досліджених водойм.

Зообентос та зооперифітон. Основну біомасу зообентосу ВО складала угруповання молюсків *Melanoides tuberculata* і *Tarebia granifera* (рис. 5). Загальна біомаса зообентосу водойми-охолоджувача коливалась від $0,54$ г/м² до $20,09$ г/м² і залежала від характеру ґрунтів. У середньому біомаса зообентосу у ВО дорівнювала $11,32 \pm 1,28$ г/м², чисельність – 160 екз./м².



Рис. 5. Моллюски *Melanoides tuberculata* і *Tarebia granifera*

Переважає більшість зооперифітону скидного і відвідного каналів була представлена моллюсками родини *Thiaridae*, чисельність яких коливалась від 20 экз./м² до 80 экз./м². У каналах ЦСО збагачення кількості видів сталося за рахунок знахідки *Planorbis corneus* L. – популярного в акваріумістиці виду моллюсків.

У підземних скидних каналах основними представниками зооперифітону також були моллюски р. *Trinitidae*. На стінках металевих труб їх чисельність досягала 5200 экз./м².

Іхтіофауна. У сучасному складі іхтіофауни водойми-охолоджувача зареєстровано 18 видів риб. Тут присутні аборигенні види, які більш-менш адаптувалися до специфічних умов технологічної водойми (плітка, плоскирка, сом європейський тощо). Види-інтродуценти, вселення яких здійснюється з метою біомеліорації, представлені наступними видами: карась сріблястий, білий товстолобик, білий амур, тилapia мозамбікська, каналний сом. Також наявні види-саморозселенці (амурський чебачок, сонячний окунь). Останні можуть значно нарощувати свою чисельність в умовах нестабільної екологічної рівноваги технологічних водойм. Взагалі, до складу іхтіофауни ВО ЗАЕС входить 44 % аборигенних видів і 56 % чужорідних видів риб.

За результатами іхтіологічних досліджень індивідуальна маса цьоголіток білого товстолобика у водоймі-охолоджувачі дорівнювала 12–20 г при нормі 25–30 г. У зв'язку з цим, вихід із зимувальних садків становив лише 40 % при нормативному 70 %. Високі показники природної смертності цьоголіток білого товстолобика обумовлені низькою наважкою, пресом високої температури води влітку, а також негативним впливом з боку рибоїдних птахів, які за зимовий період значно виїдають молодь білого товстолобика.

Максимальна іхтіомаса білого товстолобика припадає на п'ятирічних особин, тобто максимальне споживання кормових ресурсів буде спостерігатися у чотирьох–шестирічок. У подальшому іхтіомаса даної генерації буде поступово зменшуватися, у зв'язку з природною смертністю, тобто у водойму будуть повертатися акумульовані органічні речовини. Відповідно, саме на ці вікові групи і слід орієнтувати початок меліоративного вилучення особин білого товстолобика.

Про необхідність впровадження промислу рослиноїдних риб свідчить і аналіз теоретичних і фактичних коефіцієнтів природної смертності. На підставі даних із зариблення та розрахункової чисельності відповідної генерації через кілька років перебування у водоймі можна визначити середні коефіцієнти загальної смертності (які у результаті відсутності промислу, будуть відповідати показникам природної смертності).

Теоретично очікувана природна смертність чотирьох-шестирічок товстолобиків повинна становити 0,23–0,25, тоді як в реальній популяції становить 0,31–0,42, тобто у водоймі спостерігається підвищена елімінація даних видів риб. Однією з причин цього може бути перенаселення, зростання внутрішньовидової конкуренції, тому при зниженні меліоративного ефекту в результаті зменшення їхньої маси генерації, необхідно регулювати чисельність малоефективних вікових груп.

Потенційним споживачем бентосу є короп (сазан). За даними контрольних уловів граничний вік коропа склав 8 років, тобто віковий ряд досить широкий. У крупновічкових сітках (з кроком вічка $a=75$ мм і вище), в основному, зустрічалися особини віком від 5 до 7 років (43,2 %) довжиною 42–60 см. Коефіцієнти вгодованості за Фультоном коливалися в межах від 1,88 до 2,48 (в середньому 2,13), що також свідчить про досить задовільні умови нагулу даного виду.

Іхтіофауна у скидному і підвідному каналах була небагаточисельна і представлена в основному тиляпією віком від 1 до 3-х років. Тиляпія виступає споживачем біомаси нитчастих водоростей та запобігає їх масовому обростанню на гідротехнічних спорудах. В умовах ВО ЗАЕС вона акліматизувалася та утворила самовідтворювальну популяцію, особини якої розмножуються цілорічно в умовах теплих вод водойми. Середньорічний показник вилову тиляпії з водойми-охолоджувача ЗАЕС становить 667 кг/рік.

При проведенні паразитологічних досліджень риб, що мешкають у водоймі охолоджувачі (короп, карась сріблястий, білий товстолобик, судак, бички) та відводному каналі (тиляпія), були виявлені лише одиничні в'їчасті інфузорії родів *Trichodina* та *Apiosoma*, і черв р. *Dactilogyrus*. Усі паразити локалізувалися на зябрах. Екстенсивність зараження риб не перевищували 10 %. Тобто, епізоотичний стан водойми-охолоджувача на період досліджень можна вважати благополучним.

Макрофіти. Зарості макрофітів (вищі водні рослини) формуються на мілководних ділянках ВО. Вища водяна рослинність була представлена 17 видами. Видом домінантом є очерет звичайний *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud, який створює суцільні зарості шириною близько 1 м (рис. 6).

Щільність заростань очеретом на окремих ділянках може сягає до 90 екз./м². Фітомаса очерету у ВО в щільних заростях становила близько 4,25 кг/м². У цілому, площа заростання геліофітами ВО незначна – менше 5 % площі водного дзеркала.

Первинна продукція і деструкція. Середні показники валової первинної продукції (A) фітопланктону влітку коливалися у межах від 6,2 г/м³ до 22,8 г/м³ добу, причому значення A збільшувалися по напрямку від району скиду підігрітих води до місця продукції ВО. У збалансованих екосистемах продукція

врівноважується деструкцією і визначається співвідношенням $A/R=1$, або індексом самоочищення-самозабруднення. У водоймі-охолоджувачі ЗАЕС в районі скиду теплих вод цей показник дорівнює 0,6 – свідчить про понижений ступінь самоочищення води.



Рис. 6. Очерет звичайний *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud на схилах плит підвідного каналу

5. 3. Аналіз існуючих і можливих біоперешкод у циркуляційній системі водоохолодження Запорізької атомної електричної станції

Рослини, які можуть надавати біологічні перешкоди, представлені в основному нитчастими зеленими (*Cladophora*, *Ulothrix*), синьо-зеленими і діатомовими водоростями. Вони розвиваються в більшій чи меншій мірі протягом усього року. Для їх розвитку необхідно сонячне освітлення, тому у водоймі-охолоджувачі вони можуть вегетувати всюди, крім затемнених ділянок систем водопостачання. Істотну роль в розподілі різних водоростей відіграє термічний режим. Масовий розвиток нитчастих і синьо-зелених водоростей співпадає з зонами скидання підігрітих вод.

Біоперешкоди тваринного походження утворюють молюски *Melanoides tuberculata* і *Tarebia granifera*. Як види-вселенеці вони дуже агресивно займають різні біотопи. Різке збільшення чисельності характерно для нових видів на початкових стадіях вселення.

Підвищення температури води у зворотному каналі та у водоймі-охолоджувачі може привести до більш інтенсивного розвитку молюсків, які будуть розвиватися як у зворотному і підводному каналах, так і в системах охолодження і техводопостачання. Відмирання організмів, пов'язане з підвищенням температури і швидкості течії в підвідному каналі, позначиться на кількості дрифтового матеріалу, що викличе біоперешкоди в роботі насосних станцій. Мушлі відмерлих молюсків течією води накопичуються у басейнах ділянки біомеліорації і також створюють біоперешкоди.

5. 4. Режим здійснення контролю за розвитком потенційних утворювачів біоперешкод

При розробці регламенту різних видів гідробіологічного моніторингу у циркуляційній системі охолодження ЗАЕС враховували методичні вказівки щодо розробки регламенту гідробіологічного моніторингу [32] та рекомендації щодо концептуальних підходів до організації гідробіологічного моніторингу [22]. Для об'єктивної оцінки гідроекологічного стану техногенних водойм ЗАЕС та фонові водойми рекомендується проведення чотирьох видів гідробіологічного моніторингу – поточного, екстремального, розгорнутого і фонового. Періодичність проведення поточного контролю гідроекологічних показників ЦСО ЗАЕС представлена в табл. 1.

Таблиця 1

Контрольні параметри існування гідробіонтів у водоймі-охолоджувачі

Об'єкт контролю	Контрольні параметри	Частота контролю
Системи охолодження: ВО, скидний канал, підвідний канал, бризкальні басейни.	Температура води, °С	Раз на місяць
	БСК ₅ , мгО ₂ /дм ³	
	ХСК ₅ , мгО ₂ /дм ³	
	Азот амонійний, мг/дм ³	
	Мідь, мг/дм ³	
	Свинець, мг/дм ³	
	Марганець, мг/дм ³	
	Цинк, мг/дм ³	

У табл. 2 надається перелік усіх угруповань гідробіонтів, що підлягають поточному контролю у водоймі-охолоджувачі, каналах і системі технічного водопостачання. Надається періодичність та параметри контролю.

Екстремальний моніторинг проводиться у випадках перевищення ГДК, екстремальних кліматичних явищ, різкого зростання біоперешкод. Його ціллю є визначення причин і динаміки зміни контрольованих показників, а також отримання вихідних даних для розробки оперативних заходів щодо попередження можливих негативних наслідків впливу чинників на екосистему ВО і зростання біологічних перешкод.

Режим екстремального моніторингу ВО вводиться відразу ж після виявлення службою охорони навколишнього середовища (СОНС) фактів значного перевищення нормативних ГДК гідрохімічних показників, значних змін гідробіологічних показників. Також при виявленні загрози життєдіяльності популяцій і угруповань гідробіонтів при раптовому зростанні біологічних перешкод.

Контрольовані гідробіологічні показники при проведенні екстремального моніторингу обирають на основі результатів первинного обстеження, поточного моніторингу та аналізу фактичного гідробіологічного стану ЦСО та ВО.

Таблиця 2

Об'єкти поточного контролю та частота проведення гідробіологічного моніторингу

№	Об'єкти контролю	Предмети контролю	Частота контролю	Параметри контролю
1	Системи охолодження: ВО, канали бризкальних басейнів	Бактеріопланктон	Щомісяця улітку та один раз восени	Морфологічні групи, чисельність, біомаса
		Фітопланктон	Щомісяця улітку та один раз восени	Видовий склад, чисельність, біомаса
		Зоопланктон	Щомісяця улітку та один раз восени	Видовий склад, чисельність, біомаса
		Фітобентос	Щомісяця улітку та один раз восени	Видовий склад, чисельність, біомаса
		Фітоперифітон	Щомісяця улітку та один раз восени	Видовий склад, чисельність, біомаса
		Зообентос	Один раз у сезон (улітку та восени)	Видовий склад, чисельність, біомаса
		Зооперифітон	Щомісяця улітку та один раз восени	Видовий склад, чисельність, біомаса
		Макрофіти	Одноразово (кінець серпня – початок вересня)	Видовий склад, чисельність, біомаса
		Іхтіофауна	Одноразово (улітку)	Видовий склад, рибопродуктивність
	Первинна продукція і деструкція	Щомісяця улітку та один раз восени	Індекс самоочищення-самозабруднення	
2	Системи технічного водопостачання: дюкери підземних скидних каналів, аванкамери берегових насосних станцій	Фітоперифітон	Щомісяця улітку та один раз восени	Видовий склад, чисельність, біомаса
		Зооперифітон	Щомісяця улітку та один раз восени	Видовий склад, чисельність, біомаса

Метою розгорнутого гідробіологічного моніторингу є встановлення загальних тенденцій розвитку гідроекосистеми ЗАЕС, угруповань гідробіонтів, у першу чергу, потенційно загрозливих для нормальної експлуатації ЗАЕС. Також він направлений на виявлення ролі інвазійних видів гідробіонтів, наслідків екстремальних ситуацій, коригування системи поточного моніторингу.

Розгорнутий гідробіологічний моніторинг проводиться з періодичністю один раз в 2–5 років із залученням фахівців-гідробіологів спеціалізованих наукових організацій (за необхідності) і включає докладне обстеження ВО та ЦСО. Контрольовані гідробіологічні показники та об'єкти контролю розгорнутого моніторингу визначаються довгостроковою програмою проведення моніторингу.

Метою фоновий гідробіологічний моніторинг є оцінка можливого негативного впливу скидних вод ЗАЕС на екосистему фоновий ділянки Каховського водосховища. Також він направлений на виявлення гідробіонтів, що можуть потрапляти з водосховища до циркуляційної системи охолодження ЗАЕС і створювати там біоперешкоди.

При виборі моніторингових точок у фоновий водоймі оцінювали можливий вплив скидних вод ЗАЕС на біоценози літоральної та профундальної зон фоновий ділянки. Точки відбору проб і біологічні об'єкти досліджень представлені в табл. 3.

При проведенні поточного моніторингу фоновий ділянки Каховського водосховища необхідно контролювати наступні гідробіологічні угруповання: бактеріопланктон; фітопланктон; фітобентос; зоопланктон; зообентос.

Таблиця 3
Точки відбору гідробіологічних проб у фоновий водоймі

Фоновий водойма	Точки контролю	Ґрунт, субстрат	Біологічні об'єкти	Горизонт досліджень, м
Каховське водосховище	Водозабір Запорізької ТЕС	Товща води, дно	Бактеріопланктон	0.01
			Фітопланктон	1
			Фітобентос	10
			Зоопланктон	1
			Зообентос	10
	500 м нижче скиду води з ВО	Товща води, дно	Бактеріопланктон	0.01
			Фітопланктон	1
			Фітобентос	10
			Зоопланктон	1
			Зообентос	10

Систематичний контроль вказаних біологічних об'єктів дозволить виявити зміни в біоценозах фоновий ділянки Каховського водосховища, яка знаходиться у зоні впливу скидних вод ЗАЕС. Стан популяцій інших біологічних об'єктів (риб) знаходиться під контролем державного моніторингу. Розгорнутий моніторинг впливу скидних вод ЗАЕС на Каховське водосховище проводиться у рамках щорічного державного моніторингу.

5.5. Рекомендації щодо поліпшення екологічного стану водойми-охолоджувача Запорізької атомно-енергетичної станції

Для стримування масового розвитку гідробіонтів, що заважають роботі підводним комунікаціям ЗАЕС, необхідно підтримувати чисельність риб-меліораторів у водоймі-охолоджувачі на оптимальному рівні. Регулювання чисельності риб повинна здійснюватися шляхом щорічного зариблення водойми і періодичного меліоративного вилучення риб. У водоймі-охолоджувачі ЗАЕС доцільно проводити з метою біомеліорації щорічну інтродукцію наступних видів риб (тис. екз.): короп – 13,6; білий товстолобик – 91,8; білий амур – 21,7.

Виллов старшовікових особин білого товстолобика – це одна з головних умов вдалої утилізації органічної речовини, яка створюється фітопланктоном. Якщо не вилучати старшовікових особин білого товстолобика, вони загинуть та вивільнять акумульовані біогенні елементи знову до водойми, що в свою чергу сприятиме розвитку водоростей.

При чисельності молюсків *Melanoides tuberculata* і *Tarebia granifera* 160 екз./м² та 9 місяцях (270 діб) вегетативного сезону, їх річна продукція складатиме 41,78 г/м² м'якої частини молюска. Враховуючи показники природної смертності риб, відсоток споживання зообентосу (70 %) та площу ВО (820 га), загальна кількість зарибку чорного амура повинна становити 37,5 тис. екз. Доцільно проводити зариблення водойми дворічками чорного амура середньою масою не менше 100–130 г. Використання цьоголіток чорного амура для зарибку небажано, оскільки значно зростуть витрати риби за рахунок збільшення відсотка природної смертності (майже вдвічі).

Оскільки тїляпія в умовах теплих вод ЗАЕС росте дуже швидко, рекомендується проводити її меліоративний виллов за досягнення маси особини вище, ніж 300–350 г.

6. Обговорення існуючих і можливих біоперешкод у циркуляційній системі охолодження Запорізької атомно-енергетичної станції

Водойма-охолоджувач є техногенною водоймою, основною функцією якої є охолодження скидної теплої води. Тому підвищений температурний режим є її характерною особливістю і передбачений технологічними умовами [33]. Результати проведених досліджень свідчать, що влітку температура води у ВО ЗАЕС складає 32–40 °С. Для більшості гідробіонтів, у тому числі й риб (окрім тїляпії), така температура є стресовою. Відомо, що в ембріональному і постембріональному періодах висока температура води може викликати різні морфофункціональні відхилення у риб [34]. Тому слабкий розвиток іхтіофауни у ВО є слідством цих порушень. У зв'язку з цим, контроль за температурним режимом повинен бути обов'язковим заходом у гідробіологічному моніторингу ВО. На нього необхідно спиратися при розрахунках інтродукції риб-біомеліораторів у ВО.

Важливими параметрами гідробіологічного контролю у ВО і каналах ЦСО є чисельність і біомаса бактеріопланктону. Є свідчення, що бактеріопланктон може створювати біоперешкоди – біоплівки на поверхні води або на гідротехнічних спорудах [35]. У циркуляційній системі ЗАЕС бурхливий розвиток бактеріопланктону (до 7,9 млн. кл/мл) і утворення біоплівки спостерігались лише

влітку на окремих ділянках відвідних каналів, що було спричинено підвищеним температурним режимом і накопиченням органічної речовини (рис. 2). При такому локальному розповсюдженню бактеріопланктону контроль за його розвитком в ЦСО ЗАЕС достатньо проводити 1 раз на місяць в літній період. Але збільшення концентрації органічних речовин у ЦСО може спровокувати розвиток бактерій і утворення біоперешкод. Саме тому гідробіологічний моніторинг передбачає визначення показників БСК₅ та ХСК₅ (табл. 1) для контролю за вмістом органічних речовин.

Серед представників фітопланктону ВО потенційно небезпечним утворювачем біоперешкод є вид синьозелених водоростей – *Microcystis aeruginosa*, який викликає «цвітіння» води у прибережних зонах водойми (рис. 3). Подібну картину у ВО ЗАЕС відмічали і раніше [36]. Низький вміст біогенних сполук (фосфору) у воді ВО стримував масове розмноження синьо-зелених водоростей. Проте, наявність у видовому складі фітопланктону мікроцистісу потребує контролю за його розвитком. Визначення чисельності і біомаси фітопланктону 1 раз/місяць, як передбачено в гідробіологічному моніторингу, дозволить розраховувати оптимальну посадку у ВО риб-фітопланктофагів (білий товстолобик), які будуть обмежувати розвиток синьо-зелених водоростей. Це дозволить уникнути ризики утворення біоперешкод, викликаних фітопланктоном.

В угрупованні зоопланктону були відсутні види, які здатні до масового розповсюдження в умовах ВО. Показники біомаси зоопланктону були досить низькими (у середньому $1,45 \pm 0,09$ г/м³). Основним фактором, який обмежував розвиток зоопланктону у ВО, є висока температура води. Про слабкий розвиток зоопланктону у водоймах-охолоджувачах та його високу чутливість до температури відмічають і інші дослідники [37]. Повідомляється також про зміни у видовому складі зоопланктону в зоні впливу підігрітих вод [38]. Саме факт високої чутливості зоопланктону до температури доцільно використовувати у гідробіологічному моніторингу фонові водойми (Каховського водосховища) для оцінки впливу скидних теплих вод ЗАЕС на екосистему водосховища.

На стінках металевих труб підземних скидних каналів були виявлені організми фітоперифітону – нитчасті водорості родів *Oedogonium sp.* і *Ulotrix zonata*, які утворювали щільні обростання і перешкоджали нормальному водотоку. Високий коефіцієнт видової подібності між угрупованнями фітоперифітону ВО ЗАЕС та Каховського водосховища (0,92) свідчить, що водосховище є постійним джерелом потрапляння цих водоростей у водойму-охолоджувач. Здійснення гідробіологічного контролю за розвитком нитчастих водоростей у ВО дозволить отримати данні щодо їх біомаси і розрахувати чисельність риб-фітофагов (білого амура) для вселення у водойму-охолоджувач. Білий амур є активним споживачем водної рослинності, він буде стримувати розвиток водоростей у ВО, що обмежить їх подальше розповсюдження в ЦСО.

Важливим об'єктом гідробіологічного моніторингу в ЦСО ЗАЕС повинні бути представники зооперифітону – тропічні моллюски *Melanoides tuberculata* і *Tarebia granifera*. Перші дані про появу *Melanoides tuberculata* у ВО ЗАЕС з'явилися у 2015 році [39]. А вже в 2017 р. обидва види повністю натуралізувались і створили біоперешкоди [40]. Бурхливе розмноження і

розповсюдження *M. tuberculata* і *T. granifera* пояснюється їх придатністю до партеногенетичного розмноження [41]. Подальші дослідження показали, що у ВО масові скупчення молюсків утворюються в перифітоні на глибині 1 м, досягаючи чисельності 367 экз./м² [42]. Ймовірною причиною потрапляння їх у ВО вважається акваріумістика.

У каналах ЦСО угруповання зооперифітону потребують особливої уваги, оскільки саме їх об'єкти викликали біоперешкоди. На стінках металевих труб чисельність *M. tuberculata* і *T. granifera* досягала 5200 экз./м², що призводило до зниження пропускної здібності трубопроводів і потребувало постійної механічної чистки.

В утворенні біоперешкод у ЦСО ЗАЕС основне місце належало *T. granifera*, другорядне – *M. tuberculata*. У пробах зооперифітону співвідношення чисельності між двома видами становило 3–4:1. Поглиблене вивчення біологічних особливостей двох видів виявило розбіжності у будові їх зябрового апарату і травної системи, які дозволяють *T. granifera* краще пристосовуватись до нових умов існування порівняно з *M. tuberculata* [43].

Аналогічне проникнення і масове розповсюдження молюска *M. tuberculata* відмічалось у ВО Південно-Української АЕС. Але там, на відміну від ЦСО ЗАЕС, цей молюск не утворив біоперешкоди в системі охолодження, хоча його чисельність у ВО досягала 12,6 тис. экз./м² [6]. Результати досліджень, а також літературні дані підтверджують той факт, що створення біоперешкод у ЦСО ЗАЕС обумовлено агресивним розповсюдженням і адаптуванням саме молюска *Tarebia granifera*. Отримані дані дозволяють розробити науково-обґрунтовані рекомендації щодо інтродукції у ВО риб-молюскофагів для стримання розвитку небезпечних видів.

Аналіз іхтіофауни водойми-охолоджувача свідчить, що існуючі у водоймі види риб не можуть розглядатися як ефективні споживачі молюсків і для боротьби з біоперешкодами вони малоефективні. Потрібно проводити зариблення ВО рибами-молюскофагами. Активним споживачем молюсків є чорний амур. Стосовно чорного амура є повідомлення, що за добу він споживає близько 19 грамів меланій [44]. На відміну від класичних рекомендацій зариблення водойм-охолоджувачів рибами-фітомеліораторами [45], додаткове зариблення ВО чорним амуром дасть змогу контролювати і обмежувати ріст популяцій молюсків. При щорічних обсягах зариблення ВО чорним амуром в кількості 37,5 тис. екземплярів він буде споживати близько 256,5 т молюсків за рік. Таким чином, зариблення ВО чорним амуром дозволить знизити чисельність молюсків у циркуляційній системі водоохолодження ЗАЕС за рік з 342,5 т до 86 т і підтримувати їх популяції на безпечному рівні.

Потенціальними утворювачами біоперешкод можуть виступати також вищі водні рослини – геліофіти. Площа заростання ВО ЗАЕС геліофітами була незначна – менше 5 % площі водного дзеркала, але збільшення площі заростання буде знижувати охолоджувальну здатність ВО. Крім того, рослини, що розкладаються, погіршують якість води, служать джерелом органічних речовин. Занурені рослини течією можуть переноситися в райони водозабору і створювати біологічні перешкоди. Повітряно-водні рослини (очерет, рогоз тощо) служать

місцем скупчення молюсків і гніздування птахів, що небажано для техноекосистеми ЗАЕС. Для контролю за станом заростання ВО геліофітами в гідробіологічному моніторингу передбачено проводити оцінку чисельності і фітотомаси рослин 1 раз на рік в кінці вегетаційного сезону (серпень-вересень). Ці показники необхідно враховувати при обчисленні вселення у ВО активного фітофага – білого амура. Орієнтована кількість посадки дволіток білого амура у ВО становить 14,8 тис. екз.

Таким чином, проведені дослідження свідчать про наявність у складі гідробіоценозів ЦСО ЗАЕС діючих і потенціальних утворювачів біоперешкод. Існуючі методи боротьби з біоперешкодами не забезпечують їх попередження і мають низьку ефективність. Запропонований регламент гідробіологічного моніторингу дасть можливість контролювати розвиток популяцій небезпечних гідробіонтів, своєчасно виявляти види – утворювачі біоперешкод і розробляти відповідні рекомендації щодо їх усунення. Регламент включає чотири види моніторингу – поточний, екстремальний, розгорнутий і фоновий, кожен з яких має свої цілі і задачі. Систематичне здійснення всіх видів моніторингу дозволить попередити будь-які ризики, пов'язані з масовим розвитку гідробіонтів. Фоновий моніторинг дозволить контролювати екологічний стан біоценозів Каховського водосховища (фонові водойми) у зонах скиду теплих вод ЗАЕС. Розроблений гідробіологічний моніторинг має універсальний характер і може бути адаптований до інших енергетичних об'єктів з урахуванням особливостей їх техногенних систем водоохолодження.

7. Висновки

1. За результатами гідроекологічного аналізу водойми-охолоджувача циркуляційної системи ЗАЕС в літній період спостерігається перевищення рибогосподарських ГДК за показниками температури води (на 6 °С), біологічного і хімічного споживання кисню (БПК₅ – на 21 %; і ХПК₅ – на 64 %). Також відмічалось перевищення вмісту міді (1,6 ГДК), марганцю (1,8 ГДК), цинку (4,2 ГДК) і заліза (1,7 ГДК), що пов'язано з технологічними особливостями станції.

2. При дослідженні планктонних угруповань біоценозів у ВО і каналах ЦСО виявлений локальний розвиток бактеріопланктону з максимальною чисельністю 7,9 млн. кл/мл.; чисельність фітопланктону коливалась в широких межах (13376–85724 млн. екз./м³) з домінуванням синьо-зелених водоростей, які викликали «цвітіння» води; угруповання зоопланктону були малочисельні (30193–141580 екз./м³) з мінімальними показниками в точках скиду підігрітих вод. В угрупованнях бентосу домінували молюски родини *Thiaridae*, біомаса яких коливалась у широких межах від 0,54 до 20,09 г/м²; у складі фітобентосу домінували нитчасті водорості *Oedogonium sp.* та *Ulotrix zonata*, біомаса яких на окремих ділянках каналів ЦСО досягала 123,6±18,44 г/м². Іхтіофауна ВО ЗАЕС була представлена аборигенними видами (44 %) і чужорідними видами (56 %), серед яких 7 видів були інтродуковані з метою біомеліорації; у скидному і підвідному каналах основну іхтіомасу складала інтродукована тиліпія.

3. Основними групами гідробіонтів, що створюють біологічні перешкоди у циркуляційній системі охолодження ЗАЕС, є нитчасті водорості *Oedogonium*

sp., *Ulotrix zonata* та молюски *Melanoides tuberculata* і *Tarebia granifera* родини *Thiaridae*. Мушлі відмерлих молюсків з течією води утворюють дрифтовий матеріал, який накопичуються у басейнах ділянки біомеліорації і створює перешкоди у роботі насосних станцій. Потенційно небезпечним організмом, що викликає «цвітіння» води у ВО, є синьо-зелена водорість *Microcystis aeruginosa*.

4. Розроблений режим здійснення контролю за розвитком потенційних утворювачів біоперешкод передбачає проведення чотирьох видів гідробіологічного моніторингу – поточного, екстремального, розгорнутого і фонового для забезпечення контролю за гідроекологічним станом техногенних водойм ЗАЕС та фонові водойми (Каховське водосховище) і попередження ризиків утворення біоперешкод.

5. Рекомендації щодо поліпшення екологічного стану водойми-охолоджувача передбачають вселення у водойму риб-біомеліораторів з різним спектром живлення (білий товстолобик, білий амур, короп, чорний амур) для запобігання масового розвитку гідробіонтів – потенційних створювачів біоперешкод.

Подяка

Колектив авторів вдячний керівництву Державного підприємства «Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом» ВП «Запорізька АЕС» і особисто начальнику СОНС ВП «Запорізька АЕС» Квашніну І. В. за організацію і фінансування проведених гідробіологічних досліджень. Автори також вдячні колегам канд. біол. наук Яковенко В. О. і канд. біол. наук Ананьєвій Т. В. за участь і консультативну допомогу під час обробки дослідних проб.

Література

1. Романенко, В. Д., Кузьменко, М. І., Афанасьєв, С. О. та ін. (2012). Гідроекологічна безпека атомної енергетики в Україні. Вісн. НАН України, 6, 41–51. doi: <https://doi.org/10.15407/vsn2012.06.041>
2. Grohmann, A. P. (2008). Bioencrustation in the turbine cooling system at the funil hydroelectric power plant, Itatiaia, Rio de Janeiro, Brazil. *Naturalia*, 31, 16–21. URL: <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/naturalia/article/view/1212>
3. Звягинцев, А. Ю., Полтаруха, О. П., Масленников, С. И. (2015). Обрастание морских систем технического водоснабжения и анализ методов защиты от обрастания в водоводах (аналитический обзор). *Вода: химия и экология*, 1, 37–60. URL: <https://www.researchgate.net/publication/339696835>
4. Самойленко, В. М., Свирид, А. А. (2014). Многолетние изменения фитопланктона водоема-охладителя. *Альгология*, 24 (3), 371–375. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/81407/28-Samoilenko.pdf?sequence=1>
5. Кражан, С. А., Протасов, О. О., Базаєва, А. М., Григоренко, Т. В., Силаєва, А. А. (2011). Гідробіологічний стан водойми-охолоджувача Хмельницької атомної електростанції в осінній період. *Рибогосподарська наука України*, 3 (17), 29–35. URL: <https://fsu.ua/index.php/uk/2011/3-2011-17/2011-03-029-03>
6. Слепнев, А. Е., Силаєва, А. А. (2013). О натурализации *Melanoides tuberculata* (Thiaridae, Gastropoda) в водоеме-охладителе Южно-Украинской

АЭС. Вестн. зоологии, 47 (2), 178. URL: http://mail.izan.kiev.ua/vz-pdf/2013/2/22_Prokopenko.pdf

7. Яковенко, В. А., Силаева, А. А., Протасов, А. А. (2018). Инвазивные брюхоногие моллюски в техноэкосистеме Запорожской АЭС. Ядерная энергетика та довілля, 1 (11), 61–65. URL: https://www.researchgate.net/publication/329659147_Yakovenko_V_Sylayeva_A_Protasov_A_Invasive_gastropods_in_the_technoecosystem_of_Zaporozhska_AES

8. Protasov, A. A., Sylayeva, A. A., Novoselova, T. N., Gromova, Y. F., Morozovskaya, I. A. (2017). Nuclear Power Plant Technoecosystem: 18 Years of Hydrobiological Observations. Journal of Siberian Federal University. Biology, 11 (4), 459–484. doi: <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0045>

9. Albloushi, M. A. (2017). Biofouling control of industrial seawater cooling towers. Thuwal, 267. URL: <https://repository.kaust.edu.sa/bitstream/handle/10754/626169/Mohammed%20Albloushi%20Dissertation.pdf?sequence=1&isAllowed=n>

10. Jadidi, P., Zeinoddini, M. (2020). Influence of hard marine fouling on energy harvesting from Vortex-Induced Vibrations of a single-cylinder. Renewable Energy, 152, 516–528. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.083>

11. Протасов, А. А., Панасенко, Г. А., Бабарига, С. П. (2008). Биологические помехи в эксплуатации энергетических станций, их типизация и основные гидробиологические принципы их ограничения. Гидробиологический журнал, 44 (5), 36–54.

12. Федоненко, О. В., Маренков, О. М., Петровський, О. О. (2019). Проблема біологічних перешкод в роботі АЕС (на прикладі експлуатації техноекосистеми Запорізької АЕС). Ядерна та радіаційна безпека, 2 (82), 54–60. doi: [https://doi.org/10.32918/nrs.2019.2\(82\).10](https://doi.org/10.32918/nrs.2019.2(82).10)

13. Шадрина, Л. А. (1988). К вопросу о влиянии активного хлора на формирование сообщества морского обрастания. Экология моря, 28, 93–97.

14. Goodman, P. D. (1987). Effect of chlorination on materials for sea water cooling systems: a review of chemical reactions. British Corrosion Journal, 22 (1), 56–62. doi: <https://doi.org/10.1179/000705987798271785>

15. Giacobone, A. F. F., Pizarro, R. A., Rodríguez, S. A., Belloni, M., Croatto, F. J., Ferrari, F. et. al. (2015). Biocorrosion at Embalse Nuclear Power Plant. Analysis of the Effect of a Biocide Product. Procedia Materials Science, 8, 101–107. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.04.053>

16. Карпов, В. А., Ковальчук, Ю. Л., Ильин, И. Н. (2008). Экологические аспекты разработки и применения средств защиты от обрастания и коррозии в морской воде. Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе, 2, 33–35.

17. Bott, T. R. (2011). Biofouling Control. Industrial Biofouling, 81–153. doi: <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-53224-4.10004-x>

18. Болеев, А. А. (2013). Предотвращение биологического обрастания металлических конструкций оголовка водозаборных сооружений. Волгоград, 20.

19. Qiu, H., Feng, K., Gapeeva, A., Meurisch, K., Kaps, S., Li, X. et. al. (2022). Functional polymer materials for modern marine biofouling control. Progress in Polymer Science, 127, 101516. doi: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2022.101516>

20. Zhao, X., Kim, J., Warns, K., Wang, X., Ramuhalli, P., Cetiner, S. et. al. (2021). Prognostics and Health Management in Nuclear Power Plants: An Updated Method-Centric Review With Special Focus on Data-Driven Methods. *Frontiers in Energy Research*, 9. doi: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.696785>
21. Protasov, A. A., Zubkova, Y. I., Silayeva, A. A. (2016). Conceptual Approaches to Organization of Hydrobiological Monitoring of Techno-ecosystems of Thermal and Nuclear Power Plants. *Hydrobiological Journal*, 52 (2), 59–70. doi: <https://doi.org/10.1615/hydrobj.v52.i2.70>
22. Протасов, А. А., Немцов, А. А., Масько, А. Н. (2019). Применение европейских принципов природоохранной деятельности в стандарте гидробиологического мониторинга водных техноэкосистем АЭС ГП «НАЭК «Энергоатом». *Ядерна енергетика та довкілля*, 2 (14), 71–77. URL: https://www.researchgate.net/publication/336037180_Primenenie_evropejskih_principov_prirodoohrannoj_deatelnosti_v_standarte_gidrobiologiceskogo_monitoringa_vo_dnyh_tehnoekosistem_AES_GP_NAEK_EnergoatomApplication_of_European_Principles_of_Environmental
23. Романенко, В. Д. (Ред.) (2006). *Методи гідроекологічних досліджень поверхневих вод*. К.: ЛОГОС, 408.
24. Романенко, В. Д., Жукинський, В. М., Оксіюк, О. П. та ін. (1998). *Методи екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями*. К.: СИМВОЛ-Т, 28.
25. *Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях. Зоопланктон и его продукция (19684)*. Л.: ЗИН, 35.
26. Щербак, В. І. (2002). *Методи досліджень фітопланктону. Методичні основи гідробіологічних досліджень водних екосистем*. Київ, 41–48.
27. Правдин, І. Ф. (1966). *Руководство по изучению рыб (преимущественно пресноводных)*. М.: Пищ. пром-сть, 376.
28. Чугунова, І. І. (1959). *Руководство по изучению возраста и роста рыб*. М.: Изд-во АН СССР, 164.
29. Быховская-Павловская, І. Е. (1969). *Паразитологические исследования рыб*. Л.: Наука, 108.
30. *Инструкция по эксплуатации пруда-охладителя 00.ГЦ.УЛ.ИЭ.01.А (2012)*. Энергодар: ОП ЗАЭС, 15.
31. *Вода рибогосподарських підприємств. Загальні вимоги та норми: СОУ-05.01.-37-385:2006 (2006)*. К.: Міністерство аграрної політики України, 7.
32. *СОУ НАЕК 178:2019. Порядок розробки регламенту гідробіологічного моніторингу водойми-охолоджувача, систем охолодження і системи технічного водопостачання АЕС з реакторами типу ВВЕР*.
33. Протасова, А. А. (Ред.) (2011). *Техно-екосистема АЭС. Гидробиология, абиотические факторы, экологические оценки*. К.: Институт гидробиологии НАН Украины, 234.
34. Водяницький, О. М. (2018). *Морфофізіологічні та цитогенетичні особливості ембріогенезу риб при різних екологічних умовах водного середовища*. Київ, 22. URL: http://hydrobio.kiev.ua/images/text/doc/aref_Vodyanitskiy.pdf

35. Суздалева, А. Л. (1995). Бактериопланктон водоемов-охладителів Курської і Калининської АЕС. М., 24.
36. Охріменко, В. О. (2013). Оцінка якості води водойми-охолоджувача Запорізької АЕС методом біологічної індикації. Рибогосподарська наука України, 1 (23), 103–108. doi: <https://doi.org/10.15407/fsu2013.01.103>
37. Макушенко, М. Е., Кулаков, Д. В., Верещагіна, Е. А. (2014). Зоопланктон Копорської губи Фінського заливів в зоні впливу Ленінградської АЕС. Гідробіол. журн., 50 (2), 3–15. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/105283/01-MakushenkoNEW.pdf?sequence=1>
38. Muthulakshmi, A. L., Natesan, U., Ferrer, V. A., Deepthi, K., Venugopalan, V. P., Narasimhan, S. V. (2019). Impact assessment of nuclear power plant discharge on zooplankton abundance and distribution in coastal waters of Kalpakam, India. Ecological Processes, 8 (1). doi: <https://doi.org/10.1186/s13717-019-0173-9>
39. Климчук, А. (2015). Біологічні особливості інвазійного виду гастропод. *Melanooides tuberculata*: Abstr. VIII Intern. Conf. «Zoocenosis-2015. Biodiversity and Role of Animals in Ecosystems». Dnipro, 78–79.
40. Marenkov, O., Batalov, K., Kriachek, O. (2018). Biological and biomechanical principles of the controlling molluscs *Melanooides tuberculata* (Müller 1774) and *Tarebia granifera* (Lamarck, 1822) in reservoirs of strategic importance. World Scientific News, 99, 71–83. URL: <http://psjd.icm.edu.pl/psjd/element/bwmeta1.element.psjd-c88f8d40-b81a-4b84-b757-0998d39099d1>
41. Silva, E. C., Gomes, L. E. O. (2014). *Melanooides tuberculatus* (Müller, 1774): Occurrence extension of the invasive gastropod in Bahia, Brazil. Pan-American Journal of Aquatic Sciences, 9 (2), 145–149. URL: [http://panamjas.org/pdf_artigos/PANAMJAS_9\(2\)_145-149.pdf](http://panamjas.org/pdf_artigos/PANAMJAS_9(2)_145-149.pdf)
42. Yakovenko, V., Fedonenko, O., Klimenko, O., Petrovsky, O. (2018). Biological control of the invasive snail species *Melanooides tuberculata* and *Tarebia granifera* in Zaporizka Nuclear Power Plant cooling pond. Ukrainian Journal of Ecology, 8 (1), 975–982. doi: https://doi.org/10.15421/2018_301
43. Єсіпова, Н. Б. (2018). Цитометричні особливості молюсків родини Thiaridae, що утворюють обростання в гідротехнічній системі Запорізької АЕС. Таврійський науковий вісник, 103, 256–261. URL: <http://dspace.ksau.kherson.ua/bitstream/handle/123456789/2347/40.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
44. Frida, B.-A., Heller, J. (2001). Biological control of aquatic pest snails by the Black carp *Mylopharyngodon piceus*. Biological Control, 22, 131–138. doi: <https://doi.org/10.1006/bcon.2001.0967>
45. Zakonnova, L., Nikishkin, I., Rostovzev, A. (2017). Resource-Saving Cleaning Technologies for Power Plant Waste-Water Cooling Ponds. E3S Web of Conferences, 21, 02015. doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172102015>