

УДК 504.064.4:627.151:622

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2025.3\(501\).25](https://doi.org/10.15589/znп2025.3(501).25)

DEVELOPMENT OF A STRATEGIC MODEL FOR ENSURING THE SUSTAINABILITY OF SURFACE WATER BODIES IN THE ZONE OF INFLUENCE OF MINING ENTERPRISES

РОЗРОБКА СТРАТЕГІЧНОЇ МОДЕЛІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАЛОСТІ ПОВЕРХНЕВИХ ВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ У ЗОНІ ВПЛИВУ ГІРНИЧОДОБУВНИХ ПІДПРИЄМСТВ

Ruslana A. Valerko

valerko_ruslana@ukr.net

ORCID: 0000-0003-4716-0100

Vasyl M. Bondarchuk

kvm_bvm@ztu.edu.ua

ORCID: 0000-0003-2793-8720

Р. А. Валерко,

д.с.-г.н., доцент

В. М. Бондарчук,

старший викладач

*Zhytomyr Polytechnic State University, Zhytomyr**Державний університет «Житомирська політехніка», м. Житомир*

Abstract. Purpose. The study is aimed at developing a strategic model for ensuring the sustainability of surface water bodies that are exposed to anthropogenic impacts as a result of mining enterprises' activities. The main objective is to create an integrated approach that combines environmental, technical, and managerial aspects, enabling the formation of an effective system for monitoring, restoring, and preserving water resources in industrial regions.

Methodology. The leading methodological approach of the research is systems analysis, through which a strategic model for ensuring the sustainability of surface water bodies in the zones of mining industry enterprises was developed.

Results. A five-stage model has been proposed, which includes: assessment of the current state of water bodies; identification of pollution sources; development of a set of environmental and technical measures; integrated management and monitoring; evaluation of effectiveness with feedback. The model functions as a closed adaptive cycle that allows for continuous improvement of management decisions. Expected outcomes include reducing the level of anthropogenic pressure, restoring biodiversity, enhancing the ecological sustainability of aquatic ecosystems, and reducing social tension through information transparency.

Scientific novelty. For the first time, an integrated strategic model has been proposed that combines hydrochemical, biological, hydromorphological, and managerial aspects into a single system. The model envisages the use of nature-based solutions, digital monitoring technologies, and adaptive management mechanisms, which ensure its universality and flexibility under different conditions.

Practical significance. The developed model can be used by state authorities, local communities, and enterprises to increase the efficiency of water resource protection in mining activity zones. Its implementation will ensure compliance with environmental standards, reduce the risk of accidental pollution, establish a transparent system of environmental monitoring, and contribute to the sustainable development of mining regions.

Key words: surface water bodies; mining enterprises; strategic model; ecological sustainability; systems analysis; hydrochemical monitoring; integrated water resources management.

Анотація. Мета. Дослідження спрямоване на розробку стратегічної моделі забезпечення сталості поверхневих водних об'єктів, які зазнають техногенного впливу внаслідок діяльності гірничодобувних підприємств. Основна мета полягає у створенні інтегрованого підходу, що поєднує екологічні, технічні та управлінські аспекти, дозволяючи сформуванню ефективної системи моніторингу, відновлення та збереження водних ресурсів у промислових регіонах.

Методика. Провідним методологічним підходом дослідження став системний аналіз, за допомогою якого була створена стратегічна модель забезпечення сталості поверхневих водних об'єктів у зоні діяльності підприємств гірничодобувної галузі.

Результати. Запропоновано п'ятиетапну модель, яка включає: оцінку поточного стану водних об'єктів; визначення джерел забруднення; розробку комплексу природоохоронних і технічних заходів; інтегроване управління та моніторинг; оцінку ефективності із зворотним зв'язком. Модель функціонує як замкнений адаптивний цикл,

що дозволяє постійно вдосконалювати управлінські рішення. Очікуваними результатами є зниження рівня техногенного навантаження, відновлення біорізноманіття, підвищення екологічної сталості водних екосистем та зменшення соціальної напруги завдяки прозорості інформації.

Наукова новизна. Уперше запропоновано інтегровану стратегічну модель, яка поєднує гідрохімічні, біологічні, гідроморфологічні та управлінські аспекти в єдиній системі. Модель передбачає використання природоорієнтованих рішень, цифрових технологій моніторингу та механізмів адаптивного управління, що забезпечує її універсальність і гнучкість у різних умовах.

Практична значимість. Розроблена модель може бути використана органами державного управління, місцевими громадами та підприємствами для підвищення ефективності охорони водних ресурсів у зонах гірничодобувної діяльності. Її впровадження дозволить забезпечити дотримання екологічних нормативів, знизити ризики аварійних забруднень, сформувати прозору систему екологічного моніторингу та сприяти сталому розвитку гірничопромислових регіонів.

Ключові слова: поверхневі водні об'єкти; гірничодобувні підприємства; стратегічна модель; екологічна сталість; системний аналіз; гідрохімічний моніторинг; інтегроване управління водними ресурсами.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Діяльність гірничодобувних підприємств супроводжується формуванням значних обсягів шахтних і кар'єрних вод, відвалів гірських порід та шламосховищ, що стають джерелами забруднення поверхневих водних об'єктів. Це призводить до зміни гідрохімічного складу води, погіршення її екологічних характеристик, зниження біорізноманіття та підвищення екологічних ризиків для населення. У зв'язку з цим виникає необхідність у розробці стратегічних підходів, які б поєднували технічні, екологічні та управлінські інструменти забезпечення сталого стану водних екосистем у зоні техногенного впливу.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Сучасні дослідження одноставно вказують, що кислотний шахтний/кар'єрний дренаж є головним механізмом деградації поверхневих вод у гірничопромислових регіонах, оскільки зумовлює різке підкислення, підвищення сульфатів і мобілізацію важких металів у водній товщі та донних відкладах, що веде до втрат біорізноманіття. Узагальнюючі огляди підкреслюють необхідність комбінації превенції, локальної очистки й довготривалого моніторингу для зниження екологічних ризиків [1–3].

Дослідження буферних прибережних смуг показують, що правильно спроектовані зелені коридори суттєво зменшують винос завислих речовин та азоту; водночас їхня ефективність залежить від гідрології ділянки, ширини смуги й типу рослинності (трава/чагарники/дерева). Дослідження підтверджують скорочення втрат азоту й твердого стоку, але застерігають від універсальних «рецептів» без урахування місцевої гідрології [4–6].

У частині біоіндикації останні роботи деталізують застосування діатомових водоростей і макрозообентосу як чутливих індикаторів органічного та токсичного навантаження. Нові WFD-сумісні індекси для макробезхребетних, разом із сапробіологічними показниками та індексом Шеннона, підвищують

діагностичну здатність моніторингу, особливо на водоймах зі змішаними джерелами впливу [7, 8].

Паралельно швидко розвивається онлайн-моніторинг якості води: огляди 2023–2025 рр. описують сенсори електропровідності, рН, розчиненого кисню, амонійного азоту/нітратів, мутності та інтеграцію IoT/ML-алгоритмів для виявлення аномалій у реальному часі. Пілотні системи демонструють оперативне виявлення аварійних скидів і основу для адаптивного управління на рівні підприємство–громада–регулятор [9, 10].

Щодо природоорієнтованих рішень, то науковці наголошують на ефективності штучних і природних болотних систем для вилучення азоту, фосфору, завислих речовин і металів; нові роботи показують також потенціал для складних полютантів та користь для біорізноманіття й регуляції стоку. Приклади реальних впроваджень ілюструють екосистемні вигоди, але підкреслюють потребу в належній експлуатації та масштабуванні [11–13].

Регуляторно-методична база в Європі задається Водною рамковою директивою ЄС 2000/60/ЄС (WFD), що визначає цілі «доброго екологічного стану», інтегроване управління на рівні річкових басейнів та використання біологічних, гідроморфологічних і фізико-хімічних елементів якості. Для країн, що імплементують WFD, це формує уніфіковані підходи до оцінки стану, планування заходів і публічної звітності даних моніторингу [14].

Отже, сучасна наукова думка базується на тому, що стійкість поверхневих вод у зонах гірничого впливу досягається поєднанням: методів локальної очистки з буферними смугами, біоіндикації у комплексі з онлайн-сенсорами, природоорієнтованих споруд, управління за принципами WFD із прозорими даними для громад. Саме ці блоки закладено в запропоновану далі стратегічну модель.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Попри значну кількість наукових досліджень, присвячених оцінці впливу гірничодобувної діяльності на водні ресурси, низка аспектів проблеми

залишається недостатньо опрацьованою. Більшість робіт зосереджена на локальних аспектах – хімічному складі шахтних та кар'єрних вод, процесах формування кислотного дренажу чи ефективності окремих природоохоронних заходів. При цьому відсутнє системне бачення інтегрованої моделі, яка б одночасно охоплювала технічні, екологічні, організаційні та соціально-економічні чинники забезпечення сталості водних об'єктів.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Таким чином, метою дослідження стало створення інтегрованої стратегічної моделі забезпечення сталості поверхневих водних об'єктів, яка б враховувала виявлені наукові та практичні прогалини й забезпечувала довготривалу екологічну безпеку в умовах інтенсивного техногенного навантаження.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Провідним методологічним підходом дослідження став системний аналіз [15], за допомогою якого була створена стратегічна модель забезпечення сталості поверхневих водних об'єктів у зоні діяльності підприємств гірничодобувної галузі. **Об'єктом дослідження** виступають поверхневі водні об'єкти (річки, водотоки та заплавні екосистеми), що зазнають впливу гірничодобувних підприємств унаслідок скиду шахтних та кар'єрних вод, поверхневого стоку з відвалів і шламосховищ, а також інфільтраційних процесів підземного дренажу. **Предметом** – є процеси техногенного впливу гірничодобувної діяльності на якісний стан поверхневих водних об'єктів та стратегічні механізми їхнього відновлення й забезпечення сталості.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Метою розробки стратегічної моделі є забезпечення екологічної, гідрологічної та соціально-економічної сталості водних екосистем, що зазнають

впливу діяльності гірничодобувних підприємств, шляхом інтегрованого управління, моніторингу та адаптивних природоохоронних заходів.

Основними принципами реалізації стратегії є: превентивність – зменшення негативних впливів на етапі проектування та планування діяльності підприємств; наукова обґрунтованість – застосування гідрохімічного, біоіндикаційного та геоінформаційного аналізу; адаптивність – можливість коригування заходів залежно від динаміки показників якості води; прозорість та участь громад – відкритість даних моніторингу та залучення місцевих мешканців; відновлюваність – відновлення водних екосистем після впливу шляхом рекультиваци, біотехнологічних і гідротехнічних заходів.

Запропоновано ввести такі ключові етапи реалізації стратегічної моделі: оцінка поточного стану → визначення джерел та механізмів впливу → розробка комплексу заходів → інтегроване управління та моніторинг → оцінка ефективності.

Інструменти реалізації стратегії включають нормативно-правові, економічні, технологічні та науково-освітні складові (рис. 1).

Очікуваними результатами реалізації стратегічної моделі мають бути: зниження концентрацій забруднюючих речовин до нормативних значень, відновлення біорізноманіття водних екосистем, підвищення індексу екологічної сталості щонайменше на 20 % протягом 5 років, а також зменшення конфліктів між підприємствами та громадами через прозорість даних.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Розроблена стратегічна модель підвищення рівня екологічної сталості водних об'єктів у зоні впливу діяльності гірничодобувних підприємств із використанням системного аналізу дає можливість представити її у вигляді множини:

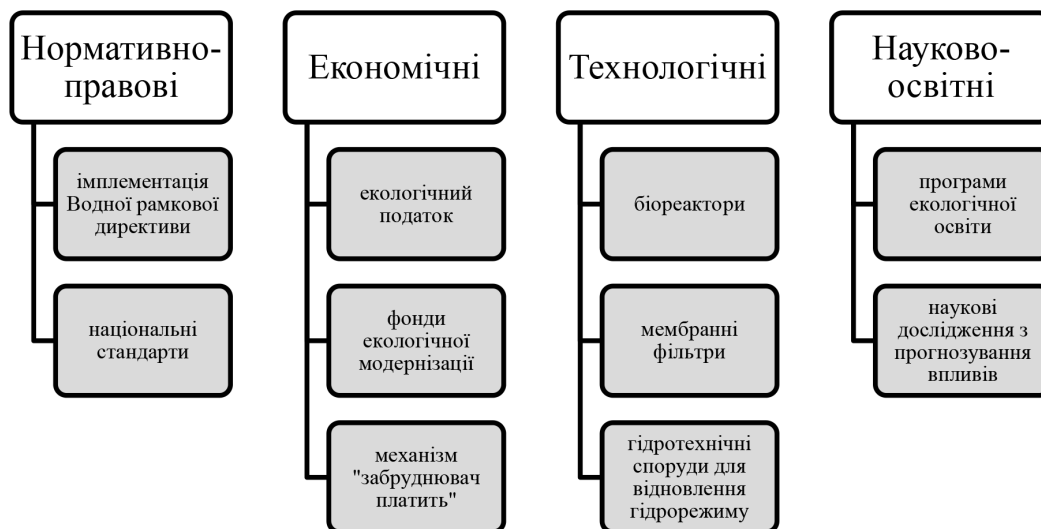


Рис. 1. Основні інструменти реалізації стратегії

$$SM = (CS, SI, CE, IM, EA), \quad (1)$$

де, CS – оцінка поточного стану, SI – визначення джерел та механізмів впливу, CE – розробка комплексу заходів, IM – інтегроване управління та моніторинг, EA – оцінка ефективності.

У свою чергу, оцінка поточного стану може бути представлено такою множиною:

$$CS = (HchA, HM, HmA, GIS), \quad (2)$$

де, $HchA$ – гідрохімічний аналіз, HM – гідробіологічний моніторинг, HmA – гідроморфологічна оцінка русла та берегів, GIS – GIS-картографування зон впливу.

Визначення джерел та механізмів впливу містить компоненти, що описуються такою множиною:

$$SI = (DR, SD, UD), \quad (3)$$

де, DR – прямі скиди шахтних і кар'єрних вод, SD – поверхневий стік з відвалів та зон складування, UD – підземний дренаж у водоносні горизонти.

Комплекс заходів забезпечення сталості поверхневих водних об'єктів складається із технічних, природоохоронних та організаційних заходів та представлений множиною:

$$CE = (TM, EPM, OA), \quad (4)$$

де, TM – технічні заходи, EPM – природоохоронні заходи, OA – організаційні заходи.

Інтегроване управління та моніторинг представлено такою множиною:

$$IM = (AS, D, RR), \quad (5)$$

де, AS – автоматизовані станції онлайн-моніторингу, D – єдина база даних про якість води, RR – механізм оперативного реагування на погіршення показників.

Оцінка ефективності реалізації стратегії буде здійснюватися шляхом порівняння показників якості води до та після впровадження заходів, використання індексу екологічної сталості водних об'єктів, а також соціологічних опитувань громади щодо стану водних ресурсів та може бути представлена такою множиною:

$$EA = (QI, ESI, SS), \quad (6)$$

де, QI – порівняння показників якості води до та після впровадження заходів, ESI – індекс екологічної сталості водних об'єктів, SS – соціологічні опитування громади щодо стану водних ресурсів.

Таким чином, стратегічну модель покращення екологічної сталості водних об'єктів під впливом діяльності підприємств гірничодобувної промисловості можна представити у вигляді графічної моделі (формула 7) та схеми (рис. 2).

$$SM = \begin{cases} CS = (HchA, HM, HmA, GIS) \\ SI = (DR, SD, UD) \\ CE = (TM, EPM, OA) \\ IM = (AS, D, RR) \\ EA = (QI, ESI, SS) \end{cases}, \quad (7)$$

Отже, розглянемо більш детально ключові етапи реалізації стратегічної моделі.

Етап 1. Оцінка поточного стану поверхневих водних об'єктів. Метою здійснення гідрохімічного аналізу є визначення рівня забрудненості води та відповідності нормативам ДСанПіН і Водної рамкової директиви ЄС. Основними параметрами, що рекомендовано використовувати, є: рН, що показує кислотно-лужний баланс та вплив технологічних процесів; амонійний азот (NH_4^+) як індикатор свіжого органічного забруднення та впливу шахтних/кар'єрних вод; нітрати (NO_3^-) та нітрити (NO_2^-), вміст, яких відображає процеси нітрифікації та можливе забруднення агрохімікатами; важкі метали (Fe, Mn, Pb, Cd, Zn), які є характерними для гірничодобувних підприємств як результат вилуговування порід; ХСК (хімічне споживання кисню) та БСК₅ (біохімічне споживання кисню) як інтегральні показники органічного забруднення, що дозволяють оцінити стан самоочисних процесів у річці. Регулярність відбору проб має бути щонайменше 1 раз на квартал (сезонні зміни) у контрольних створах: вище та нижче місця скиду.

Метою гідробіологічного моніторингу є оцінка якості води за станом живих організмів, які є природними індикаторами. Важливість біоіндикації полягає у тому, що вона відображає не лише миттєвий стан води, а й кумулятивний ефект забруднень у часі. Основними методами, що використовуються, є: визначення сапробіологічного індексу (індикатори забруднення органікою); розрахунок індексу біорізноманіття Шеннона (H') для фітопланктону та бентосу; оцінка наявності чутливих груп організмів (личинки веснянок, ручайників, молюски).

Гідроморфологічна оцінка включає аналіз фізичного стану русла та берегів, які впливають на стійкість водної екосистеми. Цей блок дозволяє оцінити, наскільки техногенні зміни впливають на природну гідродинаміку. Основні критерії, що рекомендовано

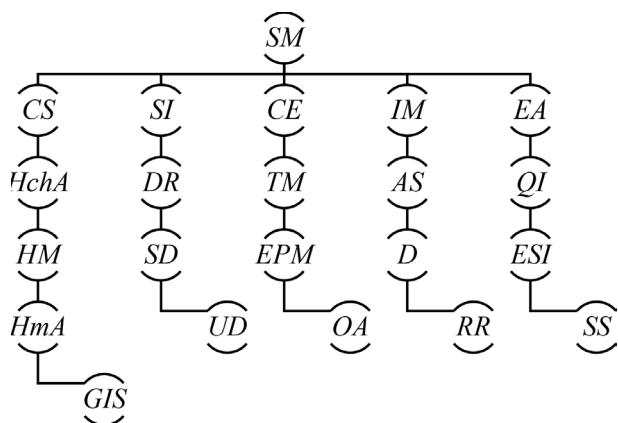


Рис. 2. Стратегічна модель покращення екологічної сталості водних об'єктів

використовувати, є: стабільність русла (наявність ерозії, розмивів, замулення); берегові укріплення (штучні або природні); ступінь зарегульованості стоку (наявність дамб, відстійників, техногенних водойм); збереженість заплавної екосистем (луки, заболочені ділянки, прибережні ліси).

GIS-картографування зон впливу використовується з метою просторового візуального відображення джерел забруднення та поширення їхнього впливу. Основні інструменти, які використовуються для реалізації цього етапу: використання ГІС-технологій для створення карт із точками відбору проб, місцями скиду, відвалами порід; буферне моделювання (визначення зон ризику навколо джерел забруднення); побудова ізоліній концентрацій окремих показників (наприклад, Fe, NH_4^+); накладання на карти даних про землекористування (сільське господарство, промисловість, ліси), щоб враховувати сукупний вплив. Створені інтерактивні карти можна використовувати як у наукових публікаціях, так і для звітності перед органами екологічного контролю та громадами.

Отже, етап 1 забезпечує комплексне уявлення про стан поверхневих водних об'єктів. Його значення полягає в тому, що він інтегрує хімічні, біологічні, фізико-географічні та просторові дані в єдину систему. Це дозволяє не лише виявити рівень техногенного навантаження, а й локалізувати найбільш проблемні ділянки для подальших природоохоронних заходів.

Етап 2. Визначення джерел та механізмів впливу. Одним із найвагоміших факторів цього етапу є оцінка прямих скидів шахтних і кар'єрних вод, адже підприємства часто відкачують шахтні та дренажні води, які містять підвищені концентрації солей, зокрема хлоридів і сульфатів (через контактування з гірськими породами); мають високий рівень заліза, марганцю, цинку, свинцю та інших мікроелементів; можуть змінювати температурний режим річки, якщо вода скидається з підземних горизонтів.

Механізм впливу: пряме надходження забруднюючих речовин у водний об'єкт → погіршення

фізико-хімічних показників → зниження біологічної продуктивності екосистеми.

Відвали гірських порід, шламосховища й зони тимчасового складування мінеральної сировини є джерелом: завислих речовин, які викликають замулення русла та зниження прозорості води; важких металів та мінералів, що вилуговуються під час дощів або танення снігу; сульфатів та нітратів, які можуть формувати кислотний або лужний дренаж.

Механізм впливу: атмосферні опади змивають частинки відвалів → формуються поверхневі стоки → надходять у водотоки → накопичення шкідливих речовин у донних відкладах та водній товщі.

Крім того, діяльність підприємств може змінювати баланс підземних вод, внаслідок чого: порушується гідродинаміка (зниження рівнів ґрунтових вод унаслідок відкачування); відбувається інфільтрація забруднених шахтних вод у водоносні горизонти, що згодом виходять у річки чи озера; можливе формування кислотного шахтного дренажу при контакті сульфидовмісних порід з водою й киснем → утворення сірчаної кислоти та мобілізація важких металів.

Механізм впливу: забруднені підземні потоки взаємодіють із поверхневими → річки отримують додаткове приховане джерело забруднення, яке складно контролювати.

Для наукового й практичного використання всі джерела впливу можна класифікувати: за способом надходження, за масштабом, за інтенсивністю впливу (рис. 3).

Таким чином етап 2 дозволяє не лише ідентифікувати конкретні джерела забруднення, а й зрозуміти механізми їхнього впливу на водні об'єкти. Це є передумовою для розробки адресних заходів: для прямих скидів – локальні очисні споруди, для поверхневого стоку – буферні смуги та відстійники, для підземного дренажу – системи гідроізоляції та моніторинг ґрунтових вод.

Етап 3. Розробка комплексу заходів для забезпечення сталості водних об'єктів. Технічні заходи – це

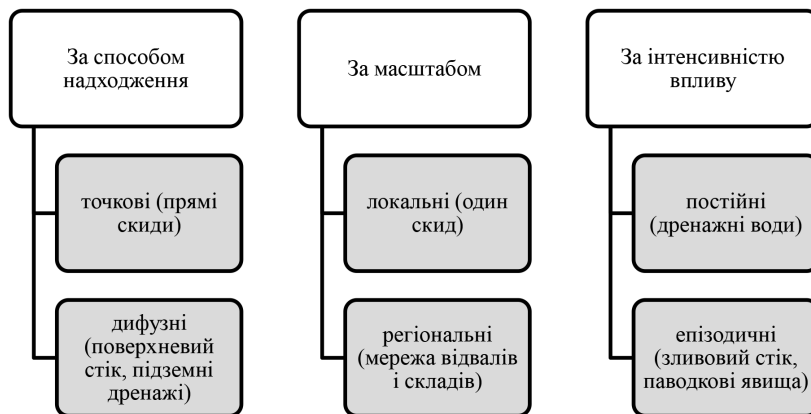


Рис. 3. Класифікація джерел впливу гірничодобувної промисловості на водні об'єкти

рішення, які безпосередньо впливають на якість води шляхом очищення, зменшення обсягів забруднень і контролю стоку. Зокрема, локальні очисні споруди (ЛОС) використовуються для попередньої очистки шахтних і кар'єрних вод перед скидом у річку. При цьому застосовуються методи відстоювання, нейтралізації, фільтрації та хімічного осадження. Відстійники та накопичувачі забезпечують осадження завислих речовин і часткове вилучення важких металів. Системи оборотного водопостачання дають можливість повторно використання до 70–90 % технічної води, що зменшує потребу у заборі та скидах. Фільтраційні бар'єри (геотекстиль, сорбенти, активоване вугілля, цеоліти) локалізують міграцію важких металів і нафтопродуктів у ґрунтових та поверхневих водах. Інноваційні технології: мембранні системи, біореактори з мікробіодоростями (для вилучення азоту та фосфору), біофільтри.

Природоохоронні заходи спрямовані на екосистемний підхід і збереження природної здатності річок до самоочищення. Серед таких заходів рекомендовано використовувати: прибережні буферні смуги шириною не менше 25–50 м, що засаджуються вологолюбними травами, чагарниками, деревами, які затримують стік і фільтрують забруднення; фіторе mediaція, тобто використання рослин (очерет, ро́гіз, верба) для акумуляції та вилучення важких металів, азоту, фосфатів із води; відновлення заплавлених біотопів шляхом створення або реабілітації заболочених ділянок та луків, які виконують функцію природних біофільтрів; ренатуралізація русла через відновлення природної звивистості річок, створення проточних озер і стариць, що покращує кисневий режим і біорізноманіття.

Організаційні заходи забезпечують управлінську основу та контроль дотримання екологічних стандартів. До них варто віднести: екологічні зони обмеження через заборону або лімітування діяльності у прибережних смугах та водоохоронних зонах; погодження лімітів скиду шляхом встановлення підприємствам допустимих концентрацій і обсягів скиду відповідно до принципу «забруднювач платить»; екологічний аудит та паспортизація водойм здійснюючи регулярні перевірки відповідності екологічним стандартам, створення картосхем джерел забруднення; система екологічного моніторингу шляхом встановлення онлайн-станцій контролю якості води (рН, електропровідність, вміст нітратів, кисню); прозорість і залучення громад забезпечуючи відкритий доступ до результатів моніторингу, створення механізмів участі місцевого населення у прийнятті рішень.

Отже, комбінація технічних, природоохоронних та організаційних заходів дозволить одночасно мінімізувати прямий техногенний вплив, відновити природну стійкість екосистем та гарантувати дотримання екологічних стандартів через управлінські інструменти.

Етап 4. Інтегроване управління та моніторинг по суті є «нервовою системою» усієї моделі, оскільки забезпечує контроль, координацію й адаптацію заходів до реальних умов.

Автоматизовані станції онлайн-моніторингу призначені для безперервного контролю ключових гідрохімічних параметрів у реальному часі, обов'язковими з яких є: рН, електропровідність (як інтегральний показник мінералізації), концентрація нітратів та амонійного азоту, розчинений кисень, температура, мутність (завислі речовини). Доцільним також є наявність додаткових модулів, таких як: сенсори важких металів (Fe, Mn, Zn), токсичності (біотести на дафнії або люмінесцентних бактеріях). Розташовуватись станції мають вище та нижче зони впливу підприємства, у місцях потенційного надходження поверхневих і підземних стоків. Перевагами таких станцій є раннє виявлення забруднення, мінімізація «сліпих зон» між періодичними лабораторними аналізами.

Єдина база даних про якість води це – централізована електронна система, де акумулюються результати онлайн-станцій, лабораторних гідрохімічних аналізів, біоіндикаційних досліджень та GIS-картографування. Основними функціями бази даних є: зберігання та обробка даних, візуалізація у вигляді карт та графіків, а також аналітичні модулі для прогнозування тенденцій (наприклад, сезонних піків забруднення). Бази даних мають бути забезпечені багаторівневим доступом як для державних органів (Держводагентство, ДЕІ), підприємств, наукових інститутів, так і для громадськості. Важливим принципом системи є прозорість і відкритість даних – щонайменше раз на квартал база повинна публікуватися у вигляді звітів або інтерактивних онлайн-карт.

Механізм оперативного реагування це – система попередження, при якій автоматизовані сенсори фіксують перевищення нормативів. Така інформація автоматично повинна надходити до екологічної служби підприємства, місцевого органу ДЕІ, диспетчерських служб громади. Алгоритм дій механізму такий: первинне підтвердження даних (повторне вимірювання або лабораторна проба) → тимчасове обмеження скидів (зменшення обсягів або повна зупинка) → виявлення джерела аварійного забруднення → запуск плану локалізації (перенаправлення стоків у відстійники, використання сорбентів, нейтралізуючих реагентів) → публікація повідомлення для громади (принцип прозорості). Наприклад, при зростанні вмісту амонійного азоту понад 1 мг/дм³ система автоматично сигналізує про можливий скид забруднених шахтних вод, і підприємство повинно негайно знизити обсяг відкачки або перенаправити потік у накопичувач.

Інтегрована модель управління являє собою такий адаптивний цикл: «моніторинг → аналіз → рішення → реалізація → оцінка → корекція». При цьому усі суб'єкти взаємодіють таким чином: підприємства

забезпечують технічні заходи; держава встановлює контрольні нормативи й санкції; громади беруть участь у контролі й оцінці результатів. Важливим чинником є технологічна підтримка, яка здійснюється через застосування GIS-платформ та мобільних додатків для швидкого доступу до даних.

Таким чином, цей етап формує інтегровану систему управління, яка поєднує сучасні сенсорні технології, відкриту базу даних та оперативні протоколи реагування. Його унікальність у тому, що він замкнений у циклі адаптивного менеджменту: дані моніторингу одразу впливають на управлінські рішення, а результати заходів перевіряються через систему моніторингу.

Завершальний етап 5 «Оцінка ефективності» є критично важливим для перевірки, чи справді розроблені заходи дають очікуваний результат і чи потрібно вносити корективи в модель.

При порівняльному аналізі гідрохімічних і біологічних показників здійснюється порівняння середніх значень ключових показників (рН, амонійний азот, нітрати, важкі метали, ХСК, БСК₅, індекс біорізноманіття Шеннона) до та після впровадження заходів мінімум раз на півроку, з урахуванням сезонних коливань. У результаті мають бути отримані зниження концентрацій забруднюючих речовин на 30–60% (залежно від типу показника) та зростання біорізноманіття. Важливим є те, що при цьому є можливість визначити, які саме заходи працюють ефективно, а які потребують посилення чи заміни.

Інтегральний індекс екологічної сталості (I_{SW}) це – єдина числова величина, яка відображає стан водного об'єкта з урахуванням комплексу показників. Розрахунок індексу здійснюється за формулою:

$$I_{SW} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot \frac{X_{ref,i}}{X_i}}{\sum w_i}, \quad (8)$$

де, w_i – ваговий коефіцієнт показника (визначається експертно, залежно від його впливу на екосистему), X_i – фактичне значення показника, $X_{ref,i}$ – референтне або нормативне значення.

Інтерпретація результатів:

$I_{SW} \geq 0,85$ – висока сталість (водний об'єкт відповідає нормативам, екосистема стабільна).

$0,65 \leq I_{SW} < 0,85$ – задовільна сталість (потрібні коригувальні заходи).

$I_{SW} < 0,65$ – низька сталість (необхідні невідкладні природоохоронні дії).

Інтегральний індекс екологічної сталості дає змогу уніфікувати результати та робити об'єктивні порівняння між різними водними об'єктами чи часовими періодами.

Соціально-економічна оцінка ефективності включає не лише «сухі цифри», а й реакцію громади та рівень довіри до результатів. На цьому етапі

необхідним є проведення соціологічних опитувань серед місцевого населення (користувачів води) з метою оцінки їхнього сприйняття змін. Серед ключових питань, які варто включити до опитування, слід виділити такі: «Чи покращилась якість питної води за останні 1–2 роки?», «Чи зменшилась кількість скарг на неприємний запах, присмак, кольоровість води?», «Чи зросла довіра до підприємств та органів влади?» тощо. Індикатором цього етапу є індекс задоволеності населення (бал за шкалою 1–5), який інтегрується в загальний індекс сталості.

Завершальним кроком цього етапу є система корекції стратегії. Якщо певні заходи показали низьку результативність (наприклад, зниження нітратів <20 %), вони мають піддаватися коригуванню через заміну технологій, розширення масштабів, поєднання з природоохоронними рішеннями. Враховуючи адаптивний принцип стратегія щороку повинна переглядатися з урахуванням нових даних моніторингу та результатів KPI. Механізм корекції здійснюється шляхом визначення слабких місць (через аналіз індикаторів), розробку додаткових заходів, внесення змін у план управління підприємства й рекомендації для місцевої влади.

Етап 5 є не лише «контролем виконання», а й механізмом постійного вдосконалення моделі, який об'єднує три рівні: науково-аналітичний (гідрохімічний та біологічний аналіз), інтегральний (індекс екологічної сталості), соціальний (довіра та сприйняття громади), забезпечуючи зворотний зв'язок, який робить модель адаптивною і гнучкою.

Стратегічна модель побудована як замкнений адаптивний цикл. Усі п'ять етапів розташовані по колу та з'єднані стрілками, що підкреслює замкненість і повторюваність процесу стратегічного управління сталим станом водних об'єктів (рис. 4).

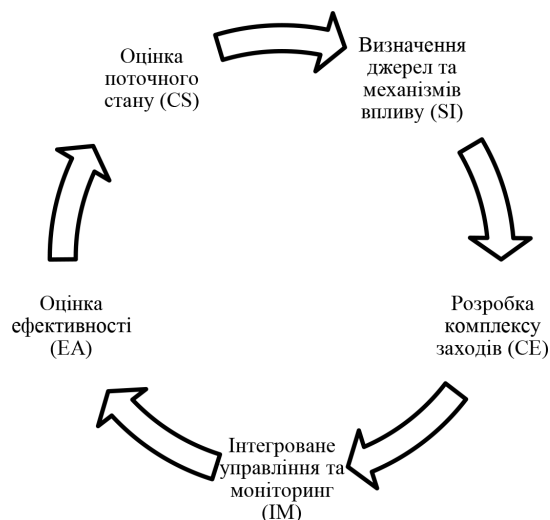


Рис. 4. Замкнений цикл адаптивного управління водними ресурсами у зоні діяльності гірничодобувних підприємств

Модельні взаємозв'язки гарантують, що стратегія не є статичною, а постійно вдосконалюється залежно від нових викликів і динаміки екосистеми.

ВИСНОВКИ

Запропоновано стратегічну модель забезпечення сталості поверхневих водних об'єктів у зоні впливу гірничодобувних підприємств, що базується на принципах превентивності, наукової обґрунтованості, адаптивності, прозорості та відновлюваності.

Виділено п'ять ключових етапів реалізації стратегії: оцінка поточного стану (гідрохімічний, біологічний, гідроморфологічний аналіз та GIS-картографування); визначення джерел та механізмів впливу (прямі скиди, поверхневий стік, підземний дренаж); розробка комплексу заходів (технічні, природоохоронні та організаційні); інтегроване управління та моніторинг (онлайн-станції, єдина база даних, механізми оперативного реагування); оцінка ефективності (порівняльний аналіз, інтегральний індекс сталості, соціологічні опитування).

Модель представлена як замкнений адаптивний цикл, у якому кожен етап взаємопов'язаний із

наступним і забезпечує можливість постійного вдосконалення стратегії з урахуванням нових даних моніторингу та соціально-економічних викликів.

Очікувані результати впровадження стратегії включають: зниження концентрацій забруднюючих речовин до нормативних значень, відновлення біорізноманіття екосистем, підвищення інтегрального індексу екологічної сталості щонайменше на 20% у середньостроковій перспективі, а також зменшення соціальних конфліктів через прозорість екологічної інформації.

Практична цінність дослідження полягає у створенні універсальної методологічної основи, яку можна адаптувати для різних регіонів із гірничодобувною діяльністю, інтегруючи міжнародні стандарти (зокрема положення Водної рамкової директиви ЄС) та кращі природоорієнтовані практики управління водними ресурсами.

Таким чином, розроблена стратегічна модель є інноваційним інструментом інтегрованого управління водними ресурсами, що забезпечує баланс між промисловим розвитком, екологічною безпекою та соціальною стабільністю у гірничопромислових регіонах.

REFERENCES

- [1] Rambabu, K., Banat, F., Pham, Q. M., Ho, S. H., Ren, N. Q., & Show, P. L. (2020). Biological remediation of acid mine drainage: Review of past trends and current outlook. *Environmental Science & Ecotechnology*, 2, 100024. <https://doi.org/10.1016/j.esec.2020.100024>
- [2] Zhang, S., Wu, P., Zhang, J., et al. (2025). Effects of acid mine drainage on microbial community development and physicochemical properties of mine contaminated sites in Southwest China. *Scientific Reports*, 15, 20776. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-05799-z>
- [3] Shi, X., Gao, Y., Qian, H., Chen, J., Li, W., Li, S., & Liu, Y. (2025). Elucidating the hydrochemistry and REE evolution of surface water and groundwater affected by acid mine drainage. *Environmental Pollution*, 366, 125495. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125495>
- [4] Valkama, E., Usva, K., & Uusi-Kämpä, J. (2019). A meta-analysis on nitrogen retention by buffer zones. *Journal of Environmental Quality*, 48(2), 270–279. <https://doi.org/10.2134/jeq2018.03.0120>
- [5] Dunn, R. M., Hawkins, J. M. B., Blackwell, M. S. A., Zhang, Y., & Collins, A. L. (2022). Impacts of different vegetation in riparian buffer strips on runoff and sediment loss. *Hydrological Processes*, 36(11), e14733. <https://doi.org/10.1002/hyp.14733>
- [6] Leeds-Harrison, P. B., Quinton, J. N., Walker, M. J., Sanders, C. L., & Harrod, T. (1999). Grassed buffer strips for the control of nitrate leaching to surface waters in headwater catchments. *Ecological Engineering*, 12(3–4), 299–313. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(98\)00075-5](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(98)00075-5)
- [7] Mavromati, E., Kemitoglou, D., Tsiaoussi, V., & Lazaridou, M. (2021). A new WFD-compliant littoral macroinvertebrate index for monitoring and assessment of Mediterranean lakes (HeLLBI). *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(11), 745. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09493-1>
- [8] Novoselova, T., Barinova, S., & Protasov, A. (2022). Phytoplankton indicators in the assessment of the ecological status of two reservoirs with different purposes in Southern Ukraine. *Ecologies*, 3(2), 96–119. <https://doi.org/10.3390/ecologies3020009>
- [9] Farouk, M. I. H. Z., Jamil, Z., & Abdul Latip, M. F. (2023). Towards online surface water quality monitoring technology: A review. *Environmental Research*, 238(1), 117147. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117147>
- [10] Forhad, H. M., Uddin, M. R., Chakrovorty, R. S., Ruhul, A. M., Faruk, H. M., Kamruzzaman, S., Sharmin, N., Jamal, A. S. I. M., Haque, M. M., & Morshed, A. M. (2024). IoT based real-time water quality monitoring system in water treatment plants (WTPs). *Heliyon*, 10(23), e40746. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40746>
- [11] Ferreira, C. S. S., Kašanin-Grubin, M., Kapović Solomun, M., Sushkova, S., Minkina, T., Zhao, W., & Kalantari, Z. (2023). Wetlands as nature-based solutions for water management in different environments. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 33, 100476. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2023.100476>
- [12] Justino, S., Calheiros, C. S. C., Castro, P. M. L., & Gonçalves, D. (2023). Constructed wetlands as nature-based solutions for wastewater treatment in the hospitality industry: A review. *Hydrology*, 10(7), 153. <https://doi.org/10.3390/hydrology10070153>
- [13] Chen, G., Mo, Y., Gu, X., et al. (2024). Sustainability of global small-scale constructed wetlands for multiple pollutant control. *npj Clean Water*, 7, 45. <https://doi.org/10.1038/s41545-024-00336-3>

- [14] Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for community action in the field of water policy. *Official Journal of the European Communities*, L 327, 1–73. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32000L0060>
- [15] Valerko, R. A., Herasymchuk, L. O., Patseva, I. H., Bondarchuk, V. M., & Voynalovych, I. M. (2024). Systemnyi analiz yak metodolohichnyi pidkhid do rozrobky stratehichnoi modeli pokrashchennia ekolohichnoi bezpeky silskoho vodopostachannia. [System analysis as a methodological approach to developing a strategic model for improving the ecological safety of rural water supply]. *Pryrodnycha osvita ta nauka – Natural Education and Science*, (5), 62–66. <https://doi.org/10.32782/NSER/2024-5.12> [in Ukrainian].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Rambabu, K., Banat, F., Pham, Q. M., Ho, S. H., Ren, N. Q., & Show, P. L. (2020). Biological remediation of acid mine drainage: Review of past trends and current outlook. *Environmental Science & Ecotechnology*, 2, 100024. <https://doi.org/10.1016/j.ese.2020.100024>
- [2] Zhang, S., Wu, P., Zhang, J., et al. (2025). Effects of acid mine drainage on microbial community development and physicochemical properties of mine contaminated sites in Southwest China. *Scientific Reports*, 15, 20776. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-05799-z>
- [3] Shi, X., Gao, Y., Qian, H., Chen, J., Li, W., Li, S., & Liu, Y. (2025). Elucidating the hydrochemistry and REE evolution of surface water and groundwater affected by acid mine drainage. *Environmental Pollution*, 366, 125495. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125495>
- [4] Valkama, E., Usva, K., & Uusi-Kämpä, J. (2019). A meta-analysis on nitrogen retention by buffer zones. *Journal of Environmental Quality*, 48(2), 270–279. <https://doi.org/10.2134/jeq2018.03.0120>
- [5] Dunn, R. M., Hawkins, J. M. B., Blackwell, M. S. A., Zhang, Y., & Collins, A. L. (2022). Impacts of different vegetation in riparian buffer strips on runoff and sediment loss. *Hydrological Processes*, 36(11), e14733. <https://doi.org/10.1002/hyp.14733>
- [6] Leeds-Harrison, P. B., Quinton, J. N., Walker, M. J., Sanders, C. L., & Harrod, T. (1999). Grassed buffer strips for the control of nitrate leaching to surface waters in headwater catchments. *Ecological Engineering*, 12(3–4), 299–313. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(98\)00075-5](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(98)00075-5)
- [7] Mavromati, E., Kemitzoglou, D., Tsiaoussi, V., & Lazaridou, M. (2021). A new WFD-compliant littoral macroinvertebrate index for monitoring and assessment of Mediterranean lakes (HeLLBI). *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(11), 745. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09493-1>
- [8] Novoselova, T., Barinova, S., & Protasov, A. (2022). Phytoplankton indicators in the assessment of the ecological status of two reservoirs with different purposes in Southern Ukraine. *Ecologies*, 3(2), 96–119. <https://doi.org/10.3390/ecologies3020009>
- [9] Farouk, M. I. H. Z., Jamil, Z., & Abdul Latip, M. F. (2023). Towards online surface water quality monitoring technology: A review. *Environmental Research*, 238(1), 117147. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117147>
- [10] Forhad, H. M., Uddin, M. R., Chakrovorty, R. S., Ruhul, A. M., Faruk, H. M., Kamruzzaman, S., Sharmin, N., Jamal, A. S. I. M., Haque, M. M., & Morshed, A. M. (2024). IoT based real-time water quality monitoring system in water treatment plants (WTPs). *Heliyon*, 10(23), e40746. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40746>
- [11] Ferreira, C. S. S., Kašanin-Grubin, M., Kapović Solomun, M., Sushkova, S., Minkina, T., Zhao, W., & Kalantari, Z. (2023). Wetlands as nature-based solutions for water management in different environments. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 33, 100476. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2023.100476>
- [12] Justino, S., Calheiros, C. S. C., Castro, P. M. L., & Gonçalves, D. (2023). Constructed wetlands as nature-based solutions for wastewater treatment in the hospitality industry: A review. *Hydrology*, 10(7), 153. <https://doi.org/10.3390/hydrology10070153>
- [13] Chen, G., Mo, Y., Gu, X., et al. (2024). Sustainability of global small-scale constructed wetlands for multiple pollutant control. *npj Clean Water*, 7, 45. <https://doi.org/10.1038/s41545-024-00336-3>
- [14] Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for community action in the field of water policy. *Official Journal of the European Communities*, L 327, 1–73. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32000L0060>
- [15] Валерко, Р. А., Герасимчук, Л. О., Пацева, І. Г., Бондарчук, В. М., & Войналович, І. М. (2024). Системний аналіз як методологічний підхід до розробки стратегічної моделі покращення екологічної безпеки сільського водопостачання. *Природнича освіта та наука*, (5), 62–66. DOI: <https://doi.org/10.32782/NSER/2024-5.12>

© Валерко Р. А., Бондарчук В. М.

Дата надходження статті до редакції: 15.08.2025

Дата затвердження статті до друку: 29.08.2025

Опубліковано: 24.11.2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0