



Національний університет біоресурсів і
природокористування України

В. П. Строкаль, А. В. Куровська

Науково-методичні рекомендації:

ІНТЕГРАЛЬНА ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ПРИРОДНИХ ВОД ДЛЯ РІЗНИХ ВИДІВ ВОДОКОРИСТУВАННЯ



Київ - 2024

УДК 502.51:006.15.5

*Науково-методичні рекомендації розглянуто та рекомендовано до друку
Вченою Радою Національного університету біоресурсів і природокористування
України (Протокол № 9 від 23 травня 2024 року)*

Укладачі:

Строкаль В. П., доцент, кандидат педагогічних наук, доцент кафедри екології агросфери та екологічного контролю Національного університету біоресурсів і природокористування України

Куровська А. В., здобувач наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 101 «Екологія» Національного університету біоресурсів і природокористування України

Рецензенти:

А. В. Клепко – завідувач кафедри загальної екології, радіобіології та безпеки життєдіяльності Національного університету біоресурсів і природокористування України, доктор біологічних наук, старший науковий співробітник

О. І. Наумовська – завідувач кафедри екології агросфери та екологічного контролю Національного університету біоресурсів і природокористування України, кандидат сільськогосподарських наук, доцент

Строкаль В. П., Куровська А. В. Інтегральна оцінка екологічного стану природних вод для різних видів водокористування : науково–методичні рекомендації. Київ : Редакційно–видавничий відділ НУБіП України, 2024. 64 с.

У науково-методичних рекомендаціях викладений механізм проведення інтегральної оцінки екологічного стану природних вод для різних видів водокористування, що поєднує якісну оцінку та кількісну оцінку стану води. Обґрунтовано розроблений алгоритм інтегральної оцінки природних вод за критеріальним підходом, що базується на індикаторах (індексах) якості води, які визначають критерії якості води для видів водокористування. Наведено приклади застосування моделі DPSIR для вирішення водно-екологічних проблем. Науково-методичні рекомендації будуть корисними в навчальних цілях для студентів ОС «Бакалавр» та «Магістр» та здобувачів доктора філософії зі спеціальності 101 «Екологія» галузі знань 10 «Природничі науки», наукових цілях для проведення оцінки екологічного стану природних водних ресурсів, визначаючи індикатори дефіциту води за видами водокористування.

УДК502.51:006.15.5

© Строкаль В.П., Куровська А.В., 2024

Зміст

Вступ.....	4
1. Інтегральне управління водними ресурсами України.....	6
2. Екологічні проблеми поверхневих вод.....	8
3. Види водокористування.....	11
4. Алгоритм інтегральної оцінки екологічного стану природних вод для різних видів водокористування.....	15
4.1. Схема алгоритму та етапи його застосування.....	15
4.2. Методичне підґрунтя для інтегральної оцінки.....	18
4.3. Практичне значення.....	34
5. Модель DPSIR: інформаційний інструмент для вирішення екологічних проблем.....	35
5.1. Практичне значення моделі.....	35
5.2. Застосування моделі на прикладі Київського водосховища.....	38
Література.....	45
Додатки.....	53
Додаток А. Обґрунтування та розрахунок екологічного індексу I_E при оцінюванні води для водної екосистеми.....	54
Додаток Б. Обґрунтування та розрахунок екологічного індексу I_E з ЛОШ при оцінюванні води для риборозведення.....	56
Додаток В. Оптимальні значення показників якості води для рибогосподарських цілей (враховуючи особливості категорії риб як Коропові).....	58
Додаток Г. Обґрунтування та розрахунок індексів якості води при оцінюванні води для зрошення.....	60
Додаток Д. Обґрунтування та розрахунок Індекс Якості Води – WAWQI при оцінюванні води для питних цілей.....	61
Додаток Е. Обґрунтування та розрахунок інтегрального індикатора якісного та кількісного стану водойми – індикатора водного дефіциту води (WSq)	63

Вступ

Основним джерелом водопостачання для різних потреб є каскад Дніпровських водосховищ. Якість води у водосховищах погіршується в результаті точкових (скид недостатньо очищених зворотних вод складає до 50%) й дифузних джерел забруднення (сільськогосподарська діяльність), а також внаслідок змін клімату (підвищення температури повітря). При цьому недостатньо вивченим є питання поєднання кількісних та якісних характеристик природних водних ресурсів, необхідних як для самої екосистеми, так і для задоволення потреб галузей економіки.

У Водній стратегії України до 2050 року [2] зазначено, що на виробничі потреби використовується до 60% прісної води, потреби зрошення – 21,4%, питні та санітарно-гігієнічні потреби – 17,3%. Це показує нам, що потреба у якісній воді є актуальною.

Управління водними ресурсами в Україні має євроінтеграційний курс, який базується на поєднанні принципів інтегрованого управління кількісними та якісними характеристиками природних вод. Потреба у розробці науково-обґрунтованого алгоритму інтегрального оцінювання якості води для потреб, враховуючи специфіку водного об'єкта, не завдаючи шкоди самій водній екосистемі, а також поєднуючи кількісну та якісну характеристику водного об'єкта, представлена у нормативному державному документі «Водна стратегія України на період до 2050 року» та ратифікованому європейському документі – Директива 2000/60/ЄС Європейського парламенту та Ради «Про встановлення рамок діяльності Співтовариства в галузі водної політики».

Детальний аналіз якісного стану природних водних ресурсів Дніпровського басейну показав погіршення якості природних вод («помірно забруднені»). Основним джерелом водопостачання для різних потреб є каскад Дніпровських водосховищ. Якість води у водосховищах погіршується в результаті точкових (скид недостатньо очищених зворотних вод складає до 50%) й дифузних джерел забруднення (сільськогосподарська діяльність), а також внаслідок змін клімату (підвищення температури повітря). Обґрунтована

ситуація створює передумови для оцінювання водоюми Київського водосховища як джерела для різних потреб галузей економіки (сільського господарства, питних, господарсько-побутових, рибогосподарських цілей) та для нормальної життєдіяльності водної біоти. При цьому недостатньо вивченим є питання поєднання кількісних та якісних характеристик природних водних ресурсів, необхідних як для самої екосистеми, так і для задоволення потреб галузей економіки.

Мета базувалася на розробці алгоритму інтегральної оцінки екологічного стану природних вод для різних видів водокористування.

Практичне значення полягає у:

- застосуванні алгоритму інтегральної оцінки екологічного стану природних вод для різних видів водокористування для Київського водосховища;
- забезпеченні виконання стратегічних Цілей Водної стратегії України на період до 2050 року;
- використанні розробленого алгоритму для навчальних цілей (у розрізі дисциплін «Екологічна безпека», «Екологічні ризики» для студентів ОС «Бакалавр» зі спеціальності 101 «Екологія»; «Професійна екологічна діяльність експерта», «Збалансоване природокористування (Green Deal)» для студентів ОС «Магістр» зі спеціальності 101 «Екологія») та науковий цілей (як підгрунтя для підготовки здобувачів доктора філософії зі спеціальності 101 «Екологія» галузі знань 10 «Природничі науки»).

Наукова новизна розробки науково-методичних рекомендацій полягає у вдосконаленні механізму оцінювання екологічного стану природних вод на основі розробленого алгоритму інтегральної оцінки екологічного стану природних вод для різних видів водокористування.

1. Інтегральне управління водними ресурсами України

Інтегральне оцінювання поверхневих вод входить до загальної системи інтегрального управління водними ресурсами України. Принципи якого базуються на імплементації положень Водної рамкової директиви ЄС [3] та прийняттям Водної стратегії України до 2050 року [2]. Україна приєдналася до Водної конвенції та Протоколу про воду та здоров'я [1], що дозволило спрямувати систему інтегрального управління водними ресурсами в руслі європейської інтеграції [4].

Інтегроване управління водними ресурсами – це система управління, що заснована на обліку всіх видів поверхневих ресурсів (природних, підземних, зворотних) у межах географічних кордонів, яка поєднує інтереси різних галузей та рівні ієрархії водокористування, залучає всі зацікавлені сторони до прийняття рішень, сприяє ефективному використанню водних, земельних та інших природних ресурсів на користь сталого (збалансованого) забезпечення вимог природи та суспільства у воді [5]. Система управління базується на ключових принципах, які визначають основну його практичну значимість: *басейновий* принцип (в межах гідрологічних одиниць відповідно до геоморфології басейну); *цільовий* принцип (управління враховує оцінку та використання всіх видів водних ресурсів (поверхневі води, підземні води, зворотні води) та використання їх за цільовими потребами); *координаційний* принцип (тісна координація всіх видів водокористувачів та організацій, залучених до управління водними ресурсами); принцип *інтеграції* (інтеграція між політикою уряду, законодавством та самою системою управління); принципи *доступності* та *залученості* для громад (участь громадськості не тільки в процесі управління водними ресурсами, а й у фінансуванні, плануванні, підтримці та розвитку водної інфраструктури); принцип *пріоритетності* (встановлення пріоритетів потреб екосистем та водного господарства у необхідній кількості якісної води); принципи *відкритості* та *прозорості* (обмін інформацією, відкритість та прозорість системи управління водними ресурсами на всіх рівнях управління, включаючи водогосподарські організації, що потребують якісної води, уряд –

який забезпечує потреби галузей економіки, наукову спільноту – які впроваджують інноваційні підходи для збереження та охорони водних ресурсів) [5].

Варто розуміти, що інтегроване управління водними ресурсами в країнах Європи поєднує якісні та кількісні характеристики водних ресурсів для ефективного й збалансованого водокористування як галузями економіки, так й населенням. Важливим аспектом є включення до системи інтегрованого управління водними ресурсами принципів глобальних Цілей Сталого Розвитку (далі ЦСР). Оскільки «вода» має як тісний так і опосередкований зв'язок із 17-ма ЦСР (рис. 1), що забезпечують екологічний, економічний та соціальний збалансований розвиток держави, суттєвим питанням є збереження водних ресурсів та забезпечення ефективного використання їх для різних потреб.



Рис. 1. Зв'язок «води» із ЦСР у поєднанні із екологічним, соціальним та економічним розвитком держави

Держава має євроінтеграційний рух і важливою умовою є імплементація Директив ЄС та впровадження принципів ЦСР у водне законодавство та водну політику. Це дасть змогу вдосконалити водний діалог між урядом,

громадськістю та науковцями і цим самим створити умови для удосконалення водної політики на засадах збалансованого розвитку держави. З огляду на вище зазначене, розвиток стратегії інтегрального управління водними ресурсами України потребує удосконалення, в першу чергу в напрямку інтегрального оцінювання природних водних ресурсів з метою визначення їхньої придатності для різних потреб.

2. Екологічні проблеми поверхневих вод

Поверхневі водні ресурси України виступають одним із головних джерел для задоволення всіх потреб населення та галузей економіки [6]. В руслі євроінтеграційного курсу, оцінювання поверхневих вод має ґрунтуватися на принципах *інтеграції* якісних та кількісних характеристик якості води; *цільового використання* для різних потреб з врахування збалансованості попиту та пропозиції; *пріоритетності* визначення ключових індикаторів (показників), що спричинюють погіршення якості води; *прозорості, відкритості та доступності* для всіх зацікавлених сторін (уряд – громадські організації – наука).

Водно-екологічні проблеми поверхневих вод пов'язані з специфікою використання їх для відповідних цілей. Зокрема у Водній стратегії України до 2050 року [2] зазначено, що в Україні стан якості поверхневих вод, які є джерелом питної води для 80 % населення є незадовільним і характеризується підвищеним вмістом органічних та біогенних речовин; половина областей країни має природний дефіцит прісної води, джерела водопостачання (поверхневі водні ресурси) постійно піддаються антропогенному навантаженню, зокрема забрудненню нітратами.

У Плані управління річковим басейном Дніпра 2025-2030 [7] наведені основні водно-екологічні проблеми Дніпровського басейну, який забезпечує до 80 % всі галузі економіки та потреби населення. До найбільш пріоритетних віднесли: *забруднення органічними речовинами, забруднення біогенними речовинами, забруднення небезпечними речовинами, засмічення пластиком та твердими побутовими відходами.*

Антропогенне забруднення органічними речовинами у більшості випадків пов'язано із продуктами життєдіяльності живих організмів, які потрапляють у водні об'єкти, передусім від точкових джерел (із стічними водами населених пунктів, промислових об'єктів, тваринницьких комплексів) та дифузних джерел забруднення. Джерелом дифузного забруднення поверхневих вод органічними речовинами є сільське господарство (гній свійських тварин, захоронення їхніх туш), сільське населення (домогосподарства, що не мають каналізації). Найбільші значення показника застосування гною спостерігалися у межах Вишгородського району Київської області – 12 т/га, Канівського району Черкаської області – 15 т/га [7].

Навантаження поверхневих вод біогенними елементами спричиняється переважно сполуками азоту і фосфору, які можуть надходити як від точкових, так і дифузних джерел. Збагачення вод біогенними елементами прискорює розвиток водоростей і макрофітів до виникнення явища «цвітіння». Наслідком цього є збільшення трофічного статусу екосистеми, небажане порушення балансу організмів у водному середовищі та зниження якості води, зменшення насиченості води киснем. Джерелом точкового забруднення поверхневих вод біогенними речовинами є житлово-комунальне господарство (разом із стічними водами, до поверхневих вод надходить 14 340 т/рік сполук азоту та 4801 т/рік сполук фосфору) та промисловість (із стічними водами у середньому до природних водних об'єктів відводиться приблизно 1 112 тис. т $N_{\text{мін}}$ та у 68.5 т $P_{\text{мін}}$) [7, 14]. Джерелом дифузного забруднення поверхневих вод біогенними речовинами є сільське господарство (розведення тварин та застосування добрив у рослинництві) та сільське населення (за рік від сільського населення надходить 6 492 т сполук $N_{\text{заг}}$ та 911 т $P_{\text{заг}}$) [7]. Україна має найвищий відсоток розораності сільськогосподарських земель у світі (78,2 % за 2021 р.), що відповідно прогнозує посилення навантаження дифузного забруднення поверхневих вод.

Вчені зазначають [8-11, 14], що наявність біогенних речовин у поверхневих водах є причиною посилення процесів евтрофікації. Евтрофікація описується як стан водної мережі з високим рівнем концентрації поживних

речовин, що включає азот і фосфор, що призводить до «цвітіння» водоростей, таким чином погіршуючи якість води у водних екосистемах [12, 13].

Відповідно до Плану управління річковими басейнами [7], евтрофікація водних об'єктів в Україні визнана поширеним явищем. В Україні затверджена методика визначення зон, (наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів від 15.04.2021 № 244), як того вимагає Нітратна директива ЄС. Згідно з методикою, всю територію країни на період 2025-2030 років визначили, як зону вразливу до нітратів. Такий підхід застосовується в багатьох країнах, які мають водно-екологічні проблеми, зокрема забруднення поверхневих вод органічними та біогенними речовинами.

Погіршення якості поверхневих вод, пов'язаних із питаннями глобальних змін клімату та сільськогосподарської діяльності також декларуються міжнародними, ратифікованими Україною, програмами (Водною Рамковою Директивою ЄС та Європейським Зеленим Курсом) [1, 4-6].

З огляду на вище описані водні проблеми, водні ресурси країни потребують розробки науково-обґрунтованого підходу до інтегральної оцінки поверхневих вод з врахуванням потреб як для природи, так і для інших видів водокористування. Традиційні способи оцінки якості поверхневих вод базуються на порівнянні експериментально визначених значень параметрів із існуючими нормативами. Такий підхід дає змогу лише оцінити якість природної води для загальних цілей, не враховуючи індикаторів водного дефіциту та якісного стану вод для різних потреб.

Зважаючи на те, що інтегральне управління водними ресурсами в Україні має євроінтеграційний курс, який базується на поєднанні принципів інтегрованого управління не тільки кількісними, а в першу чергу якісними характеристиками природних вод, то потреба у розробці науково-обґрунтованого алгоритму інтегрального оцінювання екологічного стану природних вод для різних потреб, враховуючи охорону водної екосистеми є актуальною як ніколи.

3. Види водокористування

У Водній стратегії України до 2050 року [2] зазначено, що на виробничі потреби використовується до 60% прісної води, потреби зрошення – 21,4%, питні та санітарно-гігієнічні потреби – 17,3%. Це показує нам, що потреба у оцінюванні якісного стану природних водних ресурсів для різних видів водокористування є актуальною.

Водокористування – це використання водних об'єктів для задоволення потреб населення, галузей економіки, включно з правом на забір води та скидання стічних вод.

Відповідно до ст. 46 Водного кодексу України, водокористування може бути двох видів: загальне та спеціальне. *Загальне водокористування* здійснюється громадянами для задоволення їх потреб безкоштовно, як купання, плавання, спортивне рибальство, водопій тварин тощо (ст. 47 Кодексу). *Спеціальне водокористування* – це забір води із водних об'єктів із застосуванням споруд або технічних пристроїв, використання води та скидання забруднюючих речовин у водні об'єкти, включаючи забір води, та скидання забруднюючих речовин із зворотними водами із застосуванням каналів (ст. 48 Кодексу). Спеціальне водокористування здійснюється юридичними і фізичними особами, насамперед для задоволення питних потреб населення, а також для господарсько-побутових, лікувальних, оздоровчих, сільськогосподарських, промислових, транспортних, енергетичних, рибогосподарських та інших державних й громадських потреб [15].

Згідно із ст.1 Водного кодексу України, якість води – характеристика складу і властивостей води, яка визначає її придатність для *конкретних цілей* використання. Якість води водного об'єкта В. К. Хільчевський [6] розглядає як поєднання хімічного й біологічного складу і фізичних властивостей води, що визначає її придатність для конкретних видів водокористування: господарсько-питного, культурно-побутового (рекреаційного), рибогосподарського. Відповідно до його концепції, загальною оцінкою стану водного об'єкта слугує екологічна оцінка якості води. Він пропонує проводити оцінювання якості води

за екологічними цілями, рибогосподарськими цілями, гігієнічними цілями (господарсько-питного водокористування, культурно-побутового водокористування). Методичною основою для оцінки якості води виступають нормативи якості води для різних цілей.

Питання оцінювання якості води для різних потреб є дискусійним на науковій ниві. Висвітленню комплексних підходів у сфері оцінювання води для різних цілей та потреб присвячено праці вітчизняних вчених В. К. Хільчевський [1, 6], В. В. Гребінь, М. В. Яцюк [16], О. Г. Васенко, О. В. Рибалова, С. Р. Артем'єв [17], С. М. Юрасов, Т. А. Сафранов, А. В. Чугай, С. О. Кур'янова [18-19], Л. В. Войтенко, В. А. Копілевич, Є. А. Заленська [20-22], І. В. Шумигай [23]. Проте праці, в яких були б враховані інтегральні показники оцінювання якості та кількості води для конкретних видів водокористування відсутні.

Нами запропоновано проводити оцінювання якості води для тих видів водокористування, які є більш вагомими для регіону досліджування. Водний кодекс України визначає два основні види водокористування (загальне та спеціальне), і відповідно до нього пропонуємо проводити оцінку якості води за *загальними видами водокористування* (рис. 2) – для водної екосистеми (екологічні цілі), *риборозведення* (як спортивна риболовля, не маємо на увазі для промисловості), *спеціальними* (рис. 2) – для питних цілей (питні та господарсько-побутові потреби), зрошення (полив сільськогосподарських культур).

Проведення оцінювання екологічного стану поверхневих вод для загального водокористування дозволить попередити прогнозовані чинники забруднення води та зберегти водну екосистему. Спеціальні види водокористування, як зрошення та питні потреби – є досить актуальними в умовах дефіциту води у сільськогосподарській сфері, та дефіциту води у сільській місцевості.

Нами поєднано в один вид господарсько-питне та культурно-побутове водокористування, оскільки застосування розробленого алгоритму інтегральної оцінки екологічного стану природних вод впроваджувалося для Київського водосховища і відповідно потреби поділу їх на два окремі види не було

доцільним. Проте, залежно від мети проведення інтегральної оцінки природних вод, оцінювання якості води для цих двох видів водокористування можна провести окремо. Вважаємо за необхідне обов'язково при проведенні інтегральної оцінки екологічного стану природних вод включати загальні види водокористування (для водної екосистеми, водойм рибогосподарського призначення), оскільки оцінка їхнього якісного стану є важливою інформацією, що показує екологічний стан води певного водного об'єкта та можливість його до самовідновлення.



Рис. 2. Види водокористування для проведення інтегральної оцінки екологічного стану природних вод (власна розробка)

До інтегрального оцінювання екологічного стану природних вод за видами водокористування долучаємо оцінку за кількісними характеристиками водного об'єкта. Досить актуальним при інтегральній оцінці у європейських країнах є визначення для водного об'єкта індикатора водного стресу чи водного дефіциту. В умовах змін клімату та військової діяльності, питання дефіциту води для різних потреб досить активно обговорюються на засіданнях різних рівнів організації, від уряду й до наукової спільноти.

Доступні для використання запаси поверхневих вод досить не рівномірно розподілені по території України. Для порівняння, в Івано-Франківській області забезпеченість водними ресурсами на одну людину становить 3,26 тис.м³/рік (за класифікацією – проміжна забезпеченість), тоді як в Київській області – 0,46 тис.м³/рік (за класифікацією – катастрофічна низька забезпеченість), Херсонській області – 0,22 тис.м³/рік (за класифікацією – катастрофічна низька забезпеченість) [24]. Згідно з прогнозом Одеського державного екологічного університету [25] щодо стану водних ресурсів України, на основі моделі «клімат-стік» на період 2030–2040 роки, водні ресурси степової зони можуть знизитися до 40–50%, а на решті території досягти 24-40%.

Врахування інтегрального індикатора водного дефіциту до оцінки якісного стану природних вод дозволить більш ґрунтовно надати характеристику водному об'єкту та обґрунтувати доступність якісної води для різних видів водокористування. З огляду на вище наведені положення, нами до інтегральної оцінки якості природних вод долучено розрахунок інтегрального індикатора водного дефіциту для водного об'єкта – *WSq* (Water Scarcity including quality). Він розраховує кількісно величину доступної води з врахуванням найгіршого показника що може спричинити погіршення якості води – *WSq* [26]. В європейських країнах даний індикатор досить широко використовується науковцями в екологічних дослідженнях з управління та менеджменту водними ресурсами, а також для розробки науково-обґрунтованих заходів покращення екологічного стану води.

4. Алгоритм інтегральної оцінки екологічного стану природних вод для різних видів водокористування

4.1. Схема алгоритму та етапи його застосування

Враховуючи вище описані положення, нами розроблений алгоритм інтегральної оцінки екологічного стану природних вод за критеріальним підходом для різних видів водокористування (рис. 3). Алгоритм був застосований для Київського водосховища (дисертаційна робота здобувача доктора філософії зі спеціальності 101 «Екологія» А. В. Куровської).

Інтегральна оцінка за критеріальним підходом – це узагальнення окремих критеріїв з метою оцінювання придатності використання води як джерела для конкретного виду водокористування. До критеріїв оцінки входять показники, які визначають якісний стан водного об'єкта. Кінцевим етапом інтегральної оцінки – є розрахунок інтегрального індикатора водного дефіциту для різних видів водокористування. Важливим аспектом даного алгоритму є дотримання виконання послідовності проведення якісної оцінки вод. Кожен критерій пов'язаний з іншим критерієм і доповнює інформацію. Критерії якісної оцінки вод є базою для проведення розрахунку індикатора водного дефіциту (WSq), який визначає наскільки водний об'єкт є придатним для водозабезпечення різних галузей та показує рівень прогнозованого дефіциту води. Інтегрований індикатор водного дефіциту (WSq) може бути використаний як інструмент для оцінювання використання водних природних ресурсів з метою регулювання водного дефіциту в Україні.

Алгоритм інтегральної оцінки екологічного стану природних вод за критеріальним підходом включає п'ять основних етапів, з яких чотири етапи – відповідають за оцінювання якісного стану водного об'єкта (якісний показник стану водойми для конкретного водокористування), п'ятий етап – за оцінювання кількісного стану – індикатора водного дефіциту для видів водокористування (рис. 3).

Нами обраний критеріальний підхід для оцінювання водного об'єкта, оскільки він розкриває специфіку та цілі водокористування. Екологічний

критерій відповідає екологічним цілям, рибогосподарський критерій – цілям водойми рибогосподарського призначення, іригаційний критерій – сільськогосподарським цілям як полив сільськогосподарських культур, гігієнічний критерій – питним та господарсько-побутовим цілям водокористування.

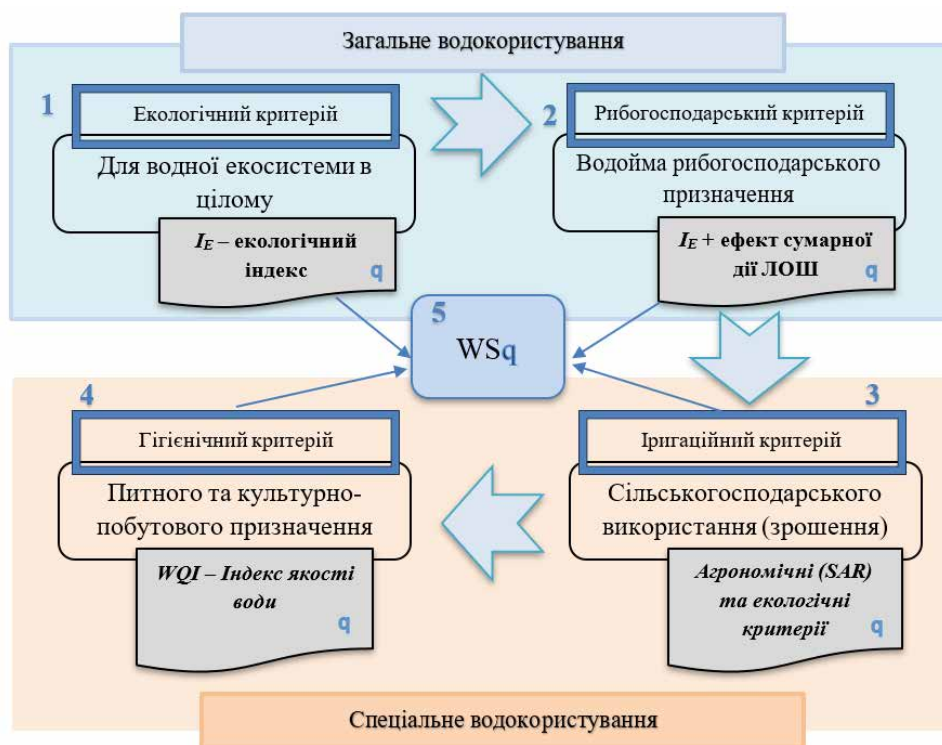


Рис. 3. Алгоритм інтегральної оцінки екологічного стану природних вод за критеріальним підходом для різних видів водокористування (власна розробка)

Перший етап – оцінка за екологічний критерієм. Включає оцінювання якісного стану води для водної біоти загалом. Для оцінки використовуємо комплексний екологічний індекс (I_E), який дозволяє визначати стан водойми за класами та категоріями якості. Даний індекс включає показники сапробності води, мінералізації та токсичних речовин, концентрація яких може суттєво вплинути на життєдіяльність водних організмів. На основі співставлення фактичних даних із критеріями екологічного індексу виводиться клас та категорія якості водойми.

Другий етап – оцінка за рибогосподарським критерієм. Базується на результатах попередньої оцінки, оскільки гідробіонти відносяться до водної біоти і попередня оцінка для водної екосистеми є підґрунтям визначення ключових показників якості води для категорій риб. Для даної категорії екологічний індекс (I_E) визначаємо з врахуванням ефекту спільної дії із лімітуючою ознакою шкідливості (ЛОШ). Враховуючи ЛОШ, за оцінки екологічного стану води для риби були враховані їхні біологічні особливості та шкідливість речовин із спільним санітарно-токсикологічним та токсикологічним ефектом. Це дає можливість більш точно оцінити воду для нормального функціонування риби.

Третій етап – оцінка за іригаційним критерієм. Включає оцінку якості водойми за агрономічними та екологічними критеріями показників. Агрономічні критерії показників (SAR – натрієво-абсорбційне співвідношення, мінералізація) надають оцінку води з метою запобігання осолонцюватості ґрунтів та погіршення родючості ґрунтів на яких використовують воду. Визначення показників, що входять до складу екологічних критеріїв (важки метали у воді) дає можливість оцінити якість води, що може вплинути на санітарний стан ґрунтів та спрогнозувати погіршення якості сільськогосподарської продукції.

Четвертий етап – оцінка за гігієнічним критерієм. Базується на показниках якості води для питних та господарсько-побутових цілей. Оцінювання води здійснюємо з використанням індексу якості води (WQI), який враховує ваговий фактор кожного показника та включає ті показники якості води, концентрація яких у воді найбільш суттєво впливає на здоров'я людей.

П'ятий етап – розрахунок інтегрального індикатора водного дефіциту (WSq) для видів водокористування. Оцінка водного об'єкту на даному етапі базується на всіх вище описаних етапах. На кожному етапі визначаються та обґрунтовуються пріоритетні показники, які мають найгірші значення або їхня концентрація перевищувала суттєво встановлені нормативи. Це дозволяє виокремити по одному показнику для кожного виду водокористування, який є ключовим чинником забрудненості води.

4.2. Методичне підґрунтя для інтегральної оцінки

Для оцінювання якості води водного об'єкта пропонуємо використовувати індекси якості води, що враховують певні групи показників якості води, що визначають критерії якості для видів водокористування. На рисунку 4 наведена схема оцінювання якості води залежно від виду водокористування та з врахуванням показників якості, індексів якості та критеріїв оцінки водного об'єкта.

Для визначення якісного стану води водного об'єкта для загальних видів водокористування як для водної екосистеми та водойми рибогосподарського призначення пропонуємо використовувати екологічний індекс якості води (I_E) [27], який включає групу показників за сольовим складом, трофо-сапробіологічним та речовинами специфічної токсичної дії. Проте для водної екосистеми й для водойм рибогосподарського призначення є різниця у використанні групи показників як трофо-сапробіологічні та специфічної дії. Це зумовлено біологічними особливостями водної біоти і зокрема гідробіонтів.

Оцінювання якісного стану вод для водної екосистеми (дод. А)

Для водної екосистеми до групи показників за сольовим складом (індекс якості води за показниками сольового складу – I_1) пропонуємо включати показники якості води як сума йонів, хлориди, сульфати, мінералізація та клас-групу-тип за іонним складом (рис. 4).

До трофо-сапробіологічних показників (індекс якості води за трофо-сапробіологічними показниками – I_2) включати показники якості води як: прозорість, водневий показник (рН), азот амонійний, азот нітритний, азот нітратний, сполуки фосфору, розчинений кисень, процент насичення водойми киснем, біологічне споживання кисню за 5 діб, ступінь сапробності води. В загальній кількості 10 показників. Вважаємо за доцільне використання саме цих показників якості води, оскільки вони демонструють основну якісну характеристику води та їхню придатність до життєдіяльності водних організмів. Зокрема прозорість, БСК₅ та вміст розчиненого кисню впливають на ступінь

сапробності води, що є одними з індикаторів органічного забруднення води. Вміст біогенних речовин (азот амонійний, азот нітритний, азот нітратний, сполуки фосфору) є індикаторами біогенного забруднення і чинником посилення процесів евтрофікації води.

До групи показників специфічних речовин токсичної дії (індекс якості води за показниками токсичної дії – I_3) відносимо вміст важких металів (свинець, кадмій, цинк, мідь) та заліза загального. Слід обирати ті показники токсичної дії, які були у значних концентраціях у воді за попередніми дослідженнями або є індикаторами певного виду забруднення або найбільш впливають на водні організми. З точки зору водної екосистеми, значні значення вмісту заліза (біологічно активного елементу) у воді впливають на інтенсивність розвитку фітопланктону і якісний склад мікрофлори у воді. Також, навіть невелика концентрація міді, цинку, свинцю та кадмію суттєво є токсичною для живих організмів водного середовища. Саме тому ми пропонуємо визначати цих п'ять показників специфічної токсичної дії для оцінки якісного стану водної екосистеми.

*Оцінювання якісного стану вод для водойм рибогосподарського
призначення (дод. Б)*

Пропонуємо використовувати екологічний індекс якості води (I_E) із врахуванням ефекту сумарної дії лімітуючої ознаки шкідливості (ЛОШ) [28-29]. Це дає змогу врахувати рибогосподарські гранично-допустимі концентрації показників якості води, лімітуючі ознаки шкідливості (ЛОШ) та біологічні особливості категорій риби.

Методика передбачає використання блокових індексів [28-29]. Для інтегральної оцінки екологічного стану природних вод пропонуємо використовувати лише три головні блокові індекси (рис. 4): індекс якості води за показниками мінералізації – I_m , індекс якості води за трофо-сапробіологічними показниками – $I_{троф.}$, індекс якості води за токсикологічною ЛОШ – $I_{токс.}$ Використання цих блокових індексів дозволяє врахувати оцінку якості води за попередніми індексами (для водної екосистеми), враховуючи попередні

показники якості води, і тим спрощує процедуру отримання додаткових показників якості води, які потребують значних фінансових затрат на їхні вимірювання. Для інтегральної оцінки екологічного стану води цих індексів є достатньо для визначення якісного сану води для даного виду водокористування. Якщо ж метою дослідження є моніторинг – тоді варто використовувати для оцінювання всі вісім блокових індексів. Інтегральна оцінка якості води для видів водокористування базується на середньозважених показниках якості води і не потребує моніторингових вимірювань.

Перша група показників є ідентичною до першої групи показників для оцінки водної екосистеми (I_1) і при оцінюванні I_m беремо дані із попередньої оцінки.

Проте група показників трофо-сапробіологічного складу ($I_{\text{троф.}}$) відрізняються від попередньої оцінки (I_2), оскільки тут ми враховуємо показники за ефектом спільної дії. Відповідно до оцінювання якості води за $I_{\text{троф.}}$ включаємо наступні показники якості води: прозорість, водневий показник (рН), вміст фосфору, вміст розчиненого кисню, процент насичення водойми киснем, ступінь сапробності води, біологічне споживання кисню за 5 діб. Загалом використовуємо 7 показників якості води. Вміст азоту нітратного ми не можемо врахувати в даній категорії визначення індексу, оскільки він входить до санітарно-токсикологічної групи ЛОШ.

Значення показників за вмістом азоту амонійного і нітритного беремо із попередньої оцінки і включаємо до групи показників для визначення індексу якості води за токсикологічною ЛОШ – $I_{\text{токс.}}$. Даний індекс також включає вміст важких металів, значення яких ми можемо взяти із попередньої оцінки для водної екосистеми. Тобто для визначення $I_{\text{токс.}}$ включає показники, що мають ефект спільної дії з ЛОШ, а зокрема це азот амонійний, азот нітритний, кадмій, мідь, цинк, свинець. Для визначення даного індексу важливою умовою є врахування гранично-допустимих концентрацій показників якості для риборозведення (дод. В).

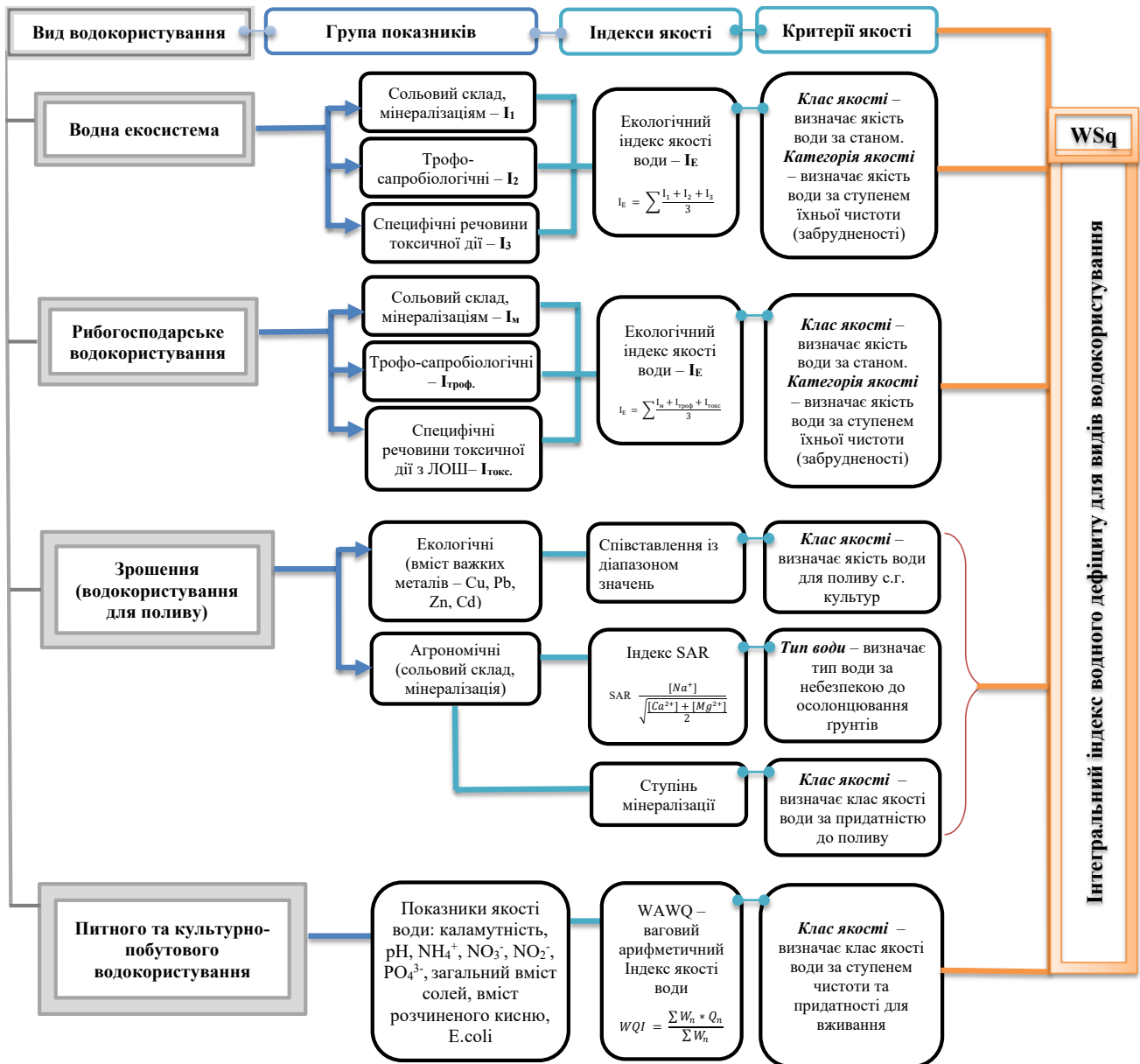


Рис. 4. Методичне підґрунтя для застосування алгоритму інтегральної оцінки екологічного стану природних вод (власна розробка)

Використання значень показників із попередньої оцінки робить використання даного методу більш економічно доцільним та ефективним з точки зору застосування його для виду водокористування як риборозведення.

Оцінювання якісного стану вод для зрошення (дод. Г)

Існують чотири основних критерії за якими проводиться оцінка якості поверхневих вод для зрошення [18]:

1. *Концентрація розчинних солей.* Основними катіонами, які присутні в зрошувальних водах є Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , а основними аніонами – Cl^{-} , SO_4^{2-} , HCO_3^{-} . Можуть бути присутні і інші, проте вони не мають внеску у солоність води, яка є головним показником води для зрошення. Визначення рівня солоності можна проводити шляхом електропровідності. Коли рівень солоності вод досить високий, варто добре дреноувати ґрунт.

2. *Концентрація Na^{+} щодо концентрації інших основних катіонів.* Високі концентрації Na^{+} щодо концентрацій Ca^{2+} та/або Mg^{2+} , можуть призвести до збільшення частки вільного, здатного до обміну Na^{+} в ґрунті. Це у свою чергу призводить до збільшення рН ґрунту до 8,5 і більше.

3. *Концентрація токсичних елементів,* які можуть негативно впливати на ріст рослин та представляти небезпеку. Забруднювальні речовини із зрошувальної води можуть накопичуватися у ґрунті і зробити його непридатним для сільського господарства. З іншої сторони, речовини що знаходяться у воді можуть бути безпечними для рослин, але вони можуть вплинути на якість сільськогосподарської продукції. Для кожного виду рослин можуть бути токсичними певні індивідуальні сполуки [18].

4. *Концентрація поживних (біогенних) елементів.* Високі концентрації нітратів і фосфатів у водах створюють екологічну небезпеку для водної екосистеми. Проте з іншої сторони, для вод, що використовуються для зрошення – вони є додатковим джерелом надходження до ґрунту сполук азоту та фосфору, які є необхідними для живлення сільськогосподарських культур [18].

Розглядаючи критерії оцінки природної води для зрошення, саме перший критерій – є найбільш вагомими, оскільки від нього залежать агрономічні ризики як засолення, зниження водопроникності ґрунтів. Екологічні ризики як забруднення води токсичними речовинами та високими концентраціями біогенних речовин – прямого впливу на сільськогосподарські культури не мають.

Методологічна проблема у розробці загальних критеріїв оцінювання якості вод для зрошення полягає в тому, що одночасно потрібно враховувати різні за своєю природою вимоги. Так провідні фахівців з даної галузі Л. В. Войтенко,

В. А. Копілевич [20] зазначають, що критерії якості води для зрошення мають забезпечити відсутність негативного впливу води на зрошувальні землі, враховуючи тип ґрунту, гарантувати епідеміологічну безпеку для зрошувальних територій, вирощеної продукції, поверхневих та ґрунтових вод.

В Україні діють агрономічні та екологічні критерії оцінки якості води для зрошення (рис. 4), що наведені у національних стандартах: ДСТУ 2730:2015. Захист довкілля. Якість природної води для зрошення. Агрономічні критерії [30]; ДСТУ 7286:2012 Якість природної води для зрошення. Екологічні критерії (Відомчий нормативний документ (ВНД) 33-5.502-97 Вода для зрошення. Екологічні критерії [31]).

Зокрема, вище описані перший і другий критерії – відносяться до агрономічних критеріїв якості води для зрошення, третій і четвертий – до екологічного критерію.

Основна мета агрономічних критеріїв оцінювання якості води є попередження процесів засолення ґрунтів, збереження родючості ґрунтів, забезпечення планової врожайності сільськогосподарських культур [30]. Мета екологічних критеріїв – попередження можливого негативного впливу на характеристики родючості ґрунтів та їх відповідність санітарно-гігієнічним вимогам, дотримання харчової якості сільськогосподарської продукції [31, 32].

Пропонуємо проводити оцінку якості природної води водосховища для зрошення з врахуванням агрономічних та екологічних критеріїв (рис. 5). Алгоритм виконання наведений в додатку Г.



Рис. 5. Схематичне відображення критеріїв оцінки якості води для зрошення (власна розробка на основі літератури [20, 30-32])

Ми пропонуємо до агрономічних критеріїв включити показник *SAR* (Sodium-Adsorption-Ratio), та мінералізацію (сума розчинених), які надають повну характеристику води щодо прогнозованого засолення ґрунтів. До екологічних критеріїв включити показники вмісту важких металів у воді (Cu, Pb, Cd, Zn), які демонструють безпечність води для використання в цілях зрошення (токсичність важких металів) та якість води, що не буде впливати на санітарно-гігієнічний стан ґрунтів.

Агрономічні критерії

Оцінка природної води для зрошення проводимо на критеріях мінералізації (концентрація розчинних солей) з використанням показника *SAR*.

Класифікацію зрошувальних вод щодо здатності їх до осолонцювання ґрунту дає департамент сільського господарства США. Величина негативного впливу Na^+ оцінюється за показником *SAR* – Sodium-Adsorption-Ratio (натрієво-абсорбційне співвідношення) [33]. Визначення даного показника проводиться за формулою 1:

$$SAR = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]}{2}}} \quad (1)$$

Відповідно до величини *SAR* виділяють 4 типи вод [19, 28, 33, 34]:

- 0-10: слаболужні з малою небезпекою осолонцювання;
- 10-18: середньолужні з середньою небезпекою осолонцювання;
- 18-26: сильнолужні з високою небезпекою осолонцювання;
- >26: сильнолужні з дуже високою небезпекою осолонювання.

За використання природної води для зрошення обов'язково потрібно враховувати тип ґрунту та ґрунтовий рельєф.

Залежно від мінералізації за класифікацією А.М. Костякова [34], іригаційні води класифікують наступним чином:

1. Вода підходить для поливу – містить не більше 400 мг/дм^3 розчинених солей.
2. Вода, у якій від 400 до 1000 мг/дм^3 розчинених солей, потребує обережного підходу з урахуванням комплексу умов її використання.
3. Вода, у якій від 1000 до 3000 мг/дм^3 розчинених солей, засолює ґрунти, непридатна для використання.

Екологічні критерії

За оцінки якості води для зрошення за екологічними критеріями виділяють 2 класи води [31, 32]: I клас – «придатна»: вода за показниками відповідає нормам; II клас – «обмежено придатна»: використовують для зрошення за умов екологічного контролю та обов'язково застосування комплексу агро меліоративних заходів. Непридатною вважається вода, якщо її показники виходять за межі II класу якості.

Нормування якості води для зрошення проводимо за вмістом важких металів у воді. Пропонуємо брати для інтегральної оцінки основні показники, які суттєво впливають на санітарний стан ґрунтів та вод – мідь, цинк, свинець та кадмій. Також їхні значення можна взяти із попередніх оцінок для водної екосистеми та риборозведення і це зменшить значно витрати на визначення додаткових показників якості води. Градація цих показників стосовно класу якості води представлена у таблиці 1.

Таблиця 1

Оцінка якості зрошувальної води за вмістом важких металів (мг/дм³) [31]

№	Назва	Оцінка якості води	
		I клас	II клас
1	Мідь (Cu), мгCu/дм ³	<0,5	0,5-1,0
2	Цинк (Zn), мгZn/дм ³	<0,08	0,08-0,2
3	Свинець (Pb), мгPb/дм ³	<0,02	0,02-0,05
4	Кадмій (Cd), мгCd/дм ³	<0,005	0,005-0,01

Воду вважають *придатною для зрошення* якщо вона відповідає наступним критеріям: за агрономічним критерієм: вода є слоболужні з малою небезпекою осолонцювання (*SAR – не більше 10*), містить до 400 мг/дм³ розчинених солей (мінералізація); за екологічним критерієм: концентрація важких металів у воді відноситься до I класу якості води (відповідно до встановлених вимог ВНД 33-5.5-02-97 [31]); відповідно до Постанови КМУ №766 від 02.09.2020 р. полив безпечний вважається коли якість води зрошувальних вод за агрономічними та екологічними критеріями відноситься до I класу [32].

Оцінювання якісного стану вод для питних та господарсько-побутових цілей (дод. Д)

В екологічній науці широко використовують узагальнені індекси якості води для моніторингових досліджень. Вітчизняні вчені [20, 21] якість води для питних цілей виражають у вигляді інтегрального показника – WQI (індекс якості води) в модифікації із узагальненою функцією бажаності Харрінгтона. Оцінку якості води Канівського водосховища дослідники [35] провели на основі розрахунку індексу якості води WQI. У роботі вчених [36] розраховано блокові індекси для оцінки Запорізького (Дніпровського) водосховища.

Індекс якості води WQI є одним із індексів, які широко використовуються для оцінки якості води для питних та господарсько-побутових цілей [19-23]. Індекс якості води (WQI) є одним із найбільш використовуваних інструментів для опису якості води. Аналіз динаміки кількості публікацій у базі даних WoS Core Collection показав стрімке зростання їх від 940 публікацій у 2013 році до 3497 у 2022 році [21]. Еволюція досліджень WQI за рік у базі даних Scopus 2022 показує також ріст публікацій. Між 1975 і 1988 роками кількість досліджень залишалася незначною (від 1 до 13 досліджень). У 1998 році кількість досліджень збільшилася до 46 і поступово зросла до 466 публікацій у 2011 році. Дослідження WQI значно зросли за останнє десятиліття, демонструючи, що WQI став важливою темою дослідження [37].

Індекс WQI базується на фізичних, хімічних і біологічних факторах, які об'єднують в одне значення в діапазоні від 0 до 100 і включають 4 процеси: вибір параметра; перетворення необроблених даних у загальну шкалу; надання вагових коефіцієнтів; агрегування значень субіндексів та визначення класу якості води.

У науці існує кілька індексів якості води, зокрема ваговий арифметичний індекс якості води (WAWQI – Weighted Arithmetic Index methods for Water quality), індекс якості води Канадської Ради міністрів навколишнього середовища (CCMEWQI – Canadian Council of Ministers of Environment Water Quality Index), Індекс якості води Національного санітарного фонду (NSFWQI –

National Sanitation Foundation Water Quality Index), Орегонський індекс якості води (OWQI – Oregon Water Quality Index).

Нами для проведення оцінювання якості води в структурі інтегральної оцінки природних вод для різних видів водокористування обрано ваговий арифметичний індекс якості води (WAWQI), застосування якого базується на змінній кількості та типах параметрів якості води у порівнянні з відповідними стандартами стосовно виду водокористування. Зважений арифметичний індекс використовується для розрахунку індексу якості води та класифікує якість води за ступенем чистоти за допомогою найбільш часто вимірюваних змінних якості води. Метод широко застосовувався різними зарубіжними науковцями [37].

Методика розрахунку індексу WAWQI передбачає включення 9 пріоритетних показників, які є найбільш вагомими з огляду на проблему дослідження та попередньо визначені для певного виду водокористування. Нами обрано показники якості води, які можуть впливати на стан якості води як джерела для питних та господарсько-побутових потреб і які частково були враховані при оцінюванні якості води для водної екосистеми, риборозведення та зрошення. Економічно доцільно враховувати значення показників, які уже є визначеними.

До них віднесли (табл. 2): каламутність (як фізичний показник що впливає на загальний стан води, погіршуючи загальні умови водойми для господарсько-питних потреб), рН води (хімічний показник, який не повинен виходити за межі 6,5-8,5), концентрації у воді сполук азоту та фосфору (біогенні речовини, наявність яких у високих дозах може спричинити захворювання у людини), загальний вміст солей (мінеральний склад води, високі вмісти якого можуть впливати на організм людини), вміст розчиненого кисню, E.coli (показник епідемічної безпеки води, наявність його уже буде свідчити про загрозу для здоров'я). Для кожного обраного показника має визначити його стандартне значення (нормативне). Обґрунтування даних показників із їхнім стандартним значенням для питних цілей наводимо у таблиці 2.

Таблиця 2

Обґрунтування вибору параметрів (показників) для оцінки якості води за ваговим арифметичним індексом якості води для питних цілей

№	Параметри (показники)	Пояснення	Стандартне значення	Література
1	Каламутність	Фізичний показник що впливає на загальний стан води, погіршуючи загальні умови водойми для господарсько-питних потреб	Не більше 1,0	[39, 40]
2	pH	Хімічний показник, який не повинен виходити за межі 6,5-8,5	8,5	[41]
3	NH_4^+ , мг NH_4^+ /дм ³	Біогенні речовини, наявність яких у високих дозах може спричинити захворювання у людини. Вони відносяться до категорії санітарно-токсикологічного впливу на здоров'я людини	2,0	[41]
4	NO_3^- , мг NO_3^- /дм ³		45,0	
5	NO_2^- , мг NO_2^- /дм ³		3,3	
6	PO_4^{3-} , мг PO_4^{3-} /дм ³		3,5	
7	Загальний вміст солей, мг/дм ³	Це показник мінерального складу води, високі вмісти якого можуть впливати на організм людини. Не повинен перевищувати за сухим залишком 1000 мг/дм ³ , у тому числі хлоридів - 350 мг/дм ³ , сульфатів - 500 мг/дм ³	До 1000	[41]
8	Розчинений кисень, мг/дм ³	Не повинен бути менше 4 мг/дм ³ в будь-який період року в пробі, відібраній до 12-ї години дня	Не менше 4,0	[41]
9	Індекс лактопозитивних кишкових паличок в 1дм ³ води (E.coli)	Показник епідемічної безпеки води, наявність його уже буде свідчити про загрозу для здоров'я. Досить небезпечна бактерія, що відноситься до групи коліформних бактерій. Наявність їх є ознаками забруднення води тваринними відходами. Загалом бактерія має бути відсутньою у питній водопровідній воді. Проте ми досліджуємо природну воду, яка для водопостачання буде проходити обробку.	До 5000*	Нормативне значення відповідно до МУ №2285-81

Розрахунок індексу якості води (WAWQI) проводимо у три етапи відповідно до методики [38]. Алгоритм виконання наведений у додатку Д.

Перший етап передбачає розрахунок одиничних вагових коефіцієнтів (W_n) для кожного параметра (показника якості води). Його розраховують як пропорцію відповідно до певного стандарту параметра. Для цього використовуємо формулу 2:

$$W_n = \frac{K}{S_n}, \text{ де} \quad (2)$$

W_n – ваговий фактор для кожного n параметра

S_n – стандартне значення n параметрів якості води.

K – константа пропорційності. Для її розрахунку використовуємо формулу 3:

$$K = \frac{1}{1/S_1 + 1/S_2 + 1/S_3 \dots + 1/S_n} = \frac{1}{\sum \frac{1}{S_n}}, \quad (3)$$

$S_1 \dots S_n$ – стандартні значення параметрів 1 ... n .

Важливою умовою при розрахунку вагового коефіцієнту W_n – він має становити 1.

Другий етап передбачає визначення рейтингу якості для n -го параметра якості води або субіндексу (Q_n). Рейтинг якості або субіндекс (Q_n), що відповідає n -му параметру, є числом, що відображає відносне значення цього параметра в досліджуваній воді відносно його допустимого стандартного значення. Розраховуємо за формулою 4:

$$Q_n = \frac{[(V_n - V_0)]}{[(S_n - V_0)]} * 100, \quad (4)$$

Q_n – рейтинг якості або субіндекс для n -го параметра якості води.

V_n – фактичне значення n -го параметра.

V_0 – ідеальне значення n -го параметра в чистій воді.

S_n – стандартне значення n параметрів якості води.

Згідно з методикою значення V_0 – практично для всіх показників 0, оскільки передбачає ситуацію, що забруднення у воді відсутнє, всі параметри відповідають нормативам. Проте для таких показників як *pH* води та *вміст розчиненого кисню* – згідно методики дане значення потрібно розраховувати, враховуючи умови, що V_0 для *pH* становить 7,0, V_0 для параметра розчиненого кисню становить – 14.

Третій етап передбачає розрахунок загального індексу якості води (WAWQI). Загальний WQI – це сукупність рейтингу якості (Q_n) і ваги одиниці (W_n) лінійно. Проводимо визначення за формулою 5:

$$WQI = \frac{\sum W_n * Q_n}{\sum W_n} \quad (5)$$

Усі формули вводять в програму Excel. Градування розрахункових значень WQI здійснюємо відповідно до встановленої шкали (табл. 3).

Таблиця 3

Категоризація індексу якості води WQI для оцінки якості води з метою використання її у питних та господарсько-побутових цілях

Значення індексу якості води WQI [35, 37, 38]	Якість води [35, 37, 38]	Клас [42]	Пояснення [35, 38]	Колір [37]
0-25	відмінна	A	Воду можна використовувати для питних та господарсько-побутових цілей без будь-якої обробки	Голубий
25-50	добра	B	Воду можна використовувати для господарсько-питних цілей, проте для питних потреб – бажано провести обеззараження (залежно параметра, який впливає на якість води)	Зелений
51-70	низька	C	Воду можна використовувати для пиття лише після проведення первинної обробки з подальшим знезараженням	Жовтий
76-100	дуже низька	D	Воду можна використовувати для пиття лише після проведення первинної обробки з подальшим знезараженням	Оранжевий
Більше 100	найгірша	E	Воду бажано не використовувати для питних та господарсько-побутових потреб, вона може бути використана для технічних цілей. Відповідно потребує заходів з обробки.	Червоний

Визначення інтегрального індикатора водного дефіциту води – WSq (дод. E)

Питання дефіциту води, зменшення водозабезпеченості в умовах змін клімату, військової діяльності є досить актуальним для проведення інтегральної оцінки стану водних ресурсів країни. Якщо виникає дефіцит води, тоді існує значний розрив між пропозицією та попитом на воду відповідної якості.

Щоб мати уяву про доступну кількість та належну якість води для певних видів водокористування пропонуємо визначати інтегральний *індикатор водного дефіциту води* за секторами (видами водокористування), що включає якість води – *WSq (Water Scarcity including quality)*. Він розраховує кількісно величину доступної води з врахуванням найгіршого показника що може спричинити погіршення якості води – WSq [26]. Він досить широко використовується

науковцями в екологічних дослідженнях з управління та менеджменту водними ресурсами в європейських країнах.

Даний індикатор WSq дозволяє включати показники, які є безпосередніми чинниками забруднення природної води, впливаючи на її якість. Вимоги до якості води відрізняються залежно від цільового використання. Раціональне управління водними ресурсами для різних видів використання потребує не лише врахування попиту на кількість необхідної води, але й врахування специфіки підбору кожного показника для розрахунку індикатора водного дефіциту.

Цей індикатор WSq інтегрує (поєднує) два компоненти що відповідають за кількісну величину (визначає дефіцит води) і якісну величину природної води (визначає якість води відповідно до потреби). Поєднуючи ці два компоненти ми можемо спрогнозувати водні проблеми для певних видів водокористування за попитом і пропозицією. Слід розуміти, що інтегральний індикатор водного дефіциту WSq – це показник, який показує яка кількість доступної якісної (чистої) води необхідна для виду водокористування.

Алгоритм проведення розрахунків наведено в додатку Е. Для розрахунків індикатора WSq першою умови є проведення екологічної оцінки стану природної води для певного виду водокористування з визначенням пріоритетних показників якості води, які найбільш суттєво впливають на якість води. Відповідно до методики розрахунку, інтегральний індикатор водного дефіциту включає лише один показник якісного стану, який є найбільш пріоритетним для інтегральної оцінки води певного виду водокористування.

Нами запропоновано обрати наступні показники якості води для відповідних видів водокористування як (табл. 4): біохімічне споживання кисню для водної екосистеми, вміст розчиненого кисню для риборозведення, загальний вміст солей для потреб зрошення, *E.coli* – показник якості води для питних та господарських цілей. Перелік показників можна змінювати, залежно від виду забруднення водного об'єкту та мети дослідження. Нами обрані саме ці, оскільки вони є пріоритетними для оцінки якості води за відповідними видами водокористування.

Таблиця 4

Обґрунтування вибору показників якості води для розрахунку інтегрального індикатора водного дефіциту WSq

Потреби	Методика проведення оцінювання якості води	Показник для розрахунку WSq	Обґрунтування
Водна екосистема (загалом)	Комплексний екологічний індекс І _Е	БСК ₅ , мгО ₂ /дм ³	Показник, що є індикатором органічного забруднення
Водойма рибогосподарського призначення	Комплексний екологічний індекс І _Е з використанням ефекту сумарної дії ЛОШ	Розчинений кисень, мгО ₂ /дм ³	Показник, який відповідає за аеробні властивості риб, може бути індикатором біогенного та органічного забруднення, що викликають гіпоксію у риб
Вода для зрошення	Агрономічні критерії (SAR, мінералізація) Екологічні критерії (вміст важких металів)	Загальний вміст солей, мг/дм ³	Показник, який може спричинити осолонцювання ґрунтів та погіршити родючість ґрунту
Вода для питних та культурно-побутових цілей	Індекс якості води WQI	E.coli	Показник епідемічної безпеки води, наявність його уже буде свідчити про загрозу для здоров'я.

Наступним етапом передбачено проведення самих розрахунків.

Для розрахунку індикатора водного дефіциту WSq використовуємо методику van Vliet, M.T.H., Flörke, M., Wada, Y. (2017) [26]. Алгоритм даної методики відрізняється від інших тим, що дана методика дозволяє інтегрувати обрані показники якісного стану води до визначення кількості чистої води яка є необхідною для певного виду водокористування.

Нами була адаптована методика [26] до водно-екологічних проблем. Індикатор WSq розраховуємо як відношення галузевих водозаборів прийнятної якості води до загальної доступно кількості води за формулою 6:

$$WSq = \frac{\sum_{j=1}^n (D_j + dq_{ij})}{Q}, \text{ де} \quad (6)$$

WSq (water scarcity including quality) – дефіцит води, включаючи якість води (безмірна величина).

D_j – загальне споживання води за сектором j, визначається для кожного виду водокористування окремо (км³/рік).

$dq_{i,j}$ – додаткова кількість чистої води, яка необхідна для розбавлення забрудненої води до відповідної якості води для сектора j з урахуванням забруднювача i ($\text{км}^3/\text{с}$), розрахункова величина.

Показник $dq_{i,j}$ розраховується на основі стандарту певного показника якості води за формулою 7:

$$dq_{i,j} = \begin{cases} 0, & \longrightarrow C_i \leq C_{\max_{i,j}} \\ \left(\frac{Q * C_i}{C_{\max_{i,j}}} - Q \right), & \longrightarrow C_i > C_{\max_{i,j}} \end{cases} \quad (7)$$

C_i – фактична концентрація i показника якості води для певного сектору (виду водокористування) (одиниця вимірювання залежить від розглянутого параметра якості води).

$C_{\max_{i,j}}$ – максимальне (нормативне) значення i показника якості води для певного сектору (виду водокористування) (одиниця вимірювання залежить від розглянутого параметра якості води).

Q – загальна кількість води у водному об'єкті (км^3).

Якщо концентрація i показника (забруднювача) не перевищує встановленим нормативним значенням, тобто відповідає умові $C_i \leq C_{\max_{i,j}}$, $dq_{i,j} = 0$.

Якщо концентрація i показника (забруднювача) перевищує встановлені нормативні значення, тобто відповідає умові $C_i > C_{\max_{i,j}}$, розрахунок $dq_{i,j}$ проводимо за формулою вищу.

Проте в наших умовах, для виду водокористування – риборозведення, обраний пріоритетний показник – вміст розчиненого кисню ($\text{мгO}_2/\text{дм}^3$), значення якого вважаються оптимальними якщо його вміст у воді становить вище оптимального його значення. Наприклад для категорії риб Коропові (*Cyprinidae*) оптимальне значення вмісту розчиненого кисню у воді становить $5,0 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$. Відповідно, діятиме умова $C_i > C_{\max_{i,j}}$, при якій ми вважаємо, що $dq_{i,j} = 0$. Якщо ж значення даного показника нижчі встановленим оптимальним нормативам для

відповідних категорій риб, тоді діятиме умова $C_i \leq C_{\max_{i,j}}$, за якої проводимо розрахунок для визначення $d_{q_i,j}$ відповідно за формулою 7.

Градація індикатора водного дефіциту WSq наведена у таблиці 5 [26].

Таблиця 5

Інтерпретація результатів індикатора водного дефіциту [26]

Градація	Індикатор водного дефіциту WSq	Пояснення	Колір
0-0,2	Низький рівень	Дефіциту води немає. Кількість доступної якісної води достатня для j сектора	Зелений
0,2-0,4	Середній рівень	Дефіцит води відчутний, варто звернути увагу які показники вплинули на доступність якісної води для j сектора. Кількість доступної якісної води частково достатня для j сектора	Жовтий
0,4-0,6	Високий рівень	Дефіцит води серйозний. Існує ризик забруднення води, що унеможливило її використання. Кількість доступної якісної води для j сектора – практично не доступна.	Оранжевий
>0,6	Дуже високий рівень	Високий дефіцит води. Водний об'єкт не можна використовувати для j сектора через наявність високо рівня забрудненості. Кількість доступної якісної води для j сектора – відсутня.	Червоний

Інтерпретація результатів WSq дозволяє оцінити до якого виду водокористування найбільше придатний водний об'єкт. Індикатор показує необхідну кількість якісної води для певного сектору. Чим менше значення WSq , тим краще підходить водний об'єкт для певного сектору, маючи достатню кількість якісної води – дефіцит води малий. Якщо ж високі значення його – це означає що дефіцит води високий, що водний об'єкт потребує додаткової кількості води для його розбавлення до безпечних меж щоб прогнозовано бути використаним для даного сектору.

4.3. Практичне значення

Практичне значення застосування алгоритму інтегральної оцінки екологічного стану природних вод можна виокремити наступним чином.

З одного боку, інтегральна оцінка екологічного стану поверхневих вод враховує індикатори погіршення якості води, з іншого – визначає доступність

якісної води для різних видів водокористування. Попереднє виокремлення та обґрунтування ключових індикаторів дозволить робити аналітичні дослідження лише тих показників якості води, що роблять найбільший антропогенний вплив на водну екосистему і є важливими для конкретного виду водокористування. З економічної точки зору, це сприяє зменшенню витрат на аналітичні (лабораторні) аналізи показників води. Також, виокремлення ключових індикаторів дозволить провести оцінку за кількісною характеристикою, розрахувавши інтегральний індекс дефіциту води для кожного виду водокористування, в тому числі для водної екосистеми загалом.

Поєднання такого підходу до оцінювання поверхневих водних ресурсів поперше дозволить забезпечити виконання стратегічних цілей Водної стратегії України на період до 2050 року [2], зокрема Ціль 2 «Поліпшення якісного стану водних об'єктів шляхом досягнення та підтримання «доброго» екологічного та хімічного стану масивів поверхневих вод...» та Ціль 3 «Забезпечення необхідної кількості водних ресурсів для відновлення та оздоровлення водних екосистем і досягнення стійкого водозабору та водопостачання». По-друге, інтегральна оцінка якості природних вод може стати доповненням до державного моніторингу водних ресурсів України.

5. Модель DPSIR: інформаційний інструмент для вирішення екологічних проблем

5.1. Практичне значення моделі

Логічними завершенням інтегральної оцінки екологічного стану природних вод є розробка *науково-методичних рекомендацій* для визначення причинно-наслідкових зв'язків водної проблеми та заходів (способів, шляхів) для вирішення даної проблеми.

Інтегральна оцінка екологічного стану природних вод потребує інтегрального системного підходу до визначення водної проблеми, оскільки враховує якісні та кількісні характеристики досліджуваного водного об'єкта та дає можливість виокремити пріоритетну проблему для водної екосистеми.

В європейських країнах досить часто можна зустріти рішення екологічних проблем, заходи яких базуються на моделі DPSIR (**D**Driving forces, **P**ressures, **S**tate, **I**mpact, **R**esponse). Модель DPSIR – це концептуальна методика, яка використовується для аналізу та управління взаємодією між суспільством і навколишнім середовищем. Ця методологія, розроблена Європейським агентством з навколишнього середовища (EEA) [43], широко застосовується для оцінки екологічних проблем і розробки рішень щодо їх вирішення, а також є інформаційним інструментом для вирішення екологічних проблем.

Модель DPSIR почала широко використовуватися з 1995 року, була розроблена Європейським Агентством Навколишнього середовища (EEA). Зокрема для оцінки навколишнього середовища Європи, EEA у 1995 році використала модель DPSIR [44]. Науковці [45] у 2006 році на основі моделі DPSIR зробили синтез причинно-наслідкових зв'язків екологічної проблеми морського середовища та розробили управлінські підходи до відновлення морської екосистеми. Застосовано модель DPSIR науковцями [47] у 2013 році для пояснення антропогенного впливу за заміною екосистемних послуг, що містять як негативний, так і позитивний вплив на екосистему. Управління морським середовищем, його інтеграція екосистемних послуг і суспільних переваг побудовано на основі моделі DPSIR [48]. У праці [49] розкрито структуру DPSIR, та вченими доведено його ефективність використання як інструмента для аналізу екологічних проблем, в тому числі для річок та узбережжя морів й океанів. У 2016 році вченими [52] було оцінено стійкість регіональних водних ресурсів у на основі моделі DPSIR. Також, у 2018 році модель DPSIR була використана для розробки управлінських рішень і балансів для підтримки управління водними ресурсами [53]. Оцінка міської водної безпеки у 2021 році зроблена фахівцями [51] на основі моделі DPSIR. Вітчизняними вченими модель DPSIR [50] була використана для знаходження взаємодії між соціальною та екологічною системою у вирішенні проблеми висихання ялинкових деревостанів в українських Карпатах.

Проте, у сфері вирішення водних проблем, вітчизняними науковцями модель не була застосована. У Плані управління річковим басейном Дніпра на 2025-2030 роки запропоновано використовувати концептуальну модель DPSIR для оцінки антропогенного впливу на кількісний та якісний стан поверхневих та підземних вод, у тому числі точкових та дифузних джерел [54].

Європейське Агентство Навколишнього середовища (ЕЕА) [46] визначає кожен компонент концептуальної моделі DPSIR наступним чином: (*Drivers*) рушійні сили описують соціальні, демографічні та економічні зміни в суспільствах і відповідні зміни в стилі життя, загальний рівень споживання та моделі виробництва; (*Pressure*) індикатори тиску описують розвиток викидів речовин (викидів), фізичних і біологічних агентів, використання ресурсів і використання землі в результаті діяльності людини; (*State*) індикатори стану дають опис кількості та якості фізичних явищ (таких як температура), біологічних явищ (таких як рибні запаси) та хімічних явищ (таких як концентрація CO₂ в атмосфері) на певній території; (*Impact*) зміни в стані впливають на функції навколишнього середовища, такі як здоров'я людини та екосистеми, доступність ресурсів, втрати виробленого капіталу та біорізноманіття; і, нарешті, (*Response*) відповіді – це дії, вжиті групами (та окремими особами) у суспільстві, а також спроби урядів запобігти, компенсувати, покращити або адаптуватися до змін у стані навколишнього середовища.

Можна виокремити практичне значення використання моделі DPSIR у вирішенні екологічних проблем:

- інформаційний інструмент функціонування звітності, інформаційного забезпечення в системі управління навколишнім середовищем;
- методологічна платформа аналізу причинно-наслідкових зв'язків екологічної проблеми, антропогенного впливу на екосистеми;
- підґрунтя підготовки звітності для систем моніторингу навколишнім середовищем.

Варто зазначити, що модель DPSIR допомагає визначити зв'язки та структурувати інформацію, а також дозволяє зрозуміти та переглянути екологічну проблему на всіх рівнях (від локального до національного). Останнім часом модель використовується для оцінки змін навколишнього середовища в екосистемах, визначення соціального та економічного тиску на систему, прогнозування потенційних викликів і вдосконалення методів управління. Гнучкість і загальна застосовність структури роблять її стійким інструментом, який також можна застосовувати в соціальних, економічних та інституційних сферах для збалансованого розвитку держави.

Використання даної моделі дозволяє систематично та комплексно підійти до вирішення певної проблеми, зокрема інтегрувати соціально-економічні підходи до розв'язання екологічних питань, поєднати причини та зв'язки появи проблеми й надати їй інформаційного забезпечення, комплексно врахувати антропогенне навантаження та його вплив на екосистему, показати взаємодію між екологічними, соціальними та економічними аспектами в контексті збалансованого стійкого розвитку держави, враховуючи реалізацію принципів ЦСР.

Ми пропонуємо, після інтегральної оцінки якості природних вод, для вирішення виокремленої екологічної проблеми – застосувати модель DPSIR, оскільки вона включає інтегрований підхід до вирішення екологічної проблеми, використовується для вироблення практики управління екосистемами різного рівня на засадах сталого розвитку.

5.2. Застосування моделі на прикладі Київського водосховища

У Плані управління річковим басейном Дніпра на 2025-2030 роки [54] урядом та розробниками запропоновано використовувати концептуальну модель DPSIR для оцінки антропогенного впливу на кількісний та якісний стан поверхневих та підземних вод, у тому числі точкових та дифузних джерел. На наш погляд, застосування моделі в наших реаліях військового часу є актуальним

та необхідним інструментом, який надасть конкретні відповіді на поставлені екологічні водні проблеми.

Нами запропоновано застосувати модель DPSIR, як логічне завершення інтегральної оцінки якості природних вод. Модель дозволяє виокремити основні причинно-наслідкові зв'язки появи водної проблеми та їх обґрунтування, а також запропонувати заходи для вирішення чи мінімізації негативного впливу точкових, дифузних й інших джерел забруднення на водну екосистему.

Модель була застосована для Київського водосховища. В ході проведення інтегральної оцінки якості води Київського водосховища для загальних видів водокористування (водна екосистема, риборозведення) та спеціального водокористування (зрошення, питні та господарсько-побутові цілі), були виокремлені ключові показники якості води, що найбільш суттєво впливали на якісний стан води для видів водокористування. До них відносимо:

- перевищений вміст сполук азоту амонійного в воді відносно його гранично-допустимої концентрації для питних цілей ($0,15-0,92 \text{ мгN/дм}^3$ за норми $< 0,10 \text{ мгN/дм}^3$ за ДСТУ 4808:2007), відносно оптимального значення для водної біоти ($0,15-0,92 \text{ мгN/дм}^3$ за норми $< 0,10 \text{ мгN/дм}^3$ [27]); знаходження значень у допустимих межах для водойм рибогосподарського призначення відповідно національних нормативів ($0,15-0,92 \text{ мгN/дм}^3$ за норми $- 0,5-1,0 \text{ мгN/дм}^3$ за СОУ 05.01-37-385:2006), проте відповідно до стандартів ЄС (Директива 78/659/ЄС) оптимальне значення даного показника у воді для коропових та лососевих становить $0,005 \text{ мгN/дм}^3$;

- завищені значення сполук фосфору у воді відносно його гранично-допустимої концентрації для питних цілей ($0,1-0,5 \text{ мгP/дм}^3$ за норми $< 0,015 \text{ мгP/дм}^3$ за ДСТУ 4808:2007), відносно оптимального значення для водної біоти ($0,1-0,5 \text{ мгP/дм}^3$ за норми $< 0,015 \text{ мгP/дм}^3$ [27]); знаходження значень у допустимих межах для водойм рибогосподарського призначення відповідно до національних нормативів ($0,1-0,5 \text{ мгP/дм}^3$ за норми $- 0,3-0,5 \text{ мгP/дм}^3$ за СОУ 05.01-37-385:2006), відповідно до стандартів ЄС (Директива 78/659/ЄС)

оптимальне значення даного показника у воді для коропових становить $0,4 \text{ мгP/дм}^3$ та лососевих – $0,2 \text{ мгP/дм}^3$;

- низький рівень розчиненого кисню води, що відносить якість води до категорії непридатних для водної екосистеми ($3,06\text{-}3,46 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$ за оптимального значення для неї більше $8,0 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$ [27]), водойм рибогосподарського призначення ($3,06\text{-}3,46 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$ за оптимального значення для категорії риб коропові – $5,0 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$, осетрові – $6,0 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$, лососеві – $7,80\text{-}8,0 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$ за СОУ 05.01-37-385:2006), питних цілей ($3,06\text{-}3,46 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$ за оптимального значення для неї більше $8,0 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$ за ДСТУ 4808:2007);

- високий вміст БСК₅ у воді, що відносить воду до категорії непридатних для водної екосистеми ($4,3\text{-}54,0 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$ за оптимального значення для екосистеми – $<1,0 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$ [27]), водойм рибогосподарського призначення ($4,3\text{-}54,0 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$ за оптимального значення для категорії риб коропові та осетрові – $3,0 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$, лососевих – $2,0 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$ за СОУ 05.01-37-385:2006), зрошення ($4,3\text{-}54,0 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$ за оптимального значення $10,0 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$ за ВНД 33-5.5-02-97);

- завищені значення вмісту свинцю у воді, що відносить її до категорії «брудні» для водної екосистеми ($20,1\text{-}97,0 \text{ мкгPb/дм}^3$ за оптимального значення – до $2,0 \text{ мкгPb/дм}^3$ [27]), для водойм рибогосподарського призначення ($20,1\text{-}97,0 \text{ мкгPb/дм}^3$ за оптимального значення – до $10,0 \text{ мкгPb/дм}^3$), для зрошення ($0,02\text{-}0,05 \text{ мкгPb/дм}^3$ за норми – $0,02 \text{ мкгPb/дм}^3$ за ВНД 33-5.5-02-97);

- високі вмісти показника епідемічної безпеки – *E.coli* у досліджуваних пробах води, що відносить воду до категорії непридатних для зрошення ($500,0\text{-}6200,0 \text{ КУО/дм}^3$ за норми не більше $1000,0$ одиниць в 1 дм^3 води за ВНД 33-5.5-02-97), питних та господарсько-побутових цілей ($500,0\text{-}6200,0 \text{ КУО/дм}^3$ за норми не більше $3000,0$ одиниць в 1 дм^3 води відповідно до нормативного документу МУ № 2285-81), водойм рибогосподарського призначення ($500,0\text{-}6200,0 \text{ КУО/дм}^3$ за норми не більше $1000,0$ одиниць в 1 дм^3 води за СОУ 05.01-37-385:2006).

На основі інтегральної оцінки екологічного стану води Київського водосховища, виокремили водну проблему водойми, як антропогенна евтрофікація. Визначено, що точковими джерелами забруднення води Київського водосховища з правого берегу є підприємства (з виробництва продукції «Чіпси люкс», вирощування птиці «Агромарс» (закрита через порушення утилізації відходів) та «Дочірнє підприємство Лютіж», вирощування свиней «Славутич», надання послуг «Лютіжкомунгосп»), з лівого берегу – бази відпочинку («Кемпінг парк», «Shelest», «SunSet» та ін.). До дифузних джерел, в результаті діяльності яких відбувається опосередковане надходження біогенних речовин до водойми Київського водосховища віднесли: сільськогосподарські фермерські господарства що займаються вирощуванням зернових, технічних та бобових культур («Гута Межигірська», «Тарас Плюс» та ін.) та приватні присадибні господарства.

Нами обґрунтовано, що до азотного забруднення води водосховища, частка внеску точкових джерел становить 24%, тоді як дифузних – 76%. Частка внеску точкових джерел до фосфорного забруднення води водосховища складає 83%, дифузних – 17%. Відповідно підприємства є джерелом точкового забруднення водойми фосфорними сполуками (83%), тоді як фермерські господарства та приватні присадибні ділянки – джерелом дифузного забруднення водойми азотними сполуками (76%).

Окремим джерелом забруднення виступають військові дії [55, 56]. Аналізуючи значення показників якості води Київського водосховища за сезонністю 2021-2022 рр. (до повномасштабного вторгнення росії на територію України), та осінні показники 2023 р., спостерігаємо чотири основні виклики:

- тенденція до погіршення якості води за показниками азоту амонійного, азоту нітритного, сполук фосфору, БСК₅;
- збільшилися значення за вмістом сухих залишків, що призвело до збільшення рівня мінералізації води;
- знизився рівень розчиненого кисню у воді, що відповідно спричинило зменшення процентного співвідношення кисню у воді;

- посилилися значно процеси евтрофікації водойми, зокрема у 2021-2022 роках спостереження, на лівому березі водосховища нами не було візуально виявлено інтенсивності розвитку синьо-зелених водоростей, проте в осінній період 2023 р. ми візуально бачили у водоймі велику кількість ціанобактерій.

Варто зазначити, що у лютому 2022 р. для захисту м. Києва від вторгнення російської армії був зруйнований шлюз Ірпінського гідровузла, що був буфером між р. Ірпінь та водосховищем. В результаті таких дій відбулося затоплення будинків та сільськогосподарських орних ділянок, що у свою чергу спричинило виніс водою до водосховища великої кількості відходів різного характеру, органічних та мінеральних добрив тощо [55, 56].

Відповідно можна сказати, що у Київському водосховищі присутні біогенні сполуки, які є індикаторами евтрофікації (наявність значних значень амонійного азоту є свідченням забруднення що відбулося нещодавно), присутнє органічне забруднення, індикатором якого є наявність у високих значеннях БСК₅. Низький рівень розчиненого кисню у воді є свідченням проходження біогенних реакцій, що впливають на розмноження синьо-зелених водоростей у воді, спричинюючи явище евтрофікації.

Для виокремлення причинно-наслідкових зв'язків посилення процесів евтрофікації води Київського водосховища та надання відповідних рекомендацій як уряду так і водокористувачам, нами була побудована модель DPSIR (рис. 6). Модель включає аналіз чинників, що спричинили посилення процесів евтрофікації (*Drivers*), антропогенне навантаження, процеси якого вплинули на якість води (*Pressure*), екологічний стан води за вмістом показників якісного стану води, які найбільш суттєво вплинули на якість води (*State*), вплив вище перерахованих елементів моделі на процеси евтрофікації води Київського водосховища (*Impact*). До кожного елементу моделі (*D* – чинники, *P* – антропогенне навантаження, *S* – екологічний стан води, *I* – вплив) нами запропоновані рекомендації у вигляді заходів та пропозицій (*R* – рекомендації) для зменшення негативного впливу чинників забруднення, що сприятимуть послабленню процесів евтрофікації води Київського водосховища.

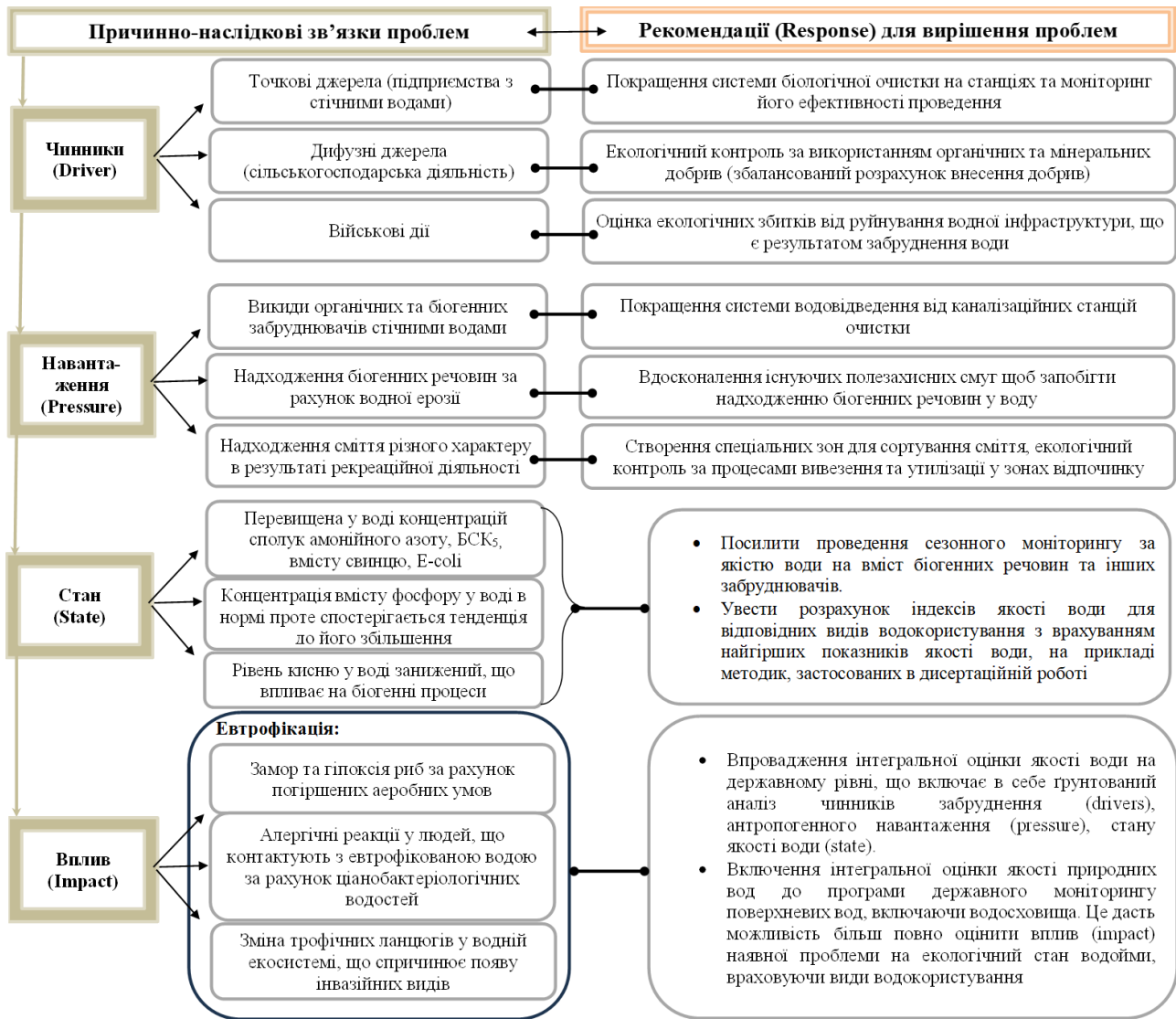


Рис. 6. Рекомендації для покращення екологічного стану та якості води у Київському водосховищі на основі моделі DPSIR, що відображає ключову водну проблему – евтрофікацію (власна розробка)

Ми розуміємо, що на процеси евтрофікації окрім антропогенних чинників (точкові та дифузні джерела, військова діяльність), впливають такі природні чинники як зміна температурного режиму повітря що у свою чергу викликає зміну температури води та швидкості течій, а також кількість опадів, які є неоднорідними. Природні чинники напряду залежать від зміни клімату і дослідження цих змін вимагає проведення аналізу даних в часі та в динаміці.

Інтегральна оцінка якості природних вод відображає антропогенні чинники, що впливають на якість води відповідно до конкретно поставлених завдань, включаючи аналіз середньозважених значень показників якості води. Звісно до інтегральної оцінки можна додати метеорологічні показники, які б дозволили показати вплив змін клімату на якість води та на процеси евтрофікації, проте це вимагатиме моніторинговий даних за 10-20 років і це уже не є основою інтегральної оцінки, а радше є – моніторинговим дослідженням. Варто зазначити, що основна мета інтегральної оцінки якості природних вод – це показати сучасний теперішній екологічний стан водного об'єкта і визначити основні причинно-наслідкові зв'язки появи водної проблеми та розробити заходи для вирішення.

Література

1. Хільчевський, В. К. (2023). Водна політика: світові тенденції, стан в Україні. Науковий збірник «Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія». Київ : Київського національного університету імені Тараса Шевченка, № 4(70), С. 6-22. DOI: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2023.4.1>
2. Водна стратегія України на період до 2050 року. Схвалено розпорядженням КМ України від 9.12.2022 р. № 1134-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1134-2022-%D1%80#Text>
3. Директиви ЄС у сфері управління водними ресурсами: довідник. – Рівне: «Волинські береги», 2019. – 224 с. URL: <https://ep3.nuwm.edu.ua/18864/1/%D0%9F%D1%96%D0%BD%D1%87%D1%83%D0%BA%3D%D0%94%D0%B8%D1%80%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%B8%20%D0%84%D0%A1.pdf>
4. Strokal, V. P., Kovpak, A. V. (2020). The basin approach for water resources management in Ukraine: the SWOT analysis. Scientific journal «*Biological Systems: Theory and Innovation*», Том 11, №4, р. 35-56. URL: <http://dx.doi.org/10.31548/biologiya2020.04.004>
5. Integrated water resources management (IWRM). CAWater-info: Portal of Knowledge for Water and Environmental Issues in Central Asia. URL: http://www.cawater-info.net/bk/8-1_e.htm
6. Хільчевський, В. К. (2021). Моніторинг вод в Україні: методи оцінювання якості води для різних цілей у зв'язку зі змінами нормативної бази (2014-2021 рр.). Науковий збірник «Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія». Київ : Київського національного університету імені Тараса Шевченка, №(3)61. С. 6-19. DOI: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2021.3.1>
7. План управління річковим басейном Дніпра 2025-2030: проект. Державне агентство водних ресурсів України Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України. URL: <https://davr.gov.ua/fls18/DNIPRO4.pdf>

8. Дмітрієва, О. О. та ін. (2019). Концептуальні напрями дослідження умов життя населення в зоні евтрофованих водних об'єктів / Дмітрієва О.О., Колдоба І.В., Хоренжя І.В. Науково-практичний журнал «Екологічні науки», Випуск 4 (27), С. 134-145. URL: <http://www.ecoj.dea.kiev.ua/archives/2019/4/22.pdf>
9. Li A., Strokal M., Bai Z., Kroeze C. & Ma L. (2019). How to avoid coastal eutrophication – a back-casting study for the North China Plain. *Science of The Total Environment*. 692, 676-690. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.306>
10. Strokal, M., Kahil, T., Wada, Y., Albiac, J., Bai, Z., Ermolieva, T., ... & Kroeze, C. (2020). Cost-effective management of coastal eutrophication: A case study for the yangtze river basin. *Resources, Conservation and Recycling*, 154, 104635. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104635>
11. Zhang, Y., Li, M., Dong, J., Yang, H., Van Zwieten, L., Lu, H., ... & Wang, H. (2021). A critical review of methods for analyzing freshwater eutrophication. *Water*, 13(2), 225. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13020225>
12. Akinawo, S. O. (2023). Eutrophication: Causes, consequences, physical, chemical and biological techniques for mitigation strategies. *Environmental Challenges*, 100733. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100733>
13. Sonarghare, P. C., Masram, S. C., Sonparote, U. R., Khaparde, K. P., & Kharkate, S. K. (2020). Causes and effects of eutrophication on aquatic life (a review). *International Journal for Environmental Rehabilitation and Conservation*, XI, 213-218. URL: <https://eoi.citefactor.org/10.11208/essence.20.11.SP2.147>
14. Proskurnin, O., Tsapko, N., Ivashchenko, T., Vasilenko, S., Belokon, K., Zakharchenko, N., ... & Teliura, N. (2024). Standardizing the Wastewater Composition in Order to Minimize the Eutrophication Risk for the Reservoir. *Journal of Ecological Engineering*, 25(6), 144-152. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/186822>
15. Хільчевський, В. К. (2015). Основні засади управління якістю водних ресурсів та їхня охорона : навч. посібник / В. К. Хільчевський, М. Р. Забоклицька, Р. Л. Кравчинський, О. В. Чунарьов / за ред. В. К. Хільчевського. Київ : ВПЦ «Київський університет», 172 с.

16. Гребінь, В. В. та ін. (2012). Гідрографічне районування території України як передумова розробки планів інтегрованого управління річковими басейнами / В. В. Гребінь, М. В. Яцюк, О. В. Чунарьов // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. Т.2. С. 8-16. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/glghge_2012_2_3

17. Васенко, О. Г. та ін. (2015). Інтегральні та комплексні оцінки стану навколишнього природного середовища: монографія / О. Г. Васенко, О. В. Рибалова, С. Р. Артем'єв, Н. С. Горбань, Г. В. Коробкова, В. О. Полозенцева, О. В. Козловська, А. О. Мацак, А. А. Савічев. Харків : НУГЗУ, 419 с.

18. Юрасов, С. М., Сафранов, Т. А., Чугай, А. В. (2011). Оцінка якості природних вод: Навчальний посібник. Одеса : Вид-во «Одеський державний екологічний університет», 164 с.

19. Юрасов, С. М., Кур'янова, С. О., & Юрасов, М. С. (2009). Комплексна оцінка якості вод за різними методиками та шляхи її вдосконалення. Український гідрометеорологічний журнал, (5), 42-53. URL: <http://uhmj.odeku.edu.ua/wp-content/uploads/2016/08/5-Yurasov-Kurianova.pdf>

20. Войтенко, Л. В., Копілевич, В. А., Заленська, Є. А., Гаць, А. К. (2021). Оцінка якості води для зрошення: методологія та практика. Сучасні технології та досягнення інженерних наук в галузі гідротехнічного будівництва та водної інженерії: зб. наук. пр. Херсон: ХДАЕУ, Вип. 3. С.125-129. URL: <https://www.ksau.kherson.ua/files/konferencii/20210528/%D0%97%D0%B1%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20%D0%BD%D0%B0%D1%83%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D1%85%20%D0%BF%D1%80%D0%B0%D1%86%D1%8C%203%20%D0%A5%D0%B5%D1%80%D1%81%D0%BE%D0%BD%202021.pdf#page=125>

21. Заленська, Є. А., Войтенко, Л. В. Індекси якості води: адаптація та використання для України // Науково-практичний журнал «Екологічні науки» Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України Державної екологічної академії післядипломної освіти та управління. Київ : Видавничий дім «Гельветика», Випуск 4(43). С.158-64. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.4-43.9>

22. Войтенко, Л. В., Копілевич, В. А., Строкаль, М. П. (2015). Концепція інтегральної оцінки якості води для різних видів водоспоживання з використанням функції бажаності Харрінгтона // Науково-практичний журнал «Біоресурси і природокористування». Серія «Хімія». Київ : НУБіП, 7(1-2). С. 25-36. URL: <https://journals.nubip.edu.ua/index.php/Bio/article/viewFile/6263/6157>
23. Шумигай, І. В., Манішевська, Н. М., Постоєнко, Д. М., Мороз, В. В. (2020). Гідрохімічний режим та екологічний стан водного басейну р. Тетерів. Агроекологічний журнал. №4. С. 47-58. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2020.219445>
24. Romashchenko, M., Husyev, Y., Shatkovskiy, A., Saidak, R., Yatsyuk, M., Shevchenko, A., & Matiash, T. (2020). Impact of climate change on water resources and agricultural production. *Land Reclamation and Water Management*, (1), 5-22. DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202001-235>
25. Степаненка, С. М., Польового, А. М. (2011). Оцінка впливу кліматичних змін на галузі економіки України: монографія. Одеса: Одеський державний екологічний університет, 697 с.
26. van Vliet, M. T., Flörke, M., & Wada, Y. (2017). Quality matters for water scarcity. *Nature Geoscience*, 10(11), 800-802. URL: <https://www.nature.com/articles/ngeo3047>
27. Методика екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями / В. Д. Романенко, В. М. Жукинський, О. П. Оксіюк та ін. Київ : «СИМВОЛ-Т», 1998. 28 с.
28. Колісник, А. В., Юрасов, С. М. (2009). Вдосконалення методики комплексної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями. Вісник Одеського державного екологічного університету, Вип.7. С. 192-202. URL: <http://bulletin.odeku.edu.ua/wp-content/uploads/2009/05/26-Kolisnyk-Urasov.pdf>
29. Юрасов, С. М., Кур'янова, С. О., Юрасов, М. С. (2009). Комплексна оцінка якості вод за різними методиками та шляхи її вдосконалення. Український гідрометеорологічний журнал, (5), 42-53. URL: <http://uhmj.odeku.edu.ua/wp-content/uploads/2016/08/5-Yurasov-Kurianova.pdf>

30. ДСТУ 2730:2015. Захист довкілля. Якість природної води для зрошення. Агрономічні критерії. Розробники: Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії ім. О.Н. Соколовського», Інститут водних проблем і меліорації НААН України, Технічний комітет з «Ґрунтознавства» (ТК 142). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. 13 с.

31. ВНД 33-5.5-02-97. Вода для зрошення. Екологічні критерії. Харків: Державний комітет України по водному господарству, 1998. 15 с.

32. Постанова Кабінету Міністрів України «Про нормативи екологічно безпечного зрошення, осушення, управління поливами та водовідведенням» від 02.09.2020 р. № 766. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/766-2020-%D0%BF#Text>

33. Wilcox, L. V. Classification and Use of Irrigation Waters [Electronic resource] : Circular No. 969 United States Department Of Agriculture: Washington, D.C. November 1955. URL: https://www.ars.usda.gov/arsuserfiles/20360500/pdf_pubs/P0192.pdf

34. Юрасов, С. М., Сафранов, Т. А., Чугай, А. В. (2011). Оцінка якості природних вод: Навчальний посібник. Одеса : Вид-во «Одеський державний екологічний університет», 164 с.

35. Безсонний, В. Л., Некос, А. Н., Сапун, А. В. (2022). Екологічна оцінка якості води Канівського водосховища. Людина та довкілля. Проблеми неоекології. Вип. 38. С. 85-96. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2022-38-08>

36. Ніколенко, Ю. В., Федоненко, О. В. (2021). Екологічна оцінка Запорізького (Дніпровського) водосховища. Електронний науковий журнал «Наукові доповіді НУБіП України». Серія «Біологія, біотехнологія, екологія» – Київ : Видавничий центр НУБіП України, № 4(92). DOI: <http://dx.doi.org/10.31548/dopovidi2021.04.004>

37. Chidiac, S., El Najjar, P., Ouaini, N., El Rayess, Y., & El Azzi, D. (2023). A comprehensive review of water quality indices (WQIs): History, models, attempts and perspectives. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 22(2), 349-395. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11157-023-09650-7>

38. Brown, R. M., McClelland, N. I., Deininger, R. A., & Tozer, R. G. (1970). A water quality index-do we dare. *Water and sewage works*, 117(10).
39. ДСанПіН 2.2.4-171-10. Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною. Київ. МОЗ України. 2010. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#Text>
40. ДСТУ 7525:2014. Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості питної води. URL: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/1-10672-dstu_voda_pytna.pdf
41. Гігієнічні нормативи якості води водних об'єктів для задоволення питних, господарсько-побутових та інших потреб населення / Затверджено наказом МОЗ України від 02.05.2022 р. № 721. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0524-22#Text>
42. Tyagi, S., Sharma, B., Singh, P., & Dobhal, R. (2013). Water quality assessment in terms of water quality index. *American Journal of water resources*, 1(3), 34-38. URL: https://www.researchgate.net/publication/259495159_Water_Quality_Assessment_in_Terms_of_Water_Quality_Index
43. Atkins, J. P., Burdon, D., Elliott, M., & Gregory, A. J. (2011). Management of the marine environment: integrating ecosystem services and societal benefits with the DPSIR framework in a systems approach. *Marine pollution bulletin*, 62(2), 215-226. URL: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.12.012>
44. EEA, 1995. Europe's Environment: the Dobbris Assessment. European Environmental Agency, Copenhagen, 676 pp. URL: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19961901262>
45. Elliot, M., Burdon, D., Hemingway, K.L., 2006. Marine ecosystem Structure, Functioning, Health and Management and Potential Approaches to Marine Ecosystem Recovery: a Synthesis of Current Understanding. Institute of Estuarine and Coastal Studies, University of Hull, 122 pp. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.05.034>

46. EEA, 2003. Environmental Indicators: Typology and Use in Reporting. European Environment Agency, 20 pp.

47. Kelble, C. R., Loomis, D. K., Lovelace, S., Nuttle, W. K., Ortner, P. B., Fletcher, P., ... & Boyer, J. N. (2013). The EBM-DPSER conceptual model: integrating ecosystem services into the DPSIR framework. *PloS one*, 8(8), e70766. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0070766>

48. Atkins, J. P., Burdon, D., Elliott, M., & Gregory, A. J. (2011). Management of the marine environment: integrating ecosystem services and societal benefits with the DPSIR framework in a systems approach. *Marine pollution bulletin*, 62(2), 215-226. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.12.012>

49. Gari, S. R., Newton, A., & Icely, J. D. (2015). A review of the application and evolution of the DPSIR framework with an emphasis on coastal social-ecological systems. *Ocean & coastal management*, 103, 63-77. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ocescoaman.2014.11.013>

50. Загвойська, Л. Д., Пелюх, О. Р. (2016). DPSIR-модель взаємодії соціальної та екологічної систем: феномен всихання ялинових деревостанів в українських Карпатах. *Вісник Одеського національного університету. Серія: Економіка*, (21, Вип. 8), 82-88.

51. Shi, S., Tao, X., Chen, X., Chen, H., Fitri, A., & Yang, X. (2021, October). Evaluation of urban water security based on DPSIR model. In *IOP conference series: Earth and environmental science* (Vol. 880, No. 1, p. 012023). IOP Publishing. DOI: [10.1088/1755-1315/880/1/012023](https://doi.org/10.1088/1755-1315/880/1/012023)

52. Sun, S., Wang, Y., Liu, J., Cai, H., Wu, P., Geng, Q., & Xu, L. (2016). Sustainability assessment of regional water resources under the DPSIR framework. *Journal of Hydrology*, 532, 140-148. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.11.028>

53. Vannevel, R. (2018). Using DPSIR and balances to support water governance. *Water*, 10(2), 118. DOI: <https://doi.org/10.3390/w10020118>

54. План управління річковим басейном Дніпра 2025-2030: проект. Державне агентство водних ресурсів України Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України. URL: <https://davr.gov.ua/fls18/DNIPRO4.pdf>

55. Stokal, V., Kurovska, A., & Stokal, M. (2023). More river pollution from untreated urban waste due to the Russian-Ukrainian war: a perspective view. *Journal of Integrative Environmental Sciences*, 20(1), 2281920. DOI: <https://doi.org/10.1080/1943815X.2023.2281920>

56. Stokal, V., Berezniak, Y., Naumovska, O., & Palamarchuk, S. (2024). The impact of the Russian-Ukrainian war on the soil-surface water interactions (No. EGU24-1115). *Copernicus Meetings*. DOI: <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-1115>

57. Клименко М. О., Вознюк Н. М., Вербецька К. Ю. Порівняльний аналіз нормативів якості поверхневих вод. Наукові доповіді НУБіП України. Серія «Біологія, біотехнологія, екологія». 2012. №(8)30. URL: https://nd.nubip.edu.ua/2012_1/12kmo.pdf.

58. СОУ 05.01–37–385:2006 Вода рибогосподарських підприємств. Загальні вимоги та норми. [Чинний від 2007–11–01]. Київ. 2006. 15 с. (дата звернення: 18.03.2024).

Додатки

Додаток А. Обґрунтування та розрахунок екологічного індексу I_E при оцінюванні води для водної екосистеми

№	Показники для оцінювання	Етапи виконання	Зведена оцінка
Оцінювання для водної екосистеми			
Екологічний індекс для водойми - I_E			$I_E = \sum \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3}$
Методика: Керівний нормативний документ: КНД 211.1.4.010-94 «Екологічна оцінка якості поверхневих вод суші та естуаріїв України. Методика. Київ: Мінприроди, 1994. 37 с.»			
I_1 – індекс сольового складу води			
1	Сума іонів Вміст хлоридів Вміст сульфатів	<p>1 етап: проводимо співставлення із критеріями за класом та категорією якості води за кожним показником.</p> <p>2 етап: розраховуємо індекс за сольовим складом (I_1) для кожного пункту спостережень за формулою:</p> $I_1 = \frac{\sum \text{категорій}_i}{n_i},$ <p>$\sum \text{категорій}_i$ – сума категорій якості за i показником; n_i – кількість показників</p> <p>3 етап: співставляємо отримані індекси I_1 із критеріями за класом та категорією якості води</p>	<p>Розраховуємо середні та максимальні значення індексу I_1</p> <p>1) $I_{1\text{сер.}}$ – індекс за показниками мінералізації води (за сольовим складом) за середніми значеннями:</p> $I_{1\text{сер.}} = \frac{I_1 + \dots + I_n}{N},$ <p>$I_1 \dots I_n$ – показники сольового складу за кожним пунктом спостереження; N – кількість пунктів спостереження</p> <p>2) $I_{1\text{max.}}$ – індекс за показниками мінералізації води (за сольовим складом) за максимальними значеннями. Знаходимо за найгіршим I_1 відповідного пункту спостереження</p>
I_2 – індекс трофо-сапробіологічного стану води			
2	Водневий показник (рН) Вміст нітратного азоту (нітратів) Вміст нітритного азоту (нітритів) Вміст амонійного азоту (амонію) Вміст фосфору Розчинений кисень $\text{мгO}_2/\text{дм}^3$ БСК ₅ % насичення киснем (розрахунково) $O_{2,\%} = \frac{C_x \times 100}{C_0},$ C_x – концентрація кисню, визначена експериментально, $\text{мгO}_2/\text{дм}^3$;	<p>1 етап: проводимо співставлення із критеріями за класом та категорією якості води за кожним показником.</p> <p>2 етап: розраховуємо індекс трофо-сапробіологічного стану води (I_2) для кожного пункту спостережень за формулою:</p> $I_2 = \frac{\sum \text{категорій}_i}{n_i},$ <p>$\sum \text{категорій}_i$ – сума категорій якості за i показником; n_i – кількість показників</p>	<p>Розраховуємо середні та максимальні значення індексу I_2</p> <p>1) $I_{2\text{сер.}}$ – індекс за показниками трофо-сапробіологічного стану води за середніми значеннями:</p> $I_{2\text{сер.}} = \frac{I_2 + \dots + I_n}{N},$ <p>$I_2 \dots I_n$ – показники трофо-сапробіологічного стану води за кожним пунктом спостереження; N – кількість пунктів спостереження</p> <p>2) $I_{2\text{max.}}$ – індекс трофо-сапробіологічного стану води за максимальними значеннями.</p>

	<p>C_0 – нормальна концентрація кисню за певної температури та атмосферного тиску (760 мм рт.ст.), виміряної при взятті проб, мгО₂/дм³</p> <p>Клас сапробності води Визначається за показниками прозорості води, О₂, % насичення води, БСК₅ Співставлення із класом сапробності</p>	<p>3 етап: співставляємо отримані індекси I₂ із критеріями за класом та категорією якості води</p>	<p>Знаходимо за найгіршим I₂ відповідного пункту спостереження</p>
I ₃ – індекс за показниками, що викликають токсичну дію на водну екосистему			
3	<p>Загальне залізо</p> <p>Мідь</p> <p>Цинк</p> <p>Свинець</p> <p>Кадмій</p>	<p>1 етап: проводимо співставлення із критеріями за класом та категорією якості води за кожним показником.</p> <p>2 етап: розраховуємо індекс за показниками токсичної дії (I₃) для кожного пункту спостережень за формулою:</p> $I_3 = \frac{\sum \text{категорій}_i}{n_i},$ <p>Σ категорій_i – сума категорій якості за i показником; n_i – кількість показників</p> <p>3 етап: співставляємо отримані індекси I₃ із критеріями за класом та категорією якості води</p>	<p>Розраховуємо середні та максимальні значення індексу I₃</p> <p>1) I_{3сер.} – індекс за показниками токсичної дії за середніми значеннями:</p> $I_{3\text{сер.}} = \frac{I_3 + \dots + I_n}{N},$ <p>I₃ ... I_n – показники токсичної дії за кожним пунктом спостереження; N – кількість пунктів спостереження</p> <p>2) I_{3max.} – індекс за показниками токсичної дії за максимальними значеннями.</p> <p>Знаходимо за найгіршим I₃ відповідного пункту спостереження</p>

**Додаток Б. Обґрунтування та розрахунок екологічного індексу I_E з ЛОШ при оцінюванні води для
риборозведення**

№	Показники для оцінювання	Етапи виконання	Зведена оцінка
Оцінювання води для рибогосподарських цілей			
	Екологічний індекс для водойми – I_E з урахуванням ефекту сумарної дії лімітуючої ознаки шкідливості (ЛОШ)		$I_E = \sum \frac{I_M + I_{\text{троф}} + I_{\text{токс}}}{3}$
	Методика: «Вдосконалення методики комплексної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями» (Юрасов С. М., Колісник А. В. та ін., Одеський державний екологічний університет України (ОДЕКУ), 2009 р.)		
I_M – індекс мінералізації води			
1	Сума іонів Сума хлоридів Сума сульфатів	<p><i>1 етап:</i> проводимо співставлення із критеріями за класом та категорією якості води за кожним показником.</p> <p><i>2 етап:</i> розраховуємо показник мінералізації (I_M) для кожного пункту спостережень за формулою:</p> $I_{M1} = \frac{\sum \text{категорій}_i}{n_i},$ <p>$\sum \text{категорій}_i$ – сума категорій якості за i показником; n_i – кількість показників</p> <p><i>3 етап:</i> співставляємо отримані індекси I_M із критеріями за класом та категорією якості води</p>	<p>Розраховуємо середні та максимальні значення індексу I_M</p> <p>1) $I_{M \text{ сер.}}$ – індекс за показниками мінералізації води (за сольовим складом) за середніми значеннями:</p> $I_{M \text{ сер.}} = \frac{I_{M1} + \dots + I_{Mn}}{N},$ <p>$I_{M1} \dots I_{Mn}$ – показники мінералізації за кожним пунктом спостереження; N – кількість пунктів спостереження</p> <p>2) $I_{M \text{ max.}}$ – індекс за показниками мінералізації води (за сольовим складом) за максимальними значеннями.</p> <p>Знаходимо за найгіршим I_M відповідного пункту спостереження</p>
$I_{\text{троф.}}$ – індекс за показниками трофо-сапробіологічного стану води			
2	Водневий показник (рН) Вміст фосфору БСК ₅ Розчинений кисень мгО ₂ /дм ³ % насичення киснем (розрахунково) $O_{2,\%} = \frac{C_x \times 100}{C_0},$	<p><i>1 етап:</i> проводимо співставлення із критеріями за класом та категорією якості води за кожним показником.</p> <p><i>2 етап:</i> розраховуємо індекс трофо-сапробіологічного стану води ($I_{\text{троф.}}$) для кожного пункту спостережень за формулою:</p>	<p>Розраховуємо середні та максимальні значення індексу $I_{\text{троф.}}$</p> <p>1) $I_{\text{троф.сер.}}$ – індекс трофо-сапробіологічного стану води за середніми значеннями:</p> $I_{\text{троф.сер.}} = \frac{I_{\text{троф.1}} + \dots + I_{\text{троф.n}}}{N},$

	<p>C_x – концентрація кисню, визначена експериментально, $\text{мгО}_2/\text{дм}^3$; C_0 – нормальна концентрація кисню за певної температури та атмосферного тиску (760 мм рт.ст.), виміряної при взятті проб, $\text{мгО}_2/\text{дм}^3$</p> <p>Клас сапробності води. Визначається за показниками: прозорість води, O_2, % насичення води, БСК₅. Співставлення із класом сапробності</p>	$I_{\text{троф.1}} = \frac{\sum \text{категорій}_i}{n_i},$ <p>\sum категорій_{<i>i</i>} – сума категорій якості за <i>i</i> показником; n_i – кількість показників 3 етап: співставляємо отримані індекси $I_{\text{троф}}$ із критеріями за класом та категорією якості води</p>	<p>$I_{\text{троф.1}} \dots I_{\text{троф.}n}$ – показники трофо-сапробіологічного стану води за кожним пунктом спостереження; N – кількість пунктів спостереження 2) $I_{\text{троф.маx}}$ – індекс трофо-сапробіологічного стану води за максимальними значеннями – знаходимо за найгіршим $I_{\text{троф}}$ відповідного пункту спостереження</p>
$I_{\text{токс.}}$ – індекс за показниками з токсичною лімітуючою ознакою шкідливості			
3	<p>Вміст нітритного азоту (нітритів)</p> <p>Вміст амонійного азоту (амонію)</p> <p>Загальне залізо</p> <p>Мідь</p> <p>Цинк</p> <p>Свинець</p> <p>Кадмій</p>	<p>1 етап: проводимо співставлення наявних значень показників із їхнім гранично-допустимою концентрацією для води рибогосподарського призначення за формулою:</p> $x = \frac{C_i}{\text{ГДК}_i'}$ <p>C_i – наявна концентрація <i>i</i> показника у воді ГДК_{<i>i</i>} – гранично-допустима концентрація <i>i</i> показника у воді для рибогосподарських цілей. ГДК відповідали галузевому стандарту України – СОУ 05.01-37-385:2006 Вода сільськогосподарських підприємств. Загальні вимоги та норми 2 етап: проводимо визначення $I_{\text{токс.}}$ для кожного пункту спостереження за формулою:</p> $I_{\text{токс.}} = \frac{\sum x}{n},$ <p>x – значення за кожним <i>i</i> показником; n – кількість показників 3 етап: співставляємо отримані індекси $I_{\text{токс}}$ із критеріями за класом та категорією якості води</p>	<p>Розраховуємо середні та максимальні значення індексу $I_{\text{токс}}$</p> <p>1) $I_{\text{токс.сер.}}$ – індекс за показниками з токсичною лімітуючою ознакою шкідливості за середніми значеннями:</p> $I_{\text{токс.сер.}} = \frac{I_{\text{токс.1}} + \dots + I_{\text{токс.}n}}{N},$ <p>$I_{\text{токс.1}} \dots I_{\text{токс.}n}$ – показники за показниками з токсичною лімітуючою ознакою шкідливості за кожним пунктом спостереження; N – кількість пунктів спостереження 2) $I_{\text{токс.маx}}$ – індекс за показниками з токсичною лімітуючою ознакою шкідливості за максимальними значеннями – знаходимо за найгіршим $I_{\text{токс}}$ відповідного пункту спостереження</p>

Додаток В. Оптимальні значення показників якості води для рибогосподарських цілей (враховуючи особливості категорії риб як Коропові)

№	Показники	Одиниця вимірювання	Значення	Коротка характеристика для функціонування риб
1.	Вміст катіонів*:			
2.	Кальцій (Ca^{2+})	мгCa/дм ³	50,0-70,0	Вміст в межах від 50 до 60 мг/дм ³ може забезпечити гідробіонтам повноцінний ріст та розвиток. Кальцій є основним катіоном у водоймі Київського водосховища, оскільки вода належить до гідрокарбонатного класу групи кальцію ($\text{C}_{\text{п}}^{\text{Ca}}$). Високий вміст кальцію у воді підвищує буферні властивості водної системи і робить її більш стійкою до полютантів
3.	Магній (Mg^{2+})	мгMg/дм ³	30,0	Вміст магнію у воді водосховища в межах 30,0-50,0 мг/дм ³ може забезпечити нормальне функціонування
4.	Натрій (Na^{+})	мгNa/дм ³	50,0 ($\text{Na}^{+} + \text{K}^{+}$)	Середні значення вмісту їх становлять на рівні 35,0 та 55,0 мг/дм ³ , що є допустимими значеннями для гідробіонтів
5.	Калій (K^{+})	мгK/дм ³		
6.	Вміст аніонів*:			
7.	Гідрокарбонати (HCO_3^{-})	мг/дм ³	300,0-400,0	Аніонний склад водойми формують мінералізацію води та визначають групу та тип води. Для гіпо-та олігогалінних вод, оптимальними значеннями вважаються значення Cl^{-} до 75 мг/дм ³ , від 76 до 200 мг/дм ³ водойму вважають забрудненою, >200 мг/дм ³ – брудною. В більшості випадків вміст SO_4^{2-} є оптимальним до 100 мг/дм ³ , від 101 до 200 мг/дм ³ водойму вважають забрудненою, >200 мг/дм ³ – брудною
8.	Хлориди (Cl^{-})	мг/дм ³	50,0-70,0	
9.	Сульфати (SO_4^{2-})	мг/дм ³	50,0-70,0	
10.	Вміст біогенних речовин*:			
11.	Азот амонійний (NH_4^{+})	мгN/дм ³	≤1,0	Показники, які є індикаторами антропогенного навантаження – біогенного забруднення води (від точкових джерел – стоки від підприємств, дифузних – поверхневі стоки від с.г. територій, сільського населення, ерозії), що посилює процеси евтрофікації водойми. Відносно невеликі концентрації їх можуть викликати гостре отруєння риб. Вони є отрутами для риб комбінованої дії, призводячи до нервово-паралітичної зміни органів та подальшої загибелі популяції риб. За концентрації NH_4^{+} – 0,5 мгN/дм ³ кількість мертвої ікри коропа становила до 80%. Загалом, стан водойми вважається задовільним для гідробіонтів та всіх живих організмів (без речовин наявного забруднення), якщо значення показників знаходяться в межах: NH_4^{+} – 0,10-0,50 мгN/дм ³ , NO_3^{-} – 0,20-0,70 мгN/дм ³ , NO_2^{-} – 0,002-0,02 мгN/дм ³ , PO_4^{3-} – 0,015-0,1 мгN/дм ³ .
12.	Азот нітратний (NO_3^{-})	мгN/дм ³	≤2,0	
13.	Азот нітритний (NO_2^{-})	мгN/дм ³	0,1	
14.	Фосфати (PO_4^{3-})	мгP/дм ³	0,5	

15. Показники кисневого балансу*:				
16.	БСК ₅	мгО ₂ /дм ³	<3,0	Показник, який є індикатором наявності органічних речовин у воді, які сприяють швидкому розмноженню аеробних бактерій (чим більший його вміст – тим більша кількість органічних речовин). Завищені значення можуть зумовити дисбаланс кисню, зменшуючи його у воді, чим самим створити гіпоксичні умови для риб. Найбільш оптимальними для природної водойми є значення БСК ₅ в межах 0,5-2,0 мгО ₂ /дм ³ , що відповідають нормальному розмноженню популяції риб. Водойма вважається не забрудненою органічними речовинами, якщо вміст БСК ₅ становить до 1,6
17.	Концентрація розчиненого кисню	мгО ₂ /дм ³	>5,0	Показник який є індикатором аеробного дихання риб (підтримка метаболізму та росту, функціонування гідробіонтів) та біологічної активності (фотосинтезу) живих організмів у воді. Концентрація його залежить від температурних режимів води й повітря, атмосферного тиску та сезонності. Різні категорії риб по різному реагують на кількість розчиненого кисню у воді (холодноводні риби як лососеві вимагають більшої концентрації для їхнього існування – більше 9 мгО ₂ /дм ³ ; тепловодні риби як коропові є менш вибагливими, можуть нормально себе почувати з концентрацією від 5,0 мгО ₂ /дм ³). Якщо концентрація показника сягає нижче 5-6 мгО ₂ /дм ³ для холодноводних і нижче 2 мгО ₂ /дм ³ для тепловодних – гідробіонти можуть перейти в стан гіпоксії, що загрожує втраті їх чисельності.
18. Вміст важких металів – токсичних речовин:				
19.	Мідь (Cu)***	мкгCu/дм ³ – мгCu/дм ³	1,0 - 0,01	Важкі метали, що є показниками, які відносяться до індикаторів хімічного забруднення води небезпечними токсичними речовинами (джерелом надходження є недостатньо очищені або неочищені стічні води від господарств та підприємств). Наявність навіть незначної концентрації важких металів у природній водоймі може бути токсичною для гідробіонтів. Вони можуть виступати канцерогенами (отруйними речовинами) для риб.
20.	Цинк (Zn)***	мкгZn/дм ³ – мгZn/дм ³	10,0 - 0,10	
21.	Свинець (Pb)**	мкгPb/дм ³ – мгPb/дм ³	10,0 - 0,10	
22.	Кадмій (Cd)**	мкгCd/дм ³ – мгCd/дм ³	0,5 - 0,005	
23.	Залізо (Fe)**	мкгFe/дм ³ – мгFe/дм ³	10,0 - 0,10	

*Оптимальні значення відповідно до галузевого стандарту СОУ 05.01–37–385:2006 [58]; **Оптимальні значення відповідно до нормативів водойм що оцінюються для рибогосподарського призначення [28-29]; ***Оптимальні значення відповідно до нормативів рибогосподарських водойм [57]

Додаток Г. Обґрунтування та розрахунок індексів якості води при оцінюванні води для зрошення

	Показники для оцінювання	Умови виконання	Зведена оцінка	
Оцінювання води для зрошення				
Екологічні показники: з метою попередження негативного впливу на с.г. рослини та ґрунти			При оцінці води для зрошення виділяють 2 класи води: I клас – придатна для зрошення II клас – обмежено придатна для зрошення	
1	Методика: ДСТУ 7286:2012 Якість природної води для зрошення. Екологічні критерії (Відомчий нормативний документ (ВНД) 33-5.502-97 Вода для зрошення. Екологічні критерії)	Проводимо співставлення із визначеними критеріями води для зрошення відповідно до відомчого нормативного документа. Визначаємо клас якості води		
	Мідь (Cu), мгCu/дм ³			I клас – менше 0,08 мг/дм ³ II клас – 0,08-0,2 мг/дм ³
	Цинк (Zn), мгZn/дм ³			I клас – менше 0,5 мг/дм ³ II клас – 0,5-1,0 мг/дм ³
	Свинець (Pb), мгPb/дм ³			I клас – менше 0,02 мг/дм ³ II клас – 0,02-0,05 мг/дм ³
	Кадмій (Cd), мгCd/дм ³	I клас – менше 0,005 мг/дм ³ II клас – 0,005-0,01 мг/дм ³		
Агрономічні показники: з метою визначення осолонцювання ґрунтів, погіршення родючості ґрунтів, погіршення технологій вирощування с.г. культур				
2	Методика: 1. Мінералізація – за ДСТУ 2730:2015 Захист довкілля. Якість природної води для зрошення. Агрономічні критерії	Проводимо співставлення із визначеними критеріями води для зрошення відповідно. Визначаємо клас якості води	I клас – придатна для поливу II клас – обмежено придатна для поливу III клас – непридатна для поливу	
	Загальний вміст солей, мг/дм ³		I клас – менше 400,0 мг/дм ³ II клас – 400,0-1000,0 мг/дм ³ III клас – 1000,0-3000,0 мг/дм ³	
3	Методика: 2. Показник SAR (натрієво-абсорбційне співвідношення) – розроблений департаментом сільського господарства США	1 етап: для кожного пункту спостереження розраховуємо показник SAR за формулою: $SAR = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]}{2}}}$ 2 етап: визначаємо тип води	Ранжування величини SAR та визначення типів води: 0-10: слоболужні з малою небезпекою осолонцювання; 10-18: середньолужні з середньою небезпекою осолонцювання; 18-26: сильнолужні з високою небезпекою осолонцювання; >26: сильнолужні з дуже високою небезпекою осолонювання	
	Na^+ мекв/дм ³ (ммоль/дм ³)			
	Ca^{2+} мекв/дм ³ (ммоль/дм ³)			
	Mg^{2+} мекв/дм ³ (ммоль/дм ³)			

Додаток Д. Обґрунтування та розрахунок Індекс Якості Води – WAWQI при оцінюванні води для питних цілей

Показники	Умови виконання	Зведена оцінка		
Оцінювання води для питних та культурно-побутових цілей				
<p>Ваговий арифметичний Індекс Якості Води – WQI (WAWQI – Weighted Arithmetic Index methods for Water quality)</p> <p>Метод зваженого арифметичного індексу якості води (WAWQI) класифікує якість води відповідно до ступеня чистоти, використовуючи параметри якості води, які найбільш суттєво впливають на якість води для питних та рекреаційних цілей. На відміну від інших індексів якості води, ця методика дозволяє використовувати показники які нам потрібні для оцінювання. Методика передбачає використання 9 найбільш вагомих показників.</p>	<p><i>1 етап:</i> розрахунок одиничних вагових коефіцієнтів (W_n) для кожного показника за формулою:</p> $W_n = \frac{K}{S_n},$ <p>W_n – ваговий фактор для кожного n параметра S_n – стандартне значення n параметрів якості води. K – константа пропорційності.</p> <p>Для розрахунку константи пропорційності (K) використовуємо формулу:</p> $K = \frac{1}{1/S_1 + 1/S_2 + 1/S_3 \dots + 1/S_n} = \frac{1}{\sum \frac{1}{S_n}},$ <p>$S_1 \dots S_n$ – стандартні значення параметрів $1 \dots n$.</p> <p>Важливою умовою при розрахунку вагового коефіцієнту $\sum W_n = 1$ для всіх показників.</p> <p><i>2 етап:</i> визначення рейтингу якості для n-го параметра якості води (Q_n) за формулою:</p> $Q_n = \frac{[(V_n - V_0)]}{[(S_n - V_0)]} * 100,$ <p>Q_n – рейтинг якості для n-го параметра якості води. V_n – фактичне значення n-го параметра. V_0 – ідеальне значення n-го параметра в чистій воді. S_n – стандартне значення n-го параметрів якості води.</p> <p>Згідно з методикою значення $V_0 = 0$ для всіх показників окрім рН та вміст розчиненого кисню. $V_0 = 0$ означає, що забруднення у воді відсутнє, всі параметри відповідають нормативам. Проте для таких показників як рН води та вміст розчиненого кисню – згідно методики дане значення потрібно</p>			
<p>Методика: розроблена американськими вченими (Brown et. all) і широко використовується у світі оцінюючи якість води для питних цілей. Brown, R. M., McClelland, N. I., Deminger, R. A., O'connor, M. F. (1972). A Water Quality Index – crashing the Physiological Barrier. Indic Environ Qual, 1, 173–182. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4684-2856-8_15</p>				
	Визначені показники якості води	Дані для розрахунку WQI		
		S_n – стандартне значення	W_n – ваговий фактор	V_0 – ідеальне значення
1	Каламутність	Не більше 1,0	0,40326	0
2	pH	8,5	0,04744	7
3	NH_4^+ , мг NH_4^+ /дм ³	2,0	0,20163	0
4	NO_3^- , мг NO_3^- /дм ³	45,0	0,00896	0
5	NO_2^- , мг NO_2^- /дм ³	3,3	0,12220	0
6	PO_4^{3-} , мг PO_4^{3-} /дм ³	3,5	0,11522	0

7	Загальний вміст солей, мг/дм ³	До 1000	0,00040	0	<p>розраховувати, враховуючи умови, що V_0 для рН становить 7,0, V_0 для параметра розчиненого кисню становить – 14.</p> <p>3 етап: розрахунок загального індексу якості води (WAWQI)</p> $WQI = \frac{\sum W_n * Q_n}{\sum W_n}$ <p>Q_n – рейтинг якості або субіндекс для n-го параметра якості води W_n – ваговий фактор для кожного n параметра</p> <p>Ранжування індексу: WQI – 0-25 – відмінна якість води (клас А); WQI – 25-50 – добра якість води (клас В); WQI – 51-75 – низька якість води (клас С); WQI – 76-100 – дуже низька якість води (клас D); WQI > 100 – найгірша якість води (клас E)</p>
8	Розчинений кисень, мг/дм ³	Не менше 4,0	0,10081	14	
9	Індекс лактопозитивних кишкових паличок в 1дм ³ води (E.coli)	До 5000	0,00008	0	

Додаток Е. Обґрунтування та розрахунок інтегрального індикатора якісного та кількісного стану водойми – індикатора водного дефіциту води (WSq)

Показники		Умови виконання		Пояснення та зведена оцінка	
Індикатор водного дефіциту води <i>WSq</i> (<i>Water Scarcity including quality</i>)					
<p>Визначення інтегрального індикатора якісного та кількісного стану водойми – індикатора водного дефіциту води <i>WSq</i> (<i>Water Scarcity including quality</i>). Індикатор дозволяє визначити дефіцит якісної води для різних видів водокористування та для самої водної екосистеми, враховуючи кількісну та якісну характеристику водойми.</p> <p>Індикатор <i>WSq</i> розраховує кількісно величину доступної води з врахуванням найгіршого показника що може спричинити погіршення якості води. Він досить широко використовується науковцями в екологічних дослідженнях з управління та менеджменту водними ресурсами в європейських країнах.</p>				$WSq = \frac{\sum_{j=1}^n (D_j + dq_{ij})}{Q}$ <p>D_j – загальне споживання води за сектором j (видом водокористування), визначається для кожного виду водокористування окремо (км³/рік).</p> <p>$dq_{i,j}$ – додаткова кількість чистої води, яка необхідна для розбавлення забрудненої води до відповідної якості води для сектора j (виду водокористування) з урахуванням забруднювача i (км³/с), розрахункова величина</p> <p>Q – загальна кількість води у водному об'єкті (літературні та статистичні дані)</p>	
<p>Методика: методика розрахунку індикатора водного дефіциту розроблена європейськими вченими (van Vliet, M.T. et. all, 2017). van Vliet, M. T., Flörke, M., & Wada, Y. (2017). Quality matters for water scarcity. Nature Geoscience, 10(11), 800-802. URL: https://www.nature.com/articles/ngeo3047</p>				<p><i>1 етап</i>: визначення показників якості води (q) за кожним видом водокористування та для водної екосистеми, які найбільш суттєво впливають на якість води та їхнє обґрунтування. Для обґрунтування використовуємо попередню оцінку якості води для різних видів водокористування</p> <p><i>2 етап</i>: розраховуємо показник $dq_{i,j}$ для кожного виду водокористування та загальне споживання води за певним сектором (видом водокористування) D_j.</p> <p>Показник $dq_{i,j}$ розраховується на основі стандарту певного показника якості води за формулою</p>	
1 етап					
Потреби / водокористування		Метод оцінки	q – показник якості води	Обґрунтування	
1	Водна екосистема (загалом)	I_E	БСК ₅ , мгО ₂ /дм ³	Індикатор органічного забруднення	
2	Водойма рибогосподарського призначення	$I_E + \text{ЛОШ}$	Розчинений кисень, мгО ₂ /дм ³	Забезпечує аеробні властивості риб	
3	Вода для зрошення	SAR, заг.вміст солей	Загальний вміст солей, мг/дм ³	Індикатор осолонцювання ґрунтів	
4	Вода для питних та культурно-побутових цілей	WAWQI	E-Coli	Показник епідемічної безпеки води	

$$dq_{i,j} = \begin{cases} 0, & C_i \leq C_{\max i,j} \\ \left(\frac{Q * C_i}{C_{\max i,j}} - Q \right), & C_i > C_{\max i,j} \end{cases}$$

C_i – фактична концентрація i показника якості води для певного сектору (виду водокористування) (одиниця вимірювання залежить від розглянутого параметра якості води).

2 та 3 етапи							
	Потреби / водокористування	Величини для обрахунку					WSq.j
		Q	Dj	Ci	Сmaxi,j	dqi,j	
1	Водна екосистема (загалом)	3,7	1,20	24,10	1,6	52,0	14,39
2	Водойма рибогосподарського призначення	3,7	1,20	3,27	5,0	1,28	0,67
3	Вода для зрошення	3,7	0,19	340,67	400,0	0	0,05
4	Вода для питних та культурно-побутових цілей	3,7	0,08	2767,0	5000	0	0,02

$S_{maxi,j}$ – максимальне (нормативне) значення i показника якості води для певного сектору (виду водокористування) (одиниця вимірювання залежить від розглянутого параметра якості води).
 Q – загальна кількість води у водному об'єкті (км³).
 Якщо концентрація i показника (забруднювача) не перевищує встановленим нормативним значенням, $dqi,j = 0$.
 Якщо концентрація i показника (забруднювача) перевищує встановлені нормативні значення, розрахунок dqi,j проводимо за формулою вище.
 Якщо за умовами якості води вважається кращою якщо концентрація i показника перевищує нормативне значення, тоді проводимо розрахунок dqi,j як для умови – $Ci > S_{maxi,j}$, використовуючи формулу вище.
 Dj – загальне споживання води за сектором j (видом водокористування), визначається для кожного виду водокористування окремо в км³/рік (літературні та статистичні дані)
 3 етап: розраховуємо індикатор водного дефіциту

$$WSq = \frac{\sum_{j=1}^n (Dj + dq_{ij})}{Q}$$

Ранжування WSq: 0-0,2 – низький рівень дефіциту якісної води; 0,2-0,4 – середній рівень дефіциту; 0,4-0,6 – високий рівень дефіциту; більше 0,6 – дуже високий рівень дефіциту якісної води для певного виду водокористування.