

ІНДЕКСИ ЯКОСТІ ВОДИ: АДАПТАЦІЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ ДЛЯ УКРАЇНИ

Заленська Є.А., Войтенко Л.В.

Національний університет біоресурсів і природокористування України
вул. Героїв Оборони, 15, 03041 м. Київ

voitenko@nubip.edu.ua

Традиційна методологія оцінювання якості водних ресурсів для конкретного виду водокористування чи водоспоживання базується на порівнянні експериментально визначених значень параметрів з існуючими нормативами, наприклад, у вигляді ГДК. Але такий підхід не дає можливості оцінити якість води в цілому. Тому, починаючи із 1970-х років, у світову та європейську практику оцінювання екологічного стану водних об'єктів стали широко впроваджуватися індекси якості води (ІЯВ). Це – зручні комунікаційні моделі та інструменти для екологічного моніторингу, оцінювання рівня та періодичності антропогенного забруднення, прогнозування впливу змін клімату, які дозволяють «згорнути» багатопараметричні дані в один результат, зрозумілий навіть нефакхівцеві. Основна перевага інтегральної оцінки якості води – коректне узагальнення окремих критеріїв з метою оцінювання придатності використання води джерела для певного виду водоспоживання чи водокористування. Запропоновано методологію розрахунку та розроблено програмний продукт для визначення ІЯВ для різних водоспоживачів з урахуванням українських нормативів у області водних ресурсів. Математичний апарат побудовано на використанні функції бажаності Харрінгтона. Аналіз часткових бажаностей окремих параметрів дає можливість визначити причину зниження загальної оцінки якості – внаслідок впливу сезонних гідрохімічних факторів чи через антропогенне забруднення. На прикладі обробки моніторингових даних питного водозабору м. Біла Церква із річки Рось, розташованого у с. Глибочка Білоцерківського району, показано використання методики ІЯВ для питних цілей та риборозведення. Встановлено, що у літньо-осінній період критично низькою є часткова бажаність параметру ХСК (перманганатної окисності), що робить вододжерело по суті непридатним для питного водопостачання. Проте за шкалою оцінювання якості для риборозведення такого критичного зменшення ІЯВ не виявлено. Аналіз часткових бажаностей виявив факти потрапляння скидів, що містять ртуть на кадмій, які не можна пояснити природними процесами. *Ключові слова:* якість води, функція бажаності Харрінгтона, водоспоживання, водопостачання, нормативи якості.

Water quality indices: adaptation and application for Ukraine. Zalenska Ye., Voitenko L.

The traditional methodology of water quality for a specific type of water use or water consumption is based on a comparison of experimentally determined parameter values with existing standards, for example, in the form of maximum permissible concentrations (MPC). But this approach does not provide an opportunity to assess water quality as a whole. Therefore, since the 1970s, water quality indices (WQI) have been widely introduced into the worldwide and European practice of assessing water bodies' ecological state. These are convenient communication models and tools for environmental monitoring, assessing anthropogenic pollution level and frequency, and forecasting the impact of climate change, which allow you to “collapse” multiparameter data into one result that is understandable even to a non-specialist. The main advantage of the water quality integral assessment is the correct generalization of separate criteria to assess the suitability of using source water for a certain type of water consumption or water use. We have developed a mathematical model and a Python software product for determining the WQI for various water consumers, taking into account Ukrainian regulations in the field of water resources. The mathematical apparatus was built on the use of Harrington's desirability function. The analysis of individual parameters' partial desirability makes it possible to detect the reason for overall quality assessment decreasing – due to the influence of seasonal hydrochemical factors or as a result of anthropogenic pollution. In the example of processing monitoring data of the Bila Tserkva drinking water intake from the Ros River, located in the village of Hlybochka, Bilotserkiv district, the application of the WQI techniques for drinking purposes and fisheries was shown. It has been established that in the summer-autumn period, the partial desirability of the COD (permanganate index) is critically low, which makes the water source essentially unsuitable for drinking water supply. However, according to the quality assessment scale for fisheries, such a critical reduction of WQI was not detected. The analysis of partial desirability revealed the occurrence of discharges containing mercury and cadmium, which cannot be explained by natural processes. *Key words:* water quality, Harrington's desirability function, water consumption, water supply, quality standards.

Постановка проблеми. Концепція використання узагальнених індексів якості не є новою ідеєю. Вони використовуються у економіці (наприклад, індекс Доу-Джонса). В екології їх застосовують для оцінки біорізноманіття, видового складу (індекси Шеннона, Сімпсона), в медицині – для оцінювання загального стану здоров'я [1], в соціології [2], педагогіці [3] тощо. Індекс якості

являє собою об'єднання різнорідних за своєю природою, розмірністю, масштабами впливу на систему факторів впливу в одну чисельну величину, в тому числі для оцінювання якості природних вод [4, 5].

Актуальність питання. Індеси якості води (ІЯВ, англ. WQI) одержали розповсюдження протягом останніх десятиліть, хоча саму ідею вперше

вивловлено понад 150 років назад у Німеччині. Через чисельність, присутність або відсутність певних видів водної біоти оцінювали якість вододжерела для питного водопостачання [6]. Надалі відбулося стрімке зростання кількості наукових досліджень у цій області. Це доводить мета-аналіз кількості публікацій у базі даних WoS Core Collection, яка включає понад 21 000 рецензованих журналів із більше 250 країн світу. Аналіз динаміки кількості публікацій протягом 2013–2022 рр. наведено на рис. 1.

Перелік рубрик надзвичайно широкий – більше 200. Найбільше – у рубриці наук про довкілля, потім – водні ресурси та харчові технології. Цікаво, що 2318 опублікованих досліджень за вказаний період профінансовано Національною фундацією природничих наук Китаю (NSFC), 510 – Європейською Комісією.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Тематика дослідження відповідає напрямкам наукової діяльності та дисертаційних досліджень кафедри аналітичної і біонеорганічної хімії та якості води Національного університету біоресурсів і природокористування України.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Моніторинг водного середовища внаслідок його мінливості в часі та просторі, – складна багатоконпонентна задача. Тому за допомогою ІЯВ науковці прагнуть здійснити «укрупнення», перетворити бази даних моніторингу в один показник, виражений у безрозмірній якісній кваліметричній шкалі (дуже добре – добре – задовільно – погано – дуже погано) або у відсотках за 100-бальною шкалою [4–8]. Це – науково обгрунтовані комунікаційні моделі, які дозволяють дати відповідь на просте запитання споживача – яка за якістю вода для задоволення питних потреб, зрошення, рекреації тощо. Історично першою була шкала інтегральної оцінки води, розроблена в 1965 р. Хортоном, де відбір параметрів якості та їхні вагові коефіцієнти визначили методом Делфі – через опитування експертів [9]. Наразі методика значно розширена та удосконалена, особливо із появою

нових інструментів – методів «неявної» логіки, ГІС-технологій, нейромереж тощо. Модифікації ІЯВ прийнято у якості регіональних та державних стандартів в США в цілому та в окремих штатах, Канаді, Індії, Британії, Польщі та ін. Найбільш повно стан питання викладено в монографії [6], яка включає класифікацію ІЯВ, аналіз методологічних протиріч, опис програмних продуктів, методи використання ІЯВ. Робота [10] цікава описом ГІС-інтегрованої технології інтегральної оцінки води для зрошення. Автори [11] вказали на організаційно-методологічні проблеми використання ІЯВ у якості інструмента оцінки води через відсутність загальновизнаної методики покрової розробки. Вибір параметрів, величин вагових коефіцієнтів, методів генерації підіндексів та їхньої агрегації тощо – це авторські методики, які мають як переваги, так і недоліки. Так, в статті [12] автор виконала порівняльний аналіз ІЯВ річки Губісцкалі в Грузії. Підсумок дещо шокуючий: оцінка однієї й тієї ж води коливалася від «доброї» до «незадовільної» залежно від використаної методики.

Невирішені частини загальної проблеми.

В Україні для узагальненого оцінювання питної води діє комплексний показник ІЗВ (індекс забрудненості води) (ДСанПіН 2.2.4-171-10, ДСТУ 4808:2007). Проте його розрахунок включає лише вміст речовин I та II класу небезпеки, агрегація результатів проводиться у вигляді середнього арифметичного. Його інформативність низька. Існуюча методика екологічної оцінки якості поверхневих вод за категоріями [13] непридатна для конкретного виду водоспоживання. В [14] показано, що досвід її використання виявив ряд системних проблем. В 2012 р. методику значно ускладнили, намагаючись більш повно визначити біотичний індекс [15]. Проте знову ж таки він принципово непридатний для оцінки води з точки зору конкретного водоспоживача. Отже, аналіз попередніх досліджень засвідчив, що розроблення ІЯВ, орієнтованих на національну нормативну базу в галузі різних типів водопостачання та водокористування для риборозведення, вирощування продукції

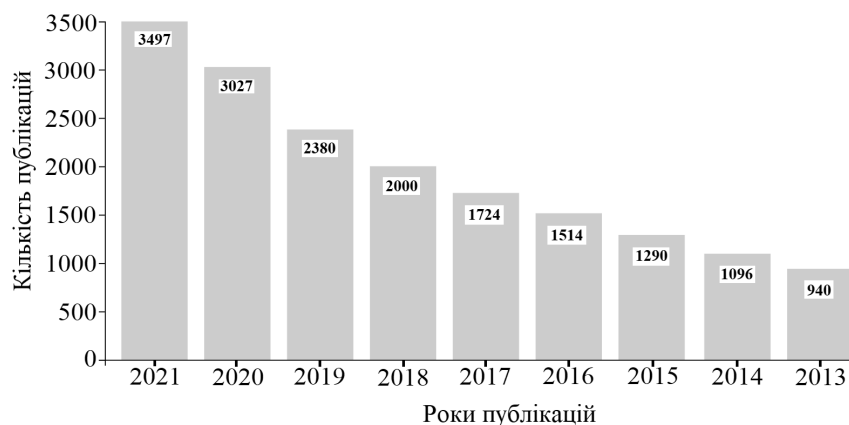


Рис. 1. Аналіз публікаційної активності за запитом “Water Quality Index” (Індекс якості води) протягом 2013–2021 рр. у базі даних WoS Core Collection

на зрошуваних землях, тваринництва, птахівництва, є актуальною науковою та практичною проблемою. Аналогів в Україні наразі немає.

Новизна полягає в розробленні концепції комплексного оцінювання водних ресурсів. Гіпотеза полягає в тому, що якість води можна виразити у вигляді інтегрального показника – узагальненої функції бажаності Харрінгтона, який, на відміну концепції WQI, базується не на суб'єктивних експертних оцінках, а на нормативних вимогах. Використовуючи його, можна спрогнозувати можливі перешкоди і дати науково обґрунтовані рекомендації щодо організації виробництва та придатності вододжерел для задоволення питних потреб людини, тварин та птиці, зрошення, риборозведення та ін.

Методологічне значення. В цілому підхід до розробки концепції ІЯВ [5] описується наступними чотирма кроками:

1. Вибір параметрів: проводиться професійними експертами, агенціями чи державними установами, які визначають законодавче поле. Як правило, рекомендують вибір змінних із 5 класів: вміст розчиненого кисню, показники евтрофікації, гігієнічні, екологічні аспекти тощо. Ми пропонуємо усунути суб'єктивність визначення переліку параметрів складу та властивостей води і включити ті, які представлено у відповідних нормативних документах України стосовно водоспоживання різного призначення: ДСТУ 4808:2007 Джерела централізованого питного водопостачання, Гігієнічні та екологічні вимоги щодо якості води та правила вибирання; ДСТУ 2730:2015 Захист довкілля. Якість природної води для зрошення. Агрономічні критерії; ВНД

33-5.5-02-97 Вода для зрошення. Екологічні критерії; СОУ 41.00-37-422:2006 Води поверхневі і підземні. Рекомендації по використанню в тваринництві і птахівництві; СОУ 05.01-37-385:2006 Вода рибогосподарських підприємств. Загальні вимоги та норми.

2. Визначення вигляду кривої функції якості кожного параметру, який має різний фізичний зміст та одиниці вимірювання, та трансформації його в безрозмірні шкали. Ми пропонуємо використати для цього криву бажаності функції Харрінгтона [16].

3. Складання шкал бажаності – це елемент, який викликає найбільше критики щодо критеріїв розподілу за категоріями від «дуже добре» до «незадовільно». Ми базувалися на нормативних документах та виходячи із міркувань, пов'язаних, із відносною точністю аналітичних визначень для високотоксичних сполук (наприклад, важких металів, хлороорганічних сполук).

4. Агрегація підіндексів через математичне перетворення. Найбільш часто використовують розрахунок середнього арифметичного чи середнього геометричного [5, 6]. Ми пропонуємо агрегацію у вигляді середнього геометричного відповідно до узагальненої функції бажаності Харрінгтона.

Методологія розрахунку ІЯВ для різних видів водокористування та водоспоживання втілена у вигляді Python програмного продукту “WODA” (Water Of Different Application), за допомогою якого розрахунок ІЯВ зводиться до введення обраних користувачем параметрів води, обираючи ним виду водоспоживання та одержання чисельної відповіді у вигляді ІЯВ за 100-бальною шкалою та словесного опису категорії води (рис. 2).

The screenshot shows the WQC v.0.2 Alpha software interface. It features a list of water quality parameters on the left, a central table for data entry and calculation, and a summary table on the right. The interface is in Ukrainian.

№	Назва:	Виміряне значення:	Часткова бажаність (di):
1	Забарвленість [Pt/Co]	12	Дуже добре (100.00 %)
2	Каламутність [мг/л]	1	Дуже добре (100.00 %)
3	Сухий залишок (загальна мінералізація) [мг/л]	780	Добре (72.00 %)
4	Сульфати [мг/л]	34	Дуже добре (100.00 %)
5	Хлориди [мг/л]	24	Дуже добре (100.00 %)
6	Магній [мг/л]	34	Добре (71.00 %)
7	Загальна твердість [ммоль/л]	6	Задовільно (51.00 %)
8	Лужність (карбонатна твердість) [ммоль/л]	3.3	Добре (69.00 %)
9	Азот нітритний N-NO2 [мг/л]	0.12	Задовільно (61.00 %)
10	Азот нітратний N-NO3 [мг/л]	2.4	Дуже добре (100.00 %)
11	Азот амонійний N-NH4 [мг/л]		На межі допустимості

Підсумкова оцінка якості: **Дуже добре (80.17 %)**

Рис. 2. Загальний вигляд інтерфейсу програми та приклад оцінювання якості питної води для споживання людиною

Таблиця 1

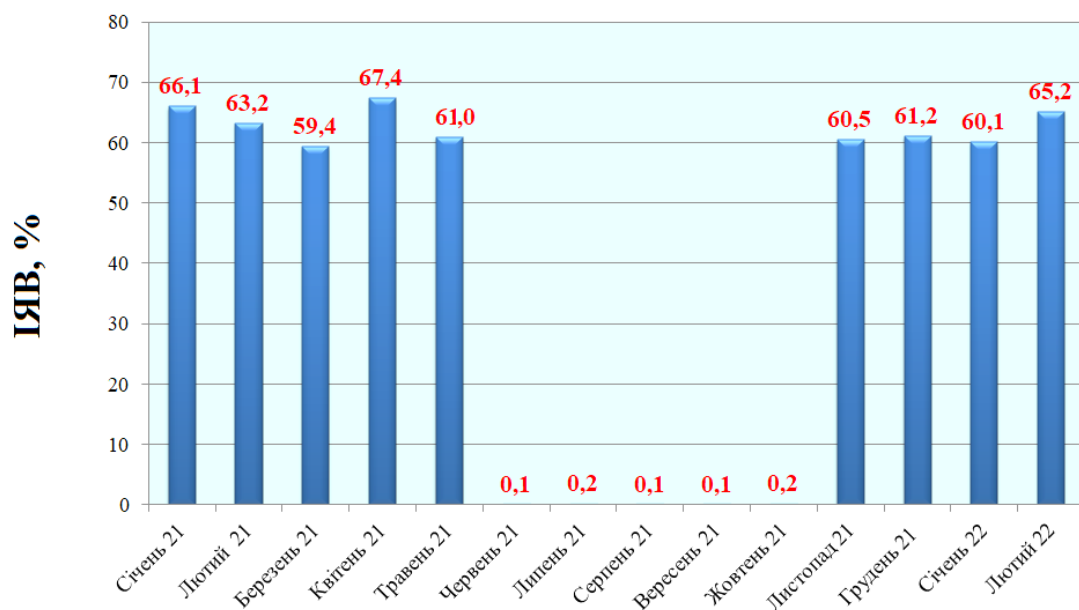
Дані моніторингу складу та властивостей проб води, відібраних на посту спостереження
у с. Глибочка Білоцерківського району (питний водозабір м. Біла Церква)

Показник складу та властивостей води	Встановлені значення													
	Січень 2021	Лютий 2021	Березень 2021	Квітень 2021	Травень 2021	Червень 2021	Липень 2021	Серпень 2021	Вересень 2021	Жовтень 2021	Листопад 2021	Грудень 2021	Січень 2022	Лютий 2022
рН, одиниці рН	8,1	8,4	8,4	8,5	8,0	8,2	8,9	8,7	9,2	7,6	8,7	8,4	8,4	8,4
Кольоровість, градуси Со/Рт шкали	12,0	11,5	13,0	12,0	13,2	16,4	15,9	13,0	11,8	10,4	11,8	14,7	12,4	12,4
Розчинений кисень, мг/дм ³	10,7	11,6	9,9	10,8	9,2	8,4	9,0	8,5	7,0	11,5	9,7	10,5	12,5	10,8
Сухий залишок, мг/дм ³	414	356	438	367	420	452	410	329	305	375	386	384	437	433
Фосфор фосфатів, P-PO ₄ ³⁻ , мг P/дм ³	0,052	0,045	0,015	0,016	0,074	0,126	0,041	0,090	0,068	0,019	0,016	0,026	0,039	0,042
Азот амонійний, N-NH ₄ ⁺ , мг N/дм ³	0,257	0,198	0,443	0,397	0,257	0,832	0,226	0,778	0,475	0,210	0,420	0,506	0,272	0,291
Азот нітритів, N-NO ₂ ⁻ , мг N/дм ³	0,009	0,007	0,002	0,007	0,009	0,066	0,007	0,007	0,009	0,007	0,007	0,009	0,018	0,018
Азот нітратів, N-NO ₃ ⁻ , мг N/дм ³	0,79	0,73	0,49	0,24	0,30	0,55	0,64	0,30	0,21	0,46	0,33	0,67	0,73	1,31
ХСК, мг O/дм ³	20,3	23,9	24,7	20,7	23,8	35,2	28,9	30,4	50,0	47,1	26,1	27,9	25,3	22,0
БСК ₅ , мг O/дм ³	2,0	2,2	3,3	3,3	2,5	3,0	3,0	3,3	12,9	12,1	2,0	2,0	1,8	2,1
Запізо загальне, мг/дм ³	0,10	0,11	0,14	0,23	0,33	0,35	0,40	0,46	0,42	0,19	0,13	0,17	0,10	0,11
Марганець, мг/дм ³	0,07	0,05	0,05	0,05	0,09	0,10	0,05	0,05	0,20	0,05	0,05	0,05	0,04	0,06
Кадмій, мг/дм ³	-	-	-	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0051	0,0004	0,0044	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004
Свинць, мг/дм ³	-	-	-	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Ртуть, мг/дм ³	-	-	-	-	0,000007	0,000007	0,00025	0,00030	0,000077	0,00030	0,00053	0,000033	0,00129	0,000007

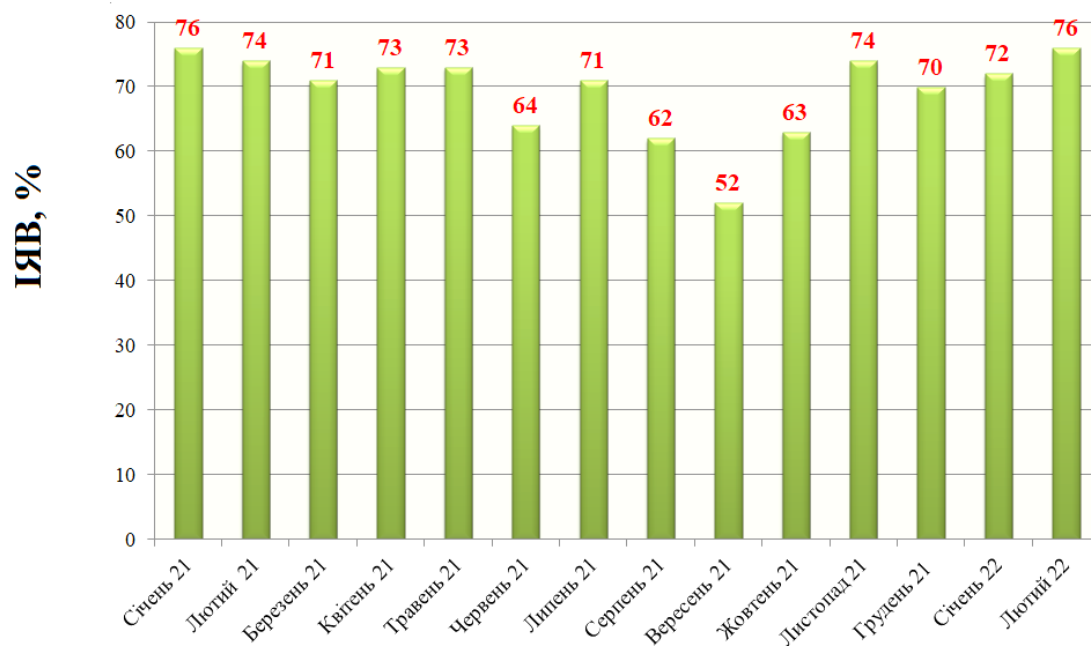
Викладення основного матеріалу. Оцінювання якості поверхневої води для різних видів водоспоживання проведено з використанням даних регіонального офісу водних ресурсів в басейні р. Рось протягом січня 2021 – лютого 2022 р., які знаходяться у вільному доступі. Відбір проб води здійснювали щомісячно у пункті спостереження 218 км, с. Глибочка Білоцерківського району, питний водозабір м. Біла Церква (табл. 1).

На рис. 3 показано, як змінюється значення ІЯВ протягом вказаного періоду для одних і тих же проб

води, проте оцінених з точки зору вимог для різних видів водоспоживання: А – для питного водозабору та Б – для риборозведення. Власне, вся наша робота і ставила метою продемонструвати, що якість води – не абсолют, вона повинна оцінюватися по-різному. Так, більшість первинних методик ІЯВ оцінювала якість води з точки зору еколога, якого хвилює проблема функціонування водних екосистем. Тому і відбиралися такі показники складу і властивостей води, які є визначальними для водних екосистем. Самий яскравий приклад – для еколога, фахівця з риборозве-



А



Б

Рис. 3. Порівняння сезонної динаміки ІЯВ для питного водопостачання (А) та для риборозведення (Б) за запропонованою методикою

дення головні показники – вміст розчиненого кисню, температура, показники евтрофікації, тоді як для питного водопостачання вміст розчиненого кисню не має принципового значення і не нормується взагалі.

Аналізуючи дані, представлені на рис. 3, виникає закономірне питання – чому настільки різоче відрізняється оцінка якості води в літньо-осінній період. Судячи із величини ІЯВ для питних цілей (рис. 3А),

протягом червня-жовтня вода непридатна для вибирання, тоді як для риборозведення, хоч і спостерігається суттєве погіршення якості (рис. 3Б), але не настільки критичне. Для відповіді слід проаналізувати дані щодо величин часткових бажаностей d_i для окремих параметрів (табл. 2, 3).

Порівняння результатів, наведених в табл. 2 та 3, свідчить про те, що критичним для питного

Таблиця 2

Оцінювання показників якості води для питного водозабору

Місяць, рік	ІЯВ, %	Критичні значення часткових бажаностей d_i , % (категорія – задовільно (67%) та нижче)						
		ХСК	Марганець	Азот амонійний	Залізо загальне	Свинець	Кадмій	Ртуть
01,21	66	8	62			*	*	*
02,21	63	3	63			*	*	*
03,21	59	2	63	62		*	*	*
04,21	67	7	63	63	62	63		
05,21	61	3	61		62	63		
06,21	0,1	0,1	60	56		63		
07,21	0,2	0,2	63		57	63		20
08,21	0,1	0,1	63	57	57	63	63	
09,21	0,1	0,1	63	62	57	63		
10,21	0,2	0,2	63			63		
11,21	60	1	61	63		63		
12,21	61	1	62	61		63		
01,22	60	2	63			63		34
02,22	65	5	63			63		

* – дані відсутні

Таблиця 3

Оцінювання показників якості води для риборозведення

Місяць, рік	ІЯВ, %	Критичні значення часткових бажаностей d_i , % (категорія – задовільно (67 %) та нижче)									
		ХСК	БСК ₅	Азот амонійний	Азот нітритний	Розчинений кисень	Залізо загальне	Свинець	Кадмій	Ртуть	рН
01,21	76	55		40							
02,21	74	48		51							
03,21	71	47		29							
04,21	73	54		36			62	63			
05,21	73	48		47			59	62			
06,21	64	32		13	48		59	60			
07,21	71	39		49			57	62			53
08,21	62	37		14			55	63	63		58
09,21	52	20	13	24		63	57	62			45
10,21	63	22	15	51				63			
11,21	74	44		32				63			58
12,21	70	41		20				63			
01,22	72	46		46	61			63		34	
02,22	76	52		45	61			63			

* – дані відсутні

водозабору є показник ХСК, тоді як для риборозведення вимоги до цього показника більш м'які. Ще один важливий момент – за даними часткових бажаностей чітко видно, коли саме до річки потрапляють скиди стічних вод, що фіксуються через зростання вмісту амонійного азоту, появу високих концентрацій кадмію та ртуті.

Головні висновки. Ми запропонували універсальну, науково обґрунтовану методику та при-

кладний інструмент для створення та застосування прикладних ІЗВ, побудованих на національних стандартах та нормативах у області водопостачання та водокористування. Сподіваємося, що цей доробок стане в нагоді як науковцям, так і виробникам, управлінцям, що керують водними ресурсами України та пересічним громадянам, які запитують – а наскільки якісною є вода, яку я споживаю?

Література

1. Ягенський А.В., Січкарук І.М. Оцінка якості життя у сучасній медичній практиці. *Внутренняя медицина*. 2007. № 3. С. 21–30.
2. Yonk R. M., Smith J. T., Wardle A. R. Building a Quality of Life Index. In: Boas A.A. V., editor. *Quality of Life and Quality of Working Life*. London: IntechOpen; 2017. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/54577> doi: 10.5772/67821 (cited 2022 Jun 30).
3. Рева О. М., Максимова О.П. Інтегральна оцінка та статистична «норма» недисциплінованості (за даними опитування студентів). *Вісник Національного авіаційного університету. Сер. Педагогіка. Психологія: зб. наук. пр.* 2009. Вип. 1. С. 78–84.
4. Gitau M.W., Chen J., Ma Z. Water Quality Indices as Tools for Decision Making and Management. *Water Resour Manage*. 2016. Vol. 30. P. 2591–2610.
5. Uddin Md. G., Nash S., Olbert A.I. A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. *Ecological Indicators*. 2021. Vol. 122, Article number 107218.
6. Abbasi T., Abassi S. A. Water quality indices. Amsterdam, 2012. 384 p.
7. Tyagi Sh., Sharma B., Singh P., Dobhal R. Water quality assessment in terms of water quality indices. *American Journal of Water Resources*. 2013. Vol. 1, No. 3. P. 34–38.
8. Voitenko L., Voitenko A. Integrated assessment of irrigation water quality based on Harrington's desirability function. *International Journal of Agriculture, Environment and Food Sciences*. 2017. Vol. 1, Issue 1. P. 55–58.
9. Horton R. K. An index number system for rating water quality. *J. Water Pollution Control Federation*. 1965. Vol. 37, Issue 3. P. 300–306.
10. Simsek C., Gunduz O. IWQ Index: A GIS-integrated technique to assess irrigation water quality. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2007. Vol. 128(1–3). P. 277–300.
11. Sutadian A.D., Muttill N., Yilmaz A. Development of river water quality indices – a review. *Environ Monit Assess*. 2016. Vol. 188, Issue 58. URL: <https://doi.org/10.1007/s10661-015-5050-0> (cited 2022 Jun 30).
12. Вербецька К.Ю. Порівняльний аналіз методик оцінки якості поверхневих вод (на прикладі типової р. Губісцкалі). *Вісник Нац. ун-ту водн. госп. та природокористування (Серія с.-г. науки)*. 2011. Вип. 2(54). С. 91–99.
13. КНД 211.1.4.010-94. Екологічна оцінка якості поверхневих вод суші та естуаріїв України. Методика. Київ. 1994. 27 с.
14. Яцик А.В., Жукинський В.М., Чернявська А.П. Досвід використання «Методики екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями» (пояснення, застереження, приклади). Київ. 2006. 60 с.
15. Методика екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями. Харків. 2012. 37 с.
16. Bikbulatov E.S., Stepanova I.E. Harrington's desirability function for natural water quality assessment. *Russ J Gen Chem*. 2011. Vol. 81. P. 2694–2704.