Розділ 2. Основи природокористування та безпека життєдіяльності

УДК 504.064.2

СТАЛИЙ РОЗВИТОК ГІДРОЕКОСИСТЕМ — ОСНОВА ЕКОБЕЗПЕЧНОГО ВОДОКОРИСТУВАННЯ

В. М. Удод, д-р біол. наук, проф.;
М. Ю. Яців
(Київський національний університет будівництва і архітектури)

Робота присвячена проблемі сталого розвитку гідроекосистем. Запропоновано методику еколого-санітарної оцінки стану гідроекосистем з урахуванням самовідновних процесів, яка включає комплексний індекс розвитку гідроекосистем та визначення їх самовідновних властивостей. Наведені розрахунки за методикою для басейну р. Прут.

Работа посвящена проблеме устойчивого развития гидроэкосистем. Предложена методика эколого-санитарной оценки состояния гидроэкосистем с учетом процессов самовосстановления, которая включает комплексный индекс развития гидроэкосистем и определение их самовосстановительных свойств. Приведены расчеты по методике для бассейна р. Прут.

This article is devoted the problem of sustainable development of water ecosystem. The method of ecological sanitary estimation of the state of water ecosystem is offered, it takes into account processes of self-purification. This method includes the complex index of development of water ecosystem and determination of them self-purification properties. The resulted calculations on a method for the Prut river are presented.

До пріоритетних завдань забезпечення екологічної безпеки належать охорона та раціональне використання водних ресурсів, а

© В. М. Удод, М. Ю. Яців, 2011

саме: забезпечення населення якісною питною водою на основі пріоритетності питного водопостачання перед іншими видами використання води; охорона джерел і систем питного водопостачання; охорона поверхневих вод від забруднень; подальший розвиток басейнового принципу управління ресурсами [1].

Контроль за досягненням цілей сталого розвитку, управління цим процесом, оцінка ефективності використовуваних засобів і рівня досягнення поставлених цілей вимагають розробки відповідних критеріїв і показників — індикаторів сталого розвитку [1, 2].

Для екологічної оцінки стану довкілля, як правило, використовують різні нормативи якості навколишнього природного середовища, які дають оцінку стану життєвого середовища людини (ГДК шкідливих речовин, ГДР радіаційного впливу тощо), або лімітують шкідливий вплив на природу (ГДВ, ГДС). Такі оцінки екологічного стану гідроекосистем характеризують ступінь їх забруднення. Проте, очевидно, що для отримання повної картини рівня розвитку водної екосистеми необхідно, поряд з характеристиками якісного стану водойми, брати до уваги величину антропогенного впливу на неї, а також обсяг природоохоронних заходів, що впроваджуються у водогосподарський процес. Крім цього, на нашу думку, для вибору джерела централізованого водопостачання обов'язково необхідно враховувати внутрішньоводоймні процеси, які характеризують сталий розвиток гідроекосистем та забезпечують нормативну якість води у даному водному джерелі зараз і на перспективу. Зазначені положення нами використані при розробці індексу розвитку гідроекосистем та методики визначення самовідновних властивостей гідроекосистем.

Індекс розвитку гідроекосистем

Сталий розвиток гідроекосистем є гарантією чистоти води по санітарно-гігієнічним та екологічним показникам. Інтегральним показником рівня сталості гідроекосистеми є індекс розвитку гідроекосистем (ІРГ) — комплексний показник, за допомогою якого можна здійснити екологічну оцінку рівня благополуччя водної екосистеми по трьох складових: поточний стан розвитку гідроекосистеми, рівень антропогенного впливу на водну екосистему, заходи для збереження сталого розвитку гідроекосисеми (рис. 1).

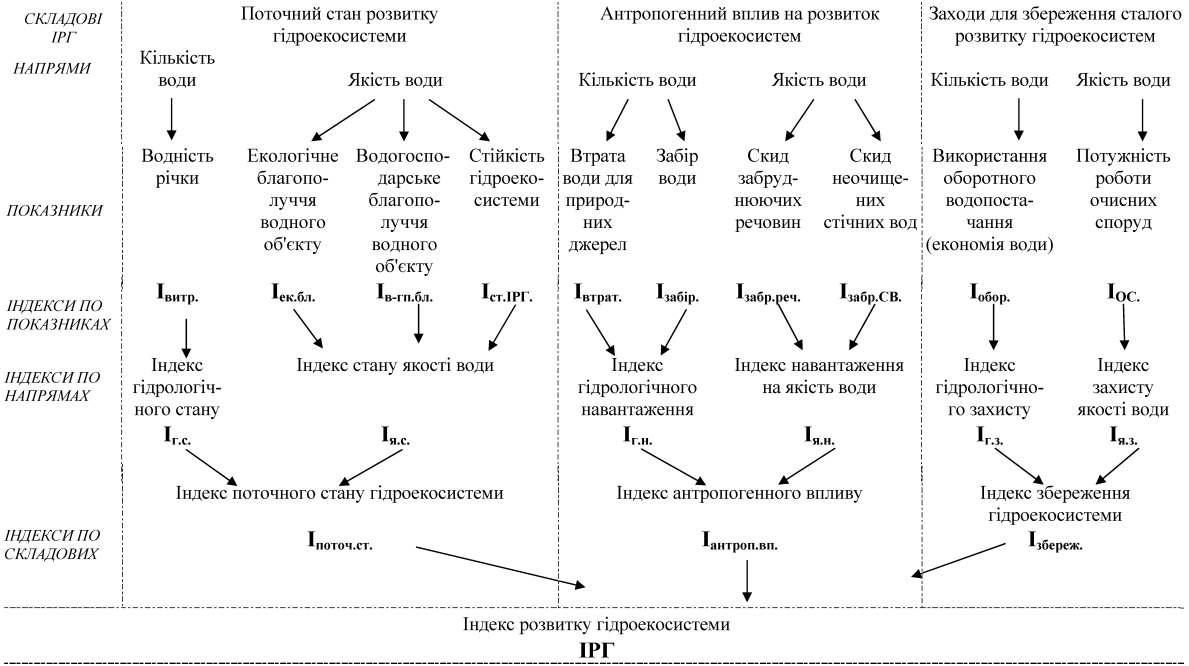

Рис. 1. Структура і склад індексу розвитку гідроекосистеми.

Беручи до уваги досвід світової практики [2, 3], було розроблено набір показників (індикаторів), які різносторонньо розкривають стан розвитку гідроекосистеми. Вони поділені на три групи [2], відповідно до складових сталого розвитку:

1. індикатори, що характеризують поточний стан розвитку гідроекосистеми (гідрологічні дані та якість води водойми);
2. індикатори, що характеризують людську діяльність, процеси і характеристики, які впливають на стійкий розвиток (вилучення вод з природних водойм, скид забруднених стічних вод та забруднюючих речовин);
3. індикатори, що характеризують дії спрямовані на покращення поточного стану (використання оборотних систем водопостачання, обробка стоків на очисних спорудах).

В кожній з категорій виділено по дві підкатегорії, які характеризують окремо якість водних ресурсів та їх кількість.

Тобто індекс розвитку гідроекосистеми є результатом агрегації комплексу показників.

Методика розрахунку ІРГ

Вихідними даними для розрахунку ІРГ є значення показників по кожній із складових. Відповідно першим етапом у визначенні індексу розвитку гідроекосистем є розрахунок проміжних індексів по кожному з показників, які повинні виражатись величиною від 1 до 0 [2, 3]. Для цього потрібно для кожного з використовуваних показників встановити порогові значення — найкраще (оптимальне) і найгірше (табл. 1) та використати формулу:

$$I_i = I_{\text{найгірш.}} + \frac{\left(I_{\text{найкращ.}} - I_{\text{найгірш.}}\right)\cdot\left(\Pi_i - \Pi_{\text{найгірш.}}\right)}{\Pi_{\text{оптим.}} - \Pi_{\text{найгірш.}}}, \qquad (1)$$

де Π_i — фактичне значення показника, який описує *i*-ту характеристику розвитку гідроекосистеми; $\Pi_{\text{найгірш.}}$ та $\Pi_{\text{оптим.}}$ — відповідно найгірше та найкраще значення для даного показника; $I_{\text{найкращ.}}$, $I_{\text{найгірш.}}$ — крайові значення проміжних індексів. Для усіх показників, крім «стійкості гідроекосистеми», $I_{\text{найкращ.}}=1$, $I_{\text{найгірш.}}=0$. У цьому випадку формула набуває вигляду:

$$I_i = \frac{П_i - П_{найгірш.}}{П_{оптим.} - П_{найгірш.}}. \quad (2)$$

Наступним етапом розрахунку ІРГ є визначення індексів по напрямам, кожен з яких є середнє арифметичне проміжних індексів по показниках.

При розрахунку індексів по трьох складових слід використовувати зважувальні коефіцієнти — більшу вагу (2/3) надавати напряму «Якість води», меншу (1/3) — напряму «Кількість води».

Узагальнений ІРГ розраховується як середньоарифметичне індексів по складових. В загальному вигляді формулу для розрахунку ІРГ можна записати у вигляді:

$$ІРГ = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \frac{П_i - П_{найгірш.}}{П_{оптим.} - П_{найгірш.}}, \quad (3)$$

де a_i — коефіцієнт (зважувальний), який враховує вагу (долю, значимість) даного показника (табл. 1).

До регіонів з високим рівнем розвитку гідроекосистем відносяться ті, в яких ІРГ > 0,8; до регіонів з середнім рівнем розвитку гідроекосистем — ті, в яких 0,4 < ІРГ < 0,8; до регіонів з низьким рівнем розвитку гідроекосистем — ті, в яких ІРГ < 0,4.

Окрім ранжирування і розділення регіонів на групи, обчислення ІРГ і індексів окремих характеристик дозволяє оцінити відповідність ситуації, що склалася, якимось орієнтирам, вираженим оптимальними значеннями показників розвитку гідроекосистеми, а також сформулювати якими мають бути управлінські рішення у відповідних ситуаціях.

Показники (індикатори) для розрахунку ІРГ.

Приклади усіх розрахунків наведені для басейну р. Прут в 2007 році.

Перша складова ІРГ «Поточний стан гідроекосистеми» містить чотири показники — один в напрямі, що характеризує гідрологічний режим (кількість води), три — в напрямі, що характеризує якість води.

Врахувати гідрологічні особливості водотоку в розрахунковий період, відобразити його водність, схильність до проходження паводків або навпаки до пересихання дозволить показник — відхилення від середньобагаторічної витрати. Для Прута середньобагаторічне значення витрати біля м. Чернівці складає 75 м^3/с, середньорічна витрата

Таблиця 1 – **Порогові значення показників для розрахунку ІРГ**

Індекс по показнику	Параметр, за значенням якого визначається індекс	Оптимальне значення	Найгірше значення
Водність (відхилення від середньо-багаторічної витрати)	Витрата для даної річки на даному створі, $м^3/с$	Середньо-багаторічне значення	Мінімальне зафіксоване значення (у випадку, коли фактичне значення менше від оптимального)
			Максимальне зафіксоване значення (у випадку, коли фактичне значення більше від оптимального)
Екологічне благополуччя гідроекосистеми	Екологічний індекс (ЕІ)	1	7
Водогосподарське благополуччя гідроекосистеми	Комбінаторний індекс забруднення (КІЗ)	1	12
Стійкість гідроекосистеми до антропогенного навантаження	Індекс стійкості ($I_{ст}$)	0 ($I_{стІРГ}$=1)	1 (відповідає $I_{стІРГ}$ =0,5)
		1 ($I_{стІРГ}$=0,5)	10 (відповідає $I_{стІРГ}$ =0)
Втрата води для природних джерел	% забору води	0	100
Забір води	% ліміту	0	200 (при значеннях >200 індекс по показнику приймається рівним 0)
Скид забрудн. речовин	% ГДС	0	200 (при значеннях >200 індекс по показнику приймається рівним 0)
Скид неочищених стічних вод	% загального скиду	0	100
Оборотне водопостачання	% загальної кількості використання води	100	0
Потужність роботи очисних споруд	% кількості стічних вод, які потребують очистки	100	0

в 2007 році — 46,35 м^3/с, мінімальне зафіксоване значення витрати на даному створі — 11 м^3/с. Індекс по показнику: $I_{витр.}$=0,55.

Якість води як складова водної екосистеми, життєве середовище гідробіонтів і важливу частину природного середовища людини враховується показником — екологічне благополуччя водного об'єкту. Він передбачає застосування чинної нормативної Методики екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями [4], тобто визначає відповідність якості води водотоку екологічним нормативам [5].

Для р. Прут нижче м. Чернівці в 2007 році ЕІ = 2,58, відповідно $I_{ек.бл.}$=0,74.

Для врахування не лише потреби гідроекосистеми щодо якості води, а ще й потреби забезпечення населення якісною питною водою, ввели показник — водогосподарське благополуччя водного об'єкту. Для кількісного вираження даного показника пропонуємо користуватись комбінаторним індексом забруднення (КІЗ) [6, 7], який дозволить оцінити відповідність якості води річки нормативам екологічно безпечного водокористування [5].

Для р. Прут нижче м. Чернівці в 2007 році КІЗ = 3,65, відповідно $I_{в\text{-}гп.бл.}$=0,73.

Наступний індикатор сталого розвитку — стійкість гідроекосистеми до впливу забруднюючих речовин антропогенного походження. Адже, відомо [8, 9], що стійкість екосистеми — це її здатність зберігати структуру і функції при негативній зовнішній дії та відновлювати структуру і функції при втраті частини компонентів екосистеми. Ця властивість екосистем є обов'язковою умовою їх сталого розвитку.

Показник (індекс) стійкості гідроекосистем відносно *n* забруднюючих речовин розраховується за формулою:

$$I_{ст} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} I_{ст.i}\,, \tag{4}$$

$$I_{ст.i} = \frac{\dfrac{C_{п.i} - C_{ф.i}}{C_{п.i}}}{\dfrac{Q_{п.i} - Q_{ф.i}}{Q_{п.i}}} = \frac{Q_{п.i}(C_{п.i} - C_{ф.i})}{C_{п.i}(Q_{п.i} - Q_{ф.i})}, \tag{5}$$

де $I_{ст.i}$ — індекс стійкості гідроекосистеми до впливу *i*-тої забруднюючої

речовини; n — кількість забруднюючих речовин, за якими визначається індекс; $C_{\text{п}\,i}$ — концентрація i-тої речовини у воді водойми в період, для якого проводиться розрахунок; $C_{\text{ф}\,i}$ — фонова концентрація i-тої речовини у воді водойми; вираз $\dfrac{C_{n.i} - C_{ф.i}}{C_{n.i}}$ відображає міру порушеності (забрудненість) гідроекосистеми i-тою речовиною; $Q_{\text{п}\,i}$ — кількість i-тої речовини, яка потрапляє у водойму зі стічними водами в період, для якого проводиться розрахунок; $Q_{\text{ф}\,i}$ — кількість i-тої речовини (фонова, мінімальна), яка потрапляє у водойму зі стічними водами в період, з мінімальним (граничним) навантаженням; вираз $\dfrac{Q_{n.i} - Q_{ф.i}}{Q_{n.i}}$ відображає міру потужності (інтенсивності) антропогенного впливу на гідроекосистему i-тою речовиною.

Індекс стійкості можна розраховувати для усіх речовин, для яких відомі вихідні дані, а також для окремих груп, наприклад, для біогенних речовин, для важких металів тощо.

Таблиця 2 — **Класифікація стійкості водної екосистеми відповідно до значень $I_{ст}$**

Значення $I_{ст}$	**Характеристика гідроекосистеми**
$0 \le I_{ст} \le 0{,}5$	Гідроекосистема дуже стійка до антропогенного впливу. Високий потенціал самовідновної здатності системи.
$0{,}5 < I_{ст} \le 1{,}0$	Гідроекосистема досить стійка до антропогенного впливу. Достатній потенціал самовідновної здатності системи.
$1{,}0 < I_{ст} \le 5{,}0$	Гідроекосистема чутлива до антропогенного впливу. Низький потенціал самовідновної здатності системи, втрата здатності системи до самовідновлення, початок її деградації
$5{,}0 < I_{ст} \le 10{,}0$	Гідроекосистема дуже чутлива до антропогенного впливу. Деградація екосистеми, кризовий стан самовідновного механізму.

Теоретично при розрахунках за формулою (6) можливі значення $I_{ст} \to \infty$, однак для зручності користування класифікацією обмежимо значення $I_{ст} \le 10{,}0$. Тобто, якщо в результаті розрахунку $I_{ст} > 10{,}0$, приймаємо $I_{ст} = 10{,}0$.

Запропоновану методику визначення стійкості гідроекосистем випробували для басейну річки Прут (табл. 3, табл. 4.). Вихідними даними служили гідрохімічні показники якості води річки та дані про скид забруднюючих речовин.

Таблиця 3 – **Результати розрахунку індексу стійкості гідроекосистеми р. Прут в створі 7 км нижче м. Чернівці в 2007 р.**

$Q_{п.i}$	т	617	0,93	454	9650	1711	2836	84	0,021	355	6,722	1,848	0,06	0,241	0,201	10	32	0,034
$Q_{ф.i}$	т	252	0,003	373	5929	811	1546	26	0,002	27	5,115	1,677	0,037	0,02	0,072	5	3	0,004
$C_{п.i}$	мг/дм^3	1,42	0,036	7,88	416,9	30,19	24,21	0,388	0,0027	0,135	0,038	0,734	0,005	0,016	0,003	0,016	12,15	0,015
$C_{ф.i}$	мг/дм^3	1,42	0,036	5,80	285,60	20,50	24,21	0,23	0,001	0,10	0,01	0,13	0,005	0,02	0,003	0,01	7,37	0,015
$\frac{Q_{п.i} - Q_{ф.i}}{Q_{п.i}}$	-	0,59	1,00	0,18	0,39	0,53	0,45	0,69	1,00	0,92	0,24	0,09	0,38	0,92	0,64	0,50	1,00	0,88
$\frac{C_{п.i} - C_{ф.i}}{C_{п.i}}$	-	0,01	0,01	0,26	0,31	0,32	0,01	0,41	0,63	0,26	0,83	0,83	0,01	0,01	0,01	0,39	0,39	0,01
$I_{ст.i}$	-	**0,02**	**0,01**	**1,48**	**0,82**	**0,61**	**0,02**	**0,59**	**0,63**	**0,28**	**3,47**	**8,95**	**0,03**	**0,01**	**0,02**	**0,79**	**0,39**	**0,01**
$I_{ст.}$	-	**1,07**																

З табл. 3 видно, що гідроекосистема р. Прут в створі 7 км нижче м. Чернівці в 2007 р. найчутливішою була до впливу таких забруднюючих речовин як залізо, СПАР, завислі речовини; найбільш стійкою до нафтопродуктів, цинку, фосфатів. Загалом же стійкість гідроекосистеми ($I_{ст.}$ = **1,07**) в розрахунковому створі оцінюється як проміжна між низькою і достатньою.

Таблиця 4 – **Індекси стійкості гідроекосистеми басейну р. Прут**

Рік	Індекси стійкості гідроекосистеми					
	р.Прут, 7 км нижче м.Чернівці	р.Прут, в межах м.Яремча	р.Прут, 0,5 км нижче м.Коломия	р.Чорний Черемош, 0,5 км нижче пгт.Верховина	р.Черемош, 1км нижче пгт.Кути	Басейн
1991	1,90	1,29	1,15	0,53	—	1,22
1994	8,10	1,21	2,42	3,57	0,84	3,23
1997	1,00	3,87	0,82	7,01	2,64	3,07
1999	0,63	—	—	—	6,13	3,38
2001	0,84	5,23	7,05	3,90	1,07	3,62
2004	3,21	2,37	3,41	—	2,99	2,99
2007	1,07	4,52	2,52	—	6,16	3,57

Як видно з табл. 4 середні значення $I_{ст}$ по басейну р. Прут свідчать про чутливість гідроекосистеми до антропогенних забруднень.

Для р. Прут нижче м. Чернівці в 2007 році $I_{ст}$ = 1,07, відповідно $I_{ст.ІРГ}$=0,5.

Індекси по напрямах: $I_{г.с.}$=$I_{витр.}$=0,55; $I_{я.с.}$=0,66.

З урахуванням зважувальних коефіцієнтів визначаємо $I_{поточ.ст}$:

$$I_{поточ.ст.} = \frac{1}{3} \cdot 0{,}55 + \frac{2}{3} \cdot 0{,}66 = 0{,}62.$$

Друга складова ІРГ «Антропогенний вплив на розвиток гідроекосистем», як і попередня, містить два напрями. Напрям «Кількість води» представлений показниками «втрата води для природних джерел» та «забір води» (% ліміту).

Перший показує відсоток втраченої води в ході її використання, її кількість — це різниця між кількістю забраної води з природного джерела і скинутої. Для р. Прут біля м. Чернівці в 2007 р. забір води поверхневий становив 11,849 м^3, скид поверхневий — 29,999 м^3, відповідно втрати води для поверхневого джерела не було (-18,15 м^3), тому відразу приймаємо $I_{втрат}$=1.

Другий показник відображає на скільки водокористувачі дотримуються норм забору води, чисельно дорівнює відсотку кількості забраної води від встановленого ліміту. Для р. Прут нижче м. Чернівці в 2007 р. забір води поверхневий — 11,849 м^3, ліміт забору поверхневий — 47,204 м^3, відповідно відсоток забраної води від ліміту — 25,1%, а індекс по показнику $I_{забір.}$=0,87.

Індекс по напряму $I_{г.н.}$=0,94.

Напрям «Якість води» другої складової ІРГ має показники «скид забруднюючих речовин» та «скид неочищених стічних вод», які досить повно характеризують антропогенний вплив на якісний стан поверхневого водного об'єкта.

Критерієм для оцінки кількості скинутих забруднюючих речовин у річку, прийняли відхилення у відсотках фактичного скиду від допустимого скиду. В якості допустимого приймається гранично допустимий скид (ГДС) забруднюючих речовин, який можна розраховувати за нормативною методикою [10]. Для річки Прут, використовуючи статистичні дані про скид забруднюючих речовин у досліджувану водойму та розрахувавши допустимі значення, були визначені відхилення та індекси по кожній речовині ($БСК_{повне}$, нафтопродукти, завислі речовини, сухий залишок, сульфати, хлориди, азот амонійний, феноли, нітрати, СПАР, жири, масла, залізо, мідь, цинк, нікель, хром (VI), алюміній, нітрити, ХСК, свинець). Індекс по показнику (середнє значення індексів по кожній речовині) $I_{забр.реч.}$=0,44.

Показник «скид неочищених стічних вод» показує, яка частина забруднених стоків скидається без очистки. Вихідними даними для його розрахунку є загальний об'єм стічних вод, які скидають у водойму і об'єм забруднених стоків. В р. Прут нижче м. Чернівці в 2007 р. потрапило 30,137 м^3 стічних вод, з яких — 3,575 м^3 (11,86%) неочищених. Індекс по показнику $I_{забр.СВ}$=0,88.

Індекс по напряму $I_{я.н.}$=0,66.

Індекс по складовій ІРГ «Антропогенний вплив на розвиток гідроекосистем»:

$$I_{\text{антроп.вп.}} = \frac{1}{3} \cdot 0{,}94 + \frac{2}{3} \cdot 0{,}66 = 0{,}75 .$$

Складова ІРГ «Заходи спрямовані на збереження сталого розвитку гідроекосистем» спрямована відображати обсяг водоохоронних заходів та містить всього два показники — це використання оборотного водопостачання в напрямі «Кількість води» (відсоток оборотної води від усієї, що використовується) та потужність роботи очисних споруд в напрямі «Якість води», що відображає на скільки очисні споруди справляються з очисткою забруднених стоків (відсоток потужності очисних споруд від кількості стічних вод, що потребують очистки). Для р. Прут біля м. Чернівці використано всього води — 18,215 м^3; оборотне використання води — 6,938 м^3; відсоток економії — 27,58 %, індекс по показнику $I_{\text{обор.}}$=0,28; потужність роботи очисних споруд — 55,586 м^3; скид, який потребує очистки — 17,021 м^3; відсоток потужності очисних споруд від забрудненого скиду — 326,57 %, тобто $I_{\text{О.С.}}$=1.

Індекси по напрямах: $I_{\text{г.з.}}=I_{\text{обор.}}=0{,}28$; $I_{\text{я.з.}}=I_{\text{ОС}}=1$.

Індекс по складовій:

$$I_{\text{збереж.}} = \frac{1}{3} \cdot 0{,}28 + \frac{2}{3} \cdot 1{,}0 = 0{,}64 .$$

Індекс розвитку гідроекосистеми басейну р. Прут біля м. Чернівці в 2007 р.:

$$\text{ІРГ} = \frac{0{,}63 + 0{,}75 + 0{,}64}{3} = 0{,}67$$ — середній рівень розвитку гідроекосистеми.

Таблиця 5 — **Індекси розвитку гідроекосистеми басейну р. Прут**

Рік	р.Прут, в межах м.Яремча	р.Прут, 0,5 км нижче м.Коломия	р.Прут, 7 км нижче м.Чернівці	р.Чорний Черемош, 0,5 км нижче пгт.Верховина	р.Черемош, 1км нижче пгт.Кути	Басейн
1991	0,84	0,64	0,72	0,65	0,49	0,67
1994	0,80	0,63	0,62	0,63	0,48	0,63

Закінчення табл. 5

Рік	р.Прут, в межах м.Яремча	р.Прут, 0,5 км нижче м.Коломия	р.Прут, 7 км нижче м.Чернівці	р.Чорний Черемош, 0,5 км нижче пгт.Верховина	р.Черемош, 1км нижче пгт.Кути	Басейн
1997	0,76	0,71	0,64	0,62	0,41	0,63
1999	0,72	0,74	0,62	-	0,51	0,65
2001	0,85	0,76	0,72	0,67	0,55	0,71
2004	0,77	0,68	0,67	0,60	0,34	0,61
2007	0,75	0,68	0,67	0,93	0,57	0,72

Самоочищення водних екосистем — передумова їх сталого розвитку

Враховуючи той факт, що внутрішньоводоймні процеси гідроекосистем обумовлюють їх розвиток і функціонування, необхідно поряд із існуючими нормативами оцінки стану води басейнів річок застосовувати методи контролю даних процесів. Інтегруючим показником внутрішньоводоймних процесів гідроекосистем, на наш погляд, є їх самовідновлювальна здатність. Саме тому окремо від ІРГ ми виділили більш вузьку еколого-санітарну оцінку, яка спрямована характеризувати самовідновні властивості гідроекосистеми.

Як індикатори здатності водойми до самоочищення нами обрано $БСК_{повн.}$ та ХСК [11, 12, 13].

Інтенсивність процесів самоочищення

БСК характеризує ту частину концентрації субстрату, яку мікроорганізми використовують на енергетичні цілі (окислення легкоокислюваної органіки), на утворення нових клітин, тобто на пластичні цілі, вони потенційно можуть використовувати кількість субстрату, рівну ХСК — $БСК_{повн}$ [12].

Якщо розглядати два створа (початковий та кінцевий), то кількість субстрату, яка може бути використана для пластичних цілей, складає $ХСК_{поч}$ — $БСК_{поч}$, а кількість, яку мікроорганізми не змогли використати для цих цілей, тобто що залишилося в кінцевому створі (в очищеній воді), $ХСК_{кін}$ — $БСК_{кін}$. Тоді, кількість субстрату, використана для пластичних цілей (в одиницях ХСК) може бути записана у вигляді наступного співвідношення [12]:

$$R = \text{ХСК}_{\text{поч}} - \text{БСК}_{\text{поч}} - (\text{ХСК}_{\text{кін}} - \text{БСК}_{\text{кін}}), \qquad (6)$$

де $\text{ХСК}_{\text{поч}}$ — хімічне споживання води річки у початковому створі (початкова ХСК неочищеної води); $\text{ХСК}_{\text{кін}}$ — хімічне споживання води річки у кінцевому створі (кінцева ХСК очищеної води); $\text{БСК}_{\text{поч}}$ — повне біохімічне споживання кисню річки у початковому створі (початкове $\text{БСК}_{\text{повн.}}$ неочищеної води); $\text{БСК}_{\text{кін}}$ — повне біохімічне споживання кисню річки у кінцевому створі (кінцева $\text{БСК}_{\text{повн.}}$ очищеної води).

Враховуючи вищесказане, для оцінки інтенсивності процесу самоочищення пропонуємо використовувати наступну формулу:

$$\text{Е}_{\text{с}} = \frac{R}{\text{ХСК}_{\text{поч}} - \text{БСК}_{\text{поч}}}. \qquad (7)$$

Тобто визначення інтенсивності зниження важкоокислюваної частини ХСК. Класифікація інтенсивності самоочищення річки відповідно до значень $\text{Е}_{\text{с}}$:

$\text{Е}_{\text{с}} = 0 \ldots 0{,}3$	—	процеси самовідновлення на даній ділянці річки (в басейні річки) мають низький рівень інтенсивності;
$\text{Е}_{\text{с}} = 0{,}3 \ldots 0{,}7$	—	середній рівень інтенсивності самоочищення;
$\text{Е}_{\text{с}} = 0{,}7 \ldots 1{,}0$	—	високий рівень інтенсивності самоочищення.

Даний показник не відображає ступінь чистоти водойми, а характеризує на скільки інтенсивно проходять внутрішньоводоймні процеси на досліджуваній ділянці річки або в усьому водному басейні. Він показує ефективність самоочищення води річки на конкретній ділянці від важкоокислюваної органіки.

Рівень інтенсивності самовідновних процесів визначили для ділянки на р. Прут між створами «3 км нижче м. Чернівці» (початковий) та «7 км нижче м. Чернівці» (кінцевий) (табл. 6).

Ефективність самоочисних процесів на ділянці р. Прут нижче м. Чернівці змінюється в широких межах (табл. 6).

Зустрічаються і від'ємні значення $\text{Е}_{\text{с}}$ при виконанні умови $\text{БСК}_{\text{поч.}} > \text{БСК}_{\text{кін.}}$, $\text{ХСК}_{\text{поч.}} > \text{ХСК}_{\text{кін.}}$, тобто варіант, коли зниження БСК відбувається на більшу кількість $\text{мгО}_2/\text{дм}^3$, ніж ХСК, що свідчить про додаткове забруднення між створами.

Випадок, коли при однаковому зниженні БСК і ХСК ефект самоочищення рівний нулю, пояснюється тим, що у цьому разі

Таблиця 6 – **Ефективність процесів самоочищення на ділянці р. Прут нижче м. Чернівці**

Дата відбору проб	4.04.86	3.06.88	2.01.90	26.04.91	30.01.92	8.04.93	15.06.94	29.04.96	1.11.00	14.10.01	26.07.02	8.10.04	1.02.05
$ХСК_{поч.}$	17	41,4	25,6	29,4	20,8	17,7	11,5	13,1	9,64	10,0	20,8	4,3	4,8
$БСК_{повн.поч.}$	10,04	4,30	11,6	5,00	7,14	4,00	2,94	3,14	1,71	4,86	11,3	1,14	3,43
$ХСК_{кін.}$	16,30	20,0	19,0	23,0	15,3	17,1	7,80	13,0	7,71	8,00	18,4	3,20	3,00
$БСК_{повн.кін.}$	8,86	3,84	11,0	3,86	7,00	4,00	2,90	3,0	1,29	4,29	10,9	0,86	2,86
E_c	**-0,07**	**0,56**	**0,43**	**0,22**	**0,39**	**0,04**	**0,43**	**0,00**	**0,19**	**0,28**	**0,21**	**0,26**	**0,90**

зниження ХСК відбувається за рахунок зниження БСК (адже БСК — частина ХСК).

Здатність водойми до самоочищення

Відповідно до відношення $БСК_{повн}/ХСК$ (частина біохімічно окислюваної органічної речовини від загальної її кількості), органічні речовини поділяють на легко- і важкоокислювані. До легкоокислюваних речовин відносять ті, для яких згадане співвідношення прямує до одиниці. Речовини, для яких дане співвідношення прямує до нуля, відносять до важкоокислюваних. Тобто відношення $БСК_{повн}/ХСК$ можна використати як індикатор здатності водойми до самоочищення [11, 12]:

$\frac{БСК_{повн}}{ХСК} = 0...0,3$ — *низька* здатність водойми до самоочищення;

$\frac{БСК_{повн}}{ХСК} = 0,3...0,7$ — *середня* здатність водойми до самоочищення;

$\frac{БСК_{повн}}{ХСК} = 0,7...1,0$ — *висока* здатність водойми до самоочищення.

Зазначимо, що даний показник не характеризує ступінь чистоти або забрудненості водойми. Він показує потенційну здатність водойми до самоочищення (біологічного окислення).

Таблиця 7

Значення критерію $\frac{БСК_{повн}}{ХСК}$ для басейну р. Прут залежно від нормативної якості води

Створ	Варіант якості води по відношенню до гранично допустимих(ГД) БСК та ХСК							
	БСК<ГД ХСК<ГД		БСК>ГД ХСК<ГД		БСК<ГД ХСК>ГД		БСК>ГД ХСК>ГД	
	$\frac{БСК_{повн}}{ХСК}$	% випадків	$\frac{БСК_{повн}}{ХСК}$	% випадків	$\frac{БСК_{повн}}{ХСК}$	% випадків	$\frac{БСК_{повн}}{ХСК}$	% випадків
Ч1	0,26	33,3	0,45	8,6	0,12	23,9	0,26	34,2
Ч2	0,25	27,9	0,47	9,0	0,12	17,2	0,27	45,9
Ч3	0,26	24,8	0,42	7,0	0,10	24,8	0,28	43,5
Я1	0,34	5,7	0,73	2,3	0,11	49,4	0,20	42,5
Я2	0,19	6,3	0,44	2,5	0,13	36,7	0,19	54,4
К1	0,22	21,3	0,44	6,7	0,13	25,3	0,22	46,7
К2	0,25	17,1	0,38	6,6	0,10	26,3	0,21	50,0
Д1	-	0,0	0,44	2,2	0,13	32,6	0,19	65,2
Кт1	0,22	42,1	0,46	1,8	0,15	35,1	0,28	21,1
Кт2	0,25	40,0	0,47	3,6	0,09	30,9	0,26	25,5
В1	0,28	47,8	0,44	2,2	0,11	30,4	0,17	19,6
В2	0,25	43,5	0,43	2,2	0,19	30,4	0,18	23,9
В середньому по басейну	0,25	25,9	0,46	6,1	0,12	27,2	0,23	40,8

Пояснення до таблиці:

Ч1 — 3,5 км вище м. Чернівці; **Ч2** — 3 км нижче м. Чернівці; **Ч3** — 7 км нижче м. Чернівці; **Я1** — 0,5 км вище міста Яремча; **Я2** — в межах міста Яремча; **К1** — 0,5 км вище міста Коломия; **К2** — 0,5 км нижче міста Коломия; **Д1** — в межі села Дора, р. Камянка; **Кт1** — 1 км вище пгт. Кути, р. Черемош; **Кт2** — 1 км нижче пгт. Кути, р. Черемош; **В1** — 1,1 км вище птт. Верховина, р. Ч. Черемош; **В2** — 0,5 км нижче птт. Верховина, р. Ч.Черемош.

Випробувавши описану методику на гідрохімічних даних басейну р. Прут (табл. 7.) виявили деякі закономірності:

1. Для варіанту, коли якість води по БСК і ХСК відповідає нормативам, характерним є середнє значення БСК/ХСК — 0,25; при цьому в 69,2 % випадків БСК/ХСК лежить в інтервалі від 0 до 0,3; в 27,9% — від 0,3 до 0,7. Тобто для нормативно чистих вод здатність до самоочищення є низькою та середньою. Така ситуація найбільш виражена в створах біля Кут та Верховини, а також вище Чернівців.

2. Найвища здатність до самоочищення спостерігається у випадках, коли БСК перевищує гранично допустимі значення, а ХСК належить нормативному інтервалу. Для басейну Прута в такій ситуації характерно 16,8 % значень БСК/ХСК від 0 до 0,3; 73,0% — від 0,3 до 0,7; 10,2% — від 0,7 до 1,0. Такі умови найрідше зустрічаються в досліджуваному басейні і найбільш притаманні створам біля Чернівців, що може свідчити про скид неочищених господарсько-побутових стічних вод.

3. Випадки, коли в басейні Прута БСК відповідає нормативам, а ХСК — перевищує їх, характеризуються найменшою здатністю до самоочищення (в середньому БСК/ХСК = 0,13), при цьому 100% значень БСК/ХСК лежить в інтервалі від 0 до 0,3. Наявність такої ситуації (Яремча, Дора, Кути, Верховина) свідчить про скид виробничих стічних вод, для яких притаманні високі значення ХСК.

4. Більша частина (40,8%) усіх вимірів по басейну річки Прут — це невідповідність нормативним вимогам і БСК, і ХСК. Самоочисна здатність при цьому може бути як низькою (80,5% випадків), так і середньою (19,0% випадків), і навіть високою (0,5%). Найхарактерніший такий варіант якості води для створів нижче Чернівців, для Яремчі, Коломиї та села Дора на р. Кам'янка.

Загалом же серед усіх вимірювань по басейну переважає низька здатність до самоочищення — 60,76%; випадків з середньою здатністю до самоочищення — 35,6%, і лише 3,64% вимірів — висока здатність до самоочищення.

Висновки:

1. Доведено доцільність забезпечення сталого розвитку гідроекосистем, що є запорукою безпечного водокористування.

2. Вперше показано, що індикатором екологічно безпечного розвитку водних екосистем є самовідновна здатність води всього водного басейну, яка є віддзеркаленням стану сталості функціонування водної екосистеми.

3. Вперше запропонована комплексна методика еколого-санітарної оцінки стану гідроекосистем басейну (11 створів) р. Прут з урахуванням самовідновних процесів. Методика включає комплексний індекс розвитку гідроекосистем та визначення самовідновних властивостей водних екосистем.

4. Вперше запропонований комплексний показник — індекс розвитку гідроекосистем (ІРГ), який дає змогу оцінити стан водної екосистеми по трьом напрямам: поточний стан гідроекосистеми, антропогенне навантаження на водну екосистему, заходи щодо збереження сталого розвитку водної екосистеми. Виконані розрахунки для басейну р. Прут.

5. Обґрунтовано розрахунок індексу стійкості ($І_{ст}$) гідроекосистеми до антропогенного навантаження. Запропоновано класифікацію стійкості водної екосистеми. Для 7 років встановлено індекси стійкості гідроекосистеми досліджуваного басейну р. Прут (5 створів). Отриманий критерій дозволить отримати уявлення про відповідність умов водного середовища вимогам і потребам розвитку гідроекосистем, що обумовлює можливість їх використання для водогосподарських цілей.

6. Для визначення інтенсивності самоочисних процесів запропоновано використовувати величину зниження важкоокислюваної органіки між двома створами. Проведені розрахунки для ділянок на р. Прут.

7. Запропоновано в якості індикатору здатності водойми до самоочищення використовувати співвідношення $БСК_{повн.}$/ХСК. Відносно цього показника охарактеризовано ситуацію в басейні р. Прут за довгостроковий період та виявлені залежності між даним співвідношенням та відповідністю якості води нормативам.

* * *

1. На меті — сталий розвиток України // Вісник НАН України. — 2007. — № 2. — С. 14—44.

2. Тарасова Н. П. Индексы и индикаторы устойчивого развития / Н. П. Тарасова, Е. Б. Кручинина // Устойчивое развитие: природа — общество — человек: материалы международной конференции — М., 2006. — Т. 1. — С. 127—144.

3. Human Development Report 2007/2008. Fighting climate change: Human solidarity in a divided world. Published for the United Nations Development Programme (UNDP). — New York: Palgrave Macmillan Houndmills, Basingstoke, 2007. — 384 p.

4. Методика екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями / В. Д. Романенко, В. М. Жукинський, О. П. Оксіюк та ін. — К.: Символ-Т, 1998. — 28 с.

5. Водний кодекс України. // Кодекс України про надра, Лісовий кодекс України, Водний кодекс України, Повітряний кодекс України: чинне законодавство зі змінами та допов. станом на 15 січ. 2010 р. — Офіц. текст — К.: Видавець Паливода А. В., 2010. — 168 с. — (Кодекси України).

6. Никаноров А. М., Емельянова В. П. Комплексная оценка качества поверхностных вод суши // Водные ресурсы. — 2005 — Т. 32, № 1. — С. 61—69.

7. Яців М. Ю. Комплексна оцінка якості води р. Прут / М. Ю. Яців // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. — 2008. — Вип.11. — С. 52—64.

8. Израэль Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды / Ю.А. Израэль. — 2-е изд., доп. — М.: Гидрометеоиздат, 1984. — 560 с.

9. Угарова Н. А. Новый подход к оценке изменения устойчивости городской среды / Н. А. Угарова // Экология и промышленность России. — 2004. — № 10. — С. 4—6.

10. Інструкція про порядок розробки та затвердження гранично допустимих скидів (ГДС) речовин у водні об'єкти із зворотними водами / Мінприроди України. — К., 1994. — 89 с.

11. Родзиллер И. Д. Прогноз качества воды водоемов — приемников сточных вод. / Родзиллер И. Д. — М.: Стройиздат, 1984. — 263 с.

12. Синельников В. Е. Механизм самоочищення водоемов / В. Е. Синельников. — М.: Стройиздат, 1980. — 111 с.

13. Удод В.М. Екологічні критерії оцінки якості води гідроекосистем на прикладі водозбірного басейну р. Прут / В. М. Удод, В. В. Трофімович, М. Ю. Яців // Екологічна безпека та природокористування. — 2010. — Вип. 5. — С. 84—93.

Отримано: 20.01.2011 р.