

Савченко І.О.

аспірант кафедри автоматизації та комп'ютерних технологій систем управління

імені професора А.П. Ладанюка,

Національний університет харчових технологій, м. Київ

ORCID: 0000-0002-5798-7104

РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНО-ЛОГІЧНИХ МОДЕЛЕЙ ОЦІНЮВАННЯ ЧИННИКІВ НЕГАТИВНОГО ВПЛИВУ НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ

Анотація. У статті аналізуються інформаційно-логічні моделі для оцінювання впливу техногенного навантаження (ТН) на навколишнє середовище. Акцентовується брак об'єктивної інформації про обсяги ТН та неможливість ретроспективного аналізу змін, що ускладнює оцінку екологічного стану. Розглядається задача ретроспективного аналізу ТН та оцінки його впливу на складові довкілля за індикаторами й індексами, що зводиться до екологічного оцінювання розподілу чинників ТН на території об'єднаних територіальних громад (ОТГ). Визначено задачу ідентифікації складу, структури чинників ТН та причинно-наслідкових зв'язків між ними. Зазначається, що техногенні чинники визначають інтегральну характеристику впливу потоку ТН на об'єкти природно-техногенної геосистеми (ПТГС). Проаналізовано методи експертного оцінювання, зокрема, методи інтервальних оцінок, аналізу ієрархій, східчастій матриці та мережних діаграм. Приділено увагу причинно-наслідковим діаграмам. Детально досліджується структурно-логічна модель потоку ТН та факторів впливу. Підкреслюється, що стратифікація факторів ТН може здійснюватись за типами техногенного впливу, що дозволяє побудувати ієрархічну структурно-логічну модель оцінки потоку ТН. Представлено підхід до проведення комплексної оцінки, який базується на багатокритеріальній оцінці загроз з подальшою згортокою до інтегрального індексу. Розглядається вплив факторів ТН на забруднення складових геосфер ПТГС ОТГ. Забруднення визначається як зміна властивостей складових геосфер, що призводить до погіршення функцій наземних і водних екосистем. Розглядаються питання розробки системної класифікації джерел ТН, наприклад, характер та природа походження, сфера та масштаби поширення, тип та режим функціонування джерела. Описано використання шкали Сааті для експертних оцінок і формули для розрахунку індексу та відношення узгодженості. Наведено класифікацію критеріїв і факторів оцінювання потоку ТН та шкалу оцінок відносно важливості. Розглядається розробка процедури для проведення оцінки впливу техногенного навантаження на водні об'єкти на території громади.

Ключові слова: техногенне навантаження, оцінювання екологічної безпеки, об'єднані територіальні громади, стратифікація чинників, причинно-слідчі діаграми, метод Дельфі, метод аналізу ієрархій Сааті, багатокритеріальна оцінка, інтегральний індекс, експертні оцінки, вагові коефіцієнти.

Постановка проблеми. Відсутність об'єктивної інформації про об'єми техногенного навантаження (ТН) та неможливість проведення ретроспективного аналізу його змін викликає певні труднощі при проведенні поточного оцінювання екологічного стану об'єктів навколишнього середовища. В цьому випадку виникає задача ретроспективного аналізу ТН та оцінювання його впливу на стан складових навколишнього середовища за індикаторами та індексами, що в кінцевому рахунку

зводиться до екологічного оцінювання розподілу чинників ТН на території об'єднаних територіальних громад (ОТГ) за узагальненим інформаційним портретом.

Через багатофакторність та комплексність впливу ТН на об'єкти природно-техногенної геосистеми (ПТГС) однією із задач є ідентифікація складу, структури чинників ТН і причинно-наслідкових зв'язків між ними. В значній мірі, техногенні чинники визначають на якісному рівні інтегральну характеристику

впливу потоку ТН на об'єкти ПТГС, який формується внаслідок нього.

Аналіз останніх досліджень. Як відомо із публікацій [1, 2], для подібних задач в галузі інженерної екології застосовуються методи експертного оцінювання, серед яких найбільш відомими є методи інтервальних оцінок, аналізу ієрархій, східчастої матриці та мережних діаграм.

Процедура побудови причинно-наслідкових діаграм, що є одним із інструментів для логіко-інформаційного моделювання в системах управління якості [3], ґрунтується на дослідженні структурно-логічної моделі потоку ТН та чинників впливу на НПС (рис. 1).

У статті Девітофранческо А., Геллер М., Мероні І., Модіка М., Палеарі С., Зоболі Р. [4] (2016) «Оцінка стійкості міських територій через багатокритеріальну систему підтримки прийняття рішень» розглядаються інноваційні рішення для підвищення енергоефективності старих будівель та зменшення їхнього негативного впливу на навколишнє середовище.

У статті Ней Дж. Дж., Абковіч М., Чу Е., Галлагер Д., Райт Г. [5] (2014) «Огляд моделей підтримки прийняття рішень щодо адаптації до зміни клімату в контексті розвитку» розглядаються моделі підтримки прийняття рішень для адаптації до зміни клімату в контексті розвитку

та підкреслюється важливість інтеграції місцевих знань та участі громад у плануванні стратегій адаптації.

У роботі Ванг М. Е. [6] (2018) «'Ми повинні довіряти цьому, або ж можемо просто викинути це': Використання систем підтримки прийняття рішень під час екстремальних погодних явищ» розглядається використання систем підтримки прийняття рішень (СППР) в екстремальних погодних умовах і підкреслюється важливість довіри до автоматизованих систем для ефективного управління в надзвичайних ситуаціях.

У статті Масареллі К., Бінетті М. С., Тріонці М., Уріккіо В. Ф. [7] (2023) «Перший крок до розробки системи підтримки прийняття рішень на основі інтеграції моніторингу навколишнього середовища для охорони регіональних водних ресурсів» проаналізовано поширені джерела забруднення, такі як нітрати, пестициди та важкі метали, з метою розробки системи підтримки прийняття рішень для захисту водних ресурсів у регіоні Апулія в Італії.

У статті Таральйо С., К'еза С., Ла Порте Л., Полліно М., Вердеккія М., Томассетті Б., Колайуда В., Ломбарді А. [8] (2019) «Система підтримки прийняття рішень для розумного міського управління: стійкість до природних явищ і повітряна екологічна оцінка» представлено нову концепцію системи підтримки

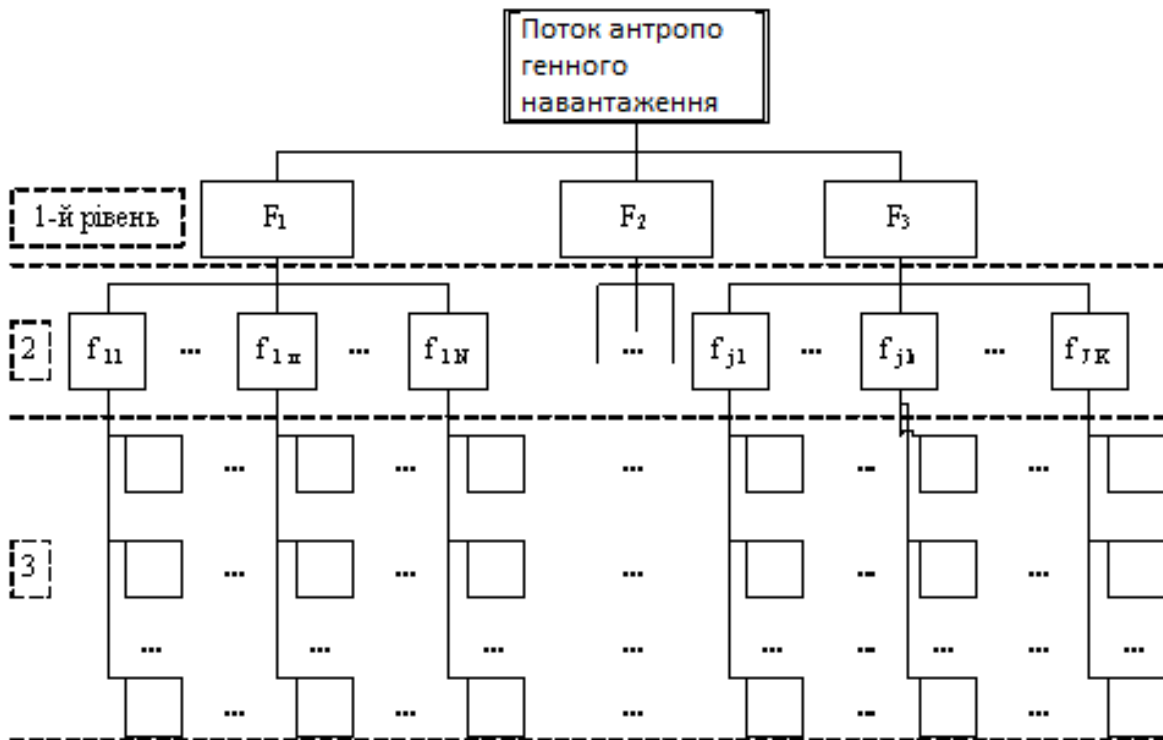


Рис. 1. Ієрархічна структурно-логічна модель потоку ТН

прийняття рішень (СППР), яка забезпечує комплексний аналіз ризиків для критичної інфраструктури, включаючи прогнозування інцидентів, оцінку потенційних збитків і впливу на міське середовище.

Мета роботи. Розробка комплексного методу оцінювання рівня екологічної безпеки поверхневих водних об'єктів ОТГ в умовах глобальних кліматичних змін і ведення бойових дій.

Результати досліджень. Для нашого випадку, коли відсутні дані про кількісні характеристики чинників ТН і оцінка впливу цілого ряду небезпечних чинників погано формалізується через відсутність попередніх досліджень в цій галузі, доцільним є поєднання застосування методів стратифікації, причинно-наслідкових діаграм, методу Дельфі та методу аналізу ієрархій Сааті, які за наявних ресурсних та фінансових обмежень дозволяють побудувати ефективний комплексний метод оцінювання рівня екологічної безпеки поверхневих водних об'єктів (ВО) ОТГ. Він дасть можливість розробити структуровані ієрархічні дерева впливу чинників ТН на гідросферу та побудувати їх інформаційний портрет.

Ієрархічна структурно-логічна модель потоку ТН має три рівні – типи впливу, фактороформуючі впливи та безпосередньо чинники впливу. Для ідентифікації складу

чинників впливу ТН на ВО та визначення їх взаємозалежності і виявлення відносної значимості умовно представимо їх у вигляді причинно-наслідкової діаграми. В нашому випадку причинно-наслідкова діаграма є інструментом, що дозволяє виявляти найбільш істотні чинники впливу ТН на НПС та їх ієрархічну підпорядкованість в загальній структурі ТН.

Стратифікація чинників потоку ТН дозволяє зробити їх селекцію за напрямками та рівнями впливу на ВО, що відображають необхідну інформацію про процеси техногенезу. Відповідно до цього методу проводять розширення статистично достовірних даних про чинники ТН. Ці дані групують залежно від умов їх отримання і проводять обробку кожної групи чинників окремо. Дані, розділені на групи за їх особливостями, називають шарами (стратами), а сам процес розподілу на шари (страти) – стратифікацією.

Стратифікація чинників ТН може бути проведена за типами техногенного впливу. У стратах типів впливу – за факторами, які можуть бути стратифіковані за первинними чи вторинними впливами. Відповідно до методу стратифікації можна побудувати наступну ієрархічну структурно-логічну модель оцінювання потоку ТН (див. рис. 2), яка певним

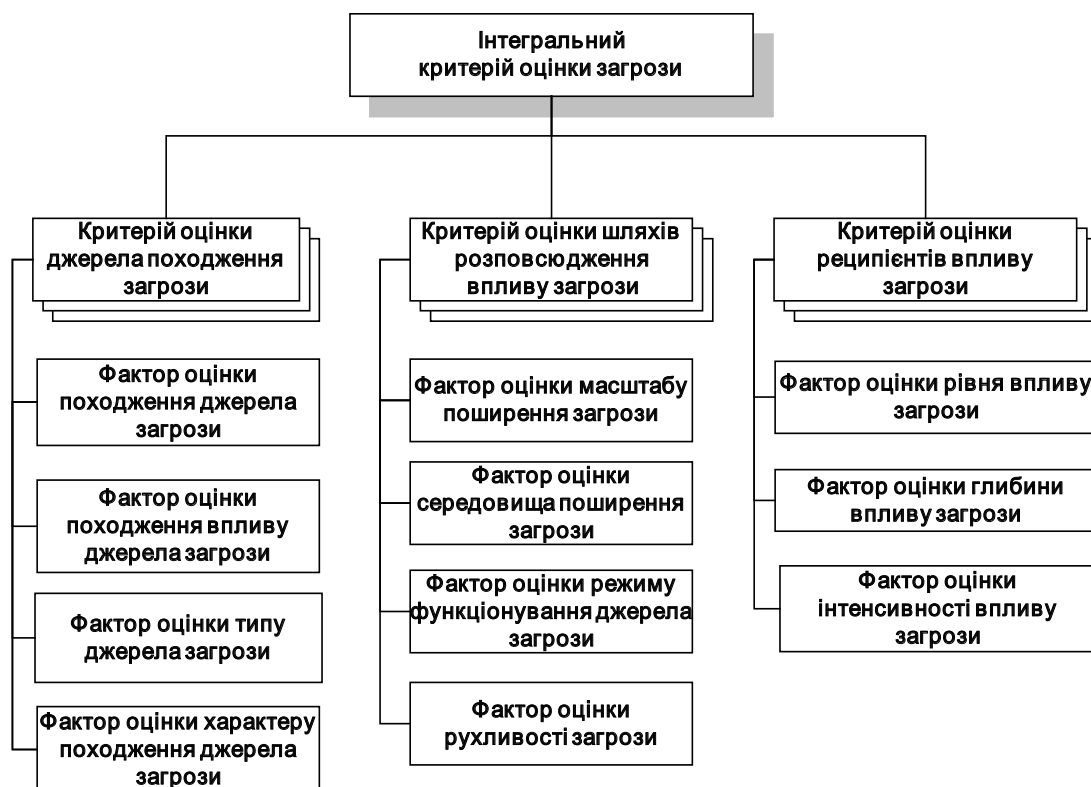


Рис. 2. Ієрархічна структурно-логічна модель оцінювання потоку ТН [9]

чином характеризує ієрархію факторів оцінювання ТН, їх взаємну узгодженість та логічний зв'язок між рівнями формалізації.

Об'єктивність вирішення задачі оцінювання потоку ТН *обумовлюється забезпеченням критеріями достатньо повного ланцюга оцінювання ознак загроз*. Це означає, що критерії описують всі важливі аспекти мети оцінки, але при цьому доцільно мінімізувати їх число. Остання вимога задовольняється, якщо критерії є незалежними, не пов'язані між собою (наприклад, бажано не використовувати в різних складових критеріях однакові вимірювані величини або величини, які виводяться одна з одної, тощо).

Процедура проведення комплексної оцінки базується на підходах багатокритеріальної оцінки загроз з подальшою згортою її до інтегрального індексу. Як правило, вона набуває практичного сенсу лише в тому випадку, коли використовується такий метод, при якому багатокритеріальна задача оцінювання зводиться до однокритеріальної [9]. Проте очевидні переваги об'єднання декількох критеріїв в один суперкритерій супроводжуються деякими труднощами і недоліками, які необхідно враховувати при використанні цього методу.

Дія факторів ТН призводить до забруднення складових геосфер ПТГС ОТГ, що означає зміну їх властивостей через дії ТН, які погіршують функції наземних і водних екосистем щодо живих об'єктів біосфери.

Джерело забруднення ПТГС (джерело чинників ТН) – це техногенний об'єкт, бойові дії або природне явище, від якого забруднення або вплив надходить у складові геосфери

(атмосфера, літосфера, гідросфера, біосфера) об'єкту НПС.

Для розробки системної класифікації джерел ТН на об'єкти НПС розглянемо існуючий на сьогодні досвід. У методиці [10] питанню класифікації джерел забруднення антропогенного походження приділено значну увагу. При цьому класифікаційними ознаками забруднень є ситуації їх виникнення, характер джерел забруднення і регулярність функціонування. У Постанові КМУ [11] наведено характеристики основних видів забруднення об'єктів НПС та періодичність проведення моніторингу їх показників. У статті [12] на основі системного підходу узагальнено чинники ТН, які можуть бути використані при розробці системної класифікації джерел і чинників ТН.

Порівняльний аналіз існуючих класифікацій техногенного навантаження та узагальнення досвіду в цій галузі дозволяють сформувати наступні класифікаційні ознаки ТН: характер походження; природа походження; сфера поширення; масштаби поширення; тип джерела; режим функціонування джерела.

Склад ознак факторів оцінювання, часткових та інтегрального критеріїв проводиться відповідно до вищевикладених підходів згідно із таблицею 1.

Керуючись цим підходом, узагальнені адитивну та мультиплікативні цілові функції можна представити у вигляді [9]:

$$J_E(e) = \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{s_i} J_i(e_i), \quad (1)$$

$$J_P(e) = \prod_{i=1}^n \frac{a_i}{s_i} J_i(e_i), \quad (2)$$

Таблиця 1. Шкала оцінок відносної важливості

Бал оцінки	Визначення	Пояснення
1	Елементи однаково важливі (пріоритетні)	Рівний внесок двох елементів в досягнення мети
3	Незначна перевага одного над іншим	Є умови, що надають легку перевагу одного над іншим
5	Істотна перевага	Існують вагомі факти, що один істотно важливіший від іншого
7	Явна перевага одного над іншим	Є беззаперечні факти переваг одного над іншим
9	Дуже сильна перевага	Очевидність переваги одного над іншим не викликає сумнівів
2, 4, 6, 8	Проміжний результат рішення між двома сусідніми міркуваннями	Застосовується в компромісному випадку
Обернені розміри приведених вище чисел	Якщо при порівнянні одного елементу з іншим отримано одне з вище зазначених чисел (наприклад, 3), то при зворотному порівнянні елементів одержимо зворотне число (тобто 1/3)	

де α_i і s_i – вагові коефіцієнти, які можуть визначатися експертним шляхом за допомогою процедур попарного порівняння методу аналізу ієрархій Сааті (МАІС).

Кожен частковий критерій J_i складається з множини факторів f_{ij} . Для отримання експертних оцінок відповідних впливів загроз експерти заповнюють анкети, в яких присвоюють відповідні оцінки ознакам факторів e_j , значення яких можна зафіксувати в бальній шкалі або в шкалі, що відповідає бальній шкалі МАІС [9] (табл. 1). Шкала – це система чисел визначеної послідовності чи інших елементів, прийнятих для виміру чи оцінювання величин, виявлення зв'язків і відносин між елементами [13].

*Бальна шкала є проміжною між порядковою та інтервальною. Якщо є впевненість, що всі експерти користуються єдиною бальною шкалою, як це буває, наприклад, за наявності спеціальних еталонів, то бальна шкала наближається до інтервальної, і бальні оцінки обробляють як кількісні.

Розробка процедури оцінювання впливу техногенного навантаження на водні об'єкти громади. Попарні порівняння проводяться за домінуванням одного елемента над іншим та виражаються в цілих числах за шкалою Сааті (див. табл. 1). Для уніфікації відповіді експертів повинен бути заданий однаковий спосіб і шкала оцінки. Експерти заповнюють матриці парних порівнянь за відповідними факторами критеріїв оцінювання (див. рис. 2).

Під час попарних порівнянь порівняння елементу з самим собою дає одиницю, результат порівняння першого елементу з другим – оцінку a_{12} , результат порівняння першого елементу з третім – оцінку a_{13} і т.д. Кожен експерт проводить експертизу незалежно, а результати записуються до таблиці 3, яка представляє структуру матриць парних порівнянь. На етапі 3 для одержання кожної матриці потрібно $n(n-1)/2$ суджень.

Дані таких оцінок, отримані від m експертів, зводяться в матрицю порівнянь (див.

Таблиця 2. Класифікація критеріїв і факторів оцінювання потоку ТН

Критерій оцінки джерела походження загрози.						
1. Фактор оцінки походження джерела загрози						
Військові дії	Глобальні кліматичні зміни		Надзвичайні ситуації	Промислова діяльність	Агропромислова діяльність	
2. Фактор оцінки походження впливу джерела загрози						
Радіоактивне	Хімічне	Електромагнітне	Механічне	Акустичне	Вібраційне	Теплове
3. Фактор оцінки типу джерела загрози						
Неорганізовані	Організовані	Групові		Одиночні	Площинні	Точкові
4. Фактор оцінки характеру походження джерела загрози						
Ланцюжкове	Фактороформуюче			Безпосереднє	Вторинне	
Критерій оцінки шляхів розповсюдження впливу загрози.						
1. Фактор оцінки масштабу поширення загрози						
Глобальне	Міждержавне	Регіональне	Охоплює об'єкти ПЗФ		Місцеве	Локальне
2. Фактор оцінки середовища поширення загрози						
Атмосферне повітря	Ґрунтові води		Поверхневі води	Ґрунти	Морські води	
3. Фактор оцінки режиму функціонування джерела загрози						
Постійно діюче	Періодично діюче	Епізодично діюче		Одноразове	Випадкове	
4. Фактор оцінки рухливості загрози						
Рухома		Малорухома			Нерухома	
Критерій оцінки реципієнтів впливу загрози.						
1. Фактор оцінки рівня впливу загрози						
Ландшафтний	Екосистемний	Флористичний	Фауністичний		Популяційний	Видовий
2. Фактор оцінки глибини впливу загрози						
Незворотній		Частково зворотній			Зворотній	
3. Фактор оцінки інтенсивності впливу загрози						
Висока		Середня			Мала	
Інтегральний критерій оцінки загрози.						

Таблиця 3. Матриця парних порівнянь за відповідними критеріями

ВО	x_1	x_2	...	x_i	...	x_n
x_1	$a_{11}=1$	a_{12}	...	a_{1i}	...	a_{1n}
x_2	a_{21}	$a_{22}=1$	...	a_{2i}	...	a_{2n}
...	...	...	...	...	...	...
x_i	a_{i1}	...	...	$a_{ii}=1$	...	a_{in}
...	...	...	...	...	...	...
x_n	a_{n1}	a_{n2}	...	a_{ni}	...	$a_{nn}=1$

табл. 4) за відповідним критерієм, у кожній клітинці якої ij стоїть число a_{ij} , яке дорівнює осередненій сумі оцінок переваги i -го фактору оцінювання над j -м за відповідним критерієм, отриманих від усіх m експертів:

$$\overline{a_{ij}} = \frac{1}{m} \times \sum_{k=1}^m a_{ijk}, \quad (3)$$

де $k \in \{1, 2, \dots, m\}$, m – кількість експертів.

Таблиця 4. Матриця парних порівнянь за критеріями із осереднених оцінок усіх експертів

ВО	x_1	...	x_i	...	x_n
x_1	$\overline{a_{11}} = 1$	...	$\overline{a_{1i}}$	...	$\overline{a_{1n}}$
...	...	...	...	...	...
x_i	$\overline{a_{i1}}$	...	$\overline{a_{ii}} = 1$	...	$\overline{a_{in}}$
...	...	...	...	...	...
x_n	$\overline{a_{n1}}$	...	$\overline{a_{ni}}$	...	$\overline{a_{nn}} = 1$

Для кожної матриці порівнянь A є рішення рівняння

$$A \times w = \lambda_{\max} \times w, \quad (4)$$

де $\lambda_{\max}$ – максимальне власне значення.

Для кожного рядка матриці порівнянь осереднених за «експертами» оцінок обчислюються компоненти власного вектору щодо рядків матриці:

$$\begin{aligned} w_1 &= (\overline{a_{11}} \times \overline{a_{12}} \times \overline{a_{13}} \times \dots \times \overline{a_{1n}})^{1/n}, \\ w_2 &= (\overline{a_{21}} \times \overline{a_{22}} \times \overline{a_{23}} \times \dots \times \overline{a_{2n}})^{1/n}, \\ &\dots \\ w_n &= (\overline{a_{n1}} \times \overline{a_{n2}} \times \overline{a_{n3}} \times \dots \times \overline{a_{nn}})^{1/n}, \end{aligned} \quad (5)$$

які нормуються діленням на $\sum_{i=1}^n w_i$ і дозволяють визначити вагові коефіцієнти:

$$k_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (6)$$

Отриманий вектор w дає після нормалізації коефіцієнти пріоритетності, що показують

внесок елементів в досягнення відповідної мети. Ці компоненти також використовуються для оцінки узгодженості оцінок експертів.

Після проведення попарних порівнянь визначається індекс узгодженості (ІУ) і відношення узгодженості (ВУ). ІУ, що відображає порушення числової та транзитивної матриці порівнянь, є важливим елементом моделі визначення вагових коефіцієнтів порівнюваних ВО. Тому цей індекс можна розглядати як показник «близькості до узгодженості». Тобто похибки співвідношень $a_{ik} = a_{ij} \times a_{jk}$, $k = \overline{1, n}$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, n}$. Для ІУ має місце наступна формула [13]:

$$IU = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \quad (7)$$

де n – число порівнюваних елементів. Для обернено симетричної матриці

$$\lambda_{\max} \geq n. \quad (8)$$

Далі порівнюють отриману ІУ із тією, що утворилася б при випадковому виборі кількісних порівнянь із шкали $1/9, 1/8, \dots, 1, 2, \dots, 9$ з утворенням обернено симетричної матриці. Розділивши ІУ на середню випадкову узгодженість (СУ), одержують відношення узгодженості (ВУ):

$$BU = \frac{IU}{CU}. \quad (9)$$

У табл. 5 середні узгодженості для випадкових матриць різного порядку.

Розмір ВУ не повинен перевищувати 10%. Іноді допускається до 20%. Якщо ВУ перевищує межі, то експертам потрібно перегрупуватися синтез пріоритетів з другого рівня вниз. Локальні пріоритети перемножуються на вищі пріоритети та підсумовуються за кожним елементом відповідно до коефіцієнтів важливості. Вектор пріоритетів ВО $P_{vp} = \{P_{vp1}, \dots, P_{vpn}\}$, який складається із компонентів P_{vpj} ($i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, 3}$), є інтегральною оцінкою i -го ТН за j -м критерієм. Наприклад для 1-го ВО:

$$\begin{aligned} P_{vp11} &= k_1 \times \overline{a_{11}} + k_2 \times \overline{a_{12}} + k_3 \times \overline{a_{13}} \\ P_{vp11} &= k_1 \times \overline{a_{21}} + k_2 \times \overline{a_{22}} + k_3 \times \overline{a_{23}} \\ &\dots \\ P_{vp1m} &= k_1 \times \overline{a_{n1}} + k_2 \times \overline{a_{n2}} + k_3 \times \overline{a_{n3}} \end{aligned} \quad (10)$$

На основі обчисленого вектору пріоритетів P_{vpj} можна провести ранжування ВО за вибраним критерієм оцінки і скласти матрицю пріоритетів

Таблиця 5. Середні узгодженості для матриць різного порядку [13]

Розмір матриці	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Середня випадкова узгодженість	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59

$$P = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & \dots & L \\ x_1 & P_{vp11} & P_{vp12} & P_{vp13} & \dots & P_{vp1L} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_i & P_{vpi1} & P_{vpi2} & P_{vpi3} & \dots & P_{vpiL} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_n & P_{vpn1} & P_{vpn2} & P_{vpn3} & \dots & P_{vpnL} \end{pmatrix} \quad (11)$$

Для порівняння між собою об'єктів $VP_1, \dots, VP_n$ за векторними критеріями (див. рис. 2 і табл. 2) використаємо формули (3), (5), (6), (10), (11) і отримаємо компоненти власного вектору щодо рядків матриці пріоритетів:

$$W_i^* = \sqrt[L]{P_{vpi1} \times \dots \times P_{vpiL}}, \quad (12)$$

які нормуються діленням на $\sum_{i=1}^n W_i^*$ і дозволяють визначити вагові коефіцієнти:

$$\bar{W}_i^* = \frac{W_i^*}{\sum_{i=1}^n W_i^*} \quad (13)$$

для якої можна отримати інтегральні оцінки відповідного i -го ВО:

$$\begin{aligned} VP_1 &= \bar{W}_1^* \times P_{vp11} + \bar{W}_2^* \times P_{vp12} + \bar{W}_3^* \times P_{vp13} + \dots + \bar{W}_L^* \times P_{vp1L}, \\ VP_2 &= \bar{W}_1^* \times P_{vp21} + \bar{W}_2^* \times P_{vp22} + \bar{W}_3^* \times P_{vp23} + \dots + \bar{W}_L^* \times P_{vp2L}, \\ &\dots \\ VP_n &= \bar{W}_1^* \times P_{vpn1} + \bar{W}_2^* \times P_{vpn2} + \bar{W}_3^* \times P_{vpn3} + \dots + \bar{W}_L^* \times P_{vpnL} \end{aligned} \quad (14)$$

1. Етапи 3, 4 і 5 проводяться для всіх рівнів і груп в ієрархії.

2. Потім використовують ієрархічний синтез для зважування власних векторів за коефіцієнтами важливості чи пріоритетності критеріїв і обчислюють суми за усіма відповідними зваженими компонентами власних векторів кожного рівня ієрархії, що лежить нижче.

3. Узгодженість ієрархії визначається шляхом перемноження кожного індексу узгодженості ІУ на пріоритет і підсумовування результатів. Потім цей результат ділиться на середньовипадкову узгодженість (див. табл. 4). Прийнятна узгодженість — біля 10% або менше. Якщо вона вища, потрібно поліпшити якість суджень, переглянувши питання при парних порівняннях або структуру задачі, повернувшись до етапу 2 для сумнівних частин ієрархії.

Тоді, відповідно до початкового допущення про те, що різниця у відповідях експертів пояснюється випадковими незалежними флуктуаціями щодо деяких «істинних» величин, для обробки даних оцінок можна використовувати звичні статистичні методи точкового оцінювання. Кожному ВО ОТГ слід привести у відповідність середній бал оцінювання:

$$x_j = \frac{1}{m} \times \sum_{i=1}^m x_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

Оцінки (15) приймаються як групові. При проведенні процедури комплексного оціню-

вання значення індикаторів і індексів загроз проектується на значення відповідних шкал.

Результати оцінювання впливу техногенного навантаження на водні об'єкти на території ОТГ Донбасу. Активні бойові дії відбуваються в найбільшому в світі вуглевидобувному регіоні України, який є однією з найбільших і найнебезпечніших природних-техногенних геосистем. Його площа становить до 53 тис. км², де проживає від 4 до 7 млн осіб.

На Донбасі розташовано понад 4000 потенційно небезпечних об'єктів, таких як шахти, металургійні та хімічні виробництва, полігони токсичних відходів тощо. Їхнє руйнування загрожує безпеці населення регіону [14].

Враховуючи вищезазначені умови, що склалися в цьому регіоні було розроблено індикативну схему проведення експрес-досліджень, які б дали змогу оцінити, найбільш уражаєму ланку, яка є критичною для забезпечення екологічної безпеки та безпеки життєдіяльності в цьому регіоні.

На наш погляд, вода є ключовим індикатором екологічного стану Донбасу. Однак через бойові дії існує невизначеність щодо рівня забруднення вод різними речовинами через відсутність систематичного моніторингу.

Для аналізу введемо поняття інформаційної матриці розподілу чинників ТН, що будується на основі ієрархічної структурно-логічної моделі потоку ТН (див. рис. 3). Застосування методу інформаційної матриці є коректним, якщо можна порівнювати сумарну кількість інформації про перехід території ВО за факторами ТН в різні класи, що можуть порівнюватися один з одним.

У спрощених інформаційних матрицях всі техногенні чинники мають вагу 1, якщо присутні, і 0, якщо відсутні. Інтенсивність чинників ТН оцінюється за трьохбальною шкалою: 1 – слабка, 2 – середня, 3 – висока.

Інформаційні величини можуть порівнюватися лише, якщо одночасно виконуються наступні три умови: порівнюються індивідуальні кількості інформації, що містяться в ознаках про приналежність до відповідних класів ВО НПС ОТГ; порівнюються величини, розраховані для одного ВО чи певної його функціональної зони і різних класів; порівнюються величини, розраховані для різних ВО НПС ОТГ чи певних його функціональних зон і різних класів.

На рис. 3 наведено результати оцінювання впливу чинників ТН на ВО на території ОТГ за розробленою процедурою.

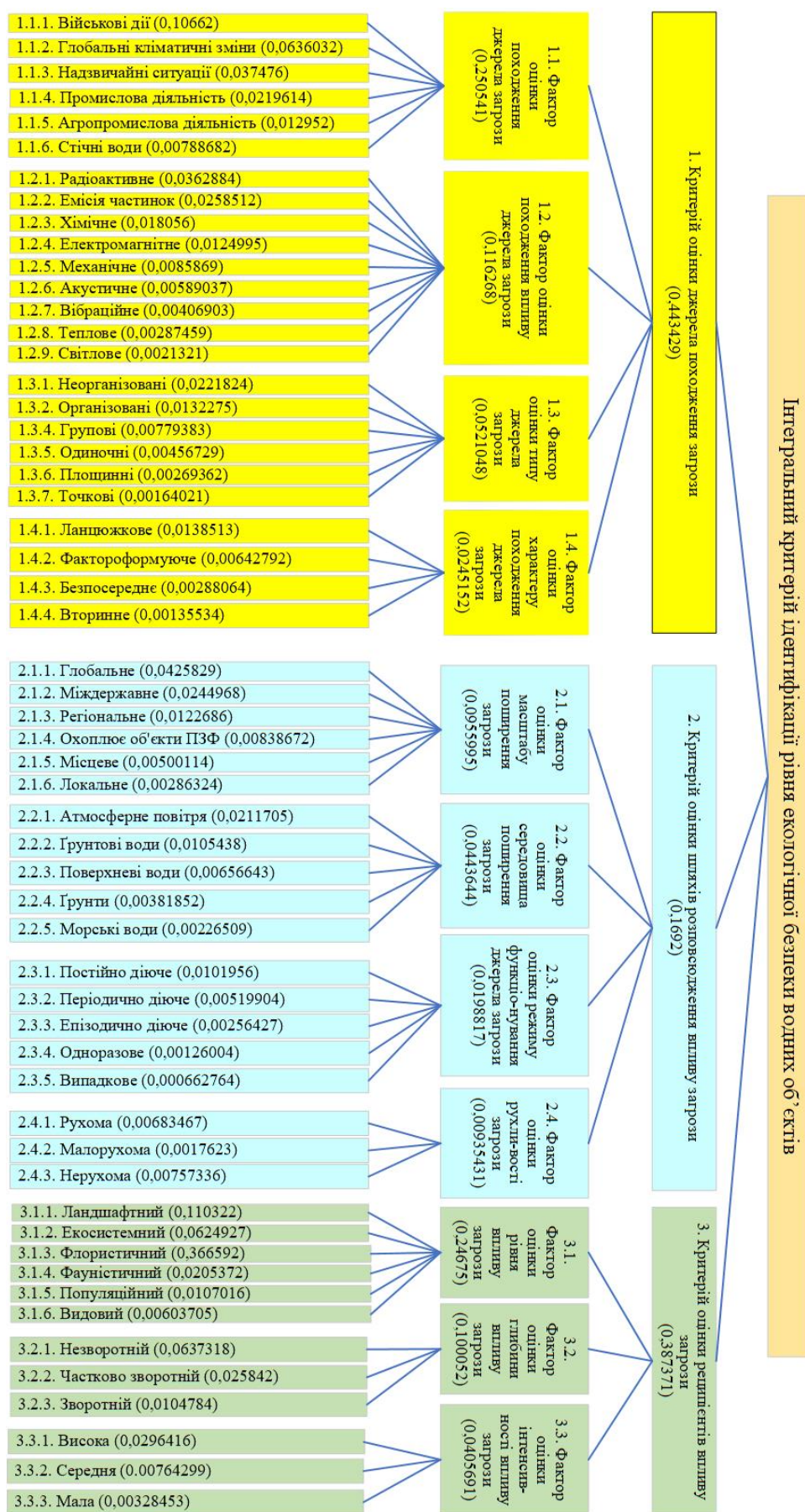


Рис. 3. Результати оцінювання впливу чинників ТН на ВО на території ОТГ

Аргументи цільової функції e_i , що є ознаками факторів в оцінках загроз за складовими критеріями, виражаються балами в безрозмірному вигляді. Для оцінки факторів в часткових критеріях складемо три системи рівнянь:

1. Критерій оцінки джерела загрози:

$$\begin{cases} f_{11}(e^1) = 0,1 \cdot e^1_{11} + 0,06 \cdot e^1_{12} + 0,04 \cdot e^1_{13} + \\ + 0,02 \cdot e^1_{14} + 0,01 \cdot e^1_{15} + 0,008 \cdot e^1_{16}, \\ f_{12}(e^1) = 0,04 \cdot e^1_{21} + 0,03 \cdot e^1_{22} + 0,02 \cdot e^1_{23} + \\ + 0,01 \cdot e^1_{24} + 0,009 \cdot e^1_{25} + 0,06 \cdot e^1_{26} + \\ + 0,004 \cdot e^1_{27} + 0,003 \cdot e^1_{28} + 0,002 \cdot e^1_{29}, \\ f_{13}(e^1) = 0,02 \cdot e^1_{31} + 0,01 \cdot e^1_{32} + 0,008 \cdot e^1_{33} + \\ + 0,005 \cdot e^1_{34} + 0,003 \cdot e^1_{35} + 0,002 \cdot e^1_{36}, \\ f_{14}(e^1) = 0,01 \cdot e^1_{41} + 0,006 \cdot e^1_{42} + \\ + 0,003 \cdot e^1_{43} + 0,001 \cdot e^1_{44}; \end{cases} \quad (16)$$

2. Критерій оцінки шляхів розповсюдження впливу загрози:

$$\begin{cases} f_{21}(e^2) = 0,04 \cdot e^2_{11} + 0,02 \cdot e^2_{12} + \\ + 0,01 \cdot e^2_{13} + 0,008 \cdot e^2_{14} + 0,005 \cdot e^2_{15} + 0,003 \cdot e^2_{16}, \\ f_{22}(e^2) = 0,02 \cdot e^2_{21} + 0,01 \cdot e^2_{22} + \\ + 0,007 \cdot e^2_{23} + 0,004 \cdot e^2_{24} + 0,002 \cdot e^2_{25}, \\ f_{23}(e^2) = 0,01 \cdot e^2_{31} + 0,005 \cdot e^2_{32} + \\ + 0,003 \cdot e^2_{33} + 0,001 \cdot e^2_{34} + 0,001 \cdot e^2_{35}, \\ f_{24}(e^2) = 0,007 \cdot e^2_{41} + 0,002 \cdot e^2_{42} + 0,008 \cdot e^2_{43}; \end{cases} \quad (17)$$

3. Критерій оцінки реципієнтів впливу джерела загрози:

$$\begin{cases} f_{31}(e^3) = 0,11 \cdot e^3_{11} + 0,06 \cdot e^3_{12} + \\ + 0,37 \cdot e^3_{13} + 0,02 \cdot e^3_{14} + 0,01 \cdot e^3_{15} + \\ + 0,006 \cdot e^3_{16}, \\ f_{32}(e^3) = 0,06 \cdot e^3_{21} + 0,03 \cdot e^3_{22} + 0,01 \cdot e^3_{23}, \\ f_{33}(e^3) = 0,03 \cdot e^3_{31} + 0,008 \cdot e^3_{32} + 0,003 \cdot e^3_{33}. \end{cases} \quad (18)$$

Після оцінки факторів обчислюють значення часткових критеріїв, за умови застосування адитивної цільової функції, за формулами:

1. Критерій оцінки джерела загрози:

$$J_1(e^1) = 0,25 \cdot f_{11}(e^1) + 0,12 \cdot f_{12}(e^1) + 0,052 \cdot f_{13}(e^1) + 0,025 \cdot f_{14}(e^1), \quad (19)$$

2. Критерій оцінки шляхів розповсюдження впливу загрози:

$$J_2(e^2) = 0,096 \cdot f_{21}(e^2) + 0,044 \cdot f_{22}(e^2) + 0,02 \cdot f_{23}(e^2) + 0,009 \cdot f_{24}(e^2), \quad (20)$$

3. Критерій оцінки реципієнтів впливу джерела загрози:

$$J_3(e^3) = 0,25 \cdot f_{31}(e^3) + 0,1 \cdot f_{32}(e^3) + 0,04 \cdot f_{33}(e^3) \quad (21)$$

4. Інтегральний критерій оцінки загрози:

$$J_{\Sigma}(e) = 0,44 \cdot J_1(e^1) + 0,17 \cdot J_2(e^2) + 0,39 \cdot J_3(e^3). \quad (22)$$

Отже, задача оцінювання впливу ТН на поверхневі та ґрунтові ВО зводиться до порівняння отриманих бальних оцінок і ранжування їх.

Висновки. Розроблено комплексний метод оцінювання рівня екологічної безпеки поверхневих водних об'єктів ОТГ в умовах глобальних кліматичних змін і ведення бойових дій, що розв'язується методами системного аналізу з використанням багатокритеріального підходу. При цьому задача ідентифікації рівня екологічної безпеки поверхневих водних об'єктів зводиться до порівняння отриманих бальних оцінок і ранжування їх за сукупністю часткових критеріїв чи інтегральним критерієм (індексом). Відповідно до структурно-логічної схеми складено системи рівнянь, за якими при проведенні відповідного експертного оцінювання будуть отримуватися відповідні оцінки впливу чинників ТН воєнно-техногенного навантаження та глобальних кліматичних змін на поверхневі водні об'єкти ОТГ Донбасу.

Література

1. Романченко І.С., Сбітнєв А.І., Чумаченко С.М. Методи прогнозування екологічного стану навколишнього середовища військових об'єктів. *Наука і оборона*. 2004. №4. С. 44-53.
2. Чумаченко С.М. Порівняльний аналіз методів екологічної оцінки та особливості їх застосування для оцінки впливу бойової підготовки на екосистеми військових полігонів. *Збірник наукових праць*. 2004. Вип. 4 (29). К.: ЦНДІ МО України. С. 144-157.
3. Системи управління якістю. *Вимоги. ДСТУ ISO 9001-2001*. 2001. К.: Держстандарт України. 23 с.
4. Devito francesco A., Ghellere M., Meroni I., Modica M., Paleari S., Zoboli R. Sustainability assessment of urban areas through a multicriteria decision support system. *Central Europe towards Sustainable Building – Innovations for sustainable future*. 2016. P. 499-506. URL: <https://iris.gssi.it/handle/20.500.12571/7177>
5. Nay J.J., Abkowitz M., Chu E., Gallagher D., Wright H. A review of decision-support models for adaptation to climate change in the context of development. *Climate and Development*. 2014. Vol. 6, no. 4. P. 357–367. URL: <https://doi.org/10.1080/17565529.2014.912196>
6. Wang M. E. “We have to trust it, or else we can just throw it away”: The use of decision support systems during extreme weather events. *Master thesis, University of Oslo*. 2018. URL: <http://urn.nb.no/URN:NBN:no-65982>
7. Massarelli C., Binetti M.S., Triozzi M., Uricchio V.F. A First Step towards Developing a Decision Support System Based on the Integration of Environmental Monitoring Activities for Regional Water Resource Protection. *Hydrology*. 2023. Vol. 10, no. 8. P. 174. URL: <https://doi.org/10.3390/hydrology10080174>
8. Taraglio S., Chiesa S., La Porta L., Pollino M., Verdecchia M., Tomassetti B., Lombardi A. Decision Support System for smart urban management: resilience against natural phenomena and aerial environmental assessment. *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*. 2019. Vol. 24. URL: <https://doi.org/10.5278/ijsepm.3338>

9. Чумаченко С.М., Дудкін О.В., Коржнів М.М., Яковлев Є.О. Методичні аспекти оцінки і ранжування загроз для біорізноманіття в Україні. *Екологія і ресурси. Зб. наук. праць*. 2003. Вип. 7. К.: УІНСіР РНБОУ. С. 77-86.
10. Кляченко О.Л., Мельничук М.Д., Іванова Т.В. Екологічні біотехнології: теорія і практика: Навчальний посібник. Вінниця, ТОВ «Нілан-ЛТД», 2015. с. 254.
11. Постанова Кабінет Міністрів України від 13 червня 2024 р. № 684 «Деякі питання функціонування державної системи моніторингу довкілля та її підсистем».
12. Чумаченко С.М., Морщ Є. В., Михайлова А. В., Парталян А. С. Методика комплексного оперативного експертного оцінювання військово-техногенних загроз в зоні проведення операції Об'єднаних сил. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2020. № 1 (9). С. 23–33.
13. Saaty T.L. Mathematical Principles of Decision Making: The Complete Theory of the Analytic Hierarchy Process. 2009. ISBN 1-888603-10-0.
14. Yakovliev Y., Chumachenko S. Ecological Threats in Donbas, Ukraine. *Centre for Humanitarian Dialogue, Geneva, Switzerland*. 2017. p. 60.

References

1. Romanchenko, I.S., Sbitnev, A.I., Chumachenko, S.M. (2004). Metody prohnovuvannya ekolohichnoho stanu navkolyshnoho seredovyshcha viiskovykh ob'ektiv [Methods for predicting the environmental status of military facilities]. *Nauka i oborona*, 4, 44-53.
2. Chumachenko, S.M. (2004). Porivnialnyi analiz metodiv ekolohichnoi otsinky ta osoblyvosti ikh zastosuvannya dlia otsinky vplyvu bioivoi pidhotovky na ekosystemy viiskovykh polihoniv [Comparative analysis of environmental assessment methods and their application for evaluating the impact of combat training on ecosystems of military ranges]. *Zbirnyk naukovykh prats*, 4 (29), 144-157.
3. Systemy upravlinnia yakistiu. Vymohy. DSTU ISO 9001-2001. 2001. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy. 23 s.
4. Devitofrancesco, A., Ghellere, M., Meroni, I., Modica, M., Paleari, S., Zoboli, R. (2016). Sustainability assessment of urban areas through a multicriteria decision support system. *Central Europe towards Sustainable Building – Innovations for sustainable future*, 499-506. URL: <https://iris.gssi.it/handle/20.500.12571/7177>
5. Nay, J.J., Abkowitz, M., Chu, E., Gallagher, D., Wright, H. (2014). A review of decision-support models for adaptation to climate change in the context of development. *Climate and Development*, 6 (4), 357–367. URL: <https://doi.org/10.1080/17565529.2014.912196>
6. Wang, M. E. (2018). "We have to trust it, or else we can just throw it away": The use of decision support systems during extreme weather events. *Master thesis, University of Oslo*. URL: <http://urn.nb.no/URN:NBN:no-65982>
7. Massarelli, C., Binetti, M.S., Triozi, M., Uricchio, V.F. (2023). A First Step towards Developing a Decision Support System Based on the Integration of Environmental Monitoring Activities for Regional Water Resource Protection. *Hydrology*, 10 (8), 174. URL: <https://doi.org/10.3390/hydrology10080174>
8. Taraglio, S., Chiesa, S., La Porta, L., Pollino, M., Verdecchia, M., Tomassetti, B., Lombardi, A. (2019). Decision Support System for smart urban management: resilience against natural phenomena and aerial environmental assessment. *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*, 24. URL: <https://doi.org/10.5278/ijsep.m.3338>
9. Chumachenko, S.M., Dudkin, O.V., Korzhniev, M.M., Yakovliev, Ye.O. (2003). Metodichni aspekty otsinky i ranzhuvannya zahroz dlia bioriznomanittia v Ukraini [Methodological aspects of assessment and ranking of threats to biodiversity in Ukraine]. *Ekolohiia i resursy*, 7, 77-86.
10. Kliachenko, O., Melnychuk, M., Ivanova, T. (2015). Ekolohichni biotekhnolohii: teoriia i praktyka [Ecological Biotechnology: Theory and Practice]. Vinnytsia: TOV "Nilan-LTD", 254.
11. Cabinet of Ministers of Ukraine Resolution of June 13, 2024, No. 684 "Certain Issues of the Functioning of the State Environmental Monitoring System and Its Subsystems".
12. Chumachenko, S.M., Morshch, Ye.V., Mykhailova, A.V., & Partalyan, A.S. (2020). Metodika kompleksnoho operatyvnoho ekspertnoho otsiniuvannya viiskovo-tekhnohennykh zahroz v zoni provedennia operatsii Obiednanykh syl [Methodology for comprehensive operational expert assessment of military-technogenic threats in the area of the Joint Forces operation]. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhehzna bezpeka*, 1 (9), 23–33.
13. Saaty, T.L. (2009). Mathematical Principles of Decision Making: The Complete Theory of the Analytic Hierarchy Process. ISBN 1-888603-10-0.
14. Yakovliev, Y., Chumachenko, S. (2017). Ecological Threats in Donbas, Ukraine. *Centre for Humanitarian Dialogue, Geneva, Switzerland*, 60.

DEVELOPMENT OF INFORMATION AND LOGIC MODELS FOR ASSESSING FACTORS OF NEGATIVE IMPACT ON THE ENVIRONMENT

The article analyzes information-logical models for assessing the impact of technogenic load (TL) on the environment. It highlights the lack of objective data on the volume of TL and the impossibility of retrospective analysis of changes, which complicates the evaluation of the ecological state. The task of retrospective analysis of TL and its impact assessment on environmental components through indicators and indices is considered, which is reduced to ecological evaluation of the distribution of TL factors within the territories of united territorial communities (UTCs).

The problem of identifying the composition, structure of TL factors, and causal relationships between them is defined. It is noted that technogenic factors determine the integral characteristic of the impact of TL flow on objects of the natural-technogenic geosystem (NTGS). Expert assessment methods are analyzed, including interval estimation, hierarchy analysis, stepwise matrices, and network diagrams, with particular attention to causal diagrams.

A detailed study of the structural-logical model of TL flow and influencing factors is presented. It is emphasized that stratification of TL factors can be performed by types of technogenic impact, allowing the construction of a hierarchical structural-logical model for TL flow assessment. An approach to comprehensive assessment based on multicriteria threat evaluation with subsequent aggregation into an integral index is proposed.

The influence of TL factors on the pollution of geosphere components of NTGS in UTCs is examined. Pollution is defined as a change in the properties of geosphere components leading to deterioration of terrestrial and aquatic ecosystem functions. Issues of developing a systematic classification of TL sources are discussed, including the nature and origin, scope and scale of distribution, type, and operational mode of the source. The use of the Saaty scale for expert evaluations and formulas for calculating the index and consistency ratio are described. A classification of criteria and factors for TL flow assessment and a scale of relative importance ratings are provided. The development of a procedure for assessing the impact of technogenic load on water bodies within the community territory is also considered.

Key words: technogenic load, environmental safety assessment, united territorial communities, factor stratification, cause-and-effect diagrams, Delphi method, Saaty's analytic hierarchy process, multicriteria evaluation, integral index, expert assessments, weighting coefficients.

Savchenko I.O.

Postgraduate Student at the Professor A.P. Ladanyuk Department of Automation and Computer Technologies of Control Systems,
National University of Food Technologies, Kyiv