


<https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-23>  
УДК 504:001.8; 504:1

Надійшла 9 березня 2023 р.  
Прийнята 20 квітня 2023 р.

## Використання ентропійного підходу в системах моніторингу водних ресурсів

*Віталій Безсонний*

к. техн. н., доцент, кафедра екологічної безпеки та екологічної освіти  
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, м. Свободи, 4, Харків, 61022, Україна,  
e-mail: [bezsonny@gmail.com](mailto:bezsonny@gmail.com),  <https://orcid.org/0000-0001-8089-7724>

Ефективне управління водними ресурсами можливе тільки при ефективно організованій системі моніторингу. З появою та розвитком теорії інформації концепція інформаційної ентропії знайшла своє місце і в галузі розробки мереж моніторингу вод. В статті проведено аналіз досліджень прикладів реалізації побудови систем моніторингу вод на основі ентропії. Продемонстровано використання різних методів теорії інформації та їх адаптації для використання в проектуванні систем моніторингу, при чому метою методів проектування є вибір пунктів моніторингу, які надають найбільше інформації для мережі моніторингу. Завдяки ретельному тестуванню теорія інформації виявилася надійним інструментом для оцінки та проектування оптимальних систем моніторингу вод. Узагальнено терміни ентропії, що використовувалися при побудові систем моніторингу вод. Розглянуто останні застосування концепції ентропії для проектів систем моніторингу води, які класифікуються на опади; стік і рівень води; якість води; вологість ґрунту та підземні води. Також висвітлено інтегрований метод проектування багатфакторних систем моніторингу. Перевага ентропійного підходу полягає в тому, що систему моніторингу водних ресурсів можливо побудувати на підставі контрольованої мережі інформації. Це може відрізнитися від заданої щільності станцій, запропонованої в керівних нормативних документах. Мережа може бути краще пристосована до конкретного використання або оптимізована для забезпечення найбільшої ефективності при щільності, нижчій від тієї, що пропонується в нормативних рекомендаціях. Висвітлено проблеми, що стосуються оцінки оптимального дизайну мережі, зокрема, оптимальний дизайн мережі моніторингу можна побудувати на основі заданих критеріїв проектування, однак практичне застосування нової оптимальної мережі моніторингу рідко оцінюється в гідрологічній чи іншій моделі. Також, важливо обґрунтувати переваги проектування мереж на основі ентропії, щоб переконати осіб, які приймають рішення, у важливості застосування ентропійних підходів. Інша проблема полягає в тому, мережа може бути суб'єктивною, ґрунтуючись на виборі, зробленому під час обчислення ентропії, і обраному методі проектування, особливо коли в проекті враховуються додаткові цільові функції. Незважаючи на наявні джерела суб'єктивності, ентропійні методи залишаються одним із найбільш об'єктивних підходів до проектування мережі.

**Ключові слова:** інформаційна ентропія; моніторинг вод; гідрометрична мережа; теорія інформації; система моніторингу.

**Як цитувати:** Безсонний Віталій. Використання ентропійного підходу в системах моніторингу водних ресурсів / Віталій Безсонний // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», 2023. – Вип. 58. – С. 302-320. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-23>

**In cites:** Vitalii Bezsonnyi (2023). Use of the entropy approach in water resource monitoring systems. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (58), 302-320. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-23> [in Ukrainian]

### Постановка проблеми.

Будемо розглядати системи моніторингу вод як такі, що враховують усі аспекти вимірювально-дослідницьких систем та процесів, пов'язаних з водою, включаючи опади, стік, якість води, підземні води, вологість ґрунту тощо. [1–3]. Адекватні, оптимально спроектовані системи моніторингу вод та отримана із них інформація стосовно якості є одним головних кроків на шляху до ефективного інтегрального управління водними ресурсами. Базовими принципами проектування систем моніторингу вод є: визначена кількість пунктів спостереження, місця розташування цих пунктів та періодичність передавання інформації [4,5]. Можна очікувати, що чим більше даних ми збираємо, тим більше проблем з водними ресурс-

ами вирішується ефективно. Однак, це не завжди вірно, тому що нерепрезентативні дані можуть не відображати реального стану вод [1 – 9]. На сьогодні скорочення пунктів спостереження за водними ресурсами є досить поширеним явищем як через фінансові питання, так і через коригування пріоритетів моніторингу [10 – 12]. Тому визначення адекватної кількості пунктів спостережень, їх місць розташування є актуальним при побудові мережі моніторингу вод. Але на сьогодні ще не створено стандартизованих підходів щодо побудови систем моніторингу вод через соціально-економічні питання та неузгодженість взаємодії різних суб'єктів моніторингу [1,13].

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

В існуючих оглядах досліджувався широкий

спектр методологій побудови систем моніторингу води, таких як статистичний аналіз, просторова інтерполяція, застосування теорії інформації, методи оптимізації, експертні методи та ін. [4,6,12 – 21]. У роботі [12] розглянуто аспекти щодо зниження гідрометричної щільності мережі пунктів спостережень, наголошується на важливості репрезентативної інформації від мереж моніторингу, розглядаються різні підходи до побудови мереж моніторингу. Авторами також порівняно різні підходи до побудови систем моніторингу: просторовий інтерполяційний, статистичний, вибірковий, фізіографічний і ентропійний та зробили кілька висновків про важливість високоякісних гідрометричних даних для управління водними ресурсами, які є актуальними понині. Вони також прийшли до висновку, що одним з найбільш перспективних підходів до проектування мереж було застосування методів ентропії, що виділяють ранні дослідження з використанням принципу максимальної ентропії і передачі інформації.

#### **Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми**

У цьому огляді розглядаються дослідження, в яких для побудови мереж та систем моніторингу було застосовано теорію інформації або інформаційну ентропію. Теорію інформації започатковано Клодом Шенном 1948 року [20] для вимірювання вмісту інформації в наборі даних і згодом була застосована для вирішення проблем водних ресурсів. На сьогодні відсутні оглядові дослідження стосовно проектування мереж моніторингу вод що базуються на концепції, згідно з якою ентропія зможе охарактеризувати властиву для станції моніторингу або мереж моніторингу інформацію. Основна мета при цьому – мати максимальну кількість інформації.

#### **Формулювання мети статті**

Метою цієї роботи є огляд досліджень стосовно побудови систем та мереж моніторингу вод, що застосували теорію ентропії в процесі проектування.

Для цього необхідно розглянути:

- поняття ентропії та терміни, що використовуються при проектуванні мереж моніторингу.
- узагальнення досліджень за категорією типу мережі: опади, стоки і рівень води, вологість

$$H(Y_1, Y_2, \dots, Y_N) = - \sum_{j_1=1}^{n_1} \sum_{j_2=1}^{n_2} \dots \sum_{j_N=1}^{n_N} p(x_{1,j_1}, x_{2,j_2}, \dots, x_{N,j_N}) \log_2 p(x_{1,j_1}, x_{2,j_2}, \dots, x_{N,j_N}) \quad (1)$$

де  $H(X_1, X_2, \dots, X_N)$  – спільна ентропія  $N$  змінних;

$p(x_{1,j_1}, x_{2,j_2}, \dots, x_{N,j_N})$  – спільна ймовірність  $N$  змінних;

$n_1, n_2, \dots, n_N$  – номери класових інтервалів відповідних розподілів змінних [25].

Якщо всі змінні стохастично незалежні, спільна ентропія з рівняння (1) дорівнюватиме сумі

грунту і підземних вод та мережі моніторингу якості води.

#### **Виклад основного матеріалу дослідження**

В подальшому при розгляді систем моніторингу термін «оцінка мережі» використовується, коли якість мережі оцінюється без зміни (вилучення або додавання) будь-якої станції спостереження, тоді як «дизайн мережі» є загальним терміном, який передбачає деякі зміни в кількості станцій. Зокрема, проектування мережі включає в себе скорочення мережі, розширення мережі та перепроєктування мережі. Зменшення мережі застосовується там, де деякі станції моніторингу необхідно видалити з мережі. З іншого боку, якщо фінансова гнучкість відповідає потребам моніторингу, додаткові станції можна додати до існуючої мережі, що називається розширенням мережі. Редизайн мережі передбачає перегрупування станцій без зміни кількості станцій. Термін «оптимальна мережа» слід використовувати лише в тому випадку, якщо мережа складається з оптимальних місць розташування станцій, ідентифікованих за допомогою фактичного використання методу оптимізації.

#### **Визначення ентропії стосовно мереж моніторингу води.**

У класичній термодинаміці ентропію розуміють як міру випадковості або неупорядкованості складних систем. Шеннон [20] розширив концепцію ентропії до теорії інформації, визначивши, що невизначеність у системі буде зменшена, коли інформація додається до системи. Тому термін ентропія в теорії інформації, введений Шенном [20] 1948 року, описує кількість інформації у випадковій величині. За умови високої ймовірності події, наприклад 0.99 чи 1.00, вона не буде несподіваною, відповідно результат є передбачливим. Відповідно, подія із низьким значенням ймовірності буде характеризуватися високим значенням ступеню невизначеності, і, відповідно, при її виникненні буде отримано велику кількість нової інформації. Звідси, інформація стосовно події, що вже трапилася, буде обернено пропорційної її ймовірності,  $1/p$  [21 – 24].

Загальний вміст інформації з  $N$  змінних можна обчислити, використовуючи спільну ймовірність, яка буде задаватися формулою:

граничних ентропій, яка стає максимальним значенням спільної ентропії. Тому спільна ентропія обмежена [25]:

$$0 \leq H(X_1, X_2, \dots, X_N) \leq \sum_{i=1}^N H(X_i) \leq N \log_2 N \quad (2)$$

Умовна ентропія пояснює міру інформаційного вмісту однієї змінної, яка не може бути передана іншими змінними. Якщо дві випадкові змін-

ні,  $A$  і  $B$ , корельовані, надання інформації від однієї змінної може усунути деяку невизначеність, яку має інша змінна. У випадку відсутності кореляції між змінними умовна ентропія дорівнює граничній ентропії. Тобто:

$$H(A|B) = H(A, B) - H(B) \leq H(A) \quad (3)$$

де  $H(A|B)$  – умовна ентропія змінної  $A$ , при

$$H(A|B) = - \sum_{i=1}^{N_A} \sum_{j=1}^{N_B} p(a_i, b_j) \log p(a_i|b_j) = - \sum_{i=1}^{N_A} \sum_{j=1}^{N_B} p(a_i, b_j) \log \frac{p(a_i, b_j)}{p(b_j)} \quad (5)$$

Дві змінні,  $A$  і  $B$ , описані вище, матимуть певну спільну або сумісно використовувану інформацію, яка називається трансінформацією або взаємною інформацією, оскільки вони корельовані.

$$\begin{aligned} T(A, B) &= H(A) - H(A|B) = \\ &= H(B) - H(B|A) = T(B, A) \end{aligned} \quad (6)$$

$$T(A|B) = - \sum_{i=1}^{N_A} \sum_{j=1}^{N_B} p(a_i, b_j) \log \frac{p(a_i, b_j)}{p(a_i)} = \sum_{i=1}^{N_A} \sum_{j=1}^{N_B} p(a_i, b_j) \log \frac{p(a_i, b_j)}{p(a_i)p(b_j)} \quad (7)$$

Трансінформація зазвичай використовується для вимірювання взаємної інформації між двома змінними або двома групами змінних, оскільки

$$T[(X_1, X_2, \dots, X_k); (X_{k+1}, X_{k+2}, \dots, X_N)] = H(X_1, X_2, \dots, X_k) - H[(X_1, X_2, \dots, X_k)|(X_{k+1}, X_{k+2}, \dots, X_N)] \quad (8)$$

Хоча трансінформація та взаємна інформація мають однакове визначення, повна кореляція не є еквівалентом їм, оскільки повна кореляція є простою оцінкою, яка визначає кількість спільної інформації, як правило, кількох змінних. Простіше кажучи, повна кореляція визначається різницею між сумою граничної ентропії  $N$  змінних та їх спільною ентропією [26, 27], яка визначається як:

$$C(X_1, X_2, \dots, X_N) = \sum_{i=1}^N H(X_i) - H(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (9)$$

Якщо  $N=2$  у рівнянні (9), загальна кореляція буде дорівнювати трансінформації або взаємній інформації. Однак трансінформація має значення лише для двох випадкових змінних, як показано в рівняннях (5) – (8); отже, загальна кореляція та значення трансінформації будуть різними, якщо  $N > 2$ .

Спільна ентропія, умовна ентропія, трансінформація та повна кореляція є основними показниками, які зазвичай використовуються при застосуванні ентропії для проектування мережі водного моніторингу. У той час як у багатьох дослідженнях розроблено конкретні підходи при застосуванні у тематичних дослідженнях з використанням основних термінів ентропії, деякі дослідження розширили терміни за їх межі, вводячи або комбінуючи основні показники.

**Застосування ентропії до побудови систем моніторингу вод.**

заданому інформаційному вмісті змінної  $B$ .

Рівняння (3) можна переписати так:

$$H(A, B) = H(A|B) + H(B) = H(B|A) + H(A) \quad (4)$$

Крім того, умовну ентропію також можна представити математично за допомогою спільних і умовних ймовірностей і теореми Байєса як:

де  $T(A, B)$  – трансінформація між змінними  $A$  і  $B$ .

Чим більша трансінформація, тим сильніше ці змінні залежать одна від одної. Іншими словами, трансінформація вказує, скільки інформаційного вмісту можна перенести з інших змінних. Подібно до рівняння (5), трансінформацію слід записати як [23]:

узагальнена форма багатofакторної трансінформації дається як:

Узагальнимо використання теорії ентропії для розробки мереж водного моніторингу. Було проведено класифікацію за типами мереж спостереження, таких як опади, стік або рівень води, вологість ґрунту або ґрунтові води та мережі якості води. У таблиці 1 представлені короткі узагальнення, включаючи типи мереж, методи та ключові висновки вибраних дослідницьких статей, які застосовували теорію ентропії для побудови систем моніторингу водних ресурсів [12].

**Мережі моніторингу опадів.** Розробка репрезентативної мережі моніторингу опадів є важливим і все ще складним завданням, для вирішення якого добре підходить ентропійний підхід. Достовірна та повна інформація про опади необхідна для прогнозування потоків і повеней, управління поверхневими водами, управління сільським господарством, розуміння кліматичних процесів і багатьох інших завдань. Проте добре відомо, що кількість опадів сильно змінюється як у просторі, так і в часі [63] і часто статистично представлено досить викривленими розподілами [64], що ускладнює застосування методів параметричного аналізу. Ці проблеми також поширюються на ентропійні підходи до моніторингу опадів. Наприклад, було виявлено, що гранична ентропія добре корелює із загальною кількістю опадів у північній Бразилії, оскільки розподіл ймовірностей у регіонах із більшою кількістю опадів мав тенденцію бути більш однорідним і менш

Узагальнена інформація щодо використання ентропійного підходу при побудові систем моніторингу водних ресурсів /  
The information about the selection of the entropy approach for the development of systems for monitoring water resources has been updated

Автори	Типи мереж	Області дослідження	Ключові висновки
[28]	Вологість ґрунту	Басейн Великих озер, Канада-США	Оптимальні мережі були різні для підйому і спуску шляхопроводів. Об'єднання даних естакади призвело до безкоштовного просторового розподілу станцій
[29]	Інтегрований	Південне Онтаріо, Канада	Одночасно проектувалися опадові та стокові мережі. -Були порівняні методи групування та зроблено висновок, що оптимальні мережі можна змінити за допомогою методів групування
[30]	Опади	Континентальні Сполучені Штати	Ідентифіковані області часового масштабування синоптичні, від місячних до рокових, міжрокові моделі. Невелика кореляція між відносною ентропією та річною кількістю опадів, за винятком точки перериву на 95° з.д.
[31]	Опади	Кархе, Іран	Розгляд помилки просторового аналізу та трансінформаційної ентропії покращив дизайн мережі
[32]	Опади	Португалія	Порівняно три методи кластеризації для зменшення щільності станцій. Найкращий метод залежав від реєстру. Усі підмножини мереж відтворювали просторову картину опадів
[33]	Опади	Водосховище Шимен Тайвань	Мережа розроблена шляхом максимізації додаткової інформації, наданої станцією, з урахуванням регіональної трансінформації. Часовий масштаб має значний вплив на доставку інформації
[34]	Опади	Експериментальний ліс Тайванського університету, Тайвань	Пріоритет станції змінюється в різних просторово-часових масштабах. Часові масштаби мають більш значні зміни у значеннях спільної ентропії, ніж просторові масштаби. Довгі часові та короткі просторові масштаби вимагають меншої кількості станцій для стабільної спільної ентропії
[35]	Опади	Басейн річки Сянцзян, Китай	Продуктивність зосередженої моделі була стабільною з різними. Оптимальні мережі Парето Продуктивність розподіленої моделі покращується з кількістю станцій
[36]	Опади / потік	Басейн річки Колумбія, Південне Онтаріо, Канада	Виявлено, що мережі отримують значну кількість інформації за 5-10-річний період даних, і загальна кореляція має тенденцію стабілізуватися протягом 5 років шляхом застосування щоденних часових рядів. Рекомендовані мінімальні 10-річні періоди даних для проектування мереж опадів або потоку з використанням щоденних часових рядів
[37]	Потік	Річка Магдалена, Колумбія	Ранговий метод корисний для пошуку екстремумів на фронті Парето. При ітеративному виборі станцій інформаційний вміст мережі не гарантовано буде максимальним, якщо мережа містить станцію з найбільшою кількістю інформації
[38]	Потік	Басейн річки Колумбія, Канада	Виявлено, що включення сигнатур потоку як мети проектування збільшує покриття мережі у верхів'ях. -Знайдено, що включення ПЗ збільшує покриття мережі в нижньому за течією та міських районах.
[39]	Потік	Вибрані басейни по всій Канаді	Використовував теорію інформації, щоб висвітлити критичні області по всій Канаді, які потребують моніторингу. -Виявлено, що кілька водозборів мають дефіцит інформації, і посилення моніторингу було б корисним
[40]	Потік	Вибрані басейни по всій Канаді	Оцінено та виділено вплив сезонного клімату на дизайн мережі потоку
[41]	Потік	Басейни річок Св. Джона та Св. Лаврентія, Канада	Запропонований підхід комбінованої регіоналізації, подвійної ентропії та багатоцільової оптимізації до розробки мінімальної оптимальної мережі, яка відповідає рекомендаціям Всесвітньої

			метеорологічної організації. Виявлено, що розташування нових станцій моніторингу, доданих до мережі, залежить від поточної щільності мережі
[42]	Потік	Річка Бразос, Техас, США	Використана ентропія спільної перестановки для впорядкування даних часових рядів для кращого врахування інформації станції. -Виявлено, що найефективнішим вікном вимірювання було сім днів у порівнянні з щоденним і місячним
[43]	Потік	Басейн річки Оттава, Канада	Порівняно регіональні дані від University-Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelnin і зворотне зважування відстані — коефіцієнт площі дренажу. Критичні зони, виділені методом індексу ТІ, були тими самими областями, куди було додано додаткові станції за допомогою методу DEMO
[44]	Потік	Басейн річки Оттава, Канада	Масштабування суттєво не впливає на аналіз індексу трансформації. Ефекти масштабування помітні при застосуванні методу ПЕБО
[45]	Потік/Рівень води	Басейн річки Бразос, США. Пійнакер, Нідерланди	Розроблений метод мінімальної надмірності максимальної інформації. Виявлено, що це краще для визначення місцезнаходження станцій із високим вмістом інформації для мережі моніторингу
[46]	Рівень води	Регіон Пійнакер, Нідерланди	Впроваджено повну кореляцію для визначення багатофакторної залежності при проектуванні мережі моніторингу води. Вміст інформації та надмірність залежать від НПП між станціями моніторингу
[47]	Рівень води	Регіон Пійнакер, Нідерланди	Повна кореляція повинна поєднуватися зі спільною ентропією, щоб отримати більше інформації з мережі моніторингу
[48]	Рівень води	Північне море, Нідерланди	Створюючи ансамбль рішень шляхом зміни розміру осередка початкового набору оптимальних рішень за Парето, автори підкреслюють невизначеність, пов'язану з вибором розміру осередка.
[49]	Рівень води/ Грунтові води	Регіон Шпревальд, Німеччина	Виявлено з використанням підмножин доступних даних часового ряду, які можуть краще ідентифікувати важливі станції. Показані рівні води в мережі реагують однаково під час сильних опадів і є більш унікальними в посушливі періоди. Метод може дозволити розробити мережу, яка зосереджена на повенях або посухах
[50]	Рівень ґрунтових вод	Деголанська рівнина, Іран	Зменшення мережі з 52 до 42 (35 високо- і 7 низькопріоритетних) станцій, тоді як стандартне відхилення середньої дисперсії помилки оцінки залишилося незмінним. Знайдена частота вибірки високопріоритетних станцій має бути кожні 20 днів, а низькопріоритетних – кожні 32, на основі аналізу станцій, відібраних за допомогою методу цінності інформації
[51]	Рівень ґрунтових вод	Деголанська рівнина, Іран	Зменшення мережі з 52 до 33 станцій, тоді як стандартне відхилення дисперсії помилок середньої оцінки залишилося незмінним. Частоту вибірки збільшено з 4 тижнів до 5 тижнів
[52]	Рівень ґрунтових вод	Південне Онтаріо, Канада	Виявлено, що врахування просторового розподілу річної зарядки може покращити покриття мережі
[53]	Рівень ґрунтових вод	Басейн річки Кодаганар, Індія	Визначено високопріоритетні станції моніторингу з використанням граничної ентропії. ПП використовувався для оцінки мережі моніторингу, показав, що її можна зменшити
[54]	Рівень ґрунтових вод	Округ Вікторія Район збереження підземних вод, Техас, США	Порівняння ІПМ, отриманого за допомогою крігінгу, з ІПМ, знайденим за допомогою граничної ентропії. Показано, що виведений з ентропії ІПМ є більш консервативним показником
[55]	Якість води	Естуарій річки Нойс, Північна Кароліна, США	Мережі, розроблені з використанням загальної ентропії системи та ентропії порушення розчиненого кисню, були подібними. Коли вимірювані параметри якості води мають низьку ймовірність порушення стандартів якості води, ентропія їх порушення є менш інформативною
[56]	Якість води	Затока Сан-	Використовуючи криву ТВ, вони змогли скоротити мережу з 37

		Франциско, Каліфорнія, США	до 21 станції моніторингу. Нова мережа охоплювала всю досліджувану область без надлишкових даних
[57]	Якість води	Басейн Хаге, Південна Корея	Розроблено обчислювально ефективний спосіб проектування мережі моніторингу в незаміряному басейні
[58]	Якість води	Басейн Санганмі, Південна Корея	Розроблено метод, заснований на максимізації інформаційного наповнення, для проектування мережі моніторингу якості води в каналізаційній системі
[59]	Якість води	Річка Джаджруд, Іран	MGA використовувався для пошуку оптимальної комбінації станцій моніторингу, які мінімізують часові та просторові ІТІ. Виявлено, що частоту вибірки та кількість станцій можна збільшити в мережі моніторингу
[60]	Якість води	Річка Карун, Іран	Розширена мережа моніторингу без збільшення надлишкової інформації
[61]	Якість підземних вод	Тегеран, Іран	Розроблено різні криві ТВ на основі однорідних кластерів існуючих станцій моніторингу. Використовується ГГА для пошуку оптимальної мережі з максимальним просторовим покриттям і мінімальною трансінформацією. Показано, що частоту дискретизації можна оптимізувати таким же чином
[62]	Якість підземних вод	Дослідницький сайт ОРЕЗ, Меріленд, США	Використовуючи ПМПЕ з двома варіантами Hydrus-3D, були додані додаткові станції моніторингу, де різниця між моделями була найбільшою

спотвореним [65]. На відміну від цього, у роботі [63] показано, що індекс граничного безладу (ІГБ), який є відношенням спостережуваної ентропії до максимально можливої ентропії на даному місці, був обернено пропорційний середній річній кількості опадів у американському штаті Техас, де було виявлено, що ІГБ змінюється сезонно. У роботі [58] вивчено ентропію на станціях моніторингу в Сполучених Штатах, де була виявлена незначна кореляція між опадами та граничною ентропією, за винятком точки розриву ентропії на  $95^\circ$  довготи, що відповідає високій часовій мінливості моделей опадів. Кілька досліджень також відзначили, що часовий відбір опадів є важливим моментом для розрахунку ентропії та для проектування мереж моніторингу опадів [44, 63]. У менш тривалих часових масштабах (від години до дня) кількість опадів сильно змінюється, що призводить до більш високої загальної ентропії, тоді як більш тривалі періоди часу (від місяця до року) мають меншу мінливість, що призводить до нижчої граничної ентропії [33, 58, 63]. Залежність від просторових і часових масштабів також була виявлена в задачах проектування мережі. Дослідниками [44] визначено пріоритет потенційних станцій у Центральному Тайвані, щоб максимізувати спільну ентропію мережі в годинному, місячному та річному часових масштабах, а також у просторових масштабах 1, 3 та 5 км. Вони виявили, що пріоритетні станції змінювалися як у просторовому, так і в часовому масштабі, причому зміни в часовому масштабі призводили до більш значних змін у пріоритеті станції, ніж просторове масштабування. Зменшення ентропії на довгих часових масштабах також вплинуло на

щільність станцій, оскільки для досягнення стабільного спільного значення ентропії для більших часових масштабів потрібна була менша кількість станцій [44]. Ці результати демонструють важливість першого розгляду цілей мережі під час визначення просторової та часової вибірки, яка використовується для обчислення ентропії. Однак дослідження на цю тему все ще обмежені, і для забезпечення надійних рекомендацій щодо стратегій вибірки потрібна додаткова робота.

Декілька підходів було запропоновано до проектування або перепроєктування мережі моніторингу опадів з використанням одного або кількох ентропійних заходів. Багато з цих підходів ініціалізуються шляхом побудови мережі навколо центральної станції, яка зазвичай вибирається як станція з найвищою граничною ентропією [30, 66 – 68]. У Римі дослідниками [66] вибралися станції для мережі опадів, послідовно знаходячи наступну станцію, яка мінімізувала умовну ентропію мережі, і додаючи цю станцію до мережі. Подібний підхід застосовано у [67] для розширення мережі моніторингу опадів на Тайвані. Дані про погодинну кількість опадів були нормалізовані за допомогою перетворення Бокса-Кокса та крігінгу, які використовувалися для інтерполяції кількості опадів у комірниці мережі. Спільна ентропія мережі була розрахована за допомогою аналітичного рівняння для спільної ентропії, дійсного для нормальних даних [69], і послідовно до мережі додавалися станції, які мали найнижчу умовну ентропію відносно решти станцій мережі. Остаточна кількість станцій, необхідних для мережі, була прийнята, коли було зібрано 95% інформації мережі [67]. У дослідженні [68] послідовно застосо-

вано декілька ентропійних мір, щоб додати станції до мережі моніторингу опадів. Перші нові станції були обрані як станції з найвищою ентропією. Друга станція була обрана для мінімізації взаємної інформації, а третя як станція, яка максимізувала умовну ентропію.

Всі вищезазначені підходи послідовно додають окремі станції до мережі моніторингу на основі єдиного критерію. Авторами [30] представлено методологію додавання станцій до мережі на основі багатовимірної функції вартості. Дані про опади були просторово інтерпольовані з існуючих станцій з використанням підходу крігінгу, де помилка крігінгу, пов'язана з оцінкою кількості опадів, обчислюється як дисперсія помилки крігінгу. Цим методом було обрано станцію, яка максимізувала ентропію трансінформації та мінімізувала дисперсію помилок, використовуючи як ціль зважене середнє значення обох показників [30]. Такий підхід збалансував вміст інформації в мережі з похибками методу інтерполяції. Дослідниками [48] використано багатоцільовий підхід для одночасного вибору підмножини станцій, які мінімізували суму попарної взаємної інформації, мінімізували зміщення та максимізували ефективність Неша–Саткліффа. Рішення були згенеровані за допомогою вибірки Монте-Карло, а мережеві рішення, що попадають уздовж фронту Парето, були знайдені як компромісні рішення. У дослідженнях [70] і [71] також використано багатоцільовий підхід для додавання станцій до мереж моніторингу снігу в Канаді. Цей підхід використовував генетичний алгоритм для пошуку мереж, які максимізували спільну ентропію та мінімізували загальну кореляцію мережі для формування фронту Парето оптимальних проектів мереж, деякі з яких також включали вартість мережі в оптимізацію [50, 71].

Важливою вимогою при додаванні станцій до мережі опадів при реалізації підходу, заснованого на ентропії, є наявність доступності даних для точок-кандидатів. Для опадів це може бути складно, оскільки дані в більш коротких часових масштабах не є нормально розподіленими. Більшість досліджень використовують підхід крігінга для інтерполяції [30, 67, 68] і вирішують потребу в нормально розподілених даних за допомогою перетворення Бокса-Кокса. У [71] вирішено проблему інтерполяції, використовуючи зовнішні дані з системи асиміляції даних про сніг (SNODAS) для станцій-кандидатів. Автори [33] представили унікальний підхід до додавання станцій, який максимізував інформаційний вміст мережі. У більшості літературних випадків ентропійні показники на ділянках, де не можливо провести вимірювання, визначаються шляхом інтерполяції спостережень за опадами на вододілі.

Дослідники [33] розрахували трансінформацію між сусідніми станціями, щоб розробити двомірне співвідношення трансінформація-відстань. На відміну від передачі даних на станції, де не можливо провести вимірювання, цей підхід передає трансінформацію на ці станції та вибирає місце з максимальною трансінформацією. Цей підхід потребує додаткової перевірки та порівняння з підходом до передачі даних.

Як зазначалося вище, дані про опади мають важливе значення для різноманітних прикладних задач. Незважаючи на це, небагато дослідників вивчали вплив мереж моніторингу опадів, розроблених із застосуванням ентропійного підходу, для реального впровадження у використанні водних ресурсів. У випадках, знайдених в літературі, застосовано обґрунтований підхід до використання ентропії для зменшення щільності мережі порівняно з мережею, яка включала всі станції. У Португалії [57] порівнювали штучні нейронні мережі, кластеризацію K-середніх і критерії взаємної інформації для зменшення щільності мережі опадів для моніторингу посухи в різних часових масштабах. Виявлено, що найефективніший метод зменшення залежить від регіону та застосованого масштабу часу, але зауважили, що всі методи показали хороші результати. Вони також виявили, що всі підмножини мереж можуть надійно відтворювати просторову картину опадів. Дослідниками [48] використано багатокритеріальний підхід, описаний раніше, щоб вибрати підмножину станцій опадів із густої мережі в басейні річки Сянцзян у Китаї. Дані про опади з підмножини мереж моніторингу використовувалися для формування зосередженої гідрологічної моделі Сянцзян [72] і розподіленої гідрологічної моделі SWAT [73]. Автор виявив, що продуктивність зосередженої моделі стала стабільною з підмножиною від 20 до 25 станцій, тоді як продуктивність розподіленої моделі продовжувала зростати, оскільки до мережі додавалося більше станцій [48]. Ці результати важливі для демонстрації корисності мереж моніторингу опадів і переваг ентропійних підходів у проектуванні мереж моніторингу опадів.

**Мережі моніторингу річкового стоку та рівня води.** Моніторинг гідрологічних показників, зокрема таких, як швидкості течії та рівень води – є одним із важливих завдань управління водними ресурсами в частині запобігання шкоди довкіллю та людям від повеней. Ефективна система управління заплавою чи прогнозування та попередження про повені може бути реалізована за допомогою експертів-прогнозистів, що впроваджують добре відкалібровані моделі та надійні інструменти з використанням якісних даних [74]. Схема мережі моніторингу кількості води була

добре реалізована завдяки не лише хорошій продуктивності ентропійних методів, але і відсутності впливу нульового ефекту, що спричинений розривом функції щільності ймовірності через нульові значення в даних, за винятком ефемерних або переривчастих потоків. Для подолання нульового ефекту в обчисленнях ентропії у [75] та [64] розділено рівняння граничної ентропії (3) на ненульові члени та нульові значення, які є визначеними. Тоді як у [64] узагальнено можливі проблеми в обчисленнях ентропії на основі гідрологічних даних такі як: ефекти, обумовлені нульовими значеннями, бінування гістограм, включаючи врахування асиметрії та помилки вимірювань. У деяких дослідженнях відмічається, що довжина та розташування часового вікна також впливають на обчислення ентропії та відповідну структуру дизайну моніторингової мережі. Дослідники [61] спостерігали часову мінливість рейтингу станцій шляхом зміщення часового вікна для проектування мережі моніторингу рівня води системи каналів у Німеччині. Автори [37] також виявили залежність сезонності від ефективності гідрометричних мереж. У [28] виявлено обернену залежність між щільністю мережі та часовим інтервалом вибірки, оскільки потрібна більша кількість станцій моніторингу, якщо інтервал часу коротший, і навпаки. Дослідники [41] проаналізували часові зміни показників ентропії оптимальних мереж, застосовуючи щоденні часові ряди для проектування мережі потоку. Вони виявили, що інформаційний приріст мережі моніторингу незначний, якщо тривалість часового ряду перевищує 10 років, а загальна кореляція має тенденцію стабілізуватися протягом п'яти років даних. Оптимальні мережі, що використовують довжину даних 5, 10, 15 і 20 років, також показують, що немає суттєвих відмінностей у результатах від 10 років або довше, тоді як оптимальна мережа, яка використовує дані за п'ять років, явно відрізняється від інших. Автори [49] проаналізували ефекти масштабування, розглянувши дві досліджувані області. Зокрема, одна досліджувана територія є малим вододілом, який є частиною іншої досліджуваної території. Після застосування аналізу трансінформації та багатоцільової оптимізації вони дійшли висновку, що на оптимальні мережі, як правило, впливає масштабування, а на індекс трансінформації – ні.

У роботі [36] оцінено вплив інтервалів класів і заповнення відсутніх даних шляхом застосування методу лінійної регресії до щоденних часових рядів і отримано висновок, що рейтинги станцій на основі значень трансінформації суттєво не змінилися. Автори [45] також досліджували зміни в рейтингах станцій на основі підходу максимальної інформативності мінімальної надлиш-

ковості (МІМН) і отримали аналогічний висновок. Однак дослідники [61], та [50] висловили протилежну думку про те, що на рейтинги станцій може вплинути метод групування, який визначає інтервали класів. Конфлікт виникає через вибір порівнюваних методів групування. Перша група застосувала різні параметри до одного методу бінінгу з використанням математичної функції підлоги. Однак остання група порівнювала інші методи групування з функцією підлоги. Враховуючи, що у дослідженні [39] виявлено, що конструктивні рішення не були загальними в деяких випадках аналізу чутливості параметра математичної функції підлоги, не рекомендується використовувати конкретний метод бінінгу без будь-якого попереднього розгляду.

Як зазначалося вище в огляді мереж моніторингу опадів, для перепроектування та розширення мережі потрібні дані з потенційних місць, де відсутні вимірювання. Дослідники [47] застосували одновимірну гідродинамічну модель для створення часових рядів стоку. Модель оцінила витрати на кожному сегменті, який розділяє річки з кроком приблизно 200 м поздовжньо. Використання гідродинамічної моделі дозволило визначити критичні місця моніторингу в основному руслі та його притоках. З іншого боку, автори [52] поєднали методи районування з обчисленням ентропії, щоб оцінити викид у потенційних місцях. Вони порівнювали ефективність різних методів районування, включаючи не лише концептуальну гідрологічну модель, але й просторову близькість, фізичну подібність та їх комбінації з співвідношенням площі дренажу. Грунтуючись на статистиці продуктивності за допомогою застосування кількох басейнів, обернене зважування відстані в поєднанні з відношенням площі дренажу показали найкращі результати, і цей висновок було прийнято в кількох дослідженнях [41, 50, 53, 46].

Деякі дослідження розширили застосування ентропії для проектування мережі моніторингу потоку. У роботі [28] запропоновано концепцію перестановочної ентропії, яка здатна диференціюватися на основі порядку послідовних спостережень, а також частоти гістограм в основних мірах ентропії Шеннона. Незважаючи на те, що гістограми з двох різних спостережень однакові, значення ентропії перестановки має тенденцію бути вищим, якщо існує більше варіацій між часовими кроками. Однак дослідження проектування мереж з використанням ентропії перестановки все ще обмежені. З іншого боку, дослідниками [53] застосовано додаткові функції до дизайну мережі. Хоча загальними цілями проектування мереж моніторингу вод з використанням техніки оптимізації є максимізація інформації та мінімізація надмірності в мережі, вони додатково



враховують фізичні властивості вододілів, такі як характеристики потоку [76, 77] та індикатори гідрологічних змін (ІГЗ) [79, 80]. Після порівняння оптимальних мереж моніторингу потоку з урахуванням і без урахування характеристик потоку та ІГЗ було зроблено висновок, що включення фізичних характеристик басейну дає краще охоплення вибраних місць розташування оптимальних мереж.

**Мережі моніторингу зволоження ґрунту та ґрунтових вод.** Вологість ґрунту є критично важливою змінною стану води як межі між атмосферою та літосферою. На жаль, моніторинг вологості ґрунту не такий часто виконується, порівняно з його просторовою мінливістю. Для розробки оптимальної мережі моніторингу вологості ґрунту в басейні Великих озер, дослідники [51] запропонували використовувати супутникові дані вологості ґрунту та солоності океану [80]. Розробка мережі моніторингу вологості ґрунту за допомогою алгоритму двійної етропії та мультикритеріальної оптимізації (DEMO) виконувалася авторами [52]. Комірки мережі були вибрані для додавання таких станцій моніторингу, які оптимально максимізували спільну ентропію, мінімізуючи загальну кореляцію, використовуючи лише супутникові дані. Було виявлено, що висхідні та низхідні переходи містять різну інформацію, а просторовий розподіл мережі, розробленої з обома переходами, містить додаткові характеристики з обох наборів даних [51].

Моніторинг підземних вод дозволяє краще зрозуміти гідрогеологію в регіоні. Це досягається за допомогою моніторингу якості та кількості підземних вод. Моніторинг якості підземних вод використовується для виявлення шлейфів забруднювачів або для довгострокового моніторингу ефектів після рекультивації, а моніторинг кількості підземних вод використовується для визначення доступної води для пиття, зрошення та промисловості. Однак моніторинг ґрунтових вод є складним за своєю суттю через фізичні бар'єри між спостерігачами та водою. Завдяки розумінню фізики підземних потоків і за допомогою моделей потоку та транспортування забруднень, таких як MODFLOW, MODPATH і MT3D [81 – 83], можна моделювати поведінку підземних вод. На жаль, таке моделювання не завжди точне, і для калібрування та підтвердження моделей потрібні реальні спостереження. Через такі обмеження, як доступність і фінансові витрати, неможливо проводити моніторинг в усіх необхідних для дослідження місцях. Натомість це ідеально підходить для оптимальної мережі моніторингу, яка має бути розроблена для забезпечення найкращого розміщення станцій моніторингу та визначення ідеальних частот вимірювань. Перевага використання інфор-

маційної теорії ентропії була показана в кількох випадках проектування мережі підземних вод [31, 32, 38, 42, 43, 61, 62, 55].

Для проектування оптимальних мереж моніторингу підземних вод розроблено різні методи, які використовують ентропію теорії інформації. Вони включають використання вимірювань ентропії в задачах оптимізації як з однією, так і з кількома цілями, і використовуються для скорочення мережі [31, 38], розширення [55, 62] і редизайну [32], а також використовувалися для виділення вразливих областей у зоні, яка повинна контролюватися [43]. У визначенні вразливих територій району збереження підземних вод округу Вікторія в Техасі, США, Уддамері та Андрусс [43] розробили індекс пріоритетності моніторингу (ІПМ) на основі зважених переваг зацікавлених сторін, щоб виділити сфери інтересів. Вони порівняли стандартне відхилення крігінгу та граничну ентропію як показники для характеристики мінливості ґрунтових вод і виявили, що ентропія є більш консервативною метрикою.

У районах, де є надмірний моніторинг, автори [42] показали, що індекс передачі інформації (ІПІ), коефіцієнт спільної ентропії та трансінформації, можуть бути використані для оцінки існуючої мережі моніторингу. За допомогою цієї оцінки можна виявити зайві станції моніторингу (свердловини) та видалити їх із мережі моніторингу підземних вод. Також може статися так, що існуюча мережа моніторингу підземних вод є недостатньою, і потрібні додаткові станції моніторингу. Дослідники [62] розробили метод, який використовує мінімальну крос-ентропію (МКЕ) для послідовного додавання станцій моніторингу до мережі. МКЕ використовувалася як метрика для кількісного визначення різниці між двома варіантами моделі Hydrus-3D [84], і станції моніторингу були додані до мережі, де різниця між моделями була найбільшою. Багатоцільовий підхід для додавання станцій моніторингу до мережі моніторингу підземних вод був застосований у дослідженні [55], він використовував два показники ентропії, загальну кореляцію та спільну ентропію, а також метрику, яка використовується для кількісного визначення просторового розподілу річного поповнення; результати яких були використані для розробки карт, які виділяють райони, у яких слід додати додаткові станції моніторингу. Більшість експериментів з проектування мереж моніторингу розглядають весь доступний часовий ряд під час обчислення показників ентропії; однак у роботі [61] показано, що використання комбінації максимуму інформативності та мінімуму надлишковості і підмножин рядів даних може бути більш ідеальним. Підмножини використовувалися для представлення внутрішньорічної мінли-

вості рівнів ґрунтових вод. Цей метод визначив місця, які були незмінно важливими в кожній підгрупі, і виявив, що станції моніторингу показали схожість під час вологих періодів і унікальність під час сухих періодів. Автори [61] також припускають, що внаслідок використання підмножин даних можливо розробити мережу, яка може бути акцентована або на повенях або посухах.

Одна з проблем, яка може виникнути з методами, заснованими на ентропії, полягає в необхідності довгих рядів даних для отримання точних вимірювань ентропії. На жаль, область дослідження для нових станцій моніторингу не матиме доступних даних для всіх можливих місць. Щоб обійти це обмеження, криві трансінформації-відстані (Т-В) були застосовані при розробці оптимальних мереж моніторингу підземних вод [32, 85]. У цих дослідженнях були розроблені криві Т-В для підзон у межах бажаної досліджуваної області на основі різних методів кластеризації. Крім того, дослідники [32] показали, що цей метод можливо застосувати у часі у вигляді кривої трансінформація-час, що потім може бути використано для оптимізації часової частоти дискретизації станцій. Слід зазначити, що обидва раніше згадані дослідження були реалізовані в тій самій досліджуваній області з використанням дещо різних методів кластеризації станцій моніторингу, і обидва створили різні мережі моніторингу підземних вод, які можна вважати оптимальними. Це підкреслює проблему оптимального дизайну мережі моніторингу, оскільки вона може бути суб'єктивною та не мати єдиного рішення. Порівняння досліджень [31, 38] також ілюструє цю проблему, де завдяки використанню різних заходів ентропії, граничної ентропії та байєсівської максимальної ентропії і методів оптимізації, один експеримент виявив, що оптимальна мережа моніторингу включала 42 станції моніторингу, тоді як інший включав лише 33 станції.

**Мережі моніторингу якості води.** Важливість мереж моніторингу якості води полягає у визначенні параметрів якості води, що перевищують нормативні значення. Кілька стратегій моніторингу якості води, зокрема два методи, що використовували виміри ентропії [29, 35], розглянуто у роботі [17]. Цей огляд показав, що створення єдиного підходу до розробки мережі моніторингу якості води є практично неможливим. Незважаючи на це, деякі реалізації методів кривої трансінформація-відстань показали перспективність оптимального перепроєктування та зменшення мереж моніторингу якості води [29, 35, 56]. У роботі [59] показано, що використовуючи модель управління стічними водами для імітації загального вмісту завислих речовин і генетичний алгоритм для оптимізації, через максимізацію

багатовимірної передачі інформації між станціями, є можливість проєктування оптимальної мережі контролю якості води у каналізаційній системі. Автори [86] порівняли використання теорії інформації і показники надійності щодо побудови системи моніторингу системи водовідведення, використовуючи оптимізаційні підходи як з однією, так і з кількома цілями. Було показано, що методи мають однакову ефективність при невеликій мережі моніторингу, а метод виявлення на основі одного об'єкта, який заснований на часі, дав дещо кращі результати, коли кількість станцій моніторингу була більшою. Автори [40] використовували ймовірності перевищення розчиненого кисню та хлорофілу-а для визначення ентропії порушення в руслі р. Нойс. Було використано загальна ентропія системи паралельно з ентропією порушення у якості міри визначення районів важливості моніторингу. Заснована на коефіцієнтах ваги, що призначені експертом, багаточільова оптимізація використовувалася при розробці компромісного розв'язку за трьома міра ентропії. Цей метод дозволив ідентифікувати зони високої невизначеності. Щоб вирішити питання доступності даних при використанні ентропійних методів дослідники [60] розробили метод, який використовує міру, аналогічну граничній ентропії. Цей метод використовує такі характеристики басейну, як довжина та кількість ділянок у річковій мережі, як частину функції витрат, яка потім оптимізується за допомогою комбінованого генетичного алгоритму і фільтрації. Доведено, що це є обчислювально ефективний метод при проєктуванні оптимальної мережі моніторингу річкового басейну.

**Інтегрований дизайн мережі моніторингу.** Майже всі попередні дослідження щодо проєктування мережі моніторингу води були зосереджені на конкретному типі мережі (тобто, розгляді однієї гідрологічної змінної в кожному дослідженні), як було показано в попередніх розділах. Однак, гідрологічні процеси взаємопов'язані в кругообігу води і, відповідно, існують причини та наслідки між гідрологічними змінними. У дослідженні [50] розроблено метод проєктування багатовимірної мережі, в якому взято умовну ентропію як міру інформації, яка не залежить від даної змінної. У їхньому дослідженні метод одночасно проєктував мережі моніторингу опадів і потоку. Зокрема, метод дотримувався традиційного багаточільового підходу, який максимізує спільну ентропію та мінімізує загальну кореляцію.

#### **Висновки**

Успішне управління водними ресурсами неможливе без належних систем моніторингу вод. На сьогодні стандартизована методологія проєктування ще не напрацьована. З розвитком теорії

інформації набули широкого застосування концепції ентропії, в тому числі і при вирішенні проблем побудови мереж. Перевагою ентропійного підходу є те, що мережі моніторингу можна оцінювати і проектувати на базі інформації, яку контролює мережа. Це відрізняється від підходів щодо заданої щільності станцій, які пропонує у керівних принципах Всесвітня метеорологічна організація (ВМО); перевага першого полягає в тому, що мережа може бути краще пристосована до конкретного використання або оптимізована для забезпечення найбільшої ефективності при щільності, нижчій від тієї, що пропонується в рекомендаціях ВМО.

В огляді проведено аналіз досліджень та їх реалізацію при проектуванні мереж моніторингу вод на основі ентропії. Продемонстровано використання різних методів теорії інформації та їх адаптації для використання в проектуванні мереж моніторингу, при чому метою методів проектування мереж є вибір станцій, які надають найбільше інформації для мережі моніторингу, одночасно будучи незалежними одна від одної. Завдяки ретельному тестуванню теорія інформації виявилася надійним інструментом для оцінки та проектування оптимальної мережі моніторингу води. Однак, коли справа доходить до оцінки оптимального дизайну, все ще є проблеми, які потрібно вирішити.

Перша полягає в тому, що оптимальний дизайн мережі моніторингу можна побудувати на основі заданих критеріїв проектування; однак практичне застосування нової оптимальної мережі моніторингу рідко оцінюється в гідрологічній чи іншій моделі [13, 48]. Цей тип числового експерименту є важливою вимогою для оцінки корисності мережі, а не просто визначення її оптимальності чи інформаційного вмісту. Крім того, важливо визначити переваги проектування мереж

на основі ентропії, щоб переконати осіб, які приймають рішення, у важливості застосування ентропійних підходів.

Інша проблема, пов'язана з оптимальною мережею, полягає в тому, що вона може бути суб'єктивною, ґрунтуючись на виборі, зробленому під час обчислення ентропії, і обраному методі проектування, особливо коли в проекті враховуються додаткові цільові функції. Це поширюється на метод, вибраний для побудови оптимальної мережі моніторингу, незалежно від того, чи вона знайдена за допомогою ітераційного методу, коли додається одна станція за раз, або сукупність станцій, які додаються одночасно. Дослідження також показали, що довжина даних, масштаб водозбору та порядок можуть впливати на дизайн оптимальної мережі [28, 41, 61]. Нарешті, при використанні дискретної ентропії було показано, що метод бінінгу впливає на остаточний дизайн мережі [50]. Впливу бінінгу на розрахунок ентропії приділяється більше уваги в інших випадках проектування геофізичних мереж [87 – 89], і подібну увагу слід приділяти у сфері водних ресурсів, особливо через унікальну та складну природу змінних води (наприклад, потік, опади) просторовий і часовий розподіл [58, 64]. Таким чином, під час вибору варіантів на основі передбачуваного застосування мережі моніторингу потрібне чітке розуміння та подальші дослідження, щоб надати рекомендації, специфічні для мереж моніторингу води. Отже, незважаючи на можливість знайти оптимальний проект мережі у формальному сенсі, слід визнати суб'єктивність, спричинену вибором проектувальника, і відсутність стандартизованих методів проектування. Зокрема, потрібно більше працювати над просторовим і часовим масштабуванням даних для обчислення ентропії, щоб забезпечити надійні рекомендації для осіб, які приймають рішення.

#### Список використаної літератури

1. Langbein W. Overview of Conference on Hydrologic Data Networks / W. Langbein // *Water Resources Research*. 1979, 15. – С. 1867–1871. <https://doi.org/10.1029/WR015i006p01867>
2. Herschy R. *Hydrometry: Principles and Practice* / R. Herschy // 2nd ed.; John Wiley and Sons Ltd.: Chichester, UK, 1999. <https://scholar.google.com/>
3. Boiten W. *Hydrometry* / W. Boiten // Balkema Publishers: The Netherlands, 2003. <https://doi.org/10.1201/9780203971093>
4. Nemes J. Mean and variance in network-design philosophies / J. Nemes, A. Askew // *In Integrated Design of Hydrological Networks (Proceedings of the Budapest Symposium)*; International Association of Hydrological Sciences Publication: USA, 1986; С. 123–131. <https://scholar.google.com/>
5. Rodda J.C. *Hydrological Network Design—Needs, Problems and Approaches* / J.C. Rodda, W.B. Langbein // *World Meteorological Organization: Geneva, Switzerland, 1969*. <https://snia.mop.gob.cl/repositorio/dga/handle/20.500.13000/984>
6. *World Meteorological Organization. Casebook on Hydrological Network Design Practice* / W.B. Langbein, Ed.: Geneva, Switzerland, 1972. <https://scholar.google.com/>
7. Davis D. The Worth of Hydrologic Data for Nonoptimal Decision Making / D. Davis, L. Duckstein, R. Krzysztofowicz // *Water Resources Research*, 1979, 15. – С. 1733–1742. <https://doi.org/10.1029/WR015i006p01733>

8. Bezsonnyi V. Regarding the Choice of Composite Indicators of Ecological Safety of Water in the Basin of the Siversky Donets / V. Bezsonnyi, R. Ponomarenko, O. Tretyakov, V. Asotsky, A. Kalynovskyi // *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 2021. – Vol. 30. – С. 622–631. <https://doi.org/10.15421/112157>
9. Безсонний В. Л. Ентропійний підхід до оцінки екологічного стану водотоку. / В. Л. Безсонний, О.В. Третьяков, Л.Д. Пляцук, А.Н. Некош // *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Екологія»*. – 2022. – Вип. 27. – С. 6–19. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2022-27-01>
10. Pilon P.J. Challenges Facing Surface Water Monitoring in Canada. / P.J. Pilon, T.R. Yuzyk, R.A. Hale, T.J. Day // *Canadian Water Resources Journal*. 1996, 21. – С. 157–164. <https://doi.org/10.4296/cwrj2102157>
11. U.S. Geological Survey. *Streamflow Information for the Next Century—A Plan for the National Streamflow Information Program of the U.S. Geological Survey*; U.S. Geological Survey: USA, 1999.
12. Mishra A. Developments in Hydrometric Network Design: A Review. / A. Mishra; P. Coulibaly // *Reviews of Geophysics*, 2009, 47. <http://dx.doi.org/10.1029/2007RG000243>
13. Chacon-hurtado J.; Alfonso L.; Solomatine D. Rainfall and streamflow sensor network design: A review of applications, classification, and a proposed framework. / J. Chacon-hurtado, L. Alfonso, D. Solomatine // *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21. – С. 3071–3091. <https://doi.org/10.5194/hess-21-3071-2017>
14. Moss M. *Concepts and Techniques in Hydrological Network Design* / M. Moss // *World Meteorological Organization: Geneva, Switzerland*, 1982. <https://scholar.google.com/>
15. Van der Made J. *Design Aspects of Hydrological Networks* / J. Van der Made, T. Schilperoort, S. van der Schaaf, T. Buishand, G. Brouwer, W. van Duyvenbooden, P. Becinsky // *Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO: The Hague, The Netherlands*, 1986. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:4ab6e86e-b0e5-4571-bd20-241ac4489023>
16. Pyrcie R. *Review and Analysis of Stream Gauge Networks for the Ontario Stream Gauge Rehabilitation Project* / R. Pyrcie // *Watershed Science Centre: Peterborough, ON, Canada*, 2004. <https://scholar.google.com/>
17. Behmel S. Water quality monitoring strategies—A review and future perspectives / S. Behmel, M. Damour, R. Ludwig, M. Rodriguez // *Science of The Total Environment*, 2016, 571, 1312–1329. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.235>
18. Безсонний В. Термодинамічні аспекти системного підходу в екології. / В. Безсонний, О. Третьяков, М. Шерстюк, А. Некош // *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія»*, 2022. – № 57. – С. 268–281. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-57-20>
19. Безсонний В.Л. Методика оцінки екологічного стану водойми на основі ентропійно зваженого індексу якості води / В.Л. Безсонний // *Екологічні науки : науково-практичний журнал*, 2023. – № 2(47). – С. 44–48. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.2-47.7>
20. Shannon C. A Mathematical Theory of Communication / C. Shannon // *The Bell System Technical Journal*. 1948, 27, P. 379–423. <http://dx.doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
21. Batty M. Space, scale, and scaling in entropy maximizing / M. Batty // *Geographical Analysis*, 2010, 42, 395–421. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1538-4632.2010.00800.x>
22. Singh V. *Entropy Theory in Hydrologic Science and Engineering* / V. Singh // *McGraw-Hill Education: USA*, 2015. <https://www.accessengineeringlibrary.com/binary/mheaeworks/f8203430db41fd24/ee925d2b4e27bfd905d73664befe36228ea77a3c4ffc963ee700bbf01c450e7c/book-summary.pdf>
23. Lathi B. *An Introduction to Random Signals and Communication Theory* / B. Lathi // *International Textbook Company: Scranton, PA, USA*, 1968. <https://scholar.google.com/>
24. Tribus M. *Rational Descriptions, Decisions and Designs* / M. Tribus // *Pergamon Press: Oxford, UK*, 1969. <https://scholar.google.com/>
25. Krstanovic P. Evaluation of rainfall networks using entropy: I. Theoretical development / P. Krstanovic, V. Singh // *Water Resources Management*, 1992, 6. – С. 279–293. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00872281>
26. Multivariate information transmission / W. McGill // *Psychometrika* 1954, 19. – С. 97–116. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02289159>
27. Watanabe S. *Information Theoretical Analysis of Multivariate Correlation* / S. Watanabe // *IBM Journal of Research and Development*. 1960, 4. – С. 66–82. <http://dx.doi.org/10.1147/rd.41.0066>
28. Stosic T. Optimizing streamflow monitoring networks using joint permutation entropy / T. Stosic, B. Stosic, V. Singh // *Journal of Hydrology*, 2017, 552. – С. 306–312. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.07.003>
29. Mahjouri, N. Revising river water quality monitoring networks using discrete entropy theory: The Jajrood River experience / N. Mahjouri, R. Kerachian // *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, 175. – С. 291–302. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-010-1512-6>
30. Mahmoudi-Meimand H. An algorithm for optimisation of a rain gauge network based on geostatistics and entropy concepts using GIS / H. Mahmoudi-Meimand, S. Nazif, R.A. Abbaspour, H. Sabokbar // *Journal of Spatial Science*. 2016, 61. – С. 233–252. <https://doi.org/10.1080/14498596.2015.1030789>
31. Hosseini M. A Bayesian maximum entropy-based methodology for optimal spatiotemporal design of groundwater monitoring networks / M. Hosseini, R. Kerachian // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2017, 189. – С. 433. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-017-6129-6>
32. Masoumi F. Optimal redesign of groundwater quality monitoring networks: A case study / F. Masoumi, R. Kerachian // *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 161. – С. 247–257. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-008-0742-3>



33. Su H.T. Developing an entropy-based model of spatial information estimation and its application in the design of precipitation gauge networks / H.T. Su, G.J.Y. You // *Journal of Hydrology*, 2014, 519, 3316–3327. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.022>
34. Alfonso L. Optimization of water level monitoring network in polder systems using information theory / L. Alfonso, A. Lobbrecht, R. Price // *Water Resources Management*, 2010, 46. <http://dx.doi.org/10.1029/2009WR008953>
35. Memarzadeh M. Evaluating sampling locations in river water quality monitoring networks: Application of dynamic factor analysis and discrete entropy theory / M. Memarzadeh, N. Mahjouri, R. Kerachian // *Environmental Earth Sciences*. 2013, 70. – C. 2577–2585. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-013-2299-x>
36. Mishra A.K. Hydrometric Network Evaluation for Canadian Watersheds. / A.K. Mishra, P. Coulibaly // *Journal of Hydrology*. 2010, 380. – C. 420–437. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.11.015>
37. Mishra A.K. Variability in Canadian Seasonal Streamflow Information and Its Implication for Hydrometric Network Design. / A.K. Mishra, P. Coulibaly // *Journal of Hydrology. Eng.*, 2014, 19. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000971](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000971)
38. Hosseini M. A data fusion-based methodology for optimal redesign of groundwater monitoring networks. / M. Hosseini, R. Kerachian // *Journal of Hydrology*, 2017, 552. – C. 267–282. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.06.046>
39. Alfonso L. Information theory-based approach for location of monitoring water level gauges in polders. / L. Alfonso, A. Lobbrecht, R. Price // *Water Resources Research*, 2010, 46. <http://dx.doi.org/10.1029/2009WR008101>
40. Alameddine I. Optimizing an estuarine water quality monitoring program through an entropy-based hierarchical spatiotemporal Bayesian framework / I. Alameddine; S. Karmakar; S.S. Qian, H.W. Paerl, K.H. Reckhow // *Water Resources Research*. 2013, 49. – C. 6933–6945. <http://dx.doi.org/10.1002/wrcr.20509>
41. Keum J. Sensitivity of Entropy Method to Time Series Length in Hydrometric Network Design / J. Keum, P. Coulibaly // *Journal of Hydrologic Engineering*, 2017, 22. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001508](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001508)
42. Mondal N.C. Evaluation of groundwater monitoring network of Kodaganar River basin from Southern India using entropy / N.C. Mondal, V.P. Singh // *Environmental Earth Sciences*, 2011, 66. – C. 1183–1193. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-011-1326-z>
43. Uddameri V. A GIS-based multi-criteria decision-making approach for establishing a regional-scale groundwater monitoring / V. Uddameri, T. Andruss // *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71. – C. 2617–2628. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-013-2899-5>
44. Wei C. Spatiotemporal scaling effect on rainfall network design using entropy / C. Wei, H.C. Yeh, Y.C. Chen // *Entropy* 2014, 16. – C. 4626–4647. <http://dx.doi.org/10.3390/e16084626>
45. Li C. Entropy theory-based criterion for hydrometric network evaluation and design: Maximum information minimum redundancy / C. Li, V.P. Singh, A.K. Mishra // *Water Resources Research*. 2012, 48. <http://dx.doi.org/10.1029/2011WR011251>
46. Werstuck C. Hydrometric network design using dual entropy multi-objective optimization in the Ottawa River Basin / C. Werstuck, P. Coulibaly // *Hydrology Research*, 2016, 48. – C. 1–13. <http://dx.doi.org/10.2166/nh.2016.344>
47. Alfonso L. Information theory applied to evaluate the discharge monitoring network of the Magdalena River / L. Alfonso, L. He, A. Lobbrecht, R. Price // *Journal of Hydroinformatics*, 2013, 15. – C. 211–228. <http://dx.doi.org/10.2166/hydro.2012.066>
48. Xu H. Entropy theory based multi-criteria resampling of rain gauge networks for hydrological modelling—A case study of humid area in southern China / H. Xu, C.-Y. Xu, N.R. Sælthun, Y. Xu, B. Zhou, H. Chen // *Journal of Hydrology*, 2015, 525. – C. 138–151. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.034>
49. Werstuck C. Assessing Spatial Scale Effects on Hydrometric Network Design Using Entropy and Multi-Objective Methods / C. Werstuck, P. Coulibaly // *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*. 2017, <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12611>
50. Keum J. Information theory-based decision support system for integrated design of multi-variable hydrometric networks / J. Keum, P. Coulibaly // *Water Resources Research*, 2017, 53. – C. 6239–6259. <http://dx.doi.org/10.1002/2016WR019981>
51. Kornelsen K.C. Design of an Optimal Soil Moisture Monitoring Network Using SMOS Retrieved Soil Moisture / K.C. Kornelsen, P. Coulibaly // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2015, 53. – C. 3950–3959. <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2014.2388451>
52. Samuel J. CRDEMO: Combined Regionalization and Dual Entropy-Multiobjective Optimization for Hydrometric Network Design / J. Samuel, P. Coulibaly, J.B. Kollat // *Water Resources Research*, 2013, 49. – C. 8070–8089. <http://dx.doi.org/10.1002/2013WR014058>
53. Leach J.M. Hydrometric network design using streamflow signatures and indicators of hydrologic alteration / J.M. Leach, K.C. Kornelsen, J. Samuel, P. Coulibaly // *Journal of Hydrology*, 2015, 529. – C. 1350–1359. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.08.048>
54. Alfonso L. Ensemble Entropy for Monitoring Network Design / L. Alfonso, E. Ridolfi, S. Gaytan-Aguilar, F. Napolitano, F. Russo // *Entropy* 2014, 16. – C. 1365–1375. <http://dx.doi.org/10.3390/e16031365>
55. Leach J.M. Entropy based groundwater monitoring network design considering spatial distribution of annual recharge / J.M. Leach, P. Coulibaly, Y. Guo // *Advances in Water Resources*, 2016, 96. – C. 108–119. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.07.006>

56. Boroumand A. Discrete entropy theory for optimal redesigning of salinity monitoring network in San Francisco bay / A. Boroumand, T. Rajaei // *Water Sci. Technol. Water Supply* 2017, 17. – C. 606–612. <http://dx.doi.org/10.2166/ws.2016.110>
57. Santos J.F. Dimensionality reduction in drought modelling / Santos J.F., Portela M.M., Pulido-Calvo I. // *Hydrological Processes* 2013, 27. – C. 1399–1410. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.9300>
58. Brunsell N.A. A multiscale information theory approach to assess spatial-temporal variability of daily precipitation / N.A. Brunsell // *Journal of Hydrology*, 2010, 385. – C. 165–172. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.02.016>
59. Lee J.H. Determination of optimal water quality monitoring points in sewer systems using entropy theory / J.H. Lee // *Entropy* 2013, 15. – C. 3419–3434. <http://dx.doi.org/10.3390/e15093419>
60. Lee C. Efficient method for optimal placing of water quality monitoring stations for an ungauged basin / C. Lee, K. Paik, D.G. Yoo, J.H. Kim // *Journal of Environmental Management*. 2014, 132. – C. 24–31. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.10.012>
61. Fahle M. Temporal variability of the optimal monitoring setup assessed using information theory / M. Fahle, T.L. Hohenbrink, O. Dietrich, G. Lischeid // *Water Resources Research*, 2015, 51. – C. 7723–7743. <http://dx.doi.org/10.1002/2015WR017137>
62. Yakirevich A. Augmentation of groundwater monitoring networks using information theory and ensemble modeling with pedotransfer functions / A. Yakirevich, Y.A. Pachepsky, T.J. Gish, A.K. Guber, M.Y. Kuznetsov, R.E. Cady, T.J. Nicholson // *Journal of Hydrology*, 2013, 501. – C. 13–24. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.07.032>
63. Mishra A.K. An entropy-based investigation into the variability of precipitation / A.K. Mishra, M. Özger, V.P. Singh // *Hydrol.* 2009, 370. – C. 139–154. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.03.006>
64. Gong W. Estimating information entropy for hydrological data: One dimensional case / W. Gong, D. Yang, H.V. Gupta, G. Nearing // *Water Resources Research*, 2014, 50. – C. 5003–5018. <http://dx.doi.org/10.1002/2014WR015874>
65. Silva V. Entropy theory for analysing water resources in northeastern region of Brazil / V. Silva, V.d.P.R. da Silva, A.F. Belo Filho, V.P. Singh // *Hydrological Sciences Journal*, 2017, 62. – C. 1029–1038. <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1099789>
66. Ridolfi E. An entropy approach for evaluating the maximum information content achievable by an urban rainfall network / E. Ridolfi, V. Montesarchio, F. Russo, F. Napolitano // *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2011, 11. – C. 2075–2083. <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-11-2075-2011>
67. Yeh H.C. Entropy and kriging approach to rainfall network design / H.C. Yeh, Y.C. Chen. – C. Wei, R.H. Chen // *Paddy and Water Environment*, 2011, 9. – C. 343–355. <http://dx.doi.org/10.1007/s10333-010-0247-x>
68. Awadallah A.G. Selecting optimum locations of rainfall stations using kriging and entropy / A.G. Awadallah // *International Journal of Civil & Environmental Engineering*, 2012, 12. – C. 36–41. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=bbfdd60b12caa37c5d5dbfca0039160dfe32299b>
69. Ahmed N.A. Entropy expressions and their estimators for multivariate distributions / N.A. Ahmed, D.V. Gokhale // *IEEE Transactions on Information Theory*, 1989, 35. – C. 688–692. <http://dx.doi.org/10.1109/18.30996>
70. Coulibaly P. Snow Network Design and Evaluation for La Grande River Basin / P. Coulibaly, J. Keum // *Hydro-Quebec: Hamilton, ON, Canada*, 2016. <https://scholar.google.com/>
71. Keum J. Entropy Applications to Water Monitoring Network Design: A Review. / J. Keum, K.C. Kornelsen, J.M. Leach, P. Coulibaly // *Entropy* 2017, 19, 613. <https://doi.org/10.3390/e19110613>
72. Zhao R.J. The Xinanjiang model applied in China / R.J. Zhao // *Journal of Hydrology*, 1992, 135. – C. 371–381. <https://scholar.google.com/>
73. Arnold J.G. Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development / J.G. Arnold, R. Srinivasan, R.S. Muttiah, J.R. Williams // *Journal of the American Water Resources Association*, 1998, 34. – C. 73–89. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
74. United Nations. Guidelines for Reducing Flood Losses; Pilon, P.J., Ed.; United Nations: Geneva, Switzerland, 2004. <https://scholar.google.com/>
75. Chapman T.G. Entropy as a measure of hydrologic data uncertainty and model performance / T.G. Chapman // *Journal of Hydrology*, 1986, 85. – C. 111–126. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(86\)90079-X](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(86)90079-X)
76. Yadav M. Regionalization of constraints on expected watershed response behavior for improved predictions in ungauged basins / M. Yadav, T. Wagener, H. Gupta // *Advances in Water Resources*, 2007, 30. – C. 1756–1774. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2007.01.005>
77. Sawicz K. Catchment classification: Empirical analysis of hydrologic similarity based on catchment function in the eastern USA / K. Sawicz, T. Wagener, M. Sivapalan, P.A. Troch, G. Carrillo // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2011, 15. – C. 2895–2911. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-15-2895-2011>
78. Richter B.D. A Method for Assessing Hydrologic Alteration within Ecosystems / B.D. Richter, J.V. Baumgartner, J. Powell, D.P. Braun // *Conservation Biology*, 1996, 10. – C. 1163–1174. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1523-1739.1996.10041163.x>
79. Monk W.A. Quantifying trends in indicator hydroecological variables for regime-based groups of Canadian rivers / W.A. Monk, D.L. Peters, R. Allen Curry, D.J. Baird // *Hydrological Processes* 2011, 25. – C. 3086–3100. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.8137>

80. Kerr Y.H. *The SMOS Mission: New Tool for Monitoring Key Elements of the Global Water Cycle* / Y.H. Kerr, P. Waldteufel, J.P. Wigneron et al. // *Proceedings of the IEEE*, 2010, 98, – C. 666–687. <http://dx.doi.org/10.1109/JPROC.2010.2043032>
81. Harbaugh A.W. *MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model—The Ground-Water Flow Process* / A.W. Harbaugh // U.S. Geological Survey: Reston, VA, USA, 2005. <https://pubs.er.usgs.gov/publication/tm6A16>
82. Pollock D.W. *User Guide for MODPATH Version 7—A Particle-Tracking Model for MODFLOW* / D.W. Pollock // U.S. Geological Survey: Reston, VA, USA, 2016. <https://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr20161086>
83. Bedekar V. *MT3D-USGS Version 1: A U.S. Geological Survey Release of MT3DMS Updated with New and Expanded Transport Capabilities for Use with MODFLOW* / V. Bedekar, E.D. Morway, C.D. Langevin, M.J. Tonkin // U.S. Geological Survey: Reston, VA, USA, 2016.
84. Šimušek J. *The HYDRUS Software Package for Simulating Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Porous Media* / J. Šimušek, M.T. van Genuchten, M. Šejna // *PC Progress: Prague, Czech Republic*, 2012. <https://scholar.google.com/>
85. Owlia R.R. *Spatial-temporal assessment and redesign of groundwater quality monitoring network: A case study* / R.R. Owlia, A. Abrishamchi, M. Tajrishy // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2011, 172, 263–273. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-010-1332-8>
86. Banik B.K. *Evaluation of Different Formulations to Optimally Locate Sensors in Sewer Systems* / B.K. Banik, L. Alfonso. – C. di Cristo, A. Leopardi, A. Mynett // *Journal of Water Resources Planning and Management* 2017, 143. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000778](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000778)
87. Ruddell B.L. *Ecohydrologic process networks: 1. Identification* / B.L. Ruddell, P. Kumar // *Water Resources Research*, 2009, 45. <http://dx.doi.org/10.1029/2008WR007279>
88. Ruddell B.L. *Ecohydrologic process networks: 2. Analysis and characterization* / B.L. Ruddell, P. Kumar // *Water Resources Research*, 2009, 45, 1–14. <http://dx.doi.org/10.1029/2008WR007280>
89. Kang M. *Agricultural and Forest Meteorology Identifying CO<sub>2</sub> advection on a hill slope using information flow* / M. Kang, B.L. Ruddell. – C. Cho, J. Chun, J. Kim // *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 232, 265–278. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.08.003>

## Use of the entropy approach in water resource monitoring systems

Vitalii Bezsonnyi,

PhD (Technical), Associate Professor,

Department of Environmental Safety and Environmental Education,

V.N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

### ABSTRACT

Effective management of water resources is possible only with an effectively organized monitoring system. After the emergence and development of information theory, the concept of information entropy found its place in the field of the development of water monitoring systems.

**The purpose** of this work is to review research related to the construction of water monitoring systems and networks that applied the entropy theory in the design process.

**Methodology.** Entropy terms used in the construction of water monitoring systems are summarized. Recent applications of the entropy concept for water monitoring system designs classified by precipitation are reviewed; flow and water level; water quality; soil moisture and groundwater. The integrated method of designing multifactorial monitoring systems is also highlighted.

**Results.** The review analyzes studies and their implementation in the design of water monitoring networks based on entropy. The use of various methods of information theory and their adaptation for use in the design of monitoring networks is demonstrated, with the goal of network design methods being the selection of stations that provide the most information for the monitoring network, while being independent of each other. Through extensive testing, information theory has proven to be a reliable tool for evaluating and designing an optimal water monitoring network.

**Scientific novelty.** This review focuses on studies that have applied information theory or information entropy to construct monitoring networks and systems. Information theory was developed by Shannon in the middle of the last century to measure the information content of a data set and was subsequently applied to solving water resources problems. To date, there are no review studies regarding the design of water monitoring networks based on the concept that entropy will be able to characterize the information specific to the monitoring station or monitoring networks. The main goal is to have the maximum amount of information.

**Practical significance.** The optimal design of the monitoring network can be built based on the specified design criteria; however, the practical application of a new optimal monitoring network is rarely evaluated in a hydrological or other model. It is also important to identify the benefits of entropy-based network design to convince decision-makers of the importance of entropy-based approaches. The optimal network can be subjective, based on the choices made during the entropy calculation and the design method chosen, especially when additional objective functions are considered in



the design. This applies to the method chosen to construct the optimal monitoring network, whether it is found using an iterative method where one station is added at a time, or a collection of stations that are added simultaneously. Research has also shown that data length, catchment scale, and the order can affect optimal network design. When using discrete entropy, it was shown that the binning method affects the final network design. Therefore, when selecting options based on the intended application of the monitoring network, a clear understanding and further research is needed to provide recommendations specific to water monitoring networks. In particular, more work is needed on the spatial and temporal scaling of the entropy calculation data to provide robust recommendations for decision-makers.

**Keywords:** information entropy; water monitoring; hydrometric network; information theory; monitoring system.

### References

- Langbein, W. (1979) Overview of Conference on Hydrologic Data Networks. *Water Resources Research*. 15, 1867–1871. <https://doi.org/10.1029/WR015i006p01867>
- Hersch, R. (1999) *Hydrometry: Principles and Practice*, 2nd ed.; John Wiley and Sons Ltd.: Chichester, UK., [https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=Hydrometry:+Principles+and+Practice&author=Hersch,+R.W.&publication\\_year=1999](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Hydrometry:+Principles+and+Practice&author=Hersch,+R.W.&publication_year=1999)
- Boiten, W. Hydrometry; A.A. (2003) *The Netherlands*. <https://doi.org/10.1201/9780203971093>
- Nemec, J.; Askew, A. (1986) Mean and variance in network-design philosophies. In *Integrated Design of Hydrological Networks (Proceedings of the Budapest Symposium)*; Moss, M.E., Ed.; International Association of Hydrological Sciences Publication: Washington, DC, USA, pp. 123–131. <https://scholar.google.com/>
- Rodda, J.; Langbein, W. (1969) *Hydrological Network Design—Needs, Problems and Approaches*; World Meteorological Organization: Geneva, Switzerland. <https://snia.mop.gob.cl/repositorioidga/handle/20.500.13000/984>
- World Meteorological Organization (1972) *Casebook on Hydrological Network Design Practice*; Langbein, W., Ed.; World Meteorological Organization: Geneva, Switzerland. <https://scholar.google.com/>
- Davis, D.; Duckstein, L.; Krzysztofowicz, R. (1979) The Worth of Hydrologic Data for Nonoptimal Decision Making. *Water Resources Research*. 15, 1733–1742. <https://doi.org/10.1029/WR015i006p01733>
- Bezsonnyi, V.; Ponomarenko, R.; Tretyakov, O.; Asotsky, V.; Kalynovskyi, A. (2021) Regarding the Choice of Composite Indicators of Ecological Safety of Water in the Basin of the Siversky Donets. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 30, 622–631. <https://doi.org/10.15421/112157>
- Bezsonnyi, V. L., Tretyakov, O. V., Plyatsuk, L. D., & Nekos, A. N. (2022). Entropy approach to assessment of the ecological state of a water course. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University Series «Ecology»*, (27), 6–19. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2022-27-01> [in Ukrainian]
- Pilon, P.; Yuzyk, T.; Hale, R.; Day, T. (1996) Challenges Facing Surface Water Monitoring in Canada. *Canadian Water Resources Journal*. 21, 157–164. <https://doi.org/10.4296/cwrj2102157>
- U.S. Geological Survey. (1999). *Streamflow Information for the Next Century—A Plan for the National Streamflow Information Program of the U.S. Geological Survey*; U.S. Geological Survey: Denver, CO, USA.
- Mishra, A.K.; Coulibaly, P. (2009) Developments in Hydrometric Network Design: A Review. *Rev. Geophys.*, 47. <http://dx.doi.org/10.1029/2007RG000243>
- Chacon-hurtado, J.; Alfonso, L.; Solomatine, D. (2017) Rainfall and streamflow sensor network design: A review of applications, classification, and a proposed framework. *Hydrology and Earth System Sciences*. 21, 3071–3091. <https://doi.org/10.5194/hess-21-3071-2017>
- Moss, M.E. (1982) *Concepts and Techniques in Hydrological Network Design*; World Meteorological Organization: Geneva, Switzerland. <https://scholar.google.com/>
- Van der Made, J.; Schilperoord, T.; van der Schaaf, S.; Buishand, T.; Brouwer, G.; van Duyvenbooden, W.; Becinsky, P. (1986) *Design Aspects of Hydrological Networks*; Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO: The Hague, The Netherlands. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:4ab6e86e-b0e5-4571-bd20-241ac4489023>
- Pyrcce, R.S. (2004) *Review and Analysis of Stream Gauge Networks for the Ontario Stream Gauge Rehabilitation Project*, 2nd ed.; Watershed Science Centre: Peterborough, ON, Canada. [https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=Review+and+Analysis+of+Stream+Gauge+Networks+for+the+Ontario+Stream+Gauge+Rehabilitation+Project&author=Pyrcce,+R.S.&publication\\_year=2004](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Review+and+Analysis+of+Stream+Gauge+Networks+for+the+Ontario+Stream+Gauge+Rehabilitation+Project&author=Pyrcce,+R.S.&publication_year=2004)
- Behmel, S.; Damour, M.; Ludwig, R.; Rodriguez, M. (2016) Water quality monitoring strategies—A review and future perspectives. *Sci. Total Environ*. 571, 1312–1329. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.235>
- Bezsonnyi, V., Tretyakov, O., Sherstyuk, M., & Nekos, A. (2022). Thermodynamic aspects of the systems approach in ecology. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series “Geology. Geography. Ecology”*, (57), 268–281. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-57-20> [in Ukrainian]
- Bezsonnyi, V.L. (2023) Methods of assessment of the ecological status of a water body based on the entropy-weighted index of water quality. *Ecological Sciences: a scientific and practical journal*. – № 2(47). – C. 44–48. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.2-47.7> [in Ukrainian]
- Shannon, C. (1948) *A Mathematical Theory of Communication*. *Bell Syst. Tech. J.* 27, 379–423. <http://dx.doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
- Batty, M. (2010) Space, scale, and scaling in entropy maximizing. *Geogr. Anal.*, 42, 395–421. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1538-4632.2010.00800.x>



22. Singh, V. (2015) *Entropy Theory in Hydrologic Science and Engineering*; McGraw-Hill Education: New York, NY, USA <https://www.accessengineeringlibrary.com/binary/mheaeworks/f8203430db41fd24/ee925d2b4e27bfd905d73664befe36228ea77a3c4ffc963ee700bbf01c450e7c/book-summary.pdf>
23. Lathi, B. (1968) *An Introduction to Random Signals and Communication Theory*; International Textbook Company: Scranton, PA, USA. <https://scholar.google.com/>
24. Tribus, M. (1969) *Rational Descriptions, Decisions and Designs*; Irvine, T.F., Hartnett, J.P., Eds.; Pergamon Press: Oxford, UK. <https://scholar.google.com/>
25. Krstanovic, P.; Singh, V. (1992) Evaluation of rainfall networks using entropy: I. Theoretical development. *Water Resour. Manag.*, 6, 279–293. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00872281>
26. McGill, W. (1954) Multivariate information transmission. *Psychometrika*, 19, 97–116. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02289159>
27. Watanabe, S. (1960) *Information Theoretical Analysis of Multivariate Correlation*. *IBM J. Res. Dev.*, 4, 66–82. <http://dx.doi.org/10.1147/rd.41.0066>
28. Stosic, T.; Stosic, B.; Singh, V. (2017) Optimizing streamflow monitoring networks using joint permutation entropy. *Journal of Hydrology*, 552, 306–312. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.07.003>
29. Mahjouri, N.; Kerachian, R. (2011) Revising river water quality monitoring networks using discrete entropy theory: The Jajrood River experience. *Environmental Monitoring and Assessment*. 175, 291–302. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-010-1512-6>
30. Mahmoudi-Meimand, H.; Nazif, S.; Abbaspour, R.; Sabokbar, H. (2016) An algorithm for optimisation of a rain gauge network based on geostatistics and entropy concepts using GIS. *J. Spat. Sci.* 61, 233–252. <https://doi.org/10.1080/14498596.2015.1030789>
31. Hosseini, M.; Kerachian, R. (2017) A Bayesian maximum entropy-based methodology for optimal spatiotemporal design of groundwater monitoring networks. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189, 433. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-017-6129-6>
32. Masoumi, F.; Kerachian, R. (2010) Optimal redesign of groundwater quality monitoring networks: A case study. *Environmental Monitoring and Assessment*. 161, 247–257. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-008-0742-3>
33. Su, H.; You, G. (2014) Developing an entropy-based model of spatial information estimation and its application in the design of precipitation gauge networks. *Journal of Hydrology*, 519, 3316–3327. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.022>
34. Alfonso, L.; Lobbrecht, A.; Price, R. (2010) Optimization of water level monitoring network in polder systems using information theory. *Water Resources Research*, 46. <http://dx.doi.org/10.1029/2009WR008953>
35. Memarzadeh, M.; Mahjouri, N.; Kerachian, R. (2013) Evaluating sampling locations in river water quality monitoring networks: Application of dynamic factor analysis and discrete entropy theory. *Environmental Earth Sciences*, 70, 2577–2585. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-013-2299-x>
36. Mishra, A.; Coulibaly, P. (2010) Hydrometric Network Evaluation for Canadian Watersheds. *Journal of Hydrology*. 380, 420–437. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.11.015>
37. Mishra, A.; Coulibaly, P. (2014) Variability in Canadian Seasonal Streamflow Information and Its Implication for Hydrometric Network Design. *Journal of Hydrology. Eng.* 19. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000971](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000971)
38. Hosseini, M.; Kerachian, R. (2017) A data fusion-based methodology for optimal redesign of groundwater monitoring networks. *Journal of Hydrology*. 552, 267–282. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.06.046>
39. Alfonso, L.; Lobbrecht, A.; Price, R. (2010) Information theory-based approach for location of monitoring water level gauges in polders. *Water Resources Research*. 46. <http://dx.doi.org/10.1029/2009WR008101>
40. Alameddine, I.; Karmakar, S.; Qian, S.S.; Paerl, H.W.; Reckhow, K.H. (2013) Optimizing an estuarine water quality monitoring program through an entropy-based hierarchical spatiotemporal Bayesian framework. *Water Resources Research*. 49, 6933–6945. <http://dx.doi.org/10.1002/wrcr.20509>
41. Keum, J.; Coulibaly, P. (2017) Sensitivity of Entropy Method to Time Series Length in Hydrometric Network Design. *Journal of Hydrologic Engineering*. 22. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001508](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001508)
42. Mondal, N.C.; Singh, V.P. (2011) Evaluation of groundwater monitoring network of Kodaganar River basin from Southern India using entropy. *Environmental Earth Sciences*. 66, 1183–1193. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-011-1326-z>
43. Uddameri, V.; Andruss, T. A. (2014) GIS-based multi-criteria decision-making approach for establishing a regional-scale groundwater monitoring. *Environmental Earth Sciences*. 71, 2617–2628. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-013-2899-5>
44. Wei, C.; Yeh, H.; Chen, Y. (2014) Spatiotemporal scaling effect on rainfall network design using entropy. *Entropy*. 16, 4626–4647. <http://dx.doi.org/10.3390/e16084626>
45. Li, C.; Singh, V.; Mishra, A. (2012) Entropy theory-based criterion for hydrometric network evaluation and design: Maximum information minimum redundancy. *Water Resources Research*, 48. <http://dx.doi.org/10.1029/2011WR011251>
46. Werstuck, C.; Coulibaly, P. (2016) Hydrometric network design using dual entropy multi-objective optimization in the Ottawa River Basin. *Hydrology Research*. 48, 1–13. <http://dx.doi.org/10.2166/nh.2016.344>

47. Alfonso, L.; He, L.; Lobbrecht, A.; Price, R. (2013) Information theory applied to evaluate the discharge monitoring network of the Magdalena River. *Journal of Hydroinformatics.*, 15, 211–228. <http://dx.doi.org/10.2166/hydro.2012.066>
48. Xu, H.; Xu, C.-Y.; Sælthun, N.; Xu, Y.; Zhou, B.; Chen, H. (2015) Entropy theory based multi-criteria resampling of rain gauge networks for hydrological modelling—A case study of humid area in southern China. *Journal of Hydrology.* 525, 138–151. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.034>
49. Werstuck, C.; Coulibaly, P. (2017) Assessing Spatial Scale Effects on Hydrometric Network Design Using Entropy and Multi-Objective Methods. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association.* <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12611>
50. Keum, J.; Coulibaly, P. (2017) Information theory-based decision support system for integrated design of multi-variable hydrometric networks. *Water Resources Research.* 53, 6239–6259. <http://dx.doi.org/10.1002/2016WR019981>
51. Kornelsen, K.; Coulibaly, P. (2015) Design of an Optimal Soil Moisture Monitoring Network Using SMOS Retrieved Soil Moisture. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 53, 3950–3959. <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2014.2388451>
52. Samuel, J.; Coulibaly, P.; Kollat, J. (2013) CRDEMO: Combined Regionalization and Dual Entropy-Multiobjective Optimization for Hydrometric Network Design. *Water Resources Research.* 49, 8070–8089. <http://dx.doi.org/10.1002/2013WR014058>
53. Leach, J.; Kornelsen, K.; Samuel, J.; Coulibaly, P. (2015) Hydrometric network design using streamflow signatures and indicators of hydrologic alteration. *Journal of Hydrology.* 529, 1350–1359. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.08.048>
54. Alfonso, L.; Ridolfi, E.; Gaytan-Aguilar, S.; Napolitano, F.; Russo, F. (2014) Ensemble Entropy for Monitoring Network Design. *Entropy.* 16, 1365–1375. <http://dx.doi.org/10.3390/e16031365>
55. Leach, J.; Coulibaly, P.; Guo, Y. (2016) Entropy based groundwater monitoring network design considering spatial distribution of annual recharge. *Advances in Water Resources.* 96, 108–119. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.07.006>
56. Boroumand, A.; Rajaei, T. (2017) Discrete entropy theory for optimal redesigning of salinity monitoring network in San Francisco bay. *Water Sci. Technol. Water Supply.* 17, 606–612. <http://dx.doi.org/10.2166/ws.2016.110>
57. Santos, J.; Portela, M.; Pulido-Calvo, I. (2013) Dimensionality reduction in drought modelling. *Hydrological Processes.* 27, 1399–1410. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.9300>
58. Brunsell, N.A. (2010) A multiscale information theory approach to assess spatial-temporal variability of daily precipitation. *Journal of Hydrology.* 385, 165–172. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.02.016>
59. Lee, J. (2013) Determination of optimal water quality monitoring points in sewer systems using entropy theory. *Entropy.* 15, 3419–3434. <http://dx.doi.org/10.3390/e15093419>
60. Lee, C.; Paik, K.; Yoo, D.; Kim, J. (2014) Efficient method for optimal placing of water quality monitoring stations for an ungauged basin. *Journal of Environmental Management.* 132, 24–31. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.10.012>
61. Fahle, M.; Hohenbrink, T.; Dietrich, O.; Lischeid, G. Temporal variability of the optimal monitoring setup assessed using information theory. (2015) *Water Resources Research.* 51, 7723–7743. <http://dx.doi.org/10.1002/2015WR017137>
62. Yakirevich, A.; Pachepsky, Y.; Gish, T.; Guber, A.; Kuznetsov, M.; Cady, R.; Nicholson, T. (2013) Augmentation of groundwater monitoring networks using information theory and ensemble modeling with pedotransfer functions. *Journal of Hydrology.* 501, 13–24. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.07.032>
63. Mishra, A.; Özger, M.; Singh, V. (2009) An entropy-based investigation into the variability of precipitation. *Journal of Hydrology.* 370, 139–154. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.03.006>
64. Gong, W.; Yang, D.; Gupta, H.; Nearing, G. (2014) Estimating information entropy for hydrological data: One dimensional case. *Water Resources Research.* 50, 5003–5018. <http://dx.doi.org/10.1002/2014WR015874>
65. Silva V.; da Silva V.; Belo Filho A.; Singh, V.; Almeida R.; da Silva B.; de Sousa, I.; de Holanda, R. (2017) Entropy theory for analysing water resources in northeastern region of Brazil. *Hydrological Sciences Journal.* 62, 1029–1038. <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1099789>
66. Ridolfi, E.; Montesarchio, V.; Russo, F.; Napolitano, F. (2011) An entropy approach for evaluating the maximum information content achievable by an urban rainfall network. *Natural Hazards and Earth System Sciences.* 11, 2075–2083. <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-11-2075-2011>
67. Yeh, H.; Chen, Y.; Wei, C.; Chen, R. (2011) Entropy and kriging approach to rainfall network design. *Paddy and Water Environment.* 9, 343–355. <http://dx.doi.org/10.1007/s10333-010-0247-x>
68. Awadallah, A. (2012) Selecting optimum locations of rainfall stations using kriging and entropy. *International Journal of Civil & Environmental Engineering.* 12, 36–41. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=bbfdd60b12caa37c5d5dbfca0039160dfe32299b>
69. Ahmed, N.; Gokhale, D. (1989) Entropy expressions and their estimators for multivariate distributions. *IEEE Transactions on Information Theory.* 35, 688–692. <http://dx.doi.org/10.1109/18.30996>
70. Coulibaly, P.; Keum, J. (2016) Snow Network Design and Evaluation for La Grande River Basin; Hydro-Quebec: Hamilton, ON, Canada. <https://scholar.google.com/>
71. Keum, J.; Kornelsen, K.C.; Leach, J.M.; Coulibaly, P. (2017) Entropy Applications to Water Monitoring Network Design: A Review. *Entropy.* 19, 613. <https://doi.org/10.3390/e19110613>

72. Zhao, R. (1992) The Xinanjiang model applied in China. *Journal of Hydrology*. 135, 371–381. <https://scholar.google.com/>
73. Arnold, J.; Srinivasan, R.; Muttiah, R.; Williams, J. (1998) Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development. *Journal of the American Water Resources Association*., 34, 73–89. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
74. United Nations (2004) *Guidelines for Reducing Flood Losses*; Pilon, P., Ed.; United Nations, <https://scholar.google.com/>
75. Chapman, T. (1986) Entropy as a measure of hydrologic data uncertainty and model performance. *Journal of Hydrology*., 85, 111–126. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(86\)90079-X](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(86)90079-X)
76. Yadav, M.; Wagener, T.; Gupta, H. (2007) Regionalization of constraints on expected watershed response behavior for improved predictions in ungauged basins. *Advances in Water Resources*. 30, 1756–1774. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2007.01.005>
77. Sawicz, K.; Wagener, T.; Sivapalan, M.; Troch, P.; Carrillo, G. (2011) Catchment classification: Empirical analysis of hydrologic similarity based on catchment function in the eastern USA. *Hydrology and Earth System Sciences*. 15, 2895–2911. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-15-2895-2011>
78. Richter, B.; Baumgartner, J.; Powell, J.; Braun, D. (1996) A Method for Assessing Hydrologic Alteration within Ecosystems. *Conservation Biology*. 10, 1163–1174. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1523-1739.1996.10041163.x>
79. Monk, W.; Peters, D.; Allen Curry, R.; Baird, D. (2011) Quantifying trends in indicator hydroecological variables for regime-based groups of Canadian rivers. *Hydrological Processes* 25, 3086–3100. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.8137>
80. Kerr, Y.; Waldteufel, P.; Wigneron, J.; Delwart, S.; Cabot, F.; Boutin, J.; Escorihuela, M.J.; Font, J.; Reul, N.; Gruhier, C.; et al. (2010) The SMOS Mission: New Tool for Monitoring Key Elements of the Global Water Cycle. *Proceedings of the IEEE*., 98, 666–687. <http://dx.doi.org/10.1109/JPROC.2010.2043032>
81. Harbaugh, A. (2005) MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model—The Ground-Water Flow Process; U.S. Geological Survey: Reston, VA, USA, <https://pubs.er.usgs.gov/publication/tm6A16>
82. Pollock, D. (2016) User Guide for MODPATH Version 7—A Particle-Tracking Model for MODFLOW; U.S. Geological Survey: Reston, VA, USA, <https://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr20161086>
83. Bedekar, V.; Morway, E.; Langevin, C.; Tonkin, M.J. (2016) MT3D-USGS Version 1: A U.S. Geological Survey Release of MT3DMS Updated with New and Expanded Transport Capabilities for Use with MODFLOW; U.S. Geological Survey: Reston, USA,
84. Šimunek, J.; van Genuchten, M.; Šejna, M. (2012) *The HYDRUS Software Package for Simulating Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Porous Media*; PC Progress: Prague, Czech Republic. <https://scholar.google.com/>
85. Owlia, R.; Abrishamchi, A.; Tajrishy, M. (2011) Spatial-temporal assessment and redesign of groundwater quality monitoring network: A case study. *Environmental Monitoring and Assessment*. 172, 263–273. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-010-1332-8>
86. Banik, B.; Alfonso, L.; di Cristo, C.; Leopardi, A.; Mynett, A. (2017) Evaluation of Different Formulations to Optimally Locate Sensors in Sewer Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 143. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000778](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000778)
87. Ruddell, B.; Kumar, P. (2009) Ecohydrologic process networks: 1. Identification. *Water Resources Research*. 45. <http://dx.doi.org/10.1029/2008WR007279>
88. Ruddell B.; Kumar P. (2009) Ecohydrologic process networks: 2. Analysis and characterization. *Water Resources Research*. 45, 1–14. <http://dx.doi.org/10.1029/2008WR007280>
89. Kang M.; Ruddell B.; Cho, C.; Chun, J.; Kim, J. (2017) Agricultural and Forest Meteorology Identifying CO<sub>2</sub> advection on a hill slope using information flow. *Agricultural and Forest Meteorology*, 232, 265–278. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.08.003>

Received 9 March 2023  
Accepted 20 April 2023