

УДК 627.51

<https://doi.org/10.31713/vt120268>

Клімов С. В. [1; ORCID ID: 0009-0000-2802-8863],

к.т.н., доцент,

Мартинов С. Ю. [1; ORCID ID: 0000-0002-5993-847X],

д.т.н., професор

Хлапук М.М. [1; ORCID ID: 0000-0001-6790-8900],

д.т.н., професор

Куницький С. О. [1; ORCID ID: 0000-0003-0318-6149],

п.н.с., доцент

¹Національний університет водного господарства та природокористування,
м. Рівне

ПОЄДНАННЯ ДАНИХ ТА МОДЕЛЕЙ В ОЦІНЦІ ДЕФІЦИТУ ВОДИ: ІНТЕГРАЦІЯ ДЕРЖАВНОГО ВОДНОГО КАДАСТРУ В МОДЕЛЮВАННЯ НА ОСНОВІ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА

У статті розглянуто проблему переходу від традиційного моніторингу водних ресурсів до прогностичного управління в умовах кліматичної нестабільності, зростаючого антропогенного навантаження, впливів бойових дій. Визначено, що ефективне моделювання водного дефіциту потребує інтеграції верифікованих та структурованих даних у сучасні гідрологічні та гідравлічні моделі. Визначено роль Державного водного кадастру України як базового джерела даних для створення цифрових двійників (digital twins) річкових басейнів. Показано, що одним з обмежень використання даних кадастру може бути їх методологічна та просторова неоднорідність, що ускладнює інтеграцію з європейськими інформаційними системами, зокрема WISE.

Запропоновано підхід до структуризації даних ДВК за гідрометричним, морфологічним та експлуатаційним блоками з подальшою інтеграцією у моделі HEC-HMS та HEC-RAS. Розроблено концептуальну архітектуру цифрового двійника річкового басейну, що забезпечує формування сценаріїв водного балансу та оцінку індексу водного дефіциту.

На прикладі регіону Полісся проаналізовано сучасний стан водокористування, структуру водоспоживання та якість водних ресурсів, наявність тенденцій до аридизації та зростання екологічних ризиків. Обґрунтовується необхідність гармонізації

даних ДБК відповідно до вимог WISE та INSPIRE для забезпечення їх сумісності та використання у транскордонному управлінні водними ресурсами.

Результати дослідження можуть бути корисними для розробки систем підтримки прийняття рішень у сфері управління водними ресурсами.

Дослідження проводиться в рамках проєкту «Кліматично стійке управління безпечними системами водопостачання з дезінфекцією та без дезінфекції» (Climate-Resilient Management for Safe Disinfected and Non-disinfected Water Supply Systems) - 101081980 - SafeCREW — Horizon-cl6-2022-zeropollution-01.

Ключові слова: водний дефіцит, Державний водний кадастр, цифровий двійник, гідрологічне моделювання, HEC-HMS, HEC-RAS, WISE, WFD, INSPIRE, Полісся, транскордонні басейни, управління водними ресурсами.

Постановка проблеми.

Забезпечення сталого управління водними ресурсами є одним із ключових викликів сучасності, що обумовлено глобальними кліматичними змінами, зростаючим антропогенним навантаженням, впливом бойових дій, [1], [2], [3]. Перехід від пасивного моніторингу поточного стану водних об'єктів до активного, прогностичного моделювання стає критично важливим інструментом для запобігання водним кризам, [4]. Сучасна європейська практика, закріплена у Водній рамковій директиві (2000/60/EC), [5], вимагає від держав-членів впровадження ризик-орієнтованого підходу, [6], [7]. Обґрунтоване прийняття управлінських рішень, наприклад, щодо видачі дозволів на спеціальне водокористування, вимагає налагодження потоків верифікованих даних та функціонування прогностичних моделей у режимі реального часу. Це дозволяє оцінити довгостроковий вплив поточних рішень на екосистеми (через 5–10 років) в умовах кліматичної нестабільності.

Актуальність прогностичного моделювання підтверджується масштабами економічних та екологічних збитків, спричинених маловоддям та посухами у Європі. За наявними оцінками, більшість таких збитків (~9 млрд євро/рік) припадає на сільське господарство, енергетичний сектор та водопостачання. Екстремальні посухи, що

спостерігалися у Західній та Центральній Європі в 2018, 2019 та 2020 роках, мали значні негативні наслідки. Зокрема, тільки у 2018 році сільськогосподарські збитки склали близько 2 млрд євро у Франції, 1,4 млрд євро у Нідерландах та 770 млн євро у Німеччині, [8]. У відповідь на ці виклики держави-члени ЄС активно розробляють плани управління посухою для забезпечення своєчасного вжиття заходів на різних рівнях, від річкових басейнів до окремих громадян.

Для України, і зокрема для регіону Полісся, проблема водного дефіциту також набуває особливої гостроти. Полісся, яке традиційно вважалося головним «донором» прісної води в країні [9], сьогодні стикається з безпрецедентними викликами. Спостерігається чіткий тренд до аридизації: зсув кліматичних зон призводить до того, що Полісся поступово набуває рис лісостепу, [10], а дефіцит вологи стає структурним. Аналіз кліматичних даних показує, що, наприклад, у басейні Дністра середня за рік температура повітря за останнє десятиліття (2011–2020 рр.) була найвищою з 1946 р. і, ймовірно, за всю історію інструментальних спостережень. Починаючи з середини 1980-х років, кожне з десятиліть було теплішим, ніж попереднє.

Ситуація ускладнюється транскордонним характером більшості річок регіону (Прип'ять, Десна, Західний Буг). Відсутність математично обґрунтованих моделей водного дефіциту, що базуються на достовірних даних, залишає Україну вразливою у міжнародних спорах щодо раціонального розподілу та використання водних ресурсів, [11]. Окрім того, дефіцит води провокує екосистемну кризу: водно-болотні угіддя (ВБУ) Полісся, які є критичними для збереження біорізноманіття всієї Європи, деградує, що матиме незворотні наслідки. Знищення ВБУ порушує природний гідрологічний режим, знижуючи здатність природи фільтрувати воду, що впливає на якість питної води для мільйонів людей, [12].

У цьому контексті наукове моделювання водного дефіциту в Україні, що базується на даних Державного водного кадастру (ДВК, [13]), є критично важливим інструментом. ДВК виступає фундаментом для моделювання, оскільки містить систематизовані дані про стан, обсяги, якість та використання поверхневих і підземних вод. Однак, наукова проблема полягає не лише у наявності даних як таких, а у необхідності їх актуалізації, верифікації та інтеграції у сучасні прогностичні моделі. Використання застарілих даних, що не враховують інтенсивність сучасних кліматичних змін та зміщення кліматичних зон, [10], створює ризик отримання



помилкових прогнозів. Це може призвести до переоцінки або недооцінки ризиків водного дефіциту та, як наслідок, до прийняття неефективних управлінських та стратегічних рішень, [14].

Головне – незважаючи на значний обсяг даних Державного водного кадастру, в Україні відсутній механізм їх прямої інтеграції у прогностичні гідрологічні моделі та європейські інформаційні системи (WISE). Неузгодженість методів збору, просторових одиниць і форматів даних обмежує можливість їх використання для достовірного моделювання водного дефіциту та транскордонного аналізу. Це створює критичний розрив між наявними даними, інструментами моделювання та вимогами Водної рамкової директиви щодо ризик-орієнтованого управління водними ресурсами, що унеможлиблює побудову достовірних прогностичних моделей та обґрунтоване прийняття управлінських рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання наукового обґрунтування управління водними ресурсами та моделювання гідрологічних процесів перебувають у центрі уваги провідних українських та закордонних вчених.

Значний внесок у дослідження гідрологічного режиму річок Полісся та розробку методів управління водними ресурсами в умовах антропогенного навантаження зробили вчені Національного університету водного господарства та природокористування (НУВГП), зокрема С. Вознюк, В. Мошинський, М. Рокочинський, С. Клименко, І. Залеський, П. Волк, ін [15], [16], [17], [18]. Їхні праці присвячені питанням оптимізації водокористування, екологічного стану меліорованих земель та адаптації водного господарства до кліматичних змін. Окрему увагу дослідженням гідрохімічного стану та якості підземних вод регіону приділяли фахівці ІВПІМ [16], [19], УкрДГРІ, КНУ ім. Тараса Шевченка, Українського геологорозвідувального інституту УГК, [20], [21], [22] та ін.

З впровадженням Водної рамкової директиви ЄС в Україні особливої актуальності набули праці, що стосуються розробки Планів управління річковими басейнами (ПУРБ). У цьому контексті дослідження В. Гребеня та В. Хільчевського (КНУ ім. Т.Шевченка), [23], [24], [25], [26] формують методологічну базу для типізації водних об'єктів та оцінки ризиків невиконання екологічних цілей.

На міжнародному рівні питання інтегрованого моделювання водних ресурсів активно розробляються фахівцями організації Deltares (Нідерланди). Зокрема, розроблена ними система Delft-FEWS [27] стала світовим стандартом для оперативного прогнозування гідрологічних явищ та управління ризиками посух. Наукові звіти Європейського агентства з навколишнього середовища (European Environment Agency, EEA, зокрема SDI - geospatial data catalogue, [28]) та Європейської обсерваторії посухи (European Drought Observatory, EDO, [29]) підтверджують необхідність використання комбінованих індикаторів для оцінки впливу кліматичної нестабільності на екосистеми:

1. Стандартизований індекс опадів (Standardized Precipitation Index, SPI);
2. Стандартизований індекс снігового покриву (Standardized Snowpack Index, SSPI);
3. Аномалія вологості ґрунту (Soil Moisture Anomaly, SMA);
4. Аномалія стану рослинності (Anomaly of Vegetation Condition, Anomaly FAPAR);
5. Індекс низького потоку (Low-Flow Index, LFI);
6. Індекс хвиль спеки та холоду (Heat and Cold Wave Index, HCWI);
7. Комбінований індикатор посухи, Combined Drought Indicator, CDI).

Згідно з комплексним оглядом Pooria Ghorbani Bam та ін. [30], існує ключова відмінність між цифровою тіню (digital shadow, DS) та повноцінним цифровим двійником (Digital Twin, DT) полягає у двонаправленості потоків даних, де інтегровані масиви (зокрема і ДВК) не лише оновлюють сформовану віртуальну модель, а й через неї дозволяють проводити автономну оптимізацію та прогнозне керування фізичними системами в режимі реального часу. Також важливим є подолання розриву між академічними знаннями та їх застосуванням через використання великих даних (big data) та ГІС [31], [32].

Особливої ваги у подоланні розриву між наявними даними та потребами моделювання набувають гібридні підходи, що поєднують фізично-орієнтовані моделі (зокрема Soil Water Assessment Tool, SWAT) із алгоритмами аналізу невизначеності, такими як SUFI-2. Досвід моделювання великих басейнів у напівпосушливих регіонах світу (наприклад, басейну Сейбуз - Seybouse Basin, Algeria, [33]) доводить, що використання супутникових кліматичних даних



(Climate Forecast System Reanalysis, CFSR) у поєднанні з ітераційним калібруванням дозволяє отримувати достовірні результати навіть за умови значних прогалин у натурних спостереженнях, що є критично релевантним для модернізації українського ДВК.

Незважаючи на значну кількість напрацювань, залишається недостатньо висвітленим питання практичної інтеграції динамічних даних Державного водного кадастру (ДВК) безпосередньо в цифрові моделі прогнозування дефіциту. Більшість існуючих досліджень або фокусуються на теоретичних аспектах гідрологічного моделювання, або на статистичному аналізі архівних даних ДВК. Питання створення «цифрових двійників» басейнів річок України, зокрема Полісся, з використанням WISE-сумісних форматів даних (зокрема WISE WFD, наприклад для Норвегії та Ісландії з 2000 року – [34]) для оперативного управління в умовах транскордонної залежності потребує подальшого наукового опрацювання та практичної реалізації.

Мета дослідження. Обґрунтувати та формалізувати підходи до інтеграції даних Державного водного кадастру у прогностичні гідрологічні моделі на основі принципів WISE-сумісності з метою створення цифрових двійників річкових басейнів для оцінки та прогнозування водного дефіциту.

Об'єкт дослідження. Процеси формування водного дефіциту в умовах кліматичної нестабільності та антропогенного навантаження у межах річкових басейнів Українського Полісся.

Предмет дослідження. Методи інтеграції, уніфікації та використання даних Державного водного кадастру у гідрологічному та гідравлічному моделюванні (HEC-HMS, HEC-RAS) з урахуванням вимог просторової та семантичної сумісності (WISE, INSPIRE).

Результати.

1. Аналіз сучасного стану та викликів управління водними ресурсами Полісся

Трансформація Полісся з надмірно зволоженого регіону в зону ризикованого водного балансу [10] вимагає детальної ревізії структури водоспоживання та антропогенного навантаження. На основі даних Державного водного кадастру та звітів БУВР річки Прип'ять (станом на 2024 рік, [35]), встановлено, що в регіоні функціонує розгалужена мережа водозаборів. Зокрема, лише в

суббасейні Прип'яті діє 655 об'єктів із забором понад 10 м³/добу, з яких 56% (365 одиниць) припадає на підземні джерела.

Загальна база даних водокористувачів України (із забором понад 5 м³/добу) налічує 34 153 записи, що підкреслює масштабність масивів даних («Big Data»), які підлягають опрацюванню в межах ДВК. Структура водокористування з поверхневих джерел (річки Стир, Горинь, Прип'ять, Уж) демонструє домінування промисловості (41%) та житлово-комунального господарства (31%), що створює значне навантаження на кількісний стан вод.

Екологічний стан масивів поверхневих вод (МПВ) Полісся суттєво обтяжений органічним та біогенним забрудненням. Дослідження засвідчують наступне:

- Органічне навантаження: 37% сумарного навантаження формується найбільшими містами регіону — Рівним та Луцьком, переважно за рахунок підприємств хімічної галузі.

- Біогенне забруднення: 91% точкових джерел забруднення припадає на населені пункти через недосконалість систем очищення стічних вод, що призводить до прогресуючої евтрофікації річок.

- Дифузні джерела: Вагомим фактором залишається змив речовин з меліорованих земель та урбанізованих територій, що ускладнює прогнозування якості води без застосування геоінформаційних моделей.

Структура водовідведення (42% – ЖКГ, 38% – промисловість) та ступінь очищення (лише 54% вод класифікуються як нормативно очищені) вказують на високу вразливість екосистем Полісся. В умовах маловоддя ці фактори стають критичними, оскільки здатність річок до самоочищення стрімко падає.

2. Результати оцінки відповідності якості підземних вод Полісся питним стандартам

Виявлені тенденції до аридизації Полісся та значний рівень забруднення поверхневих водотоків органічними і біогенними речовинами змушують переглядати стратегію водозабезпечення регіону. У цьому контексті підземні води артезіанських басейнів розглядаються як найбільш захищений стратегічний резерв. Проте ефективне інтегроване управління та моделювання безпечного водокористування неможливе без актуальних даних про хімічний та мікробіологічний стан цих вод, [36].

З метою верифікації параметрів, що в подальшому будуть використані як вхідні дані для еколого-гідрологічних моделей, нами

було проведено детальне дослідження якості підземних вод на конкретних об'єктах Волино-Подільського артезіанського басейну. Дослідження проводились в рамках грантового проєкту *Securing safe drinking water distribution (SafeCREW)* [37], який спрямований на підтримку нової Директиви ЄС про питну воду шляхом накопичення передових знань та розробки інструментів і рекомендацій для систем постачання з дезінфікованою та недезінфікованою питною водою, [38].

Для аналізу було обрано два репрезентативні об'єкти в межах Рівненського району Рівненської області: site #1 та site #2. Оцінка проводилася шляхом порівняння фактичних концентрацій із нормативами ДСанПіН 2.2.4-171-10. Залізо загальне: на обох об'єктах виявлено суттєве перевищення (рис. 1) нормативного значення $0,2 \text{ мг/дм}^3$: у site #1 середній вміст становить $1,620 \text{ мг/дм}^3$, у site #2 – $2,357 \text{ мг/дм}^3$. Це підтверджує природну специфіку горизонтів Полісся, де концентрації іноді сягають $1,0 \text{ мг/дм}^3$ і вище.

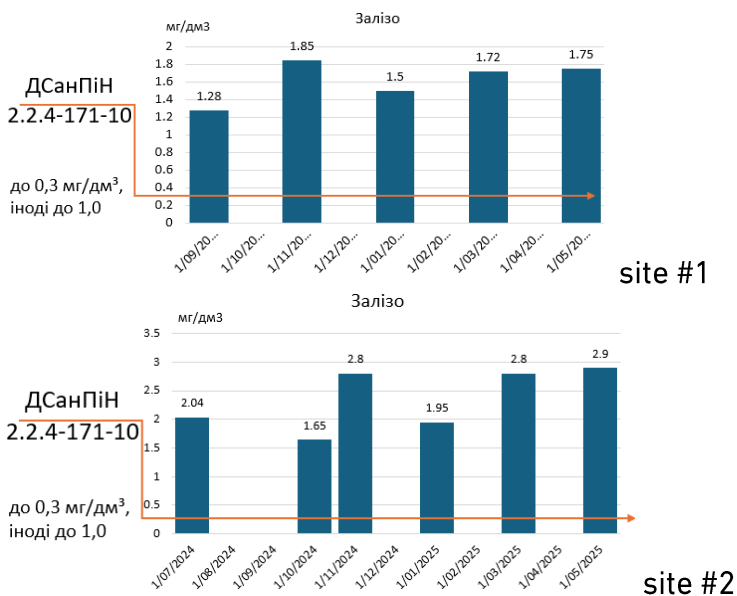


Рис.1. Вміст заліза у джерелі питного водопостачання site #1 та site #2

Марганець: на site #1 зафіксовано перевищення норми (0,05 мг/дм³), (рис. 2), із середнім показником 0,080 мг/дм³, тоді як у site #2 марганець практично відсутній.

Амоній: показники у site #1 (середнє 0,614 мг/дм³) дещо вищі за норму 0,5 мг/дм³ (рис. 2), що є важливим індикатором для моделювання потенційного антропогенного впливу на водоносні горизонти.

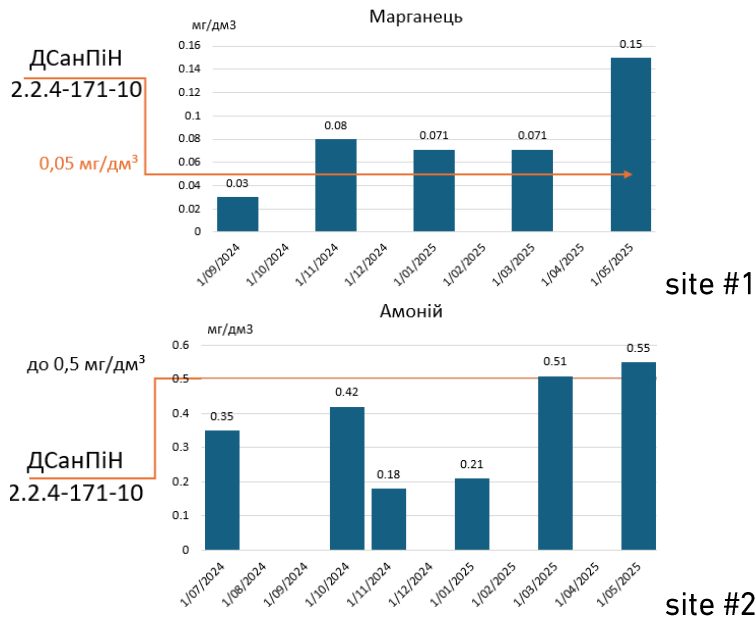


Рис.2. Вміст марганця (site #1) та амонія (site #2) у джерелі питного водопостачання

Мікробіологічна безпека: Загальні коліформи та кишкова паличка у середніх пробах на обох об'єктах не виявлені, що свідчить про високу природну захищеність досліджуваних джерел.

В цілому в рамках проекту Climate-Resilient Management for Safe Disinfected and Non-disinfected Water Supply Systems - SafeCREW, з 2024 по 2026 роки проводився аналіз більше 20 хімічних та 10 мікробіологічних показників якості води.

3. Концепція ДВК як інформаційного базису моделювання

Для переходу до прогностичного управління нами пропонується структурування даних ДВК за трьома функціональними блоками:



1. Гідрометричний блок: Багаторічні ряди спостережень за стоком, режимами та рівнями підземних вод (зокрема в межах Волино-Подільського артезіанського басейну).

2. Морфологічний та інженерний блок: Цифрові параметри гідротехнічних споруд, меліоративних систем та акумулюючих ємностей.

3. Експлуатаційний блок: Динамічні дані фактичного водокористування на основі звітності форми № 2ТП-водгосп.

Саме така інтеграція дозволяє створити «цифровий двійник» басейну, де дані кадастру виступають «паливом» для математичного ядра моделі.

4. Методологія наукового моделювання водного дефіциту

Оцінка водного дефіциту для річкових басейнів Полісся здійснюється шляхом побудови інтегрованої моделі водного балансу, що поєднує гідрологічне та гідравлічне моделювання. Методологія базується на використанні даних Державного водного кадастру як базового інформаційного джерела для формування параметрів цифрового двійника річкового басейну.

Концептуальна структура моделі включає три основні етапи:

- формування бази вхідних даних на основі ДВК;
- гідрологічне моделювання водозбору;
- гідравлічне моделювання руслових процесів та оцінка водного дефіциту.

Розглянемо їх більш детально.

4.1 Формування вхідних даних моделі на основі ДВК

Вхідні параметри моделі формувалися на основі структурованих даних Державного водного кадастру, які були згруповані у три інформаційні блоки, рис. 3.

Інтеграція цих даних дозволяє сформувати інформаційну основу для створення цифрового двійника річкового басейну.

Для мінімізації ризиків, пов'язаних із фрагментарністю даних в ДВК, доцільним буде впровадження багатостанційного калібрування (Multi-station calibration), коли налаштування гідрологічної моделі проводиться одночасно для декількох гідропостів у межах одного річкового басейну, [39], [40]. Як свідчать сучасні дослідження [31], [33], такий підхід дозволяє верифікувати модель одночасно для декількох суббасейнів, що забезпечує стабільність водного балансу

та дозволяє використовувати модель як надійне ядро цифрового двійника навіть у складних гідрокліматичних умовах.

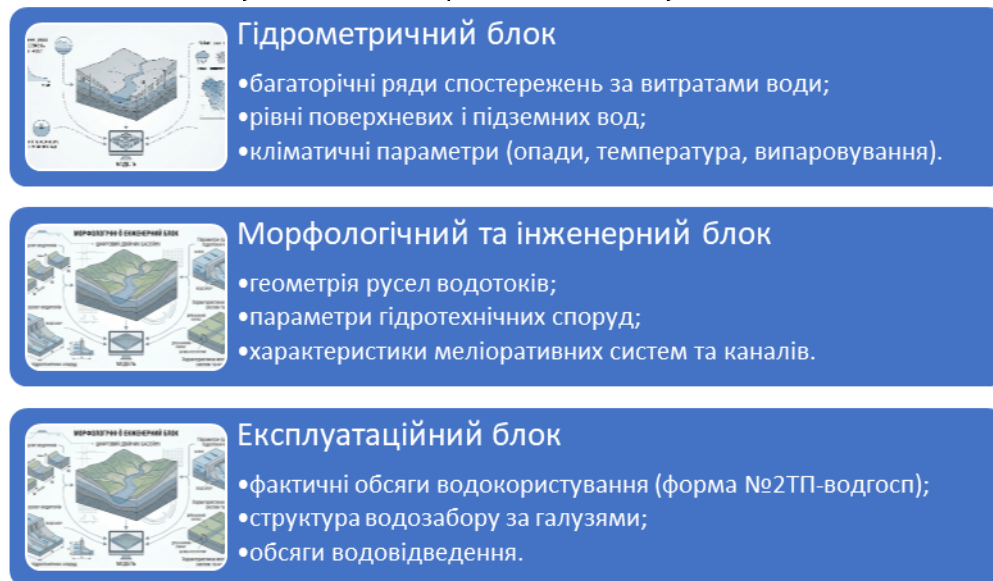


Рис. 3. Структурування даних Державного водного кадастру в інформаційні блоки

4.2 Гідрологічне моделювання водозбору

Для оцінки формування стоку використано систему гідрологічного моделювання HEC-HMS (Hydrologic Modeling System), розроблену Hydrologic Engineering Center, [41], [42], [43].

Модель застосовувалася для розрахунку водного балансу водозбору у вигляді:

$$P = Q + ET + I + \Delta S$$

де P – атмосферні опади,

Q – поверхневий стік,

ET – сумарне випаровування,

I – інфільтрація,

ΔS – зміна запасів води у водозборі.

Результатом моделювання є часові ряди витрат води у вузлових точках річкової мережі. Концептуальну схему взаємодії вхідних даних (формування яких на основі ДВК було описано вище), ключових процесів та вихідних результатів моделювання наведено на рис. 4.



Рис. 4. Концептуальна схема інформаційних потоків та функціональних модулів системи гідрологічного моделювання HEC-HMS

Як видно з рис. 4, інтеграція таких даних ДВК як опади, річковий стік, температури та цифрові моделі рельєфу дозволяє моделі HEC-HMS на основі алгоритмів моделювання "опади-стік" генерувати точні часові ряди витрат річки, що є основою для подальшого аналізу водного дефіциту. Нижче наведено пропонувану архітектуру цифрового двійника річкового басейну (рис. 5). Схема демонструє повний технологічний ланцюг моделювання:

State Water Cadastre → GIS basin preprocessing → Hydrological modelling (HEC-HMS) → Hydraulic modelling (HEC-RAS) → Water deficit index and risk maps.

4.3 Гідравлічне моделювання руслових процесів (HEC-RAS)

Для деталізації руслових процесів та аналізу розподілу витрат води використано систему HEC-RAS (River Analysis System).

Модель дозволяє виконувати: одномірні розрахунки усталених потоків; одно- та двовимірні розрахунки неусталених потоків; моделювання транспорту наносів; моделювання температури та якості води.

Гідравлічні розрахунки виконуються на основі рівнянь Сен-Венана, [44], [45], [46]:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QU}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f \right) = 0$$

де U – поздовжня швидкість потоку (м/с), A – площа поперечного перерізу (м²), q – бічний внесок на одиницю довжини каналу (м³/с·м), A – площа живого перерізу (м²), Q – витрата води, $\partial z/\partial x$ – нахил поверхні води, g – прискорення вільного падіння. S_f – нахил тертя, що використовує рівняння Маннінга, (м/м), [44].



Рис. 5. Архітектурна схема моделі цифрового двійника річкового басейну

Модель дозволяє визначати просторовий розподіл рівнів води та витрат у русловій мережі. Використання рівнянь Сен-Венана в консервативній формі (як це реалізовано в HEC-RAS 5.0 та наступних версіях, [46]) дозволяє інтегрувати дані ДВК про морфометрію русла в єдину динамічну систему, яка, на відміну від статичних "цифрових тіней", забезпечує прогностичне керування водними ресурсами.



4.4 Сценарне моделювання водного дефіциту

Для оцінки можливих змін водного балансу варто використовувати сценарний підхід на основі кліматичних сценаріїв (наприклад RCP 4.5 та RCP 8.5, [10]).

Моделювання повинно виконуватися для трьох типових гідрологічних умов: сухий, середній та вологий сценарій.

На основі результатів розрахунків визначається індекс водного дефіциту, [47], [48], [49], [50]:

$$D = Wd - Wa \quad D = \frac{W_a - W_a}{W_a} D = Wd - Wa$$

де Wd – потреба у воді,

Wa – доступний водний ресурс.

Отримані результати дозволяють: визначити критичні рівні маловоддя, оцінити ризики деградації водно-болотних угідь, сформувані науково обґрунтовані рекомендації для управління водокористуванням.

4.5. Значення сумісності ДБК з системою WISE для якості моделювання та виконання міжнародних зобов'язань

Достовірність прогностичних сценаріїв безпосередньо залежить від якості вхідних даних, що використовуються в математичному ядрі гідрологічних та гідравлічних моделей. У цьому контексті Державний водний кадастр України (ДБК) може розглядатися як базове джерело інформації для формування вхідних наборів даних моделей управління водними ресурсами.

У рамках імплементації положень Угоди про асоціацію з Європейським Союзом [51] та впровадження Водної рамкової директиви (Water Framework Directive, WFD) [5], національні інформаційні системи з водних ресурсів повинні бути сумісними з європейською інформаційною системою WISE (Water Information System for Europe, [8], [52], [53]). WISE функціонує як інтегрована платформа обміну та звітності щодо стану водних ресурсів, що адмініструється Європейським агентством з навколишнього середовища (EEA), [54]. Дані держав-членів щодо планів управління річковими басейнами (RBMP) надходять саме через WISE.

Сумісність ДБК з WISE має кілька ключових аспектів.

По-перше, вона забезпечує технічну можливість виконання міжнародних зобов'язань щодо звітності про стан водних ресурсів та виконання планів управління річковими басейнами, [55].

По-друге, використання стандартизованих структур даних і метаданих підвищує надійність інформаційної бази для гідрологічного та екологічного моделювання. Просторово узгоджені та методологічно уніфіковані дані є необхідною передумовою отримання достовірних результатів моделювання.

По-третє, сумісність інформаційних систем є важливою для управління транскордонними водними басейнами. Для річок, що мають міжнародний характер (наприклад, Прип'ять, Західний Буг, Десна), використання узгоджених інформаційних платформ дозволяє формувати спільні аналітичні моделі та забезпечувати узгоджене управління водними ресурсами.

Разом з тим інтеграція національних інформаційних систем у єдину європейську платформу WISE є складним науково-технічним завданням. Однією з ключових проблем є неоднорідність просторових даних, що використовуються різними країнами, .

У дослідженні [Hannerz & Langaas](#) (2007), [56] показано, що національні системи звітності в рамках Водної рамкової директиви базуються на різних методах просторового аналізу та використовують різні одиниці територіальної класифікації. Аналіз даних звітності Швеції та Великої Британії, а також загальноєвропейських базових наборів даних, що застосовуються у WISE, засвідчив [56] наявність суттєвої транскордонної неоднорідності просторових даних.

Унаслідок цього інтерпретація результатів моніторингу та їх міжнародне порівняння можуть бути значною мірою ускладнені. Крім того, інтеграція національних наборів даних у спільну європейську інформаційну систему може бути обмежена відмінностями у методології їх формування.

Для України це означає, що модернізація Державного водного кадастру повинна передбачати не лише оцифрування наявних даних, але й їх методологічну гармонізацію відповідно до європейських стандартів просторових даних (зокрема вимог директиви INSPIRE). Лише за умов просторової та методичної уніфікації дані ДБК можуть бути ефективно використані для міжнародної звітності, порівняльного аналізу стану водних ресурсів та інтегрованого моделювання на рівні транскордонних басейнів.



Висновки. Ефективне управління водними ресурсами в умовах кліматичної нестабільності потребує переходу від статичного обліку до інтегрованого прогностичного моделювання на основі верифікованих даних, [57]. Державний водний кадастр може виступати ключовим джерелом таких даних, однак його використання обмежується відсутністю уніфікації та сумісності з європейськими системами (WISE). Це обумовлює необхідність створення цифрових двійників річкових басейнів із гармонізованими даними для забезпечення достовірного моделювання та транскордонного управління.

З огляду на все більшу забудову територій в моделях варто враховувати міські дренажні системи (зокрема зливові каналізація, для якої не проводиться очищення на очисних спорудах), [58].

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження можуть бути зосереджені на створенні валідаційно підтверджених цифрових двійників річкових басейнів із використанням даних Державного водного кадастру. Ключовим завданням для цього є розробка формалізованих процедур гармонізації даних (просторова дискретизація, класифікації, метадані) відповідно до вимог ЄС, зокрема WISE, з подальшою перевіркою їх впливу на точність моделювання.

Доцільним також буде впровадження використання супутникових даних (напр. Sentinel) для оперативного оновлення параметрів моделей і підвищення достовірності прогнозів. Окрему увагу слід приділити кількісній верифікації моделей та оцінці чутливості результатів до якості вхідних даних.

Використання штучного інтелекту. Під час підготовки цієї статті автори використовували великі мовні моделі [Gemini](#) (Google) та ChatGPT для перекладу анотації, редагування англійського тексту, при створенні Рис. 3. Також робились пошукові запити й аналіз термінології. Остаточну перевірку та верифікацію всіх матеріалів виконали автори.

1. O. Shumilova et al., «Impact of the Russia–Ukraine armed conflict on water resources and water infrastructure», *Nat. Sustain.*, вип. 6, вип. 5, с. 578–586, Трав 2023, <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01068-x>. 2. I. Shcherbakov et al., «Poor quality of sewage water in Ukraine: a priority in post-war

- rebuilding», *Sci. Rep.*, вип. 15, вип. 1, с. 23296, Лип 2025, <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93335-4> .
- 3.** С. Величко і О. Дупляк, «ВПЛИВ ПОВНОМАСШТАБНОЇ АГРЕСІЇ НА ВОДНІ ОБ'ЄКТИ ЯК ДЖЕРЕЛА ВОДОПОСТАЧАННЯ», *Проблеми водопостачання водовідведення та гідравліки*, Вип. 45, с. 5–14, Груд 2023, <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.45.5-14> .
- 4.** D. Milicevic, S. Milenkovic, i O. Potic, «Water quality modeling role in implementation of the Water Framework Directive», *Facta Univ. - Ser. Archit. Civ. Eng.*, вип. 8, с. 247–260, Січ 2010, <https://doi.org/10.2298/FUACE1002247M> .
- 5.** «Директива 2000/60/ЄС Європейського Парламенту і Ради 'Про встановлення рамок діяльності Співтовариства в галузі водної політики' від 23 жовтня 2000 року», *Законодавство України*. Дата звернення: 25, Лютий 2019. [Online]. Доступний у: https://zakon.rada.gov.ua/go/994_962 .
- 6.** Á. Borja et al., «The European Water Framework Directive and the DPSIR, a methodological approach to assess the risk of failing to achieve good ecological status», *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, вип. 66, вип. 1, с. 84–96, Січ 2006, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2005.07.021> .
- 7.** «Впровадження Директиви 2007/60/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 23 жовтня 2007 року про оцінку та управління ризиками затоплення». Дата звернення: 11, Квітень 2026. [Online]. Доступний у: <https://dsns.gov.ua/poperedzhennya-pro-ymovirni-nadzvichayni-situaciyi-abo-uskladnennya/vprovadghennya-directiva-2007-60-ec-of-the-european-parliament-and-of-the-council-of-23-october-2007-on-the-assessment-and-management-of-flood-risks> .
- 8.** «Exposure of European ecosystems to drought». Дата звернення: 11, Квітень 2026. [Online]. Доступний у: <https://water.europa.eu/freshwater/freshwater/europe-freshwater/freshwater-themes/drought> .
- 9.** М. О. Клименко і І. І. Залеський, *Збалансоване використання водних ресурсів*. Рівне: НУВГП, 2016. Дата звернення: 11, Квітень 2026. [Online]. Доступний у: <https://ep3.nuwm.edu.ua/2732/> .
- 10.** «Узагальнена оцінка впливу зміни клімату в Україні» *Ukrainian Climate Office*, Ukrainian Climate Office. Дата звернення: 11, Квітень 2026. [Online]. Доступний у: <https://ukrainian-climate-office.org/knowledge-hub/uzahalnena-otsinka-vplyvu-zminy-klim/> .
- 11.** Y. Duliba, «Some issues of sustainable management of water resources of Ukraine in conditions of climatic and ecological threats», *Actual Probl. Law Aktual. Probl. Pravoznavstva*, вип. 1, с. 193–201, Трав 2025, <https://doi.org/10.35774/app2025.01.193> .
- 12.** G. Matta, G. Pant, P. Kumar, i R. Pal, «Navigating Water Scarcity for Global Climate Change and Ramifications», *World Water Policy*, вип. 12, вип. 1, с. e70055, 2026, doi: 10.1002/wwp2.70055.
- [13] «Про затвердження Порядку ведення державного водного кадастру», Офіційний вебпортал парламенту України. Дата звернення: 11, Квітень



2026. [Online]. Доступний у: <https://zakon.rada.gov.ua/go/413-96-%D0%BF>

14. А. Ю. Якимчук, Клімов, С. В., і ін., Інформаційне забезпечення управління еколого-економічною безпекою держави: монографія за міжнар. участю. Рівне; Варшава; Люблін: Нац. ун-т вод. госп-ва та природокористування, 2018. [Online]. Доступний у: <https://surl.li/orymch>

15. В. С. Мошинський, «Методи управління продуктивністю та екологічною стійкістю осушуваних земель». Дата звернення: 11, Квітень 2026. [Online]. Доступний у: <https://ep3.nuwm.edu.ua/4333/>

16. НУВГП, В. А. Сташук, В. С. Мошинський, А. М. Рокочинський, і П. П. Волк, «Підвищення ресурсного потенціалу Українського Полісся: монографія». Дата звернення: 11, Квітень 2026. [Online]. Доступний у: <https://ep3.nuwm.edu.ua/30397/>

17. С. Т. Вознюк et al., «Торфово-земельний ресурс Північно-Західного регіону України». Дата звернення: 11, Квітень 2026. [Online]. Доступний у: <https://ep3.nuwm.edu.ua/7506/>

18. М. О. Клименко і І. І. Залеський, Збалансоване використання водних ресурсів. Рівне: НУВГП, 2016. Дата звернення: 11, Квітень 2026. [Online]. Доступний у: <https://ep3.nuwm.edu.ua/2732/>

19. В. І. Вишневський і А. В. Куций, Багаторічні зміни водного режиму річок України. Київ: Накова думка, 2022. [Online]. Доступний у: <https://surl.li/vznwpm>

20. І. В. Саніна і Н. Г. Люта, «Ідентифікація транскордонних масивів підземних вод (Україна – Білорусь, басейн Дніпра)», Мінеральні Ресурси України, вип. 1, с. 32–38, Квіт 2021, <https://doi.org/10.31996/mru.2021.1.32-38>

21. Г. Г. Лютий, Н. Г. Люта, і І. В. Саніна, «Оцінка змін якості підземних вод водоносних горизонтів Дніпровсько-Донецького артезіанського басейну», Мінеральні Ресурси України, вип. 3, с. 20–23, Лис 2021, <https://doi.org/10.31996/mru.2021.3.20-23>

22. В. М. Шестопалов і Н. Г. Люта, «Щодо оптимального співвідношення поверхневих і підземних вод у водопостачанні населення в Україні», Мінеральні Ресурси України, вип. 1, с. 41–49, Бер 2024, <https://doi.org/10.31996/mru.2024.1.41-49>

23. Хільчевський В.К. Водна політика та управління водними ресурсами в країнах світу: навч. посібник. Київ: ДІА, 2026. 344 с. /// Khilchevskiy V.K. Water policy and water resources management in countries around the world: textbook. Kyiv: DIA, 2026. 344 p. 2026.

24. V. Khilchevskiy, Хільчевський В.К. Управління транскордонними водними ресурсами: навч. посібник – К.: ДІА, 2024. – 208 с. /// Management of transboundary water resources. 2024.

25. V. Khilchevskiy і V. V. Grebin, Хільчевський В.К., Гребін В.В. Гідрологія та гідрохімія: навч. посібник. – К.: ДІА, 2025. 352 с. /// Khilchevskiy V.K., Grebin V.V. Hydrology and hydrochemistry. Kyiv: DIA, 2025. 352 p. 2025.

26. V. Khilchevskiy, Хільчевський В.К. Гідрографія та водні ресурси Європи: навч. посібник. – К.: ДІА, 2023. – 308 с. /// Khilchevskiy V.K. Hydrography and water resources of

Europe: textbook. - Kyiv: DIA, 2023. - 308 p. 2023. **27.** «Delft-FEWS | Deltares». Дата звернення: 11, Квітень 2026. [Online]. Доступний у: <https://www.deltares.nl/en/software-and-data/products/delft-fews-platform>

28. «EEA geospatial data catalogue». Дата звернення: 11, Квітень 2026. [Online]. Доступний у: <https://surl.li/jdtfbi>

29. «European Drought Observatory | Copernicus». Дата звернення: 11, Квітень 2026. [Online]. Доступний у: <https://www.copernicus.eu/en/european-drought-observatory>

30. P. Ghorbani Bam et al., «Digital Twin Applications in the Water Sector: A Review», Water, вип. 17, вип. 20, с. 2957, Січ 2025, <https://doi.org/10.3390/w17202957>

31. A. Srivastava, V. Sridhar, i N. Kumari, «Application of Various Hydrological Modeling Techniques and Methods in River Basin Management», Water, вип. 17, вип. 1, с. 83, Січ 2025, <https://doi.org/10.3390/w17010083>

32. Z. Xu, K. Ito, G. Schultz, i J. Y. Li, «Integrated Hydrologic Modeling and GIS in Water Resource Management», J. Comput. Civ. Eng. - J COMPUT Civ. ENG, вип. 15, Лип 2001, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(2001\)15:3\(217\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(2001)15:3(217))

33. С. А. Inan, A. Maoui, Y. Lucas, i J. Duplay, «Multi-Station Hydrological Modelling to Assess Groundwater Recharge of a Vast Semi-Arid Basin Considering the Problem of Lack of Data: A Case Study in Seybouse Basin, Algeria», Water, вип. 16, вип. 1, с. 160, Січ 2024, <https://doi.org/10.3390/w16010160>

34. «EEA geospatial data catalogue», <https://sdi.eea.europa.eu>. Дата звернення: 11, Квітень 2026. [Online]. Доступний у: <https://surl.li/gjcgxh>

35. «План управління річковим басейном Дніпра (2025–2030). Суббасейн Прип'яті. Аналіз стану поверхневих та підземних вод», Держ. агентство водних ресурсів України, Київ, 2024. [Online]. Доступний у: https://buvrzt.gov.ua/doc/prezentacii/12.03.24_2.pdf

36. С. Ю. Мартинов, С. В. Клімов, «Особенности выявления небезпек та небезпечних подій при формуванні Плану забезпечення безпечності води системи водопостачання», в зб. матер., Львів, Жов 2025, с. 63–64. <https://doi.org/10.51500/7826-59-9>

37. SafeCREW, «EU Project SafeCREW. Climate-resilient management for safe disinfected and non-disinfected water supply systems.», European Commission / Horizon Europe, Horizon Europe Project ID 101081714, 2022. [Online]. Доступний у: <https://www.tuhh.de/tuhh/forschung-und-transfer/neues-aus-der-forschung/eu-project-safecrew>

38. С. Мартинов, С. Клімов, i А. Кучерова, «ВИЯВЛЕННЯ ТА ОЦІНКА НЕБЕЗПЕК В СИСТЕМІ ВОДОПОСТАЧАННЯ», Проблеми Водопостачання Водовідведення Та Гідравліки, вип. 52, с. 74–80, Груд 2025, <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2025.52.74-80>

39. K. S. Abbaspour, E. Rouholahnejad, S. Vaghefi, R. Srinivasan, H. Yang, i B. Kløve, «A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model», J. Hydrol., вип. 524, с. 733–752, Трав 2015, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>

40. W. Cao, W. Bowden, T. Davie, i A. Fenemor, «Multi-Variable and Multi-Site



Calibration and Validation of SWAT in a Large Mountainous Catchment With High Spatial Variability», *Hydrol. Process.*, вип. 20, с. 1057–1073, Бер 2006, <https://doi.org/10.1002/hyp.5933>. **41.** W. Ben Khélifa i M. Mosbahi, «Modeling of rainfall-runoff process using HEC-HMS model for an urban ungauged watershed in Tunisia», *Model. Earth Syst. Environ.*, Трав 2021, <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01177-6>. **42.** «HEC-HMS». Дата звернення: 26, Серпень 2021. [Online]. Доступний у: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/> **43.** «Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System (HEC-HMS)». Дата звернення: 26, Серпень 2021. [Online]. Доступний у: http://www.appslutelydigital.com/ModelPrimer/chapter5_section2.html **44.** D. M. Ferreira, C. V. S. Fernandes, i J. Gomes, «Verification of Saint-Venant equations solution based on the lax diffusive method for flow routing in natural channels», *RBRH*, вип. 22, 2017, <https://doi.org/10.1590/2318-0331.011716104>. **45.** «SciELO Brasil - Curvas de permanência de qualidade da água como subsídio para o enquadramento de corpos d'água a partir de modelagem matemática em regime não permanente Curvas de permanência de qualidade da água como subsídio para o enquadramento de corpos d'água a partir de modelagem matemática em regime não permanente». Дата звернення: 22, Квітень 2026. [Online]. Доступний у: <https://www.scielo.br/j/rbrh/a/kx9cNDysTxqmWVMkjWxYcXb/?format=html&lang=pt> **46.** G. W. Brunner, «HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual. Version 5.0», Hydrologic Engineering Center (HEC), U.S. Army Corps of Engineers, Davis, CA, Лют 2016. Дата звернення: 22, Лютий 2026. [Online]. Доступний у: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Reference%20Manual.pdf> **47.** V. Feiziasl, J. Jafarzadeh, B. Sadeghzadeh, i M. A. Mousavi Shalmani, «Water deficit index to evaluate water stress status and drought tolerance of rainfed barley genotypes in cold semi-arid area of Iran», *Agric. Water Manag.*, вип. 262, с. 107395, Бер 2022, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107395>. **48.** P. Colaizzi, S. Evett, S. O'Shaughnessy, i T. Howell, «Using plant canopy temperature to improve irrigated crop management», *Proc. 24th Annu. Cent. Plains Irrig. Conf. Colby*, Лют 2012. <https://surl.li/tydwwb> **49.** G. Masiello et al., «The IASI Water Deficit Index to Monitor Vegetation Stress and Early Drying in Summer Heatwaves: An Application to Southern Italy», *Land*, вип. 11, вип. 8, с. 1366, Сеп 2022, <https://doi.org/10.3390/land11081366>. **50.** S. Sharghi i A. Zeynolabedin, «Integration of machine learning models and remote sensing for estimating the Water Deficit Index», *Agric. Water Manag.*, вип. 319, с. 109827, Жов 2025, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109827>. **51.** «Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом,

Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони», Офіційний вебпортал парламенту України. Дата звернення: 11, Квітень 2026. [Online]. Доступний у: https://zakon.rada.gov.ua/go/984_011 52. «Water Information System for Europe / European Environment Agency», ROD, the EEA's reporting obligations database. Дата звернення: 11, Квітень 2026. [Online]. Доступний у: <https://rod.eionet.europa.eu/contacts?roleid=extranet-wise> 53. «WISE SoE». Дата звернення: 11, Квітень 2026. [Online]. Доступний у: https://cdr.eionet.europa.eu/help/WISE_SoE 54. «European waters -- Assessment of status and pressures 2018». Дата звернення: 11, Квітень 2026. [Online]. Доступний у: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/state-of-water> 55. «WISE WFD Reference Spatial Datasets reported under Water Framework Directive 2016». Дата звернення: 11, Квітень 2026. [Online]. Доступний у: <https://www.eea.europa.eu/en/datahub/datahubitem-view/ff3e1971-494d-4fa5-a57c-660e0f35d451> 56. F. Hannerz і S. Langaas, «Establishing a water information system for Europe: constraints from spatial data heterogeneity», Water Environ. J., вип. 21, вип. 3, с. 200–207, 2007, <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2007.00073.x> 57. Klimov, S., Starovoit, T. Long-term monitoring of surface water quality and groundwater potential using computational intelligence, GIS technologies, and remote sensing. System research and information technologies. 2026. No. 1. С. 124–143. <https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2026.1.09>. Дата звернення: 22, Квітень 2026. [Online]. Доступний у: <https://journal.iasa.kpi.ua/article/view/358082> 58. S. Achleitner, M. Möderl, і W. Rauch, «CITY DRAIN © - An open source approach for simulation of integrated urban drainage systems», Environ. Model. Softw., вип. 22, вип. 8, с. 1184–1195, 2007, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.06.013>.

REFERENCES:

1. Shumilova O. та ін. «Vplyv rosiys'ko-ukrayins'koho zbroynoho konfliktu na vodni resursy ta vodnu infrastrukturu», Nats. Sust., vyp. 6, vyp. 5, s. 578–586, Traven' 2023, <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01068-x>. 2. Shcherbakov I. та ін. «Pohana yakist' stichnykh vod v Ukraini: priorityet u pislyavoyenniy vidbudovi», nauk. Resp., vyp. 15, vyp. 1, s. 23296, Lyp 2025, <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93335-4>. 3. S. Velychko і O. Duplyak, «VPLYV POVNOMASSHTABNOYI AHRESIYI NA VODNI OB'YEKTY YAK DZHERELA VODOPOSTACHANNYA», Problemy vodopostachannya vodovidvedennya ta hidravliky, Vyp. 45, s. 5–14, Hrud 2023, <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.45.5-14>. 4. D. Milichevych, S. Milenkovich, і O. Potik, «Rol' modelyuvannya yakosti vody v implementatsiyi Vodnoyi ramkovoyi dyrektyvy»,



Facta Univ. - ser. arkhit. Civ. inzh., vyp. 8, s. 247–260, Sich 2010, <https://doi.org/10.2298/FUACE1002247M>. 5. «Dyrektyva 2000/60/YES Yevropeys'koho Parlamentu i Rady «Pro vstanovlennya ramok diyal'nosti Spil'notovarystva v haluzi vodnoyi polityky» vid 23 zhovtnya 2000 roku», Zakonodavstvo Ukrayiny. Data zvernennya: 25 lyutoho 2019. [Onlayn]. Dostupnyy u: https://zakon.rada.gov.ua/go/994_962. 6. Á. Borkha ta in., «Yevropeys'ka vodna ramkova dyrektyva ta DPSIR, metodolohichnyy pidkhid do otsinky ryzyku nedosyahnennya khoroshooho ekolohichnoho stanu», Estuar. uzberezhzhya. Shelf Sci., vyp. 66, vyp. 1, s. 84–96, Sich 2006, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2005.07.021>. 7. «Vprovadzhennya Dyrektyvy 2007/60/YES Yevropeys'koho Parlamentu ta Rady vid 23 zhovtnya 2007 roku pro otsinku ta upravlinnya ryzykamy zatoplennya». Data zvernennya: 11, Kviten' 2026. [Onlayn]. Dostupnyy u: <https://dsns.gov.ua/poperedzhennya-promovirni-nadzvichayni-situaciyi-abo-uskladnennya/vprovadghennya-directiva-2007-60-EC-of-the-european-parlament-and-of-the-council-of-23-october-2007-on-the-assessment-and-management-of-flood-risks>. 8. «Vrazlyvist' yevropeys'kykh ekosystem do posukhy». Data zvernennya: 11, Kviten' 2026. [Onlayn]. Dostupnyy u: <https://water.europa.eu/freshwater/freshwater/europe-freshwater/freshwater-themes/drought>. 9. M. O. Klymenko i I. I. Zales'kyy, Zbalansuvannya vykorystannya vodnykh resursiv. Rivne: NUVHP, 2016. Data zvernennya: 11, Kviten' 2026. [Online]. Dostupnyy u: <https://ep3.nuwm.edu.ua/2732/>. 10. «Zahal'na otsinka vplyvu zminy klimatu v Ukrayini» Ukrayins'kyy klimatychnyy ofis», Ukrayins'kyy klimatychnyy ofis. Data zvernennya: 11, Kviten' 2026. [Onlayn]. Dostupnyy za posylannam: <https://ukrainian-climate-office.org/knowledge-hub/uzahalnena-otsinka-vplyvu-zminy-klim/>. 11. YU. Duliba, «Deyaki pytannya staloho upravlinnya vodnymi resursamy Ukrayiny v umovakh klimatychnykh ta ekolohichnykh zahroz», Aktual'ni problemy prava. Aktual'ni problemy pravoznavstva, vyp. 1, s. 193–201, Traven' 2025, <https://doi.org/10.35774/app2025.01.193>. 12. H. Matta, H. Pant, P. Kumar i R. Pal, «Podolannya defitsytu vody dlya hlobal'noyi zminy klimatu ta yiyi naslidkiv», Svitova vodna polityka, vyp. 12, vyp. 1, s. e70055, 2026, doi: 10.1002/wwp2.70055. [13] «Pro zatverdzhennya Poryadku vedennya derzhavnoho vodnoho kadastru», Ofitsiyyny veb-portal parlamentu Ukrayiny. Data zvernennya: 11, Kviten' 2026. [Onlayn]. Dostupnyy u: <https://zakon.rada.gov.ua/go/413-96-%D0%BF>. 14. A. yu. Yakymchuk, Klimov, S. V., i in., Informatsiyne zabezpechennya upravlinnya ekoloho-ekonomichnoyu bezpekoyu derzhavy: monohrafiya za mizhnar. uchastyu. Rivne; Varshava; Lyublin: Nats. un-t vod. hosp-va ta pryrodokorystuvannya, 2018. [Onlayn]. Dostupnyy u: <https://surl.li/orymch>. 15. V. S. Moshyns'kyy, «Metody

upravlinnya produktyvnisty ta ekolohichnoyu stiykisty osushuvanykh zemel'». Data zvernennya: 11, Kviten' 2026. [Onlayn]. Dostupnyy u: <https://ep3.nuwm.edu.ua/4333/> 16. NUVHP, V. A. Stashuk, V. S. Moshyns'kyy, A. M. Rokochyns'kyy, i P. p. Volk, «Pidvyshchennya resursnoho potentsialu Ukrayins'koho Polissya: monohrafiya». Data zvernennya: 11, Kviten' 2026. [Onlayn]. Dostupnyy u: <https://ep3.nuwm.edu.ua/30397/> 17. S. T. Voznyuk ta in., «Torfovo-zemel'nyy resurs Pivnichno-Zakhidnoho rehionu Ukrayiny». Data zvernennya: 11, Kviten' 2026. [Onlayn]. Dostupnyy u: <https://ep3.nuwm.edu.ua/7506/> 18. M. O. Klymenko i I. I. Zales'kyy, Zbalansuvannya vykorystannya vodnykh resursiv. Rivne: NUVHP, 2016. Data zvernennya: 11, Kviten' 2026. [Online]. Dostupnyy u: <https://ep3.nuwm.edu.ua/2732/> 19. V. I. Vyshnevs'kyy i A. V. Kutsiy, Bahatorichni zminy vodnoho rezhymu richok Ukrayiny. Kyiv: Nakova dumka, 2022. [Onlayn]. Dostupnyy u: <https://surl.li/vznwpm> 20. I. V. Sanina i N. H. Lyuta, «Identyfikatsiya transkordonnykh masyviv pidzemnykh vod (Ukrayina – Bilorus', baseyn Dnipra)», Mineral'ni resursy Ukrayiny, vyp. 1, s. 32–38, Kvit 2021, <https://doi.org/10.31996/mru.2021.1.32-38>. 21. H. H. Lyutyty, N. H. Lyuta, i I. V. Sanina, «Otsinka zminy yakosti pidzemnykh vod vodonosnykh horyzontiv Dniprovs'ko-Donets'koho artezians'koho baseynu», Mineral'ni resursy Ukrayiny, vyp. 3, s. 20–23, Lys 2021, <https://doi.org/10.31996/mru.2021.3.20-23>. 22. V. M. Shestopalov i N. H. Lyuta, «Shchodo optymал'noho spivvidnoshennya poverkhnevyykh i pidzemnykh vod u vodopostachanni naselennya v Ukrayini», Mineral'ni Resursy Ukrayiny, vyp. 1, s. 41–49, Ber 2024, <https://doi.org/10.31996/mru.2024.1.41-49>. 23. Khil'chevs'kyy V.K. Vodna polityka ta upravlinnya vodnymy resursamy v krayinakh svitu: navch. posibnyk. Kyiv: DIA, 2026. 344 s. /// Khil'chevs'kyy V.K. Vodna polityka ta upravlinnya vodnymy resursamy v krayinakh svitu: navch. Kyiv: ASV, 2026. 344 s. 2026. 24. Khil'chevs'kyy V., Khil'chevs'kyy V.K. Upravlinnya transkordonnymy vodnymy resursamy: navch. posibnyk – K.: DIA, 2024. – 208 s. /// Upravlinnya transkordonnymy vodnymy resursamy. 2024. 25. Khil'chevs'kyy V. i Hrebin' V. V., Khil'chevs'kyy V.K., Hrebin' V.V. Hidrolohiya ta hidrokhiymiya: navch. posibnyk. – K.: DIA, 2025. 352 s. /// Khil'chevs'kyy V.K., Hrebin' V.V. Hidrolohiya ta hidrokhiymiya. Kyiv: ASV, 2025. 352 s. 2025. 26. Khil'chevs'kyy V., Khil'chevs'kyy V.K. Hidrohrafiya ta vodni resursy Yevropy: navch. posibnyk. – K.: DIA, 2023. – 308 s. /// Khil'chevs'kyy V.K. Hidrohrafiya ta vodni resursy Yevropy: navch. – Kyiv : ASV, 2023. – 308 s. 2023. 27. «Delft-FEWS | Del'tares». Data zvernennya: 11, Kviten' 2026. [Onlayn]. Dostupnyy u: <https://www.deltares.nl/en/software-and-data/products/delft-fews-platform> 28. «Kataloh heoprosorovykh danykh EEA». Data zvernennya: 11, Kviten' 2026. [Onlayn]. Dostupnyy u: <https://surl.li/jdtfbi> 29. «Yevropeys'ka observatoriya posukh | Kopernyka». Data zvernennya: 11, Kviten' 2026. [Onlayn]. Dostupnyy u: [124](https://www.copernicus.eu/en/european-drought-</p></div><div data-bbox=)



observatory 30. P. Ghorbani Bam et al., «Digital Twin Applications in the Water Sector: A Review», *Water*, vyp. 17, vyp. 20, s. 2957, Sich 2025, <https://doi.org/10.3390/w17202957>. 31. A. Shrivastava, V. Shridkhar, i N. Kumari, «Zastosuvannya riznykh metodiv i metodiv hidrolohichnoho modelyuvannya v upravlinni richkovym baseynom», *Voda*, vyp. 17, vyp. 1, s. 83, Sichen' 2025, <https://doi.org/10.3390/w17010083>. 32. Z. Syuy, K. Ito, H. Shul'ts ta Dzh. YU. Li, «Intehrovane hidrolohichne modelyuvannya ta HIS v upravlinni vodnymiy resursamy», *J. Comput. Civ. Eng. - J COMPUT Civ. ENG*, vypusk 15, Lypen' 2001, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(2001\)15:3\(217\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(2001)15:3(217)). 33. K. A. Inan, A. Mauyi, YU. Lukas ta Dzh. Dyuple, «Bahatostantsiyne hidrolohichne modelyuvannya dlya otsinky popovnennya pidzemnykh vod velykoho napivposushlyvoho baseynu z urakhuvannyam problemy nestachi danykh: tematychne doslidzhennya baseynu Seybuz, Alzhyr», *Water*, vypusk. 16, vyp. 1, s. 160, Sich 2024, <https://doi.org/10.3390/w16010160>. 34. «Kataloh heoprostorovykh danykh EEA», <https://sdi.eea.europa.eu>. Data zvernennya: 11, Kviten' 2026. [Onlayn]. Dostupnyy u: <https://surl.li/gjcgxh>. 35. «Plan upravlinnya richkovym baseynom Dnipra (2025–2030). Subbaseyn Pryp'yaty. Analiz stanu poverkhnevyykh ta pidzemnykh vod», Derzh. ahent-stvo vodnykh resursiv Ukrayiny, Kyiv, 2024. [Onlayn]. Dostupnyy u: https://buvrzt.gov.ua/doc/prezentacii/12.03.24_2.pdf. 36. S. yu. Martynov, S. V. Klimov, «Osoblyvosti nebezpeky ta nebezpechnykh podiy pry formuvanni Planu zabezpechennya bezpechnosti vody systemy vodopostachannya.», v zb. mater., L'viv, Zhov 2025, s. 63–64. <https://doi.org/10.51500/7826-59-9>. 37. SafeCREW, «Proekt YES SafeCREW. Stiyke do klimatu upravlinnya dlya bezpechnykh dezinfikovanykh i nedezinfikovanykh system vodopostachannya.», Yevropeys'ka komisiya / Horizon Europe, Horizon Europe Project ID 101081714, 2022. [Onlayn]. Dostupnyy u: <https://www.tuhh.de/tuhh/forschung-und-transfer/neues-aus-der-forschung/eu-project-safecrew>. 38. S. Martynov, S. Klimov, i A. Kucherova, «VYAVLENNYA TA OTSINKA NEBEZPEK V SYSTEMI VODOPOSTACHANNYA», *Problemy vodopostachannya Vodovidvedennya Ta Hidravliki*, vyp. 52, s. 74–80, Hrud 2025, <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2025.52.74-80>. 39. K. K. Abbaspur, E. Rukholakhnezhad, S. Vahefi, R. Srinivasan, KH. Yan i B. Klove, «Model' hidrolohiyi ta yakosti vody kontynental'noho masshtabu dlya Yevropy: kalibruvannya ta nevyznachenist' vysokorozdil'noyi velykomasshtabnoyi modeli SWAT», *J. Hydrol.*, vypusk 524, s. 733–752, traven' 2015, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>. 40. V. Tsao, V. Bouden, T. Deyvi i A. Fenemor, «Bahatovymirne ta bahatotochkove kalibruvannya ta validatsiya SWAT u velykomu hirs'komu vodozbori z vysokoyu prostorovoyu minlyvistyuu», *Hydrol. Process.*, vypusk 20, s. 1057–1073, Ber 2006,

<https://doi.org/10.1002/hyp.5933>. 41. V. Ben Khelifa i M. Mosbakhi, «Modelyuvannya protsesu opadiv i stoku za dopomohoyu modeli HEC-HMS dlya mis'koho nehaumirovanoho vododilu v Tunisi», Model'. Zemna systema Environ., Traven' 2021, <https://doi.org/10.1007/s40808-021-01177-6>. 42. «HEC-HMS». Data zvernennya: 26, Serpen' 2021. [Onlayn]. Dostupnyy u: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/> 43. «Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System (HEC-HMS)». Data zvernennya: 26, Serpen' 2021. [Onlayn]. Dostupnyy u: http://www.appsolutelydigital.com/ModelPrimer/chapter5_section2.html 44. D. M. Ferreira, C. V. S. Fernandes, i J. Gomes, «Veryfikatsiya rozv'yazku rivnyan' Sen-Venana na osnovi lax diffusive method for flow routing in natural channels», RBRH, vyp. 22, 2017, <https://doi.org/10.1590/2318-0331.011716104>. 45. «SciELO Brasil - Curvas de permanência de qualidade da água como subsídio para o enquadramento de corpos d'água a partir de modelagem matematica em regime não permanente Curvas de permanência de qualidade da água como subsídio para o enquadramento de corpos d'água a partir de modelagem matemática em regime não permanente». Data zvernennya: 22, Kviten' 2026. [Onlayn]. Dostupnyy u: <https://www.scielo.br/j/rbrh/a/kx9cNDysTxqmWVMkjWxYcXb/?format=html&lang=pt> 46. G. W. Brunner, «HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual. Version 5.0», Hydrologic Engineering Center (HEC), U.S. Army Corps of Engineers, Davis, CA, lyuty 2016. Data zvernennya: 22 lyutoho 2026. [Onlayn]. Dostupnyy u: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Reference%20Manual.pdf> 47. V. Feiziasl, J. Jafarzadeh, B. Sadeghzadeh, i M. A. Mousavi Shalmani, «Indeks defitsytu vody dlya otsinky stanu vodnoho stresu ta posukhy tolerantnist' henotypiv boharnoho yachmenyu v kholodniy napivposushlyviy zoni Iranu», Agric. Vodne hospodarstvo, vyp. 262, s. 107395, ber. 2022, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107395>. 48. P. Kolaytstsi, S. Evett, S. O'Shonessi ta T. Khauell, «Vykorystannya temperatury polohu roslyn dlya pokrashchennya upravlinnya zroshuvanymy sil'skohospodars'kymy kul'turamy», Materialy 24-yi shchorichnoyi konferentsiyi z iryhatsiyi rivnyan, Kolbi, lyuty 2012. <https://surl.li/tydwwb> 49. H. Masiello ta in., «Indeks defitsytu vody IASI dlya monitorynhu stresu roslynnosti ta rann'oho vysykhannya pid chas litnikh spekotnykh khvyl': zastosuvannya do pivdennoyi Italiyi», Zemlya, vyp. 11, vyp. 8, s. 1366, ver. 2022, <https://doi.org/10.3390/land11081366>. 50. S. Sharhi ta A. Zeynolabedin, «Intehratsiya modeley mashynnoho navchannya ta dystantsiynoho zonduvannya dlya otsinky indeksu defitsytu vody», Sil'skohospodars'ke upravlinnya vodnymy resursamy, vypusk 319, s. 109827, zhovten' 2025, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109827>. 51. «Uhoda pro asotsiatsiyu mizh Ukrainoyu, z odniyei storony, ta Yevropeys'kym Soyuzom,



Yevropeys'kym spivtovaryystvom z atomnoyi enerhiyi ta yikhnimy derzhavamy-chlenamy, z inshoyi storony», Ofitsiynnyy veb-portal parlamentu Ukrayiny. Data zvernennya: 11, Kviten' 2026. [Onlayn]. Dostupnyy u: https://zakon.rada.gov.ua/go/984_011 52. «Water Information System for Europe / European Environment Agency», ROD, baza danykh zobov'yazan' YEAOS shchodo zvitnosti. Data zvernennya: 11, Kviten' 2026. [Onlayn]. Dostupnyy u: <https://rod.eionet.europa.eu/contacts?roleId=extranet-wise> 53. «WISE SoE». Data zvernennya: 11, Kviten' 2026. [Onlayn]. Dostupnyy u: https://cdr.eionet.europa.eu/help/WISE_SoE. Data zvernennya: 11, Kviten' 2026. [Onlayn]. Dostupnyy u: https://cdr.eionet.europa.eu/help/WISE_SoE 54. «Yevropeys'ki vody -- Otsinka stanu ta tysku 2018». Data zvernennya: 11, Kviten' 2026. [Onlayn]. Dostupnyy u: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/state-of-water> 55. «WISE WFD Reference Spatial Datasets reported under Water Framework Directive 2016». Data zvernennya: 11, Kviten' 2026. [Onlayn]. Dostupnyy za posylannyam: <https://www.eea.europa.eu/en/datahub/datahubitem-view/ff3e1971-494d-4fa5-a57c-660e0f35d451> 56. F. Khannerts ta S. Lanhaas, «Stvorennya vodnoyi informatsiynoyi systemy dlya Yevropy: obmezheniya, pov'yazani z prostorovoyu neodnorodnistyu danykh», Water Environ. J., vyp. 21, vyp. 3, s. 200–207, 2007, <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2007.00073.x> 57. Klimov, S., Starovoyt, T. Dovhostrokovyy monitorynh yakosti poverkhnevyykh vod ta potentsialu pidzemnykh vod z vykorystannyam obchyslyval'noho intelektu, HIS-tekhnologiy ta dystantsiynoho zonduvannya. Systemni doslidzhennya ta informatsiyni tekhnologiyi. 2026. № 1. S. 124–143. <https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2026.1.09>. Data zvernennya: 22, Kviten' 2026. [Onlayn]. Dostupnyy u: <https://journal.iasa.kpi.ua/article/view/358082> 58. S. Achleitner, M. Möderl, i W. Rauch, «CITY DRAIN © - Pidkhid z vidkrytym kodom dlya modelyuvannya intehrovanykh mis'kykh drenazhnykh system», Environ. Model'. Prohramne zabezpechennya, vyp. 22, vyp. 8, s. 1184–1195, 2007, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.06.013>.

Klimov S. V. [1; ORCID ID: 0009-0000-2802-8863],

PhD, Associate Professor

Martynov S. Y. [1; ORCID ID: 0000-0002-5993-847X],

DoS, Professor

Khlapuk M. M. [1; ORCID ID: 0000-0001-6790-8900],

DoS, Professor

Kunitskyi S. O. [1; ORCID ID: 0000-0003-0318-6149],

PhD, Associate Professor

¹National University of Water and Environmental Engineering, Rivne

BRIDGING DATA AND MODELS IN WATER DEFICIT ASSESSMENT: INTEGRATING STATE WATER CADASTRE INTO DIGITAL TWIN-BASED MODELLING

This study addresses the critical transition from the conventional, descriptive monitoring of water resources to a predictive, model-based management approach in the context of climate instability, increasing anthropogenic pressure and the impacts of war. The research is motivated by the increasing frequency and severity of hydrological extremes in Europe and Ukraine, where water deficits are becoming structural rather than episodic. In this context, the development of reliable forecasting tools is not constrained by a lack of data, but by the absence of systematic integration into hydrological and hydraulic modelling frameworks.

This paper demonstrates that effectively assessing water deficits requires integrating verified, spatially consistent and semantically harmonised datasets into physically based models. The State Water Cadastre of Ukraine is identified as a foundational data source containing long-term observations of water quantity, quality, and use. However, its application is currently limited by methodological inconsistencies, spatial fragmentation and incompatibility with European data infrastructures, particularly the Water Information System for Europe (WISE).

To address these issues, the paper proposes a structured approach to organising cadastre data based on three functional blocks: hydrometric (time series of discharge and groundwater levels); morphological and engineering (river geometry, hydraulic structures, and drainage systems); and operational (actual water use based on reporting datasets). This data architecture enables the formation of a coherent input layer for digital twin development.

We have developed a conceptual framework for a river basin digital twin, integrating hydrological modelling (HEC-HMS) and hydraulic simulation (HEC-RAS) into a unified computational workflow, in particular utilizing multi-station calibration to ensure spatial consistency across sub-basins. The model enables scenario-based simulations of the water balance under different climatic

conditions (including RCP-based scenarios) and provides a quantitative assessment of water deficits using a dimensionless index that reflects the ratio of water demand to available resources.

The Polissya region is used as a representative case study. Analysis reveals a clear trend towards aridification, significant pressure from human activities on both surface and groundwater resources, and deterioration in water quality due to organic and nutrient pollution. The results confirm that, under low-flow conditions, aquatic ecosystems become much less resilient, which increases the risk of ecological degradation, particularly in wetlands.

Special attention is given to the issue of data interoperability. The study demonstrates that harmonising the State Water Cadastre in accordance with WISE and INSPIRE requirements is necessary to ensure data comparability, improve model reliability and enable transboundary water management. Without such harmonisation, the integration of Ukrainian datasets into European assessment frameworks remains technically constrained.

The proposed approach provides a methodological basis for bridging the gap between data availability and modelling capability. This approach can be applied to the development of advanced decision support systems for water resources management, facilitating risk-informed planning, optimising the allocation of water resources and enhancing resilience to climate-driven hydrological variability.

The research is being conducted as part of the project **Climate-Resilient Management for Safe Disinfected and Non-disinfected Water Supply Systems - 101081980 - SafeCREW - Horizon-cl6-2022-zero-pollution-01**.

Keywords: Water Deficit, State Water Cadastre, Digital Twin, Hydrological Modelling, HEC-HMS, HEC-RAS, WISE, Water Framework Directive, INSPIRE, Polissya, Water Resources Management.

Отримано: 29 січня 2026 року
Прорецензовано: 1 березня 2026 року
Прийнято до друку: 27 березня 2026 року



© 2026 [Klimov S. V., Martynov S. Y., Khlapuk M. M., Kunitskyi S. O.]. Licensee [NUWEE]. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC) license ([creativecommons.org](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)).