

УДК 911.375:556.18:711.4

DOI <https://doi.org/10.32782/2786-5681-2025-2.03>

Святослав КУРИЛО

кандидат географічних наук, доцент, доцент кафедри наук про Землю,

Державний університет «Житомирська політехніка»

ke_tiyu@zti.edu.ua

ORCID: 0009-0008-6138-8850

Ілля ЦИГАНЕНКО-ДЗЮБЕНКО

доктор філософії (екологія), в.о. завідувача кафедри наук про Землю,

Державний університет «Житомирська політехніка»

ke_tiyu@zti.edu.ua

ORCID: 0000-0002-3240-8719

Ганна КІРЕЙЦЕВА

доктор економічних наук, доктор технічних наук, доцент,

професор кафедри екології та природоохоронних технологій,

Державний університет «Житомирська політехніка»

gef_kgv@zti.edu.ua

ORCID: 0000-0002-1055-1784

ГІДРОЛОГІЧНЕ ПЛАНУВАННЯ УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ: ІНТЕГРАЦІЯ ВОДНИХ СИСТЕМ ТА МІСЬКИХ ЛАНДШАФТІВ

Анотація. Метою статті є розроблення концептуальних засад ландшафтно-гідрологічного планування міських територій на основі комплексного аналізу взаємодії природних і антропогенних компонентів урбанізованих геосистем. **Методологія** дослідження базується на системному аналізі та систематизації наукових публікацій із проблем ландшафтно-гідрологічного планування урбанізованих територій, опублікованих у період 2001–2024 років у провідних міжнародних журналах. Використано методи системного аналізу для розроблення концептуальних моделей, геосистемний підхід для структурування ландшафтно-гідрологічних зв'язків, методи просторового аналізу та ГІС-моделювання для обґрунтування планувальних рішень. Теоретичною основою є концепції ландшафтно-екології К. Тролля, гідрологічні теорії формування стоку Р. Хортон, концепції урбанізованих систем Дж. Форрестера та підходи до просторового планування П. Геддеса. **Наукова новизна** роботи полягає в тому, що вперше розроблено концептуальну модель ландшафтно-гідрологічних зв'язків в урбанізованих водозборах, яка демонструє ієрархічну організацію зі специфічними вертикальними та горизонтальними потоками речовини й енергії, модифікованими антропогенними чинниками. Уперше запропоновано інтегровану систему ландшафтно-гідрологічного планування, що поєднує ландшафтно-гідрологічний аналіз, сценарне планування та систему індикаторів з використанням ГІС-технологій і методів багатокритеріального аналізу. **Висновки.** Урбанізація призводить до кардинальної трансформації природних ландшафтно-гідрологічних систем через збільшення площ непроникних поверхонь, зміну структури водообігу та деградацію природної гідрографічної мережі. Просторово-часова трансформація відбувається поетапно від природного стану до формування зрілої урбанізованої системи з техногенною дренажною інфраструктурою. Інтегрована система забезпечує комплексний підхід до управління водними ресурсами через поєднання аналітичних, планувальних і моніторингових компонентів.

Ключові слова: ландшафтно-гідрологічне планування, урбанізовані території, водні системи, міські ландшафти, гідрографічна мережа, ГІС-моделювання, сталий розвиток, водозбори.

Sviatoslav KURYLO

Candidate of Geographic Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Earth Sciences,
Zhytomyr Polytechnic State University
ke_miyu@ztu.edu.ua
ORCID: 0009-0008-6138-8850

Illia TSYHANENKO-DZIUBENKO

Ph. D. (Ecology), Head of the Department of Earth Sciences,
Zhytomyr Polytechnic State University
ke_miyu@ztu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-3240-8719

Hanna KIREITSEVA

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
Professor at the Department of Ecology and Environmental Technologies,
Zhytomyr Polytechnic State University
gef_kgv@ztu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-1055-1784

HYDROLOGICAL PLANNING OF URBANIZED TERRITORIES: INTEGRATION OF WATER SYSTEMS AND URBAN LANDSCAPES

Abstract. The aim of the article is to develop conceptual foundations for landscape-hydrological planning of urban areas based on comprehensive analysis of the interaction between natural and anthropogenic components of urbanized geosystems. The research **methodology** is based on systematic analysis and systematization of scientific publications on landscape-hydrological planning of urbanized territories published in the period 2001–2024 in leading international journals. Methods of system analysis for developing conceptual models, geosystem approach for structuring landscape-hydrological connections, spatial analysis methods and GIS modeling for justifying planning decisions were used. The theoretical foundation includes concepts of landscape ecology by C. Troll, hydrological theories of runoff formation by R. Horton, concepts of urbanized systems by J. Forrester, and approaches to spatial planning by P. Geddes. **The scientific novelty** of the work lies in the fact that for the first time a conceptual model of landscape-hydrological connections in urbanized watersheds has been developed, which demonstrates hierarchical organization with specific vertical and horizontal flows of matter and energy modified by anthropogenic factors. For the first time, an integrated system of landscape-hydrological planning has been proposed that combines landscape-hydrological analysis, scenario planning, and an indicator system using GIS technologies and multi-criteria analysis methods. **Conclusions.** Urbanization leads to cardinal transformation of natural landscape-hydrological systems through increasing areas of impermeable surfaces, changes in water exchange structure, and degradation of natural hydrographic networks. Spatial-temporal transformation occurs gradually from natural state to formation of mature urbanized system with technogenic drainage infrastructure. The integrated system provides a comprehensive approach to water resource management through combination of analytical, planning, and monitoring components.

Key words: landscape-hydrological planning, urbanized territories, water systems, urban landscapes, hydrographic network, GIS modeling, sustainable development, watersheds.

Постановка проблеми. Інтенсивна урбанізація світових мегаполісів призводить до кардинальної трансформації природних ландшафтно-гідрологічних систем, що актуалізує потребу розроблення комплексних підходів до планування міських територій з урахуванням гідрологічних процесів. Дослідження М. Пола й У. Маєра демонструють, що найбільш послідовним і поширеним впливом урбанізації є збільшення площ непроникних поверхонь у межах міських водозборів, що

змінює гідрологію та геоморфологію потоків [10, с. 333]. Урбанізовані ландшафти впливають на інфільтрацію та евапотранспірацію, ускладнюють нашу здатність кількісно оцінювати їхню динаміку в межах гетерогенного ландшафту на контрастних масштабах [7, с. 2295]. Сучасні дослідження засвідчують, що гідрологічні наслідки урбанізації не є однаковими через велику просторову мінливість клімату та змін у землекористуванні. С. Лі та співавтори встановили, що урбанізація сут-

тево впливає на функції екосистем та послуги, фундаментально змінює баланс між опадами, водовіддачею та евапотранспірацією у водозборах [5, с. 1]. Точне кількісне оцінювання майбутніх гідрологічних впливів важливе для національного міського планування та ухвалення рішень щодо управління водозборами [5, с. 2]. Розвиток ефективних стратегій просторового планування потребує глибокого розуміння складних взаємодій між ландшафтними характеристиками, гідрологічними процесами й урбаністичними трансформаціями на різних просторово-часових масштабах.

Аналіз джерел та останніх досліджень. Дослідження гідрологічних впливів урбанізації показують значну варіативність наслідків залежно від регіональних особливостей. М. О'Дрісколл і співавтори зазначають, що Південні Сполучені Штати характеризуються вологим субтропічним кліматом і нині переживають найбільше чисте зростання населення у США, де розширення великих міських центрів і непроникних площ у регіоні змінило гідрологічний цикл [9, с. 605]. С. Прадхананг і співавтори на прикладі водозбору Little Eagle Creek показали, що зміни як у стоці, так і в базовому стоці в міських водозборах привернули значну увагу в останні десятиліття через їхню різку мінливість, водночас урбанізація суттєво впливає на спостережувану урбанізацію базового стоку [11, с. 1]. С. Мак-Грейн підкреслює, що розширення глобальних міських територій призвело до помітних змін природних процесів, якості довкілля та споживання природних ресурсів [7, с. 2296].

Сучасні підходи до управління міськими водними ресурсами все більше зосереджуються на інтеграції природних та інженерних систем водообігу. Л. Гарсія-Куерва та співавтори демонструють, що зелена інфраструктура все частіше просувається як у дослідженнях, так і в політиці як спосіб для міст досягнути множинних переваг і стати більш стійкими та резильєнтними [2, с. 1], зокрема для пом'якшення міської гідрологічної модифікації, зменшення пікових швидкостей стоку, збільшення поповнення підземних вод та пом'якшення ефекту міського теплового острова. Р. Мохаммадпур і співавтори підкреслюють, що міський поверхневий стік створює значні виклики в умовах урбанізації та

зміни клімату, підкреслюють важливість дерев у забезпеченні екосистемних послуг зменшення стоку [8, с. 973].

Ландшафтне планування міських територій потребує врахування екосистемних послуг і просторових характеристик урбанізованих систем. Х. Ванг і співавтори зазначають, що швидка урбанізація змінює ландшафтні моделі та призводить до частих проблем міського заболочування, які впливають на повсякденне життя громадян та спричиняють економічні збитки [19, с. 1]. П. Маркес і співавтори підкреслюють, що міські потокові коридори є життєво важливими екологічними зонами, що забезпечують ландшафтну естетику, екосистемні послуги, управління дощовими водами та рекреаційні можливості [6, с. 1]. Ці дослідження демонструють необхідність комплексного підходу до ландшафтно-гідрологічного планування, який інтегрує природні процеси з урбаністичними потребами для забезпечення сталого розвитку міських територій.

Метою дослідження є розроблення концептуальних засад ландшафтно-гідрологічного планування міських територій на основі комплексного аналізу взаємодії природних і антропогенних компонентів урбанізованих геосистем. Основними завданнями дослідження є: систематизація теоретичних підходів до вивчення ландшафтно-гідрологічних процесів в урбанізованих водозборах; розроблення концептуальної моделі ландшафтно-гідрологічних зв'язків у міських системах; аналіз просторово-часової трансформації гідрографічної мережі під впливом урбанізації; обґрунтування інтегрованої системи ландшафтно-гідрологічного планування з використанням ГІС-технологій і методів багатокритеріального аналізу.

Виклад основного матеріалу. Дослідження базується на аналізі та систематизації наукових публікацій із проблем ландшафтно-гідрологічного планування урбанізованих територій, опублікованих у період 2001–2024 рр. у провідних міжнародних журналах. Використано методи системного аналізу для розроблення концептуальних моделей, геосистемний підхід для структурування ландшафтно-гідрологічних зв'язків, методи просторового аналізу та ГІС-моделювання для обґрунтування планувальних рішень.

Теоретичною основою дослідження є концепції ландшафтної екології К. Тролля, гідрологічні теорії формування стоку Р. Хортон, концепції урбанізованих систем Дж. Форрестера та підходи до просторового планування П. Геддеса. Методологічний апарат включає системний підхід, багатокритеріальний аналіз, методи математичного моделювання водного балансу й експертні системи підтримки ухвалення рішень.

Проведене дослідження системи ландшафтно-гідрологічного планування міських територій базується на комплексному підході до вивчення взаємодії природних і антропогенних компонентів урбанізованих геосистем. Основою методологічного підходу є концептуальна модель ландшафтно-гідрологічних зв'язків, яка відображає ієрархічну організацію просторових одиниць та процесів водообміну в межах урбанізованих водозборів. Дослідження спирається на теоретичні засади ландшафтної екології К. Тролля та гідрологічні концепції формування стоку Р. Хортон, адаптовані до специфіки урбанізованих територій. Методологічною основою виступає системний підхід, що дозволяє розглядати урбанізований ландшафт як складну відкриту систему з характерними входами (атмосферні

опади, підземні води), виходами (поверхневий стік, евапотранспірація) та внутрішніми перетвореннями (інфільтрація, акумуляція, трансформація якості води). Теоретичний фундамент дослідження формують концепції Дж. Форрестера щодо урбанізованих систем та праці П. Берджеса стосовно концентричних зон міського розвитку, що дозволяє структурувати просторову організацію гідрологічних процесів відповідно до градієнта урбанізації.

Запропонована концептуальна модель демонструє системну організацію ландшафтно-гідрологічних процесів через призму геосистемного підходу, де центральним елементом виступає урбанізований водозбір як складна просторово-функціональна система. Модель базується на принципах ієрархічності та каскадності, відображає взаємодію геосистем різного рангу – від регіональних ландшафтних комплексів до локальних урочищ та фацій. Ієрархічна структура включає п'ять рівнів організації: макрорегіональний (басейни великих річок), мезорегіональний (суббасейни), локальний (елементарні водозбори), топологічний (урочища) і елементарний (фації). Кожен рівень характеризується специфічними просторовими масштабами, часовими параметрами функціонування та характером



Рис. 1. Концептуальна модель ландшафтно-гідрологічних зв'язків в урбанізованих водозборах
Джерело: розроблено автором

гідрологічних процесів. Вертикальні потоки включають інфільтрацію атмосферних опадів, капілярний підйом ґрунтових вод, евапотранспірацію з різних типів поверхонь, що формують вертикальну структуру водообміну у профілі урбанізованого ландшафту. Горизонтальні міграційні процеси охоплюють поверхневий стік по схилах різної експозиції та крутизни, внутрішньогрунтовий латеральний стік у зоні аерації, підземний стік у водоносних горизонтах, що забезпечує латеральну інтеграцію водозбірної території.

Антропогенні модифікатори кардинально змінюють природну структуру водообміну через створення імпервіозних поверхонь (покрівлі, дороги, тротуари), лінійних інфраструктурних об'єктів (дорожня мережа, комунікації), точкових джерел забруднення (промислові підприємства, очисні споруди), що призводить до формування техногенних аномалій у полях стоку речовини й енергії. Морфометричні характеристики рельєфу (абсолютні та відносні висоти, кути нахилу схилів, експозиція, вертикальна й горизонтальна розчленованість) визначають інтенсивність гравітаційного перерозподілу води та наносів, тоді як літологічна будова підстилаючих порід (гранулометричний склад, пористість, проникність, мінералогічний склад) контролює швидкість інфільтрації та внутрішньогрунтового стоку. Каскадний принцип передачі гідрологічного впливу реалізується через систему вододіл – схил – тальвег – водотік, де кожна ланка виконує специфічні функції: вододільні ділянки – акумуляція опадів та формування початкового стоку, схиліві системи – трансформація стоку та транспорт наносів, тальвеги – концентрація поверхневого стоку, водотоки – транзит води та седиментів до базису ерозії.

Просторова дискретизація території здійснюється на основі регулярної або нерегулярної сітки розрахункових комірок, кожна з яких характеризується індивідуальним набором ландшафтно-гідрологічних параметрів. Розмір комірок варіює від 1×1 м для детального моделювання локальних ділянок до 100×100 м для регіонального аналізу, забезпечує оптимальне співвідношення між точністю розрахунків і обчислювальними ресурсами. Алгоритм розрахунку водообміну між суміжними

елементами базується на чисельних методах розв'язання системи диференціальних рівнянь, включає явні та неявні схеми інтегрування залежно від характеру процесів і вимог до стійкості обчислень.

Часова динаміка урбанізованих систем характеризується поетапною трансформацією природної гідрографічної мережі під впливом зростання антропогенного навантаження. Теоретичною основою аналізу часових змін є концепція урбанізаційного циклу Дж. Аллена та модель екологічної сукцесії Ф. Клементса, адаптовані до гідрологічних систем. Аналіз просторово-часових змін гідрологічної структури території дозволяє виявити закономірності деградації природних водних систем і формування техногенних дренажних комплексів. Процеси трансформації відбуваються на різних часових масштабах: від кількох років для локальних порушень до декількох десятиліть для кардинальної перебудови регіональної гідрографічної мережі.

Еволюційна модель трансформації гідрографічної мережі демонструє послідовні стадії деградації природних водних систем від початкового природного стану (далі – T1) через активну урбанізацію (далі – T2) до формування зрілої урбанізованої системи (далі – T3). На початковому етапі природна гідрографічна мережа характеризується оптимальною щільністю $0,8\text{--}1,2$ км/км², природним меандруванням з коефіцієнтом звивистості $1,3\text{--}1,8$, збалансованим гідрологічним режимом з коефіцієнтом варіації річного стоку $0,25\text{--}0,35$ та природною морфологією русел зі співвідношенням ширини до глибини $8\text{--}12$. Басейнова організація стоку відповідає принципам Хортон з коефіцієнтом біфуркації $3,5\text{--}4,5$ та характерними показниками дренажності території.

Активна урбанізація (T2) супроводжується інтенсивною трансформацією водотоків, що включає колматацію русел унаслідок надходження зважених речовин з будівельних майданчиків (збільшення мутності в $5\text{--}10$ разів), порушення природної морфології через спрямлення русел (зменшення коефіцієнта звивистості до $1,1\text{--}1,3$), зміну гідравлічних характеристик течії через зменшення шорсткості днища та берегів (збільшення швидкостей течії в $1,5\text{--}2,0$ рази). Гідрологічний режим



Рис. 2. Просторово-часова трансформація гідрографічної мережі під впливом урбанізації

Джерело: розроблено автором

характеризується зростанням нерівномірності стоку (коефіцієнт варіації збільшується до 0,5–0,7), скороченням тривалості добігання стоку (зменшення у 2–3 рази), підвищенням максимальних витрат (збільшення у 2–5 разів) та зменшенням мінімального стоку (зменшення на 30–50%).

Деградація природної гідрографічної мережі на стадії T3 включає процеси зарегулювання стоку через створення ставків-накопичувачів, каналізування водотоків у підземні колектори (до 60–80% довжини первинної мережі), створення штучних водоймищ-накопичувачів дощового стоку об'ємом 50–200 м³/га урбанізованої території. Формування техногенної дренажної системи відбувається через створення розгалуженої мережі колекторів зі щільністю 8–15 км/км², дренажних каналів із пропускнуою здатністю 0,5–2,0 м³/с·км², накопичувачів стоку з регульовальним об'ємом 100–500 м³/км², очисних споруд потужністю 10–50 тис. м³/добу. Кількісне оцінювання трансформації здійснюється через систему показників: коефіцієнт стоку зростає з 0,15–0,25 до 0,6–0,8, модуль стоку збільшується із 3–8 л/с·км² до 15–40 л/с·км², параметри гідрологічної трансформації (час

добігання, максимальні витрати, об'єм стоку) демонструють ступінь відхилення від природних умов на 200–500%.

Інтегрована система ландшафтно-гідрологічного планування є результатом синтезу теоретичних основ просторового планування П. Геддеса та практичних підходів до управління водними ресурсами урбанізованих територій згідно з концепціями сталого розвитку Г. Брундтланд. Система базується на багаторівневому аналізі та багатокритеріальній оптимізації планувальних рішень з урахуванням складних взаємодій між природними й антропогенними компонентами міського середовища. Методологічною основою є інтеграція ГІС-технологій, методів дистанційного зондування Землі й експертних систем підтримки ухвалення рішень.

Структура інтегрованої системи планування включає три основні блоки: ландшафтно-гідрологічний аналіз, сценарне планування та систему індикаторів, які функціонують у тісній взаємодії через багаторівневу схему ухвалення рішень та зворотні зв'язки між етапами планування і моніторингом реалізації. Ландшафтно-гідрологічний аналіз охоплює морфометричний компонент (цифрові моделі рельєфу

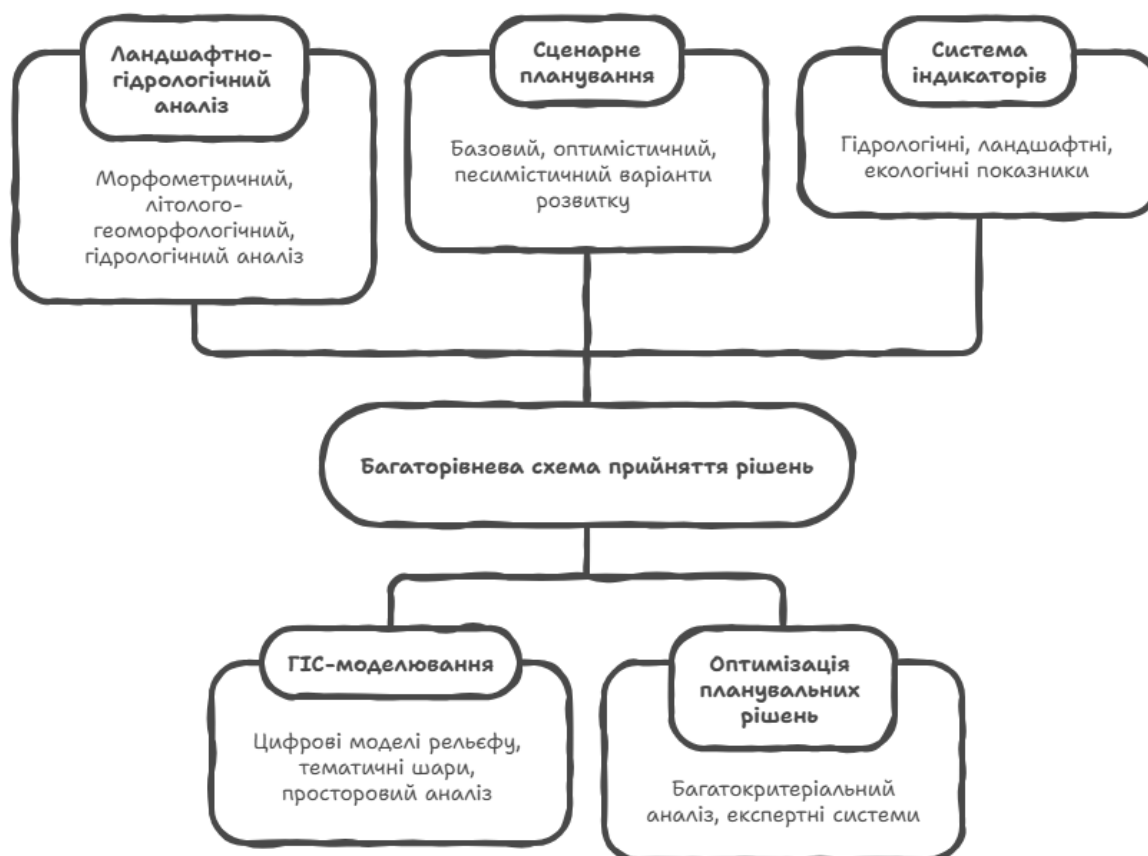


Рис. 3. Інтегрована система ландшафтно-гідрологічного планування міських територій

Джерело: розроблено автором

з роздільною здатністю 1–5 м, аналіз експозиції та крутизни схилів, розрахунок індексів топографічної вологості, літолого-геоморфологічний аналіз (картування четвертинних відкладів, визначення інженерно-геологічних властивостей порід, оцінювання стійкості схилів до ерозії) та власне гідрологічний компонент (розрахунок характеристик стоку різної забезпеченості, моделювання максимальних витрат, оцінювання якості поверхневих вод).

ГІС-моделювання реалізується через створення цифрових моделей рельєфу на основі топографічних карт масштабу 1:2 000–1:10 000 та даних лазерного сканування LIDAR з точністю визначення висот $\pm 0,15$ – $0,30$ м, систему тематичних шарів (геологія, ґрунти, рослинність, землекористування, інженерна інфраструктура) та спеціалізовані інструменти просторового аналізу (аналіз видимості, мережевий аналіз, інтерполяція, районування). Використання супутникових знімків високої роздільної здатності (Sentinel-2, Landsat-8, QuickBird) дозволяє здійснити кількісне оцінювання ландшафтно-

гідрологічних характеристик через розрахунок вегетаційних індексів (NDVI, SAVI, EVI), індексів водності (NDWI, MNDWI), показників урбанізації (NDBI, UI).

Сценарне планування включає розроблення базового сценарію (збереження існуючих тенденцій розвитку з темпами урбанізації 2–3% на рік), оптимістичного варіанту (упровадження технологій сталого розвитку, зелених дахів на 30–50% будівель, біоінженерних споруд для очищення стоку) та песимістичного сценарію (інтенсивна урбанізація без урахування екологічних обмежень, збільшення імпервіозності до 80–90%, деградація зелених зон) з урахуванням різних рівнів антропогенного навантаження та прогнозованих кліматичних змін (збільшення інтенсивності злив на 15–25%, зміна режиму опадів, підвищення температури на 1,5–2,0 °C).

Оптимізація планувальних рішень базується на багатокритеріальному аналізі з використанням методу аналізу ієрархій (АНР), нечіткої логіки для обробки експертних оцінок і генетичних алгоритмів для пошуку оптималь-

них рішень у багатовимірному просторі параметрів. Експертні системи включають базу знань із 200–300 правил ухвалення рішень, механізм логічного виводу на основі продукційних правил та інтерфейс користувача для інтерактивної роботи із системою.

Система індикаторів включає гідрологічні показники: модуль стоку (норма 3–8 л/с·км², тривожний рівень >15 л/с·км²), коефіцієнт варіації річного стоку (норма 0,2–0,4, критичний рівень >0,7), час добігання стоку (нормативний 2–6 годин, небезпечний <1 години), коефіцієнт стоку дощових паводків (природні умови 0,1–0,3, урбанізовані >0,6). Ландшафтні індекси охоплюють індекс ландшафтної стабільності за Ковдою (стабільні ландшафти >0,6, нестабільні <0,3), коефіцієнт антропогенної трансформації (слабо порушені <0,3, сильно порушені >0,7), індекс фрагментації ландшафту (низька фрагментація <2, висока >5), коефіцієнт екологічної стабільності території (екологічно стабільні >0,5, екологічно нестабільні <0,3). Екологічні критерії включають індекс біотичної цілісності ІВІ (відмінний стан >75, поганий <25), коефіцієнт природності за Реймерсом (природні екосистеми 0,8–1,0, техногенні <0,2), індекс якості води WQI (відмінна якість >90, погана <50), коефіцієнт біорізноманіття Шеннона (високе різноманіття >3, низьке <1).

Висновки. Проведений аналіз засвідчує, що урбанізація призводить до кардинальної трансформації природних ландшафтно-гідрологічних систем через збільшення площ непроникних поверхонь, зміну структури водообміну та деградацію природної гідрографічної мережі. Розроблена концептуальна модель ландшафтно-гідрологічних зв'язків демонструє ієрархічну організацію урбанізованих водозборів зі специфічними вертикальними і горизонтальними потоками речовини

й енергії, модифікованими антропогенними чинниками.

Просторово-часова трансформація гідрографічної мережі відбувається поетапно від природного стану через активну урбанізацію до формування зрілої урбанізованої системи з техногенною дренажною інфраструктурою. Кількісні показники трансформації включають зростання коефіцієнта стоку до 0,6–0,8, збільшення модуля стоку до 15–40 л/с·км² та відхилення гідрологічних параметрів від природних умов на 200–500%.

Інтегрована система ландшафтно-гідрологічного планування забезпечує комплексний підхід до управління водними ресурсами урбанізованих територій через поєднання ландшафтно-гідрологічного аналізу, сценарного планування та системи індикаторів. ГІС-моделювання з використанням цифрових моделей рельєфу та супутникових знімків дозволяє здійснити кількісне оцінювання ландшафтно-гідрологічних характеристик і оптимізацію планувальних рішень.

Результати дослідження мають практичне значення для розроблення стратегій сталого розвитку міських територій, планування зеленої інфраструктури й управління дощовим стоком в умовах зростання урбанізації та кліматичних змін. Запропонована система індикаторів може використовуватися для моніторингу екологічного стану урбанізованих водозборів і оцінювання ефективності природоохоронних заходів.

Перспективи подальших досліджень включають розроблення автоматизованих систем моніторингу гідрологічних процесів з використанням IoT-технологій і штучного інтелекту, створення цифрових двійників урбанізованих водозборів для прогнозування наслідків планувальних рішень, а також адаптацію запропонованої методології до специфічних умов (післявоєнної України).

ЛІТЕРАТУРА:

1. Alpatova O., Maksymenko I., Patseva I., Khomiak I., Gandziura V. Hydrochemical state of the post-military operations water ecosystems of the Moschun, Kyiv region. *16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. 2022. P. 1–5.
2. Garcia-Cuerva L., Norman L.M., Boykin K.G., Eastoe C., Gray F., Fan C. Integrating urban planning and water management through green infrastructure in the United States-Mexico border. *Frontiers in Water*. 2022. Vol. 4. DOI: 10.3389/frwa.2022.782922
3. Kapelista I., Kireitseva H., Tsyhanenko-Dziubenko I., Khomenko S., Vovk V. Review of innovative approaches for sustainable use of Ukraine's natural resources. *Grassroots Journal of Natural Resources*. 2024. Vol. 7. № 3. P. 378–395.

4. Kireitseva H., Tsyhanenko-Dziubenko I., Khomenko S., Palii O. Integral assessment of the effectiveness of water resource management in communities for sustainable development. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources*. 2025. Vol. 16. № 1. P. 27–38.
5. Li C., Sun G., Caldwell P.V., Cohen E., Fang Y., Zhang Y., Oudin L., Sanchez G.M., Meentemeyer R.K. Impacts of urbanization on watershed water balances across the conterminous United States. *Water Resources Research*. 2020. Vol. 56. № 6. DOI: 10.1029/2019wr026574
6. Marques P., Fernandes C., Oliveira S., Moura C., Cortes R. Ecological landscape assessment of restored urban stream to guide adaptive management. *Heliyon*. 2024. Vol. 10. № 14. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e33921
7. McGrane S.J. Impacts of urbanisation on hydrological and water quality dynamics, and urban water management : A review. *Hydrological Sciences Journal*. 2016. Vol. 61. № 13. P. 2295–2311. DOI: 10.1080/02626667.2015.1128084
8. Mohammadpour R., Shaharuddin S., Chang C.K., Zakaria N.A., Ghani A.A., Chan N.W. Urban trees and hydrological ecosystem service: A novel approach to analyzing the relationship between landscape structure and runoff reduction. *Environmental Management*. 2023. Vol. 72. № 4. P. 973–990. DOI: 10.1007/s00267-023-01868-z
9. O'Driscoll M., Clinton S., Jefferson A., Manda A., McMillan S. Urbanization effects on watershed hydrology and in-stream processes in the southern United States. *Water*. 2010. Vol. 2. № 3. P. 605–648. DOI: 10.3390/w2030605
10. Paul M.J., Meyer J.L. Streams in the urban landscape. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 2001. Vol. 32. P. 333–365. DOI: 10.1146/annurev.ecolsys.32.081501.114040
11. Pradhanang S.M., Mukundan R., Schneiderman E.M., Zion M.S., Anandhi A., Pierson D.C., Frei A., Easton Z.M., Fuka D., Steenhuis T.S. Hydrologic response in an urban watershed as affected by climate and land-use change. *Water*. 2019. Vol. 11. № 8. Article 1603. DOI: 10.3390/w11081603
12. Tsyhanenko-Dziubenko I., Kireitseva H., Demchuk L., Vovk V. Dynamics of heavy metal compounds allocation in urbohydrotops of Kyiv region in post-military conditions. *17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. 2023. Vol. 2023. № 1. P. 1–5.
13. Tsyhanenko-Dziubenko I., Kireitseva H., Demchuk L., Vovk V. Hydrochemical determination of the Teteriv River and the Kamianka River eutrophication potential. *17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. 2023. Vol. 1. P. 1–4. DOI: 10.3997/2214-4609.2023520089
14. Tsyhanenko-Dziubenko I., Kireitseva H., Fonseca Araújo J. Physiological and biochemical biomarkers of macrophyte resilience to military-related toxic stressors. *Journal Environmental Problems*. 2024. Vol. 9. № 4. P. 227–234.
15. Tsyhanenko-Dziubenko I., Kireitseva H., Sheliakh K., Levytska T., Kalenska V. Mathematical forecasting of spatio-temporal dynamics of hydroecological parameters of river ecosystems using integrally-modified Streeter-Phelps model. *Journal Environmental Problems*. 2025. Vol. 10. № 3. P. 309–316. DOI: 10.23939/ep2025.03.309
16. Tsyhanenko-Dziubenko I., Kireitseva H., Shomko O., Gandziura V., Khamdosh I. Analytical assessment of heavy metals polyelement distribution in urbanized hydroecosystem components: Spatial differentiation and migration patterns. *Journal Environmental Problems*. 2025. Vol. 10. № 2. P. 135–144.
17. Tsyhanenko-Dziubenko I., Kireitseva H., Ventsel N., Ventsel V., Shevchuk L., Skyba G. Remote evaluation of post-military basin Moshchunka of Kyiv Oblast, Ukraine using spectral indices. *18th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. 2025. P. 1–5.
18. Tsyhanenko-Dziubenko I., Šerevičienė V., Ustylenko V. Dissecting biochemical mechanisms that mediate tolerance to military chemical stressors in diverse malacological systems. *Environmental Problems*. 2024. Vol. 9. № 1. P. 51–58.
19. Wang S., Zhang Q., Yang T., Liu J., Wu H., Zhu, J., Zhang L., Qu G., Wang S. Investigating relationships between landscape patterns and surface runoff from a spatial distribution and intensity perspective. *Environmental Pollution*. 2023. Vol. 317. Article 120783. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.120783

REFERENCES:

1. Alpatova, O., Maksymenko, I., Patseva, I., Khomiak, I., & Gandziura, V. (2022). Hydrochemical state of the post-military operations water ecosystems of the Moschun, Kyiv region. *16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 1–5 [in English].
2. Garcia-Cuerva, L., Norman, L.M., Boykin, K.G., Eastoe, C., Gray, F., & Fan, C. (2022). Integrating urban planning and water management through green infrastructure in the United States-Mexico border. *Frontiers in Water*, 4. <https://doi.org/10.3389/frwa.2022.782922> [in English].
3. Kapelista, I., Kireitseva, H., Tsyhanenko-Dziubenko, I., Khomenko, S., & Vovk, V. (2024). Review of innovative approaches for sustainable use of Ukraine's natural resources. *Grassroots Journal of Natural Resources*, 7 (3), 378–395 [in English].
4. Kireitseva, H., Tsyhanenko-Dziubenko, I., Khomenko, S., & Palii, O. (2025). Integral assessment of the effectiveness of water resource management in communities for sustainable development. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources*, 16 (1), 27–38 [in English].

5. Li, C., Sun, G., Caldwell, P.V., Cohen, E., Fang, Y., Zhang, Y., Oudin, L., Sanchez, G.M., & Meentemeyer, R.K. (2020). Impacts of urbanization on watershed water balances across the conterminous United States. *Water Resources Research*, 56 (6). <https://doi.org/10.1029/2019wr026574> [in English].
6. Marques, P., Fernandes, C., Oliveira, S., Moura, C., & Cortes, R. (2024). Ecological landscape assessment of restored urban stream to guide adaptive management. *Heliyon*, 10 (14). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33921> [in English].
7. McGrane, S.J. (2016). Impacts of urbanisation on hydrological and water quality dynamics, and urban water management: A review. *Hydrological Sciences Journal*, 61 (13), 2295–2311. <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1128084> [in English].
8. Mohammadpour, R., Shaharuddin, S., Chang, C.K., Zakaria, N.A., Ghani, A.A., & Chan, N.W. (2023). Urban trees and hydrological ecosystem service: A novel approach to analyzing the relationship between landscape structure and runoff reduction. *Environmental Management*, 72 (4), 973–990. <https://doi.org/10.1007/s00267-023-01868-z> [in English].
9. O'Driscoll, M., Clinton, S., Jefferson, A., Manda, A., & McMillan, S. (2010). Urbanization effects on watershed hydrology and in-stream processes in the southern United States. *Water*, 2 (3), 605–648. <https://doi.org/10.3390/w2030605>
10. Paul, M.J., & Meyer, J.L. (2001). Streams in the urban landscape. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 32, 333–365. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.32.081501.114040> [in English].
11. Pradhanang, S.M., Mukundan, R., Schneiderman, E.M., Zion, M.S., Anandhi, A., Pierson, D.C., Frei, A., Easton, Z.M., Fuka, D., & Steenhuis, T.S. (2019). Hydrologic response in an urban watershed as affected by climate and land-use change. *Water*, 11 (8), Article 1603. <https://doi.org/10.3390/w11081603> [in English].
12. Tsyhanenko-Dziubenko, I., Kireitseva, H., Demchuk, L., & Vovk, V. (2023). Dynamics of heavy metal compounds allocation in urbohydrotops of Kyiv region in post-military conditions. *17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 2023 (1), 1–5 [in English].
13. Tsyhanenko-Dziubenko, I., Kireitseva, H., Demchuk, L., & Vovk, V. (2023). Hydrochemical determination of the Teteriv River and the Kamianka River eutrophication potential. *17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 1, 1–4. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520089> [in English].
14. Tsyhanenko-Dziubenko, I., Kireitseva, H., & Fonseca Araújo, J. (2024). Physiological and biochemical biomarkers of macrophyte resilience to military-related toxic stressors. *Journal Environmental Problems*, 9 (4), 227–234 [in English].
15. Tsyhanenko-Dziubenko, I., Kireitseva, H., Sheliakh, K., Levytska, T., & Kalenska, V. (2025). Mathematical forecasting of spatio-temporal dynamics of hydroecological parameters of river ecosystems using integrally-modified Streeter-Phelps model. *Journal Environmental Problems*, 10 (3), 309–316. <https://doi.org/10.23939/ep2025.03.309> [in English].
16. Tsyhanenko-Dziubenko, I., Kireitseva, H., Shomko, O., Gandziura, V., & Khamdosh, I. (2025). Analytical assessment of heavy metals polyelement distribution in urbanized hydroecosystem components: Spatial differentiation and migration patterns. *Journal Environmental Problems*, 10 (2), 135–144 [in English].
17. Tsyhanenko-Dziubenko, I., Kireitseva, H., Ventsel, N., Ventsel, V., Shevchuk, L., & Skyba, G. (2025). Remote evaluation of post-military basin Moshchunka of Kyiv Oblast, Ukraine using spectral indices. *18th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 1–5 [in English].
18. Tsyhanenko-Dziubenko, I., Šerevičienė, V., & Ustymenko, V. (2024). Dissecting biochemical mechanisms that mediate tolerance to military chemical stressors in diverse malacological systems. *Environmental Problems*, 9 (1), 51–58 [in English].
19. Wang, S., Zhang, Q., Yang, T., Liu, J., Wu, H., Zhu, J., Zhang, L., Qu, G., & Wang, S. (2023). Investigating relationships between landscape patterns and surface runoff from a spatial distribution and intensity perspective. *Environmental Pollution*, 317, Article 120783. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120783> [in English].

Дата надходження статті: 22.09.2025

Дата прийняття статті: 28.10.2025

Опубліковано: 17.12.2025