

# Оцінка ефективності регулювання водного стоку міськими зеленими зонами (на прикладі міста Києва)

Наталія Корогода 

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, вул. Володимирська, 64/13, Київ, 01601, Україна

## Реферат

Екосистемні послуги (ЕП) з регулювання водного стоку, що їх надають міські зелені зони (МЗЗ), є дієвим механізмом підтримання екологічного балансу міста. Обсяги ЕП залежать від ефективності МЗЗ. Проведення оцінки ЕП на основі ефективності функціонування, яке базується на загальних природничих закономірностях, дозволяє створити універсальні підходи, застосовні до будь-якої території. Також важливим є використання відкритих даних дистанційного зондування, що дозволяє проводити таку оцінку не лише науковцям, а й практикам містопланування. Метою роботи є проведення оцінки ефективності МЗЗ у регулюванні водного стоку на основі даних ДЗЗ та використання ГІС-інструментарію з відкритим кодом на прикладі м. Києва. Ефективність виконання функцій з водорегулювання кожною зеленою зоною (або всією синьо-зеленою інфраструктурою (СЗІ) міста вбачається як сила її впливу на загальний баланс води в межах річкового басейну. Оцінка ефективності має проводитись на двох територіальних рівнях: загальноміському та локальному. На загальноміському рівні оцінюванню підлягатиме вся СЗІ міста, на локальному – окремі МЗЗ. Результати моделювання на загальноміському рівні демонструють, що СЗІ в суббасейнах на околицях міста має ефективність щодо регулювання водного стоку на рівні вище середнього. На локальному рівні визначено, що ґрунтово-рослинний покрив у більшості МЗЗ м. Києва обумовлює подібні показники ефективності. Переведення отриманих значень ефективності в обсяги ЕП засвідчило, що 10 % МЗЗ надають ЕП у максимальних обсягах, 70 % – обсягах вище середніх. На загальноміському рівні – СЗІ м. Києва надає ЕП в середніх обсягах та обсягах нижче середнього, що спостерігається у 19 та 2 суббасейнах відповідно. Таке оцінювання ефективності зелених зон є зручним способом показати їх роль та цінність у регулюванні водного стоку, а також виявити шляхи ефективного проектування СЗІ та вибудувати черговість управлінських рішень для досягнення найбільшого ефекту в управлінні паводками.

## Ключові слова

Міська зелена зона, екосистемні послуги, водний стік, місто Київ

Надійшла до редакції: 8 липня 2024 / Прийнята: 10 липня 2024 / Опублікована онлайн: 8 серпня 2024

## Assessment of the water flow regulation effectiveness by urban green spaces (on the example of Kyiv)

Nataliia Korohoda

Taras Shevchenko National University of Kyiv, 64/13, Volodymyrska St., Kyiv, 01601, Ukraine

## Abstract

Ecosystem services (ES) for water flow regulation provided by urban green spaces (UGS) are an effective mechanism for keeping the ecological balance of the city. The volumes of ES depend on the effectiveness of the UGS. If the assessment of ES is based on the efficiency of the functioning based on general natural laws, universal methods can be achieved, which can be applied to any territory. It is also important to use open remote sensing data, which will allow this assessment to be used not only by scientists but also by urban planners. The purpose of the paper is to assess the effectiveness of UGS in regulating water flow based on remote sensing data and the use of open source GIS tools on the example of Kyiv. The effectiveness of each green space (or the whole blue-green infrastructure (BGI) in providing water regulation is the level of its impact on the overall water balance within the basin. Effectiveness should be assessed at two territorial levels: city-wide and local. At the city-wide level, the whole city's BGI will be assessed, and at the local level – individual UGS. The results of modeling at the city-wide level show that the BGI in sub-basins on the city's outskirts is above average in its effectiveness in regulating water flow. At the local level, it was determined that the soil and vegetation cover in most of the UGS of Kyiv determines similar efficiency levels. Converting the obtained efficiency values into volumes of ES showed that 10 % of UGS provide ES in maximum volumes, 70 % – in volumes above average. At the city-wide level, the BGI of Kyiv provides ES in average and below the average volumes, which is observed in 19 and 2 sub-basins correspondingly. Such an assessment of the effectiveness of green spaces is a good way to demonstrate their role and value in regulating water flow, as well as to identify ways to design BGI effectively and prioritise management decisions to achieve the greatest flood control effect.

## Keywords

Urban green space, ecosystem services, water flow, Kyiv

Received: 8 July 2024 / Accepted: 10 July 2024 / Published online: 8 August 2024

## 1. Вступ

Екосистемні послуги (ЕП), що їх надають міські зелені зони (МЗЗ), є дієвим механізмом підтримання екологічного балансу урбанізованих просторів. Обсяги ЕП залежать від ефективності зелених зон у виконанні окремих природних та соціально-економічних функцій (National Ecosystem Services..., 2015). Неоднакова ефективність функціонування обумовлюється станом та властивостями МЗЗ. Оцінка ефективності функціонування МЗЗ є одним з шляхів забезпечення їх сталого розвитку та надання максимальних обсягів ЕП, адже дозволяє визначити фактори, що знижують ефективність МЗЗ. Це, в свою чергу, дозволяє обґрунтувати загальну стратегію та першочергові природоохоронні рішення для підвищення ефективності МЗЗ, що є актуальним завданням для містопланувальників.

Необхідність оцінки ефективності, зокрема, стосується і ЕП з регулювання водного стоку (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Ці ЕП відносяться до групи регулювальних послуг «Гідрологічний цикл і регулювання водного стоку (включаючи боротьбу з повенями та захист прибережних територій)» (Crossman et al., 2019). В урбанізованому просторі лише МЗЗ та поверхневі водні об'єкти, що разом формують синьо-зелену інфраструктуру (СЗІ) міста, є єдиним природним механізмом, який дозволяє не лише уникнути економічних втрат, пов'язаних з проходженням паводків, а й забезпечити екологічні вигоди, пов'язані з нормалізацією колообігу води.

Серед проведених на сьогодні досліджень по оцінюванню ЕП з регулювання водного стоку можна назвати роботи як по грошовій (Barth & Döll, 2016), так і не грошовій оцінці (Thomas & Nisbet, 2007). Зокрема, роботи стосувались і проведення оцінок зазначених ЕП на територіях міст (Farrugia et al., 2013; Zhang et al., 2012). Найбільш ефективними інструментами проведення просторового аналізу та картографування ЕП є ГІС. ГІС та дані дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) (Crossman et al., 2019; Yang et al., 2015), що наразі активно використовуються, дозволяють проводити оцінку, зокрема і на основі автоматизованих моделей (Nedkov & Burkhard, 2012; Stürck et al., 2014).

Загалом слід зазначити, що наразі для ЕП з регулювання водного стоку існує значна кількість наукових розробок щодо методичного обґрунтування оцінки. В той же час, загальною проблемою є специфічність такої оцінки, що не дозволяє використовувати її на інших територіях (Barth & Döll, 2016). Крім того, існуючі автоматизовані моделі часто спираються на важкодоступну вхідну інформацію.

На нашу думку, якщо проводити оцінку на основі ефективності функціонування, яка базується на загальних природних закономірностях, можна досягти універсальних підходів, застосовних до будь-якої території. Також важливим є використання доступних даних, зокрема відкритих даних дистанційного зондування, що дозволить проводити таку оцінку не

лише науковцям, а й практикам містопланування. Зважаючи на вищевказане, метою роботи є проведення оцінки ефективності МЗЗ у регулюванні водного стоку на основі даних ДЗЗ та використання ГІС-інструментарію з відкритим кодом на прикладі м. Києва. Відповідно до мети, у роботі слід окреслити методичні основи проведення оцінки; описати процедуру проведення кількісної оцінки ефективності та обсягів ЕП; навести результати оцінки ефективності надання екосистемних послуг з регулювання водного стоку.

## 2. Матеріали і методи

*Інструментарієм* просторового аналізу при проведенні оцінки було середовище QGIS/SAGA (версія QGIS 3.32.1-Lima). *За вихідні матеріали* були обрані векторні та растрові набори геоданих території м. Києва, що увійшли до бази даних (БД):

- міські зелені зони: інформація отримана з бази даних (OpenStreetMap, 2023) та доповнена з продуктів (Buchhorn et al., 2020; Zanaga et al., 2021);

- тип та розподіл рослинності: інформація отримана з ESA WorldCover за 2020 рік з роздільною здатністю 10 м на основі даних Sentinel-1 і Sentinel-2 (Zanaga et al., 2021) та Copernicus Land Cover, колекція 3, епоха 2019 року, з просторовою роздільною здатністю 100 м (Buchhorn et al., 2020);

- суббасейни Дніпра в межах міста: побудовані на основі відомостей про рельєф території (DSM) (ALOS, 2023);

- ґрунти території, на основі (Korohoda et al., 2023a).

*Методика проведення кількісної оцінки ефективності:* була викладена нами раніше у (Korohoda & Pochaievets, 2024). Зокрема, у цій роботі було обґрунтовано набір індикаторів у відповідності до яких проводилась оцінка. Цими індикаторами стали: тип рослинності; тип ґрунту; типи земних покривів (вони дозволяють визначати тип геосистеми, що можна інтерпретувати як інтегральний індикатор в оцінюванні ЕП) (Vári et al., 2022); співвідношення різних типів геосистем та природокористування в межах басейну (Syrbe & Walz, 2012).

Відповідно до обраних індикаторів, характеристики умов, у яких функціонують зелені зони, та власне самі зелені зони, що формують атрибутивну складову БД, були умовно розподілені за групами. Перша група параметрів характеризує умови формування стоку. За розрахунковий параметр у цій групі нами обрано середнє багаторічне значення модуля стоку – *Fall*. Друга група параметрів характеризує актуальний стан самих зелених зон. За доцільне тут вбачається використовувати якісні та кількісні параметри, серед яких: *Usage type*, що відображає тип геосистем; тип рослинного покриву – *Vegetation type*; коефіцієнт водорегулюючої здатності, обумовлений якісними характеристиками рослинного покриву  $\omega_{veg}$ ; коефіцієнт водорегулюючої здатності, обумовлений властивостями ґрунту  $K_{soil}$ ; коефіцієнт

водорегулюючої здатності, обумовлений типом підстильної поверхні  $\omega$  (Farrugia et al., 2013; Korohoda & Pochaievets, 2024).

Для реалізації методики було визначено територіальні одиниці, у яких доцільно проводити моделювання. При оцінці ЕП, що їх надають зелені зони міста Києва, зважаючи на рівень досліджень, за територіальні одиниці оцінки було обрано території басейнів малих річок Києва (суббасейнів Дніпра).

Ефективність виконання водорегулювальної функції кожною зеленою зоною (або СЗІ) нами розуміється як сила її впливу на загальний баланс води в межах басейну. Загальна методика оцінки обсягів ЕП базується на визначенні того, наскільки ефективною щодо виконання водорегулювальної функції з одного боку є конкретна МЗЗ, а з іншого – вся наявна СЗІ міста. Відповідно і оцінка ефективності має проводитись на двох територіальних рівнях: загальноміському та локальному. На вищому (загальноміському) рівні оцінці підлягатиме вся СЗІ міста, а на локальному – окремі зелені зони. Методика в кінцевому випадку направлена на те, щоб було можливо легко перевести значення ефективності виконання функції у обсяги ЕП (Korohoda & Pochaievets, 2024). Тож, загальна процедура проведення оцінки полягає у наступному:

1. Встановити в межах басейнів малих річок показники водного стоку.

2. Визначити ефективність виконання функції по регулюванню стоку залежно від актуального стану МЗЗ та антропогенного перетворення території річкового басейну на обох територіальних рівнях.

### 3. Результати

Початково було встановлено умови, у яких МЗЗ міста Києва виконують свою функцію регулювання стоку. Для цього було визначено середнє багаторічне значення модуля стоку, що складає 1,50-1,85 л/с км<sup>2</sup> (Lukianets et al., 2021).

Для визначення ефективності на локальному рівні, по-перше, було встановлено тип рослинності – *Vegetation type* та коефіцієнт її водорегулюючої здатності –  $\omega_{veg}$  (Korohoda & Pochaievets, 2024).

Результати моделювання, представлені у таблиці 1 та на рис. 1 демонструють, що 59 % МЗЗ міста мають добрий потенціал щодо водорегулювання ( $\omega_{veg} \geq 0,7$ ). Лише 11 % об'єктів мають найнижчі показники. Хоча найвищі показники демонструють лише 9 % об'єктів, проте це великі за площами лісові та лісопаркові масиви, що робить рослинність міста достатньо вагомим чинником у регулюванні водного стоку.

Наступним кроком стало визначення на основі ґрунтової карти та польових і лабораторних ґрунтознавчих досліджень коефіцієнта водорегулюючої здатності різних типів ґрунту  $K_{soil}$  та встановлення у межах МЗЗ середньозваженого за площами коефіцієнта водорегулювання, обумовленого ґрунтовим покривом. Результати моделювання, представлені у таблиці 2

**Таблиця 1.** Коефіцієнт водорегулюючої здатності, обумовлений якісними характеристиками рослинного покриву ( $\omega_{veg}$ ) у МЗЗ м. Києва.

**Table 1.** The water regulating capacity coefficient which determined by the quality characteristics of the vegetation cover ( $\omega_{veg}$ ) in the UGS of Kyiv.

$\omega_{veg}$	МЗЗ	
	шт.	%
[0,5 -0,6)	471	11
[0,6 -0,7)	1303	30
[0,7 -0,8)	1882	43
[0,8 -0,9)	301	7
[0,9 -0,95]	377	9

**Таблиця 2.** Коефіцієнт водорегулюючої здатності, обумовлений властивостями ґрунту ( $K_{soil}$ ) у МЗЗ м. Києва.

**Table 2.** The water regulating capacity coefficient which determined by the soil characteristics ( $K_{soil}$ ) in the UGS of Kyiv.

$K_{soil}$	МЗЗ	
	шт.	%
[0,45 - 0,5)	424	10
[0,5 -0,6)	199	5
[0,6 -0,7)	2513	58
[0,7 -0,8)	243	6
[0,8 -0,9)	682	16
[0,9 -1]	273	6

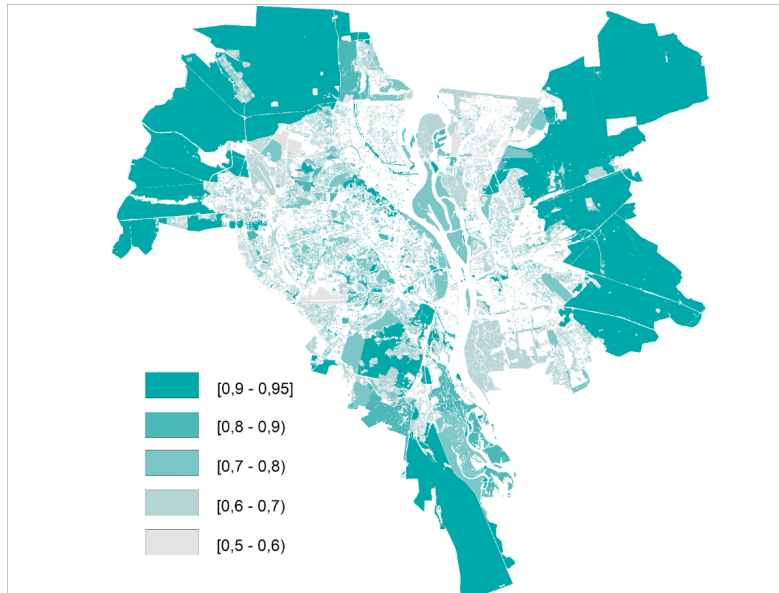
та на рис. 2, демонструють, що ґрунти в абсолютній більшості МЗЗ міста обумовлюють потенціал щодо водорегулювання вище середнього ( $K_{soil} \geq 0,6$ ). Лише 10 % об'єктів мають найнижчі показники ( $K_{soil} \geq 0,4$ ). Отже, проведене уточнення з урахуванням ґрунтових характеристик показало незначне зниження потенціалу рослинного покриву зелених зон щодо регулювання водного стоку.

Далі, на основі оверлейних операцій між рослинним та ґрунтовим покривом, було встановлено у межах МЗЗ обумовлений рослинним і ґрунтовим покривом коефіцієнт водорегулювання у зеленій зоні  $K_{\omega_{(g,a)}}$ , за моделлю (1). Власне ж ефективність зеленої зони  $E_{water\_control_{(g,a)}}$  визначалась за моделлю (2).

$$K_{\omega_{(g,a)}} = \frac{K_{\omega_{veg(g,a)}} + K_{soil(g,a)}}{2} \quad (1),$$

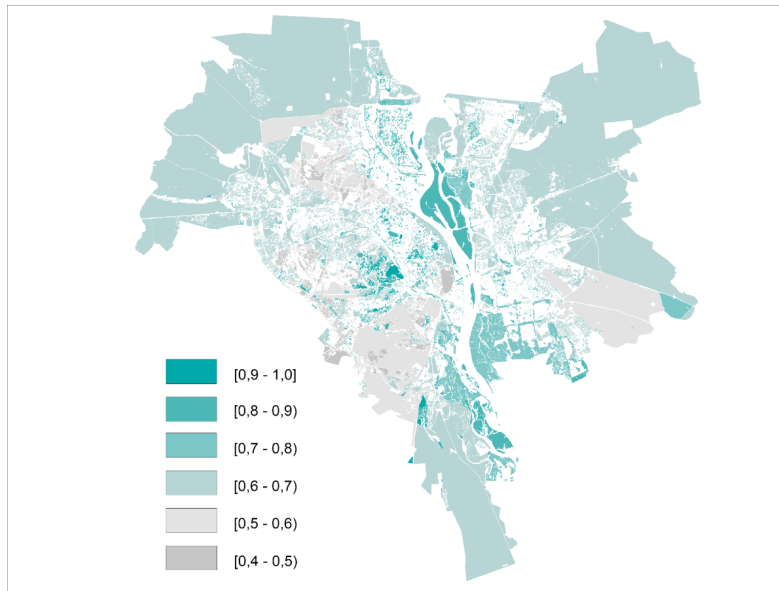
де  $K_{\omega_{(g,a)}}$  – коефіцієнт водорегулювання у зеленій зоні;  $K_{\omega_{veg(g,a)}}$  – коефіцієнт водорегулювання у зеленій зоні, обумовлений рослинним покривом;  $K_{soil(g,a)}$  – коефіцієнт водорегулювання у зеленій зоні, обумовлений ґрунтовим покривом.

$$E_{water\_control_{(g,a)}} = Fall \times K_{\omega_{(g,a)}} \quad (2),$$



**Рис. 1.** Результат моделювання коефіцієнта водорегулюючої здатності, обумовлений якісними характеристиками рослинного покриву ( $\omega_{veg}$ ) у МЗЗ м. Києва.

**Fig. 1.** The result of modelling the water regulating capacity coefficient which determined by the quality characteristics of vegetation cover ( $\omega_{veg}$ ) in the UGS of Kyiv.



**Рис. 2.** Результат моделювання коефіцієнта водорегулюючої здатності, обумовлений властивостями ґрунту ( $K_{soil}$ ) у МЗЗ м. Києва.

**Fig. 2.** The result of modelling the water regulating capacity coefficient which determined by the soil characteristics ( $K_{soil}$ ) in the UGS of Kyiv.

де  $E_{water\_control_{(g,a)}}$  – ефективність зеленої зони у регулюванні водного стоку;  $Fall$  – середнє багаторічне значення модуля стоку;  $K_{\omega_{(g,a)}}$  – коефіцієнт водорегулювання у зеленій зоні.

У результаті моделювання було визначено, що ґрунтово-рослинний покрив у більшості МЗЗ м. Києва обумовлює регулювання водного стоку на 60 % та більше ( $K_{\omega_{(g,a)}} \geq 0,6$ ), тобто ефективність зеленої зони у регулюванні водного стоку ( $E_{water\_control_{(g,a)}}$ ) є вищою від середніх показників. Особливу цінність становлять понад 1000 МЗЗ, що здатні регулювати водний стік природним чином на 75 % та вище (табл. 3, рис. 3). Також слід відмітити, що такі МЗЗ представлені не лише на околицях, а й у центральній частині міста (рис.3 (б).

**Таблиця 3.** Коефіцієнт водорегулюючої здатності, обумовлений властивостями зелених зон ( $K_{\omega_{(g,a)}}$ ) у МЗЗ м. Києва.

**Table 3.** The water regulating capacity coefficient which determined by characteristics of the green spaces ( $K_{\omega_{(g,a)}}$ ) in the UGS of Kyiv.

$K_{\omega_{(g,a)}}$	МЗЗ	
	шт.	%
[0,45 - 0,5)	25	1
[0,5 -0,6)	609	14
[0,6 -0,7)	2265	52
[0,7 -0,8)	982	23
[0,8 -0,9)	400	9
[0,9 -1]	53	1

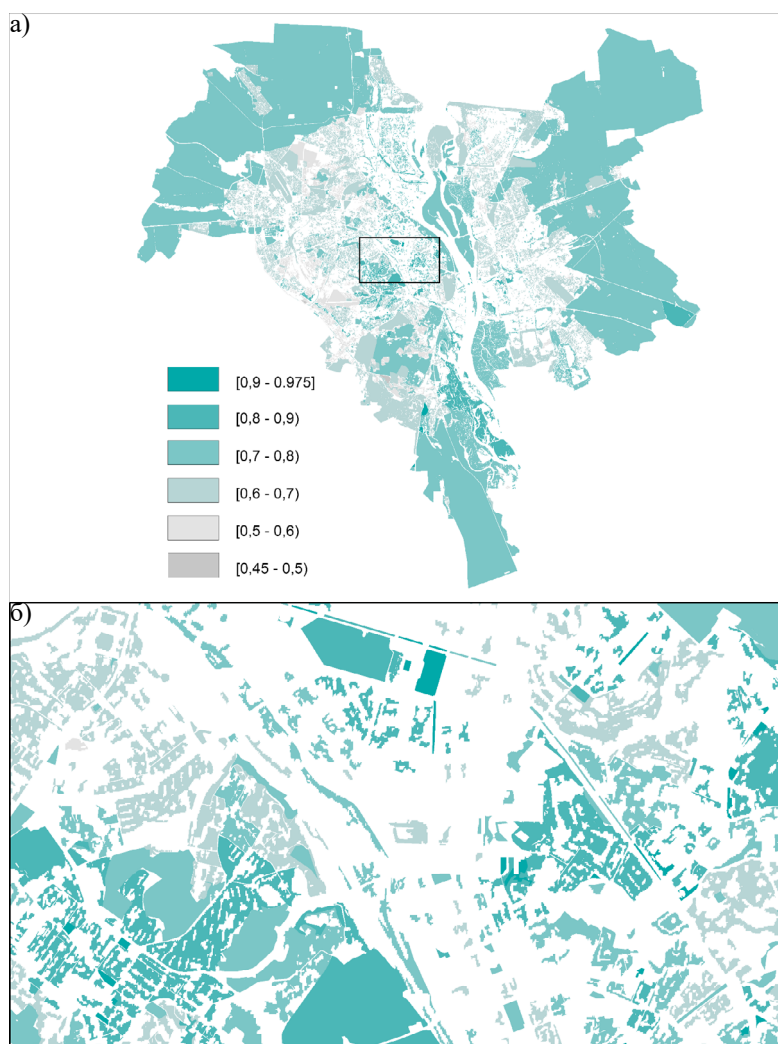


Рис. 3. Результат моделювання ефективності у регулюванні водного стоку окремими МЗЗ м. Києва -  $E\_water\_control_{(g\_a)}$ .  
 Fig. 3. The result of modelling of the water flow regulation efficiency by individual UGS in Kyiv -  $E\_water\_control_{(g\_a)}$ .

При моделюванні ефективності на загальноміському рівні було визначено типи земних покривів, окрім зелених зон – показник *Usage type* (на основі (OpenStreetMap, 2023)) та для кожного з них встановлено коефіцієнт водорегулюючої здатності, обумовлений типом підстильної поверхні –  $\omega$  (Korohoda & Pochaievets, 2024). Оскільки неоднорідні за типами поверхонь території мають різні коефіцієнти водорегулюючої здатності, то для об'єктивного визначення їх впливу на ефективність регулювання водного стоку в межах басейну було встановлено частку площі, що займають ті чи інші типи поверхонь, та визначено сумарний середньозважений за площами показник коефіцієнт водорегулювання для басейну. Результати моделювання, представлені у таблиці 4, демонструють, що співвідношення площ різних типів поверхонь у місті визначає середні та близькі до таких можливості водорегулювання. Тобто за умови порушення штучного водовідводу, найвищі ризики створюються в басейнах р. Нивки та р. Глибочиці. У той же час на 60–70 % можливе водорегулювання за рахунок МЗЗ на окраїнах міста – у басейнах річок Красилівка, Мощунка, Горенка, Видриця, Віта. 53 % суббасейнів міста незабезпечені й на половину природними можливостями

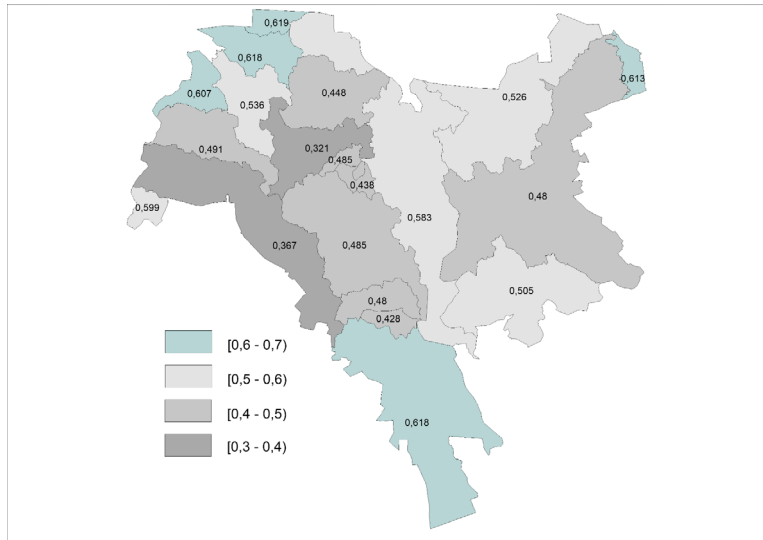
регулювання водного стоку ( $\omega \leq 0,5$ ), що викликає значне занепокоєння в умовах кліматичних змін та зношеності інженерних мереж.

Власне ж ефективність СЗІ в межах басейну  $E\_water\_control$  було визначено за моделлю (3).

$$E\_water\_control = Fall \times K_{\omega_{(b)}} \quad (3),$$

де  $E\_water\_control$  – ефективність регулювання водного стоку в межах річкового басейну; *Fall* – середнє багаторічне значення модуля стоку;  $K_{\omega_{(b)}}$  – коефіцієнт водорегулювання у басейні.

При наявному співвідношенні площ сірої (штучні поверхні) та зеленої (природні поверхні) інфраструктури, а також видового складу рослинності та переважаючих типів ґрунтів не є несподіваним те, що СЗІ міста у суббасейнах на околицях міста має ефективність регулювання водного стоку на рівні вище середнього  $E\_water\_control \geq 0,6$ . У той же час, площа забудови, наприклад у басейні р. Дарниця, незважаючи на наявність великого лісового масиву, знижує можливості природного регулювання водного стоку –  $E\_water\_control = 0,480$  (рис. 4).



**Рис. 4.** Результат моделювання ефективності у регулюванні водного стоку у суббасейнах Дніпра -  $E_{water\_control}$ .  
**Fig. 4.** The result of modelling of the water flow regulation efficiency in the Dnipro sub-basins -  $E_{water\_control}$ .

Отримані значення ефективності регулювання стоку  $E_{water\_control}$  та  $E_{water\_control}_{(g,a)}$  було переведено у обсяги ЕП на основі ранжування відповідно до шкали бажаності Харрінгтона (Harrington, 1965). Для цього, подібно до методик оцінки інших груп ЕП (Korohoda et al., 2022; Korohoda et al., 2023a; Korohoda et al., 2023b; Korohoda & Kurach, 2023; Korohoda, 2023; Korohoda & Yatsenko, 2023), було застосовано однобічну зростаючу функцію, де 0 відображає найгіршу якість МЗЗ (СЗІ) (мінімальні обсяги ЕП  $ES_{water\_control}_{(g,a)}$  та  $ES_{water\_control}_{(BGI)}$ ), а найвищу (максимальні обсяги) – відображає 1 (табл. 5).

Картографічне відображення результатів моделювання представлено на рис. 5. Зокрема, видно обсяги, що їх надає кожна зелена зона міста. Результати свідчать про те, що за нинішніх показників водного стоку, а також метричних та якісних параметрів, МЗЗ у 10 % випадків надають свій максимум ЕП. Також позитивним є те, що у сьогоднішніх умовах 70 % МЗЗ здатні надавати ЕП у обсягах вище середніх. В той же час, стає зрозумілим, що решта територій потребують змін задля підвищення власної ефективності у водорегулюванні (табл. 6). На загальноміському рівні СЗІ м. Києва у своєму нинішньому стані надає ЕП з регулювання водного стоку в середніх та нижче середніх обсягах, що спостерігається у 19 та 2 суббасейнах відповідно (табл. 7).

**Таблиця 4.** Коефіцієнт водорегулюючої здатності ( $\omega$ ) у суббасейнах Дніпра в межах м. Києва.

**Table 4.** The water regulating capacity coefficient ( $\omega$ ) in the Dnipro sub-basins in Kyiv.

$\omega$	Суббасейни Дніпра	
	шт.	%
[0,32 -0,4)	2	10
[0,4 -0,5)	9	43
[0,5 -0,6)	5	24
[0,6 -0,7]	5	24

**Таблиця 5.** Співвідношення ефективності виконання функції та обсягів екосистемних послуг з регулювання водного стоку.

**Table 5.** Correlation between the efficiency of the function and the volume of ecosystem services for water flow regulation.

$E_{water\_control}_{(g,a)} / E_{water\_control}$	$ES_{water\_control}_{(g,a)} / ES_{water\_control}_{(BGI)}$
[0,8 -1]	Максимальні
[0,63-0,8)	Вище середніх
[0,37-0,63)	Середні
[0,2-0,37)	Нижче середніх
[0-0,2)	Мінімальні

**Таблиця 6.** Обсяги ЕП з регулювання водного стоку, що надають окремі МЗЗ міста Києва.

**Table 6.** Volumes of water flow regulation ES provided by individual UGS of Kyiv.

$ES_{water\_control}_{(g,a)}$	МЗЗ	
	шт.	%
Максимальні	452	10
Вище середніх	3026	70
Середні	856	20
Нижче середніх	0	0
Мінімальні	0	0

**Таблиця 7.** Обсяги ЕП з регулювання водного стоку, що надає СЗІ міста Києва.

**Table 7.** Volumes of water flow regulation ES provided by BGI of Kyiv.

$ES_{water\_control}_{(BGI)}$	Суббасейни Дніпра	
	шт.	%
Максимальні	0	0
Вище середніх	0	0
Середні	90	19
Нижче середніх	10	2
Мінімальні	0	0

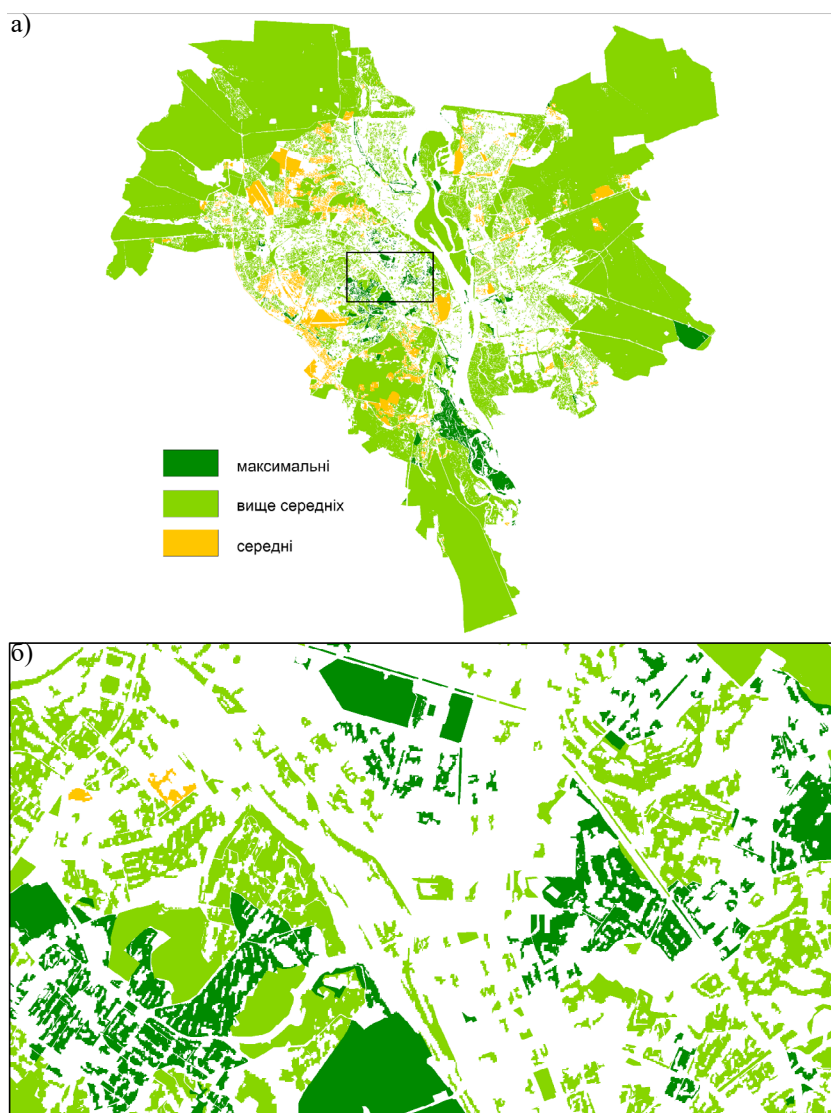


Рис. 5. Результат моделювання обсягів ЕП з регулювання водного стоку, що надають окремі МЗЗ міста Києва -  $ES_{water\_control(g,a)}$ .  
 Fig. 5. The result of modelling of volumes of water flow regulation ES provided by individual UGS of Kyiv -  $ES_{water\_control(g,a)}$ .

#### 4. Обговорення

У роботі ефективність виконання водорегулювальної функції кожною зеленою зоною (або СЗІ) трактується як сила її впливу на загальний баланс води в межах басейну. Оцінка ефективності має проводитись на двох територіальних рівнях: загальноміському та локальному. На загальноміському рівні оцінці підлягатиме вся СЗІ міста, а на локальному – окремі зелені зони. Оцінка направлена на те, щоб було можливо перевести значення ефективності виконання функції у обсяги ЕП.

Результати оцінки рослинного покриву території на локальному рівні демонструють, що 59 % МЗЗ міста мають добрий потенціал щодо водорегулювання, 11 % об'єктів мають найнижчі показники. Хоча найвищі показники демонструють лише 9 % об'єктів, проте це великі за площами лісові та лісопаркові масиви, що робить рослинність міста достатньо вагомим чинником у регулюванні водного стоку. Ґрунти в абсолютній більшості МЗЗ міста обумовлюють потенціал щодо водорегулювання на рівні вище середнього, 10 % об'єктів мають найнижчі показники ( $K_{soil} \geq 0,4$ ).

Таким чином, ґрунтово-рослинний покрив у більшості МЗЗ м. Києва обумовлює регулювання водного стоку на 60 % та більше, тобто показники ефективності  $E_{water\_control(g,a)}$  мають рівень вище середніх.

Результати моделювання на загальноміському рівні демонструють, що співвідношення площ різних типів поверхонь у місті визначає середні та близькі до таких можливості щодо водорегулювання. У басейнах таких річок як Красилівка, Мощунка, Горенка, Видриця, Віта природні умови забезпечують водорегулювання на 60-70 %. Водорегулювання за рахунок МЗЗ у 53 % суббасейнів міста не забезпечується й на половину.

Переведення отриманих значень ефективності в обсяги екосистемних послуг засвідчило, що за нинішніх параметрів водного стоку, а також метричних та якісних характеристик, МЗЗ у 10 % випадків надають свій максимум ЕП. Також позитивним є те, що у сьогоденні умовах 70 % МЗЗ здатні надавати ЕП у обсягах вище середніх. В той же час, на загальноміському рівні СЗІ м. Києва надає ЕП в середніх (19 суббасейнів) та нижче середніх (2 суббасейни) обсягах.

## 5. Висновки


В роботі на основі запропонованої нами раніше методики була проведена кількісна оцінка ефективності МЗЗ у регулюванні водного стоку на прикладі міста Києва з використанням даних ДЗЗ та ГІС-інструментарію з відкритим кодом. Зокрема, була описана процедура проведення оцінки, а також наведено її результати. У роботі визначено параметри окремих зелених зон та СЗІ міста загалом, що впливають на їх ефективність у процесі водорегулювання. На їх основі було проведено кількісну оцінку ефективності у регулюванні водного стоку на локальному (*E\_water\_control<sub>(g,a)</sub>*) та загальноміському (*E\_water\_control*) рівні. Отримані показники ефективності дозволили визначити обсяги ЕП з регулювання водного стоку, що надають окремі зелені зони та вся міська синьо-зелена інфраструктура.

Здобуті таким чином дані щодо впливу СЗІ міста на регулювання водного стоку в суббасейнах Дніпра та у межах окремих зелених зон становлять цінну інформацію, яка може допомогти містопланувальникам попередити негативні наслідки проходження паводків в масштабах всього міста та окремих його районів. Крім того, визначена ефективність окремих зелених зон є хорошим способом показати їх роль та цінність у регулюванні водного стоку. Це дослідження допомагає також виявити шляхи ефективного проектування СЗІ та вибудувати черговість управлінських рішень для досягнення найбільшого ефекту в управлінні паводками, що, безумовно, є важливим у забезпеченні стійкого розвитку міського довкілля.

## 6. Подяки

Робота виконувалась у рамках проекту «Технологія геоінформаційного оцінювання надання екосистемних послуг міськими зеленими зонами», що фінансується за рахунок зовнішнього інструмента допомоги Європейського Союзу для виконання зобов'язань України у Рамковій програмі Європейського Союзу з наукових досліджень та інновацій «Горизонт 2020».

## ORCID iD

Nataliia Korohoda  <https://orcid.org/0000-0003-1518-2997>

## Список посилань

- ALOS Global Digital Surface Model (DSM). (2023). “ALOS World 3D-30m” (AW3D30) Ver.3.2/3.1 [Data set]. [https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/aw3d30/aw3d30\\_e.htm](https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/dataset/aw3d30/aw3d30_e.htm)
- Barth, N.-C., Döll, P. (2016). Assessing the ecosystem service flood protection of a riparian forest by applying a cascade approach. *Ecosystem Services*, 21, 39–52. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.07.012>
- Buchhorn, M., Smets, B., Bertels, L., De Roo, B., Lesiv, M., Tsendbazar, N.-E., Herold, M., & Fritz S. (2020). *Copernicus Global Land Service: Land Cover 100m: collection 3: epoch*

- 2019: Globe (V3.0.1) [Data set]. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3939050>
- Crossman, N. D., Nedkov, S., Brander L. (2019). Discussion paper 7: Water flow regulation for mitigating river and coastal flooding. *Paper submitted to the Expert Meeting on Advancing the Measurement of Ecosystem Services for Ecosystem Accounting*, New York, 22-24 January 2019 and subsequently revised. Version of 1 April 2019. <https://seea.un.org>
- Farrugia, S., Hudson, M. D., McCulloch, L. (2013). An evaluation of flood control and urban cooling ecosystem services delivered by urban green infrastructure. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 9, 136–145. <https://doi.org/10.1080/21513732.2013.782342>
- Harrington, E. C. (1965). The desirable function. *Industrial Quality Control*, 21 (10), 124–131.
- Korohoda, N., Halahan, O., Kovtoniuk O. (2022). The use of GIS and remote sensing data in determining the condition of green areas in Kyiv. *XVI International Scientific Conference “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment”*. Kyiv, 15–18 November 2022, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580056>
- Korohoda, N., Kovtoniuk, O., & Halahan, O. (2023). Kyiv green areas: assessment of the functioning efficiency and volumes of ecosystem services for erosion control. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 32 (3), 516-524. <https://doi.org/10.15421/112346>
- Korohoda, N., Kovtoniuk, O., Halahan, O., Kupach, T. (2023). Heoinformatsiynе otsynuyvannya ekosystemnykh posluh z kontrolyu shvydkosti eroziyi gruntu u landshaftakh miskykh zelenykh zon [Geoinformation assessment of ecosystem services for controlling the rate of soil erosion in landscapes of urban green zones]. *Journal «Landscape Science»*, 4(2), 54-67 [Корогода, Н. П., Ковтонюк, О. В., Галаган, О. О., Купач, Т. Г. (2023). Геоінформаційне оцінювання екосистемних послуг з контролю швидкості ерозії ґрунту у ландшафтах міських зелених зон. *Ландшафтознавство*, № 4 (2), 54-67]. <https://doi.org/10.31652/2786-5665-2023-4-54-67>
- Korohoda, N., & Kupach, T. (2023). Otsinka obsyahiv nadannya kulturnykh ekosystemnykh posluh zelenymy zonamy mista Kyueva [Assessment of the volume of provision of cultural ecosystem services by Kyiv green zones]. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series “Geology. Geography. Ecology”*, (58), 159-170 [Корогода, Н., Купач, Т. (2023). Оцінка обсягів надання культурних екосистемних послуг зеленими зонами міста Києва. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія»*, 58, 159-170]. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-13>
- Korohoda, N. P. (2023). Otsinka ekosystemnykh posluh zi znyzhennya rivnya shumu vid dorozhnoho rukhu u miskykh landshaftakh [Assessment of ecosystem traffic noise reduction service in the urban landscapes]. *Journal «Landscape Science»*, 3(1), 56-67 [Корогода, Н. П. (2023). Оцінка екосистемних послуг зі зниження рівня шуму від дорожнього руху у міських ландшафтах. *Ландшафтознавство*, 3 (1), 56-67]. <https://doi.org/10.31652/2786-5665-2023-3-56-67>
- Korohoda, N. P., Pochaievets, O. O. (2024). Metodyka otsinky ekosystemnykh posluh z rehulyuvannya vodnoho stoku [Methods for assessing ecosystem services for water flow regulation]. *Hydrology, hydrochemistry and hydroecology*, 1(71), 16-30 [Корогода, Н. П., Почаєвць, О. О. (2024). Методика оцінки екосистемних послуг з регулювання водного стоку. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*, 1(71), 16-30]. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2024.1.2>

- Korohoda, N., Yatsenko, Yu. (2023). Otsinka ekosystemnykh posluh zi znyzhennya rivniv pylovoho zabrudnennya atmosferneho povitrya mista vzdovzh avtoshlyakhiv [Assessment of ecosystem services to reduce the level of dust pollution in the urban air along roads]. *Physical Geography and Geomorphology*, 46, 1–6 (117–122), 38–46 [Корогода, Н., Яценко Ю. (2023). Оцінка екосистемних послуг зі зниження рівнів пилового забруднення атмосферного повітря міста вздовж автошляхів. *Фізична географія та геоморфологія*, 46, 1–6 (117–122), 38–46]. <https://doi.org/10.17721/phgg.2023.1-6.04>
- Lukianets, O. I., Obodovskyi, O. G., Grebin, V. V., Pochaievets, O. O., Korniienko V. O. (2021). Prostorovi zakonomirnosti zminy serednoho richnoho stoku vody richok Ukrainy [Spatial regularities of change in average annual water flow of rivers of Ukraine]. *Ukrainian Geographical Journal*, 1, 6–14 [Лук'янець, О. І., Ободовський, О. Г., Гребін, В. В., Почаєвець, О. О., Корнієнко, В. О. (2021). Просторові закономірності зміни середнього річного стоку води річок України. *Український географічний журнал*, 1, 6–14] <https://doi.org/10.15407/ugz2021.01.006>
- Millennium Ecosystem Assessment (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC. <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>
- National Ecosystem Services Classification System (NESCS): Framework Design and Policy Application* (2015). EPA-800-R-15-002. United States Environmental Protection Agency, Washington, DC., 154 p.
- Nedkov, S., & Burkhard, B. (2012). Flood regulating ecosystem services – Mapping supply and demand, in the Etropole municipality, Bulgaria. *Ecological Indicators*, 21, 67–79. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.06.022>
- OpenStreetMap* contributors, [www.openstreetmap.org](http://www.openstreetmap.org), 2023
- Stürck, J., Poortinga, A., and Verburg, P. H. (2014). Mapping ecosystem services: The supply and demand of flood regulation services in Europe. *Ecological Indicators*, 38, 198–211. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.11.010>
- Syrbe, R.-U., Walz U. (2012). Spatial indicators for the assessment of ecosystem services: providing, benefiting and connecting areas and landscape metrics. *Ecological Indicators*, 21, 80–88. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.02.013>
- Thomas, H., & Nisbet, T. R. (2007). An assessment of the impact of floodplain woodland on flood flows. *Water and Environment Journal*, 21(2), 114–126. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2006.00056.x>
- Vári, Á., Kozma, Z., Pataki B. et al. (2022). Disentangling the ecosystem service ‘flood regulation’: Mechanisms and relevant ecosystem condition characteristics. *Ambio*, 51, 1855–1870. <https://doi.org/10.1007/s13280-022-01708-0>
- Yang, L., Zhang, L., Li, Y., Wu, S. (2015). Water-related ecosystem services provided by urban green space: A case study in Yixing City (China). *Landscape and Urban Planning*, 136, 40–51. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.11.016>
- Zanaga, D., Van De Kerchove, R., De Keersmaecker, W., Souverijns, N., Brockmann, C., Quast, R., Wevers, J., Grosu, A., Paccini, A., Vergnaud, S., Cartus, O., Santoro, M., Fritz, S., Georgieva, I., Lesiv, M., Carter, S., Herold, M., Li, Linlin, Tsendbazar, N. E., Ramoino, F., Arino, O. (2021). *ESA WorldCover 10 m 2020 v100*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5571936>
- Zhang, B., Xie, G., Zhang, C., Zhang, J. (2012). The economic benefits of rainwater-runoff reduction by urban green spaces: A case study in Beijing, China. *Journal of Environmental Management*, 100, 65–71. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.01.015>