



**В. М. Жук<sup>1</sup>, М. С. Мальований<sup>1</sup>, І. В. Мисак<sup>1</sup>, І. С. Тимчук<sup>1</sup>, Дірк Мушалла<sup>2</sup>, Маркус Піхлер<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна

<sup>2</sup> Технологічний університет Граца, м. Грац, Австрія

## ЧАСОВА ТА ПРОСТОРОВА НЕРІВНОМІРНІСТЬ ВИПАДАННЯ ДОЩІВ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ПОВЕРХНЕВОГО СТОКУ З УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ

Урахування часової та просторової нерівномірності випадання дощів має вагомий вплив на адекватність гідрологічних моделей поверхневого стоку. За результатами статистичного оброблення даних щодо добових висот шару опадів у Львові за період з 1945 р. по 2020 р. виявлено тенденцію до збільшення річної висоти шару опадів у середньому на 1,68 мм/рік за поточного середньорічного значення 733,4 мм/рік. Середня річна кількість днів з атмосферними опадами у Львові за період з 1945 р. по 2020 р. систематично зменшується зі середньою швидкістю 0,244 рік<sup>-1</sup>, тоді як річні кількості більших, стокоформувальних дощів – навпаки зростають: на 0,129 рік<sup>-1</sup> для дощів з добовою висотою шару  $h_0 \geq 1$  мм і на 0,088 рік<sup>-1</sup> для дощів з добовою висотою шару  $h_0 \geq 10$  мм. Для всіх стокоформувальних дощів у Львові їх середня річна кількість та середня висота шару одного дощу збільшуються при розгляді новіших часових періодів, що підтверджує загальну тенденцію до зростання частоти та інтенсивності найбільших злив незалежно від тренду щодо зміни річної висоти шару опадів. Згідно з рекомендаціями ДБН В.2.5-75:2013 отримано лінійну залежність коефіцієнта нерівномірності інтенсивності дощу від площі урбанізованого басейну стоку. Зазначено, що ця методика не враховує залежності коефіцієнтів нерівномірності випадання дощу за шаром і інтенсивністю від значення періоду одноразового перевищення. Порівняльний аналіз добових шарів опадів для 24 найбільших дощів у Львові та Граці (Австрія) у 2017–2018 рр. вказує на подібність їх розподілу в обох містах за величиною та впродовж року. Статистичним обробленням даних мережі зі 16 плювіографів у Граці отримано максимальні коефіцієнти просторової нерівномірності випадання дощів за шаром і за інтенсивністю, як лінійна функція періоду одноразового перевищення, що може бути використано для оцінювання нерівномірності дощів у містах з подібним кліматом і малою кількістю гідрометеорологічних пунктів.

**Ключові слова:** висота шару опадів; інтенсивність дощу; коефіцієнт просторової нерівномірності; період одноразового перевищення.

### Вступ / Introduction

Сталий розвиток систем дощового водовідведення є важливою складовою частиною стратегій і планів розбудови населених пунктів. Важливими особливостями систем дощового водовідведення є залежність їх робочих параметрів від кліматичних, топогеодезичних, гідрологічних, гідрологічних, гідрологічних, гідрологічних, гідрологічних і містопла-

нувальних характеристик об'єкта, а також наявність сильного зворотного впливу цих систем на гідрологічний, екологічний і санітарний стани довкілля [14]. Моделювання систем дощового водовідведення пов'язане з вирішенням комплексу стохастично-детермінованих нестационарних гідродинамічних та масообмінних задач [12]. Враховуючи складність процесів та унікальність кожної окремо взятої системи дощового водовідведен-

### Інформація про авторів:

**Жук Володимир Михайлович**, канд. техн. наук, доцент, кафедра гідротехніки та водної інженерії. Email: zhuk\_vm@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-2275-0799>

**Мальований Мирослав Степанович**, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри екології та збалансованого природокористування. Email: myroslav.mal@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-3868-1070>

**Мисак Ігор Васильович**, канд. техн. наук, асистент, кафедра гідротехніки та водної інженерії. Email: ihor\_mysak@yahoo.com; <https://orcid.org/0000-0002-1662-6636>

**Тимчук Іван Степанович**, канд. с.-г. наук, доцент, кафедра екології та збалансованого природокористування. Email: i.s.tymchuk@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-9344-3035>

**Мушалла Дірк**, професор, директор Інституту міського водного господарства. Email: d.muschalla@tugraz.at; <https://orcid.org/0000-0002-9880-8774>

**Піхлер Маркус**, аспірант. Email: markus.pichler@tugraz.at; <https://orcid.org/0000-0003-1949-5878>

**Цитування за ДСТУ:** Жук В. М., Мальований М. С., Мисак І. В., Тимчук І. С., Мушалла Дірк, Піхлер Маркус. Часова та просторова нерівномірність випадання дощів при моделюванні поверхневого стоку з урбанізованих територій. Науковий вісник НЛТУ України. 2021, т. 31, № 5. С. 67–73.

**Citation APA:** Zhuk, V. M., Malovanyy, M. S., Mysak, I. V., Tymchuk, I. S., Muschalla Dirk, Pichler Marcus. (2021). Temporal and spatial unevenness of rainfall in modeling surface runoff from urban areas. *Scientific Bulletin of UNFU*, 31(5), 67–73. <https://doi.org/10.36930/40310510>

ня, можна стверджувати, що надійний, науково обґрунтований результат моделювання процесу "дошові опади – стік" можна отримати тільки з використанням багатодисциплінарних підходів та з використанням спеціалізованих комп'ютерних програм [9, 10, 14].

За останні роки подібні комплексні дослідження дедалі частіше і масштабніше виконують в різних частинах світу. Внаслідок відмінностей у влаштуванні дощового водовідведення в різних містах, істотної кліматичної різниці та наявності різних часових рядів вихідних даних кожне дослідження має свої методологічні особливості [7, 15, 18]. Наприклад, у повномасштабному дослідженні параметрів дощового стоку з Балтійської басейну стоку у місті Львові (Україна) було виконано комплекс різноманітних, але тісно пов'язаних між собою задач: 1) статистичне оброблення рядів найбільших злив у місті за період з 1945 по 2018 рр. для обґрунтування максимальних добових висот шару опадів різної повторюваності; 2) повномасштабне натурне обстеження колекторів та території басейну стоку з визначенням площі басейну стоку та частки загальних водонепроникних поверхонь; 3) вибіркоче натурне обстеження 1000 га території для визначення взаємовідношення загальних та ефективних водонепроникних покриттів; 4) визначення добових коефіцієнтів стоку з використанням результатів попередніх етапів та з урахуванням розподілу ґрунтів на території міста за гідрологічними групами [19, 20].

*Об'єкт дослідження* – часова та просторова нерівномірність випадання атмосферних опадів на урбанізованих територіях.

*Предмет дослідження* – методи і засоби встановлення довготермінових трендів зміни висоти шару опадів і кількості дощових днів та коефіцієнтів просторової нерівномірності випадання дощів за шаром і інтенсивністю в масштабах міст.

*Мета роботи* – проаналізувати часову та просторову нерівномірність випадання дощів у масштабі міст на прикладі Львова та Граца (Австрія) та визначити коефіцієнти нерівномірності випадання дощів за шаром і інтенсивністю для їх застосування під час моделювання дощового стоку з урбанізованих територій.

Для досягнення зазначеної мети було визначено такі *основні завдання дослідження*:

- проаналізувати часову та просторову нерівномірність випадання дощів за результатами натурних спостережень;
- за результатами статистичного оброблення довготермінових спостережень за висотою шару опадів у Львові за період з 1945 р. по 2020 р. виявлено тенденції та кількісні часові залежності основних інтегральних параметрів дощів у місті, що використовуються під час моделювання поверхневого стоку;
- виконати порівняльний аналіз фактичних характеристик найбільших дощів у містах Львів та Грац (Австрія) у 2017–2018 рр.;
- на підставі статистичного аналізу даних мережі зі 16 півліографів у Граці отримати коефіцієнти просторової нерівномірності випадання дощів за шаром і інтенсивністю, що можуть бути використані для міст з подібним кліматом і малою кількістю гідрометеорологічних пунктів.

*Наукова новизна отриманих результатів дослідження* – удосконалено методи гідрологічного розрахунку дощового стоку з урбанізованих територій у частині науково обґрунтованого врахування часової та просторової нерівномірності випадання опадів у масштабі міст.

*Практична значущість результатів дослідження* – отримано довготермінові тренди зміни основних кількісних параметрів атмосферних опадів у Львові за період з 1945 р. до 2020 р.; отримано коефіцієнти просторової нерівномірності випадання дощів за шаром і інтенсивністю у Граці (Австрія).

*Аналіз останніх досліджень та публікацій.* Глобальні зміни клімату є одним з найгостріших викликів, що постали сьогодні перед людством. Всесвітня метеорологічна організація у звіті про стан глобального клімату у 2020 р. констатувала, що 2020 р. був одним із трьох найтепліших за історію метеорологічних спостережень, 2015–2020 рр. стали найтеплішим періодом за весь період спостережень, а середня температура поверхні Землі у 2020 р. приблизно на 1 °С перевищила доіндустріальний рівень [13]. З іншого боку, тенденції щодо змін річної висоти шару опадів у різних країнах та навіть у межах одного регіону можуть істотно відрізнятися: в одних містах за останні десятиліття зменшується річна кількість опадів, тоді як в інших, навпаки, – збільшується. Водночас у більшості країн Європи з кожним роком зростає частота високоінтенсивних злив та, відповідно, масштабних підтоплень територій [8].

Зміни параметрів випадання дощів разом з інтенсивною урбанізацією територій зумовлюють нові виклики та підвищують вимоги до надійності міських систем дощового водовідведення. Гідрологічні процеси на урбанізованих територіях характеризуються високою нерівномірністю у просторі та часі [2], тоді як більшість моделей дощового стоку припускають наявність просторово однорідного поля дощу. Відсутність достатньої інформації про реальний просторовий розподіл опадів є вагомим чинником, що вносить неточності у процес оцінки об'ємів та витрат дощового стоку з урбанізованих територій [3, 4, 5].

Довготерміновий аналіз зміни добової висоти шару опадів в різних частинах Карпатського регіону, виконаний [1], для останньої чверті ХХ ст. чітко показав зростання в часі частоти і шару потужних злив, тоді як у середньому кількість дощових днів має тенденцію до зменшення.

Висота добового шару опадів має прямий вплив на розрахункові об'єми та витрати поверхневого стоку з урбанізованих територій, що безпосередньо впливає на основні технологічні параметри мереж і споруд дощового та загальносплавного водовідведення, зокрема споруд для регулювання дощового стоку та каналізаційних очисних споруд [14]. Загалом прийнята методологія моделювання дощового стоку з урбанізованих територій в Україні на цей час істотно відстає від передових світових стандартів; усі використовувані методи є одноподиними та розглядають поверхневий стік як результат випадання одного розрахункового дощу, рівномірно розподіленого по площі, з інтенсивністю, що відповідає певному нормативному значенню періоду одноразового перевищення.

*Матеріали та методи дослідження.* Аналіз довготермінових тенденцій зміни параметрів атмосферних опадів у Львові виконано на базі даних метеорологічних спостережень Львівського регіонального центру з гідрометеорології [17]. Аналіз просторової нерівномірності випадання опадів у масштабах Грацу (Австрія)

проведено на підставі результатів натурних спостережень на мережі зі 16 метеопунктів у 2017–2018 рр. [11].

У цьому дослідженні використано теоретичні, чисельні та нормативні методи визначення розрахункових параметрів дощів та поверхневого стоку на урбанізованих територіях, а також стандартні статистичні методи оброблення результатів натурних систематичних спостережень зміни часових і просторових параметрів випадання дощів у містах Львів (Україна) та Грац (Австрія).

За методом найменших квадратів отримано коефіцієнти апроксимації для просторової нерівномірності випадання дощів згідно з чисельними значеннями, наведеними в роботі [6] у табличному вигляді, а також згідно з даними натурних спостережень у Граці у 2017–2018 рр. [11].

## Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

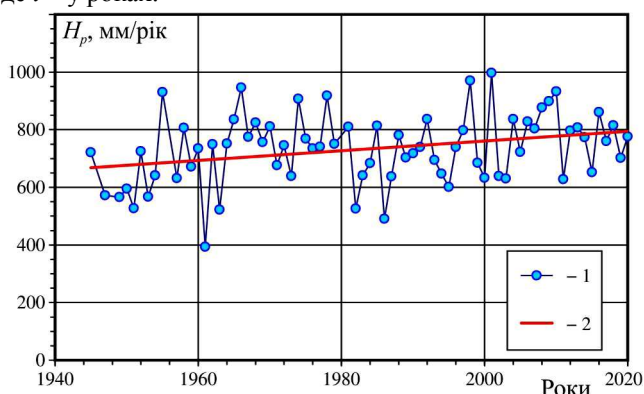
**Часова нерівномірність випадання дощів.** Під час аналізу довготермінових трендів випадання дощів велике значення має обґрунтований вибір періоду спостережень, що вибирають до статистичного оброблення. З одного боку, використання максимально довгих рядів спостережень дає перевагу в точності отриманих результатів, особливо для дощів з великими періодами одноразового перевищення. З іншого боку, використання коротших, але новіших часових рядів, дає змогу оцінити довготермінову зміну розрахункових параметрів дощів через десятиліття та актуалізувати значення відповідних параметрів з урахуванням кліматичних змін.

Для виявлення довготермінових трендів зміни розрахункових параметрів добових дощів у Львові виконано статистичне оброблення рядів гідрометеорологічних спостережень за добовою висотою шару атмосферних опадів у місті за період з 1945 по 2020 рр. та проаналізовано тенденції щодо зміни висот як річного шару опадів, так і максимальних добових шарів опадів різної повторюваності.

Проаналізовано дані щодо річної висоти шару опадів за 72 повних роки спостережень у період з 1945 до 2020 рр. (за винятком 1946, 1948, 1956 і 1980 рр.). Оброблення результатів показує, що річна висота шару опадів у Львові за цей період зростає в середньому на 1,68 мм/рік (рис. 1):

$$H_p = 1,682 \cdot t - 2604, \text{ мм/рік}, \quad (1)$$

де  $t$  – у роках.



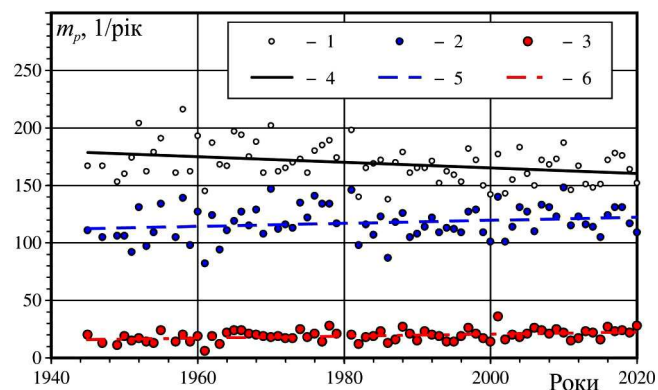
**Рис. 1.** Висота річного шару атмосферних опадів у Львові за даними спостережень у період з 1945 по 2020 рр. / Annual rainfall depths in Lviv in 1945–2020: 1 – фактичні дані спостережень / actual data; 2 – лінійна апроксимація / linear approximation (1)

Аналогічний аналіз фактичних річних висот шару опадів за період 1945–2018 рр. вказує на середній приріст 1,811 мм/рік, а за 1945–2019 рр. – 1,703 мм/рік. Отже, за останні 3 роки поточна середня швидкість зростання річної висоти шару опадів у Львові становила в середньому 1,73 мм/рік з максимальним відхиленням +4,7%. Отримані показники свідчать про стійкий довготерміновий тренд збільшення річної висоти шару опадів у Львові. З одного боку, наявна на сьогодні швидкість зростання в 1,68 мм/рік становить тільки 1/437 від середнього річного значення за період 1945–2020 рр.  $H_{p, mid} = 733,8$  мм/рік, але за весь період різниця річних значень за (1) становить вже 126,0 мм/рік або +17,2% від середнього багаторічного значення.

Аналогічну статистичну обробку виконано для інших, коротших часових періодів: двох періодів тривалістю 36 років – для першої половини наявної бази спостережень (1945–1984 рр., без 1946, 1948, 1956 та 1980 рр.) та для другої половини (1985–2020 рр.), а також для останніх 20 років (2001–2020 рр.). Чим новіший часовий період розглядали, тим більші середні показники висоти шару опадів отримано (табл. 1). Добову висоту  $h_d$  визначено як середню за один дощовий день, тоді як значення висоти  $h'_d$  відповідає відношенню сумарної висоти шару опадів на загальну тривалість періоду в добах.

**Табл. 1.** Середні висоти шару опадів у Львові у різні часові періоди / Average rainfall depths in Lviv in different periods

№	Період	Повних років спостережень	Середня кількість дощів за рік	Висота шару опадів		
				$H_{p, mid}$ , мм/рік	$h_d$ , мм/добу	$h'_d$ , мм/добу
1	1945–2020	72	169,0	733,8	4,34	2,01
2	1945–1984	36	175,1	711,1	4,06	1,95
3	1985–2020	36	162,9	756,4	4,64	2,07
4	2001–2020	20	163,7	787,0	4,81	2,15



**Рис. 2.** Фактична річна кількість днів з атмосферними опадами у Львові за період з 1945 по 2020 рр. / Actual annual number of wet weather days in Lviv in 1945–2020: 1, 2, 3 – фактичні дані спостережень відповідно для  $h_d \geq 0,1$  мм;  $h_d \geq 1$  мм і  $h_d \geq 10$  мм / actual data for the rainfall depths  $h_d \geq 0.1$  mm;  $h_d \geq 1$  mm and  $h_d \geq 10$  mm respectively; 4, 5, 6 – лінійні апроксимації (2), (3) і (4) для дощів з  $h_d \geq 0,1$  мм;  $h_d \geq 1$  мм і  $h_d \geq 10$  мм відповідно / linear approximations (2), (3) and (4) for the rainfall  $h_d \geq 0.1$  mm;  $h_d \geq 1$  mm and  $h_d \geq 10$  mm respectively

Одночасно зі збільшенням річної висоти шару опадів у Львові останні десятиліття спостерігається незначне зменшення загальної кількості дощових днів (рис. 2). Річна кількість усіх дощів у період з 1945 по 2020 рр. описується лінійною тренду:

$$m_p = 652,7 - 0,244 \cdot t, \text{ 1/рік}. \quad (2)$$



Під час моделювання роботи систем дощового водовідведення найбільше значення мають дощі з великою висотою шару певної повторюваності в часі. Проаналізовано тенденції зміни кількості та середньої висоти шару середніх і потужних злив, які зумовлюють максимальний дощовий стік з урбанізованих територій у системи водовідведення. Розглянуто тренди для мінімальних стокоформувальних дощів ( $h_0 \geq 1$  мм), а також для більших дощів з добовою висотою шару  $h_0 \geq 5, 10$  та  $20$  мм.

Річна кількість дощів з висотою добового шару  $h_0 \geq 1$  мм за період 1945-2020 рр., на відміну від загальної кількості дощових днів, незначно, але зростає:

$$m_{p,1} = -138,7 + 0,129 \cdot t, \text{ 1/рік}, \quad (3)$$

Табл. 2. Середні параметри помірних і сильних дощів у Львові у різні часові періоди / Average parameters of moderate and large rainfalls in Lviv in different periods

№	Період	Повних років спостережень	Середня річна кількість дощів та середня добова висота шару опадів $h_0$ , мм/добу							
			$h_0 \geq 1$ мм		$h_0 \geq 5$ мм		$h_0 \geq 10$ мм		$h_0 \geq 20$ мм	
			$m_p$	$h_0$	$m_p$	$h_0$	$m_p$	$h_0$	$m_p$	$h_0$
1	1945–2020	72	117,5	6,04	45,3	11,7	19,4	18,1	5,10	31,0
2	1945–1984	36	116,9	5,87	43,7	11,5	18,0	17,9	4,56	30,5
3	1985–2020	36	118,2	6,21	46,9	11,9	20,8	18,3	5,64	31,4
4	2001–2020	20	122,2	6,27	49,2	12,0	22,3	18,2	6,00	31,3

**Просторова нерівномірність випадання дощів у масштабі міст.** Згідно з рекомендаціями чинного в Україні нормативного документа [6] для розрахунків дощового стоку з урбанізованих басейнів стоку з площею менше ніж 500 га розрахункову інтенсивність випадання дощу приймаємо постійною по площі. Для басейнів стоку з площею  $F = 500$  га і більше вводимо понижувальний коефіцієнт  $k$ , який враховує нерівномірність випадання дощів на достатньо великих урбанізованих територіях (рис. 3). Залежність коефіцієнта  $k$  від площі басейну стоку  $F$  з достатньою точністю (коефіцієнт детермінованості  $R^2 = 0,9885$ ) може бути описана лінійним трендом:

$$k = 0,951 - 4,2 \cdot 10^{-5} \cdot F. \quad (5)$$

Потрібно зазначити два моменти щодо застосування методики врахування нерівномірності опадів у масштабі міст, рекомендованої [6].

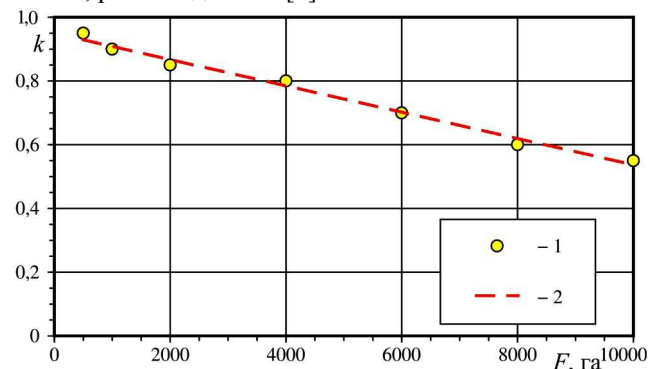


Рис. 3. Коефіцієнт пониження розрахункової інтенсивності випадання дощів  $k$  як функція площі урбанізованого басейну стоку  $F$  / Coefficient of reduction of the estimated rainfall intensity  $k$  as a function of the area of the urban catchment  $F$  [6]

По-перше, понижувальний коефіцієнт  $k$  стосується тільки інтенсивностей розрахункових дощів і, відповідно, може бути використаний тільки для визначення максимальних секундних витрат дощового стоку. Отже, коефіцієнт  $k$  за визначенням не можна застосовувати для визначення просторової нерівномірності максимального добового шару опадів, що є основним кліматичним параметром під час проектування каналіза-

ційних очисних споруд. По-друге, коефіцієнт  $k$  за чинною нормативною методикою залежить тільки від площі урбанізованого басейну стоку, тоді як добре обгрунтованим і верифікованим на практиці фактом є залежність коефіцієнта нерівномірності випадання опадів (як за шаром, так і за інтенсивністю) від значення періоду одноразового перевищення  $p$ . Цей факт підтверджується тим, що для часто повторюваних дощів зі значеннями періоду  $P$  менше ніж 0,25 року відносна різниця між максимальними та середніми висотами шару опадів та максимальними і середніми інтенсивностями дощів є незначною, тоді як зі збільшенням  $P$  відповідні два коефіцієнти просторової нерівномірності опадів різко зростають [11].

$$m_{p,10} = -154,6 + 0,088 \cdot t, \text{ 1/рік}. \quad (4)$$

Для всіх стокоформувальних дощів у Львові їх середня річна кількість  $m_p$  та середня висота шару одного дощу  $h_0$  збільшуються при розгляді новіших часових періодів (табл. 2). Отже, порівняння середніх добових параметрів помірних і сильних дощів у Львові для різних часових періодів підтверджує потребу врахування довготермінових тенденцій щодо зростання як частоти, так і висоти одноденного шару таких опадів під час виконання відповідних водогосподарських розрахунків, зокрема під час моделювання систем дощового водовідведення.

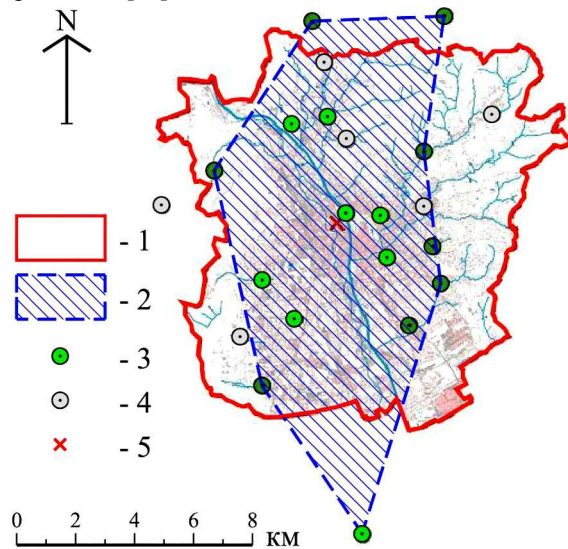


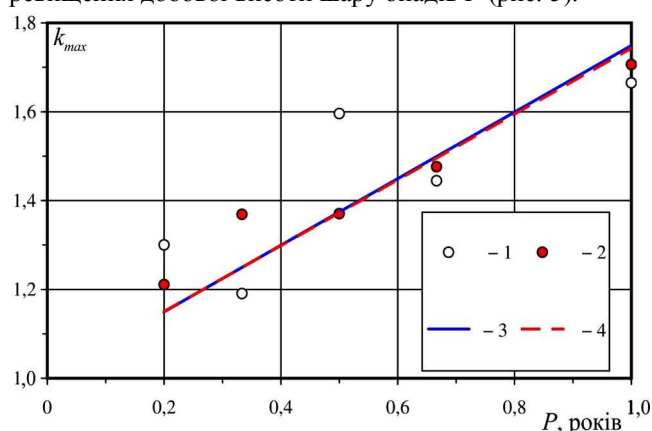
Рис. 4. Схема Граца (Австрія) з мережею автоматичних пловіогарів / Scheme of Graz city (Austria) with a rain gauge network [11]: 1 – адміністративна межа міста / administrative boundary of the city; 2 – контур, охоплений метеопунктами / the contour covered by the rain gauges; 3, 4 – відповідно задіяні та незадіяні метеопункти / analyzed and unused rain gauges respectively; 5 – сервер / server

Проаналізуємо коефіцієнти просторової нерівномірності випадання опадів у масштабі міста на прикладі Граца, розташованого у південно-східній Австрії, біля

підніжжя Альпійських гір. Загальна площа території Граца в адміністративних межах становить 125 км<sup>2</sup>. За останні десятиліття у ньому розбудовано одну з наймасштабніших і найщільніших у світі мереж гідрометеостережень у масштабі міст, що налічує 21 автоматичний гідрометеопункт, що відповідає густині 1 пункт на 6,0 км<sup>2</sup> території міста.

У роботі [11] наведено результати натурних спостережень нерівномірності випадання дощів у Граці впродовж 2017–2018 рр. на підставі оброблення даних 16 півнографів, виділених на рис. 4 зеленими символами. Фактична площа території, охопленої вказаними 16 півнографами, становить 89,27 км<sup>2</sup>, що відповідає 1 гідрометеопункту на 5,58 км<sup>2</sup> території.

Оброблення результатів натурних спостережень, наведених у роботі [11], дало змогу отримати залежності коефіцієнтів нерівномірності випадання дощу за шаром  $k_{max,h}$  та інтенсивністю  $k_{max,i}$  від періоду одноразового перевищення добової висоти шару опадів  $P$  (рис. 5).



**Рис. 5.** Коефіцієнти просторової нерівномірності випадання дощів  $k_{max}$  за шаром (1) та інтенсивністю (2) як функція періоду  $P$  за даними / Coefficients of rainfall spatial variability  $k_{max}$  by the layer (1) and by the intensity (2) as the function of return period  $P$  using the data of [11]; 3, 4 – лінійна апроксимація (6) / linear approximation (6)

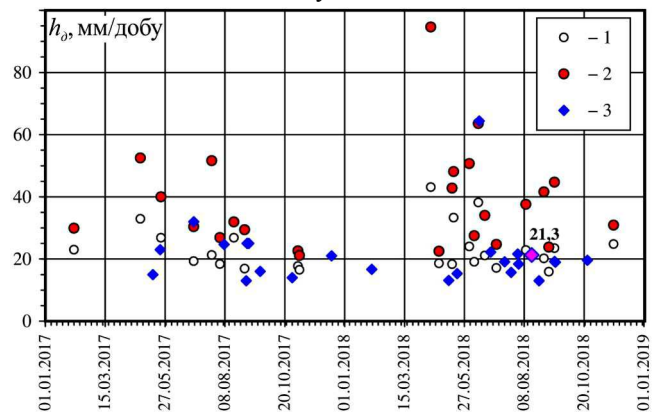
Наявний дворічний інтервал спостережень не дає підстав з достатньою точністю визначити емпіричне значення коефіцієнтів  $k_{max}$  для  $P > 1$  року. У діапазоні значень  $P = 0,2 \div 1,0$  рік обидва коефіцієнти нерівномірності можуть бути описані однією і тією самою лінійною залежністю:

$$k_{max} = 1 + 0,75 \cdot P. \quad (6)$$

Пряме застосування методики [6] до території площею 89,27 км<sup>2</sup>, дає значення коефіцієнта нерівномірності випадання дощу за інтенсивністю  $k_{min,i} = 0,576$ , що у першому наближенні відповідає коефіцієнту  $k_{max,i} = 1/k_{min,i} = 1,74$ . Згідно з лінією тренду (6), таке значення коефіцієнта  $k_{max}$ , і наближено відповідає значенню  $P = 0,99$  року, а для більш потужних і менш часто повторюваних дощів потрібно очікувати значно вищого ступеня їх просторової нерівномірності.

Порівняльний аналіз фактичних добових шарів опадів для 24 найбільших дощів у Львові та Граці (Австрія) у 2017–2018 рр. (рис. 6) вказує на подібність їх в обох містах як за величиною, так і за розподілом упродовж сезонів року. Важливим практичним питанням є можливість використання методу аналогій та екстраполяція отриманих емпірично у Граці коефіцієнтів нерівномірності для оцінювання можливих не-

рівномірностей як висоти шару опадів, так і максимальних інтенсивностей дощів у Львові.



**Рис. 6.** Порівняння добових висот опадів для 24 найбільших дощів, що випали у Граці та Львові у 2017–2018 рр. / Comparison of daily precipitation depths for the 24 largest rainfalls in Graz and Lviv in 2017–2018: 1 – середні значення  $h_d$  у Граці за показами 16 півнографів / average values of  $h_d$  in Graz according to 16 rain gauges; 2 – максимальні значення  $h_{d,max}$  у Граці / maximum values of  $h_{d,max}$  in Graz; 3 – значення  $h_d$  у Львові за показами дощоміра гідрометеостанції (виділено зливу з  $h_d = 21,3$  мм від 17.08.2018 р.) / the value of  $h_d$  in Lviv according to the data of the rain gauge of the hydrometeorological station (storm from 17.08.2018 with  $h_d = 21.3$  mm is highlighted)

**Обговорення результатів дослідження.** Отримані в роботі результати дають змогу більш науково обґрунтовано враховувати часову та просторову нерівномірність випадання дощів у масштабі міст. Оскільки великі інфраструктурні проекти, такі як реконструкція міських каналізаційних очисних споруд, планують зазвичай на перспективу 50 років, то екстраполюючи залежність (1) можна отримати очікуване значення річної висоти шару опадів у Львові у 2070 р. вже на рівні 878 мм/рік, що істотно збільшить розрахункове навантаження на систему водовідведення.

Істотним технічним обмеженням моніторингу параметрів дощів у Львові є наявність тільки однієї гідрометеостанції, розташованої на території Міжнародного аеропорту "Львів". Отже, завдання ускладнюється тим, що єдиний дощомір територіально знаходиться на частині території міста, яка належить до Чорноморського басейну стоку, тоді як у загальносплавну систему водовідведення Львова потрапляє переважно дощовий стік з Балтійської частини басейну стоку. Для уявлення наявної невизначеності щодо дійсних параметрів дощів на території Балтійського басейна стоку Львова розглянуто потужну зливу від 17.08.2018 р., яка спричинила останнє масштабне підтоплення щонайменше в 4 проблемних районах міста. За даними гідрометеостанції в цей день у Львові випало тільки 21,3 мм опадів (див. рис. 6), що приблизно відповідає періоду одноразового перевищення близько 0,2 роки [20], тобто такі та більші за шаром дощі випадають у Львові в середньому 5 разів на рік. Для порівняння 14.06.2018 р. гідрометеостанція зафіксувала у Львові дощ з висотою шару опадів 64,4 мм, що відповідає  $P = 4,5$  роки, але жодних відчутних підтоплень у Львові на той день не сталося. Ймовірно, окрім тривалості дощів та їх максимальної інтенсивності, вагомий вплив мала похибка, зумовлена просторовою нерівномірністю випадання дощів та наявністю тільки однокочкового моніторингу. Отримана емпірич-

на залежність (6) може бути використана для врахування просторової нерівномірності випадання дощів по території міста для періодів одноразового перевищення до  $P = 1$  рік включно.

Важливою перспективною задачею є розбудова в українських містах мереж спостережних пунктів, обладнаних сучасними автоматичними пловіографами для можливості науково обґрунтованого врахування часової та просторової нерівномірності випадання дощів у масштабі міст. Разом зі спеціалізованими гідрометричними пунктами це дасть змогу калібрувати та верифікувати гідрологічно-гідралічні моделі систем дощового водовідведення, що є передумовою їх успішного застосування на практиці.

## Висновки / Conclusions

За результатами статистичного оброблення даних щодо добових висот шару опадів у Львові за період з 1945 р. до 2020 р. виявлено тенденцію до збільшення річної висоти шару опадів у середньому на 1,68 мм/рік за поточного середньорічного значення 733,4 мм/рік.

Середня річна кількість днів з атмосферними опадами у Львові за період з 1945 р. по 2020 р. систематично зменшується зі середньою швидкістю  $0,244 \text{ рік}^{-1}$ , тоді як річні кількості більших, стокоформувальних дощів – навпаки зростають: на  $0,129 \text{ рік}^{-1}$  для дощів з добовою висотою шару  $h_0 \geq 1 \text{ мм}$  і на  $0,088 \text{ рік}^{-1}$  для дощів з добовою висотою шару  $h_0 \geq 10 \text{ мм}$ .

Для всіх стокоформувальних дощів у Львові їх середня річна кількість  $m_p$  та середня висота шару одного дощу  $h_0$  збільшуються при розгляді новіших часових періодів, що підтверджує загальну світову тенденцію до зростання частоти та потужності найбільших злив незалежно від локального тренду щодо зміни річної висоти шару опадів.

Згідно з рекомендаціями чинного в Україні нормативного документа [6] отримано лінійну апроксимацію (5) коефіцієнта нерівномірності дощу як функції загальної площі урбанізованого басейну стоку. Вказано, що чинна методика не узгоджується з добре обґрунтованим і верифікованим на практиці фактом залежності коефіцієнтів нерівномірності випадання опадів (як за шаром, так і за інтенсивністю) від значення періоду одноразового перевищення  $P$ , що враховують у низці закордонних методик моделювання дощового стоку.

Порівняльний аналіз фактичних добових шарів опадів для 24 найбільших дощів у містах Львові та Граці (Австрія) у 2017-2018 рр. вказує на подібність їх розподілу в обох містах за величиною та впродовж року. Статистичним обробленням даних мережі зі 16 пловіографів у Граці отримано максимальні коефіцієнти просторової нерівномірності випадання дощів за шаром і за інтенсивністю, як функція (6) періоду одноразового перевищення за  $P = 0,2 \div 1,0$  рік, що можуть бути використані для міст з подібним кліматом і малою кількістю гідрометеорологічних пунктів.

**Подяка.** Дослідження виконано в межах науково-дослідної роботи "Екологічні та економічні методи управління дощовим стоком з урбанізованих територій з пріоритетним дослідженням явища першого залпового скиду" за програмою реалізації спільних українсько-австрійських науково-дослідних проєктів у 2021–2022 рр., що фінансується Міністерством освіти і науки України та Austria's Agency for Education and Internationalisation.

## References

1. Bartholy, J., & Pongrácz, R. (2005). Tendencies of extreme climate indices based on daily precipitation in the Carpathian Basin for the 20th century. *Időjárás. Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*, 109(1), 1–20. Retrieved from: <https://www.met.hu/downloads.php?fn=/metadmin/newspaper/2017/08/4fff508ad715fc3c9541b29f2d2d1df9-idojaras-vol109-no1.pdf>
2. Bell, V. A., & Moore, R. J. (2000). The sensitivity of catchment runoff models to rainfall data at different spatial scales. *Hydrology and Earth System Sciences*, 4, 653–667. <https://doi.org/10.5194/hess-4-653-2000>
3. Bellos, V., Papageorgaki, I., Kourtis, I., et al. (2020). Reconstruction of a flash flood event using a 2D hydrodynamic model under spatial and temporal variability of storm. *Natural Hazards*, 101, 711–726. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03891-3>
4. Chaubey, I., Haan, C. T., Grunwald, S., & Salisbury, J. M. (1999). Uncertainty in the model parameters due to spatial variability of rainfall. *Journal of Hydrology*, 220(1-2), 48–61. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00063-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00063-3)
5. Cristiano, E., ten Veldhuis, M.-C., & van de Giesen, N. (2017). Spatial and temporal variability of rainfall and their effects on hydrological response in urban areas – A review. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 3859–3878. <https://doi.org/10.5194/hess-21-3859-2017>
6. DBN V.2.5-75:2013. (2013). Minrehionbud Ukrayiny. Kyiv. [In Ukrainian].
7. Emmanuel, I., Andrieu, H., Leblais, E., & Flahaut, B. (2012). Temporal and spatial variability of rainfall at the urban hydrological scale. *Journal of Hydrology*, 430–431, 162–172. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.02.013>
8. European waters. (2018). Assessment of status and pressures 2018. EEA Report No. 7, *European Environment Agency*, 85 p.
9. James, W., & Rossman, L. (2010). *Water Systems Models. Users Guide to SWMM 5, 13th ed.* CHI Press Publication, Ontario, Canada, 905 p.
10. Leimgruber, J., Stefflbauer, D. B., Krebs, G., Tscheikner-Gratl, F., & Muschalla, D. (2018). Selecting a series of storm events for a model-based assessment of combined sewer overflows. *Urban Water Journal*, 15(5), 453–460. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2018.1508601>
11. Maier, G., Krebs, G., Pichler, M., Muschalla, D., & Gruber, G. (2020). Spatial rainfall variability in urban environments – high-density precipitation measurements on a city-scale. *Water*, 12(4), 1157 p. <https://doi.org/10.3390/w12041157>
12. Mysak, I., Zhuk, V., & Petrushka, K. (2020). Comparison of the methods of surface runoff modelling from the urbanized subcatchments for estimation of peak loads on the environment. *Environmental Problems*, 5(1), 1–6. <https://doi.org/10.23939/ep2020.01.001>
13. State of the Global Climate 2020. (2021). WMO-No.1264. World Meteorological Organization. 38 p.
14. Tkachuk, S., & Zhuk, V. (2012). Stormwater regulation on drainage systems. Lviv: *Publishing Lviv Polytechnic*, 216 p. [In Ukrainian].
15. Tokay, A., Roche, R. J., & Bashor, P. G. (2014). An experimental study of spatial variability of rainfall. *Journal of Hydrometeorology*, 15, 801–812. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-13-031.1>
16. Villarini, G., Mandapaka, P. V., Krajewski, W. F., & Moore, R. J. (2008). Rainfall and sampling uncertainties: A rain gauge perspective. *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, 113. <https://doi.org/10.1029/2007JD009214>
17. Website Meteopost. Retrieved from: <https://meteopost.com/weather/climate/19.11.2021>
18. Zawilski, M., & Brzezińska, A. (2014). Areal rainfall intensity distribution over an urban area and its effect on a combined sewerage system. *Urban Water Journal*, 11(7), 532–542. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2013.831909>
19. Zhuk, V. M., Vovk, L. I., Matlai, I. I., & Popadiuk, I. Yu. (2018). Correlation between the total and effective imperviousness in



- stormwater modelling. *Scientific Bulletin of UNFU*, 28(10), 92–95. <https://doi.org/10.15421/40281019>
20. Zhuk, V., Vovk, L., Matlai, I., & Popadiuk, I. (2021). Maximum daily stormwater runoff flow rates at the inlet of the Lviv WWTP

based on the results of systematic hydrologic observations of the catchment. In: Blikharskyi Z. (Eds) *Proceedings of EcoComfort 2020. Lecture Notes in Civil Engineering*, Vol. 100. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9\\_63](https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9_63)

**V. M. Zhuk<sup>1</sup>, M. S. Malovanyy<sup>1</sup>, I. V. Mysak<sup>1</sup>, I. S. Tymchuk<sup>1</sup>, Dirk Muschalla<sup>2</sup>, Marcus Pichler<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

<sup>2</sup> Graz University of Technology, Graz, Austria

## TEMPORAL AND SPATIAL UNEVENNESS OF RAINFALL IN MODELING SURFACE RUNOFF FROM URBAN AREAS

Considering the spatial and temporal rainfall variability has a significant impact on the accuracy of hydrological models of the stormwater runoff. According to the results of statistical processing of the daily depths of the precipitation layers in Lviv city for the period 1945-2020, a tendency of increasing the annual depth of the precipitation layer is obtained by an average of 1.68 mm/year at the current average annual value of 733.4 mm/year. The average annual number of wet weather days in Lviv systematically decreases on 0.244 year<sup>-1</sup>, while the annual amounts of large rainfalls on the contrary increase on 0.129 year<sup>-1</sup> for the rainfalls with a daily depth  $h_d \geq 1$  mm and on 0.088 year<sup>-1</sup> for  $h_d \geq 10$  mm. For all runoff-forming rainfall events in Lviv, their average annual amount and mean depth of the rainfall increase when considering more recent periods, which confirms the general global trend of increasing the frequency and intensity of the largest storms, regardless of the local trend of annual precipitation change. Using the recommendations of the Ukrainian regulatory document DBN V.2.5-75:2013, a linear correlation of the spatial rainfall intensity variability coefficient on the total area of the urbanized catchment is obtained. It is indicated that this method does not align with the well-founded and verified in practice fact of the dependence of the spatial rainfall depth and intensity variability coefficients on the return period. A comparative analysis of the actual daily precipitation depths for the 24 largest storms in Lviv and Graz (Austria) in 2017-2018 indicates the similarity of their distribution in both cities so in terms of values as during the seasons. Statistical processing of the data of a network of 16 rain gauges in Graz city yielded maximum coefficients of spatial non-uniformity of rainfall by depth and by intensity as a linear function of the return period, which can be used to estimate spatial rainfall variability in cities with similar climate and a small number of rain gauges.

**Keywords:** precipitation depth; rain gauge; rainfall intensity; return period; spatial variability coefficient.