

ЕМПІРИЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОЇ ВОДОНЕПРОНИКНОЇ ПЛОЩІ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО СТОКУ В УМОВАХ М. КИЄВА

Микола Ситніченко¹, Ганна Анацька²

¹ ДП «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства»

35, вул. Митрополита Василя Липківського, Київ, 03035, Україна

^{1,2} Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

15, вул. Карпатська, Івано-Франківськ, 76019, Україна

¹ канд. техн. наук, sytnichenko@ukr.net, orcid.org/0000-0003-3539-8525

² anazkaya935@gmail.com, orcid.org/0000-0001-9695-5810

DOI: 10.32347/2524-0021.2025.52.111-120

Анотація. Водонепроникні поверхні в урбанізованих районах накопичують забруднювачі та швидко транспортують їх у водні системи, роблячи водонепроникні поверхні ключовою прогностичною змінною для оцінки скидів забруднюючих речовин. Хоча загальна водонепроникна площа (Total Impervious Area, TIA) є поширеним показником, ефективна водонепроникна площа (Effective Impervious Area, EIA), яка є частиною TIA, безпосередньо з'єднаною з дренажною системою, визнана кращою змінною для прогнозування обсягів стоку та зміни екосистеми. Однак, пряме картування EIA є занадто витратним, але може враховуватись шляхом створення регіональних регресійних моделей. Мета роботи це: визначення регресійної моделі між TIA та EIA для умов м. Києва з урахуванням інфільтраційного потенціалу ґрунту та ступеня вологості водозбору. Шляхом моделювання були згенеровані набори даних EIA для різних часток TIA (0,2; 0,4; 0,6; 0,8) та різних коефіцієнтів фільтрації. Для цих вибірок обчислено дескриптивну статистику (середнє, медіана), на основі якої апроксимовано регресійні співвідношення. Встановлено, що взаємозв'язок між TIA та статистичними показниками EIA (середнє, медіана) найкраще описується ступеневою регресійною моделлю вигляду $EIA = a \cdot TIA^b$. Отримані емпіричні рівняння для Києва, що забезпечують статистичну оцінку популяцій EIA для заданого значення TIA.

Ключові слова: водонепроникна площа, загальна водонепроникна площа (TIA), ефективна водонепроникна площа (EIA), поверхневий стік, гідрологія, ступенева регресія.

ВСТУП

Водонепроникні поверхні збирають та накопичують забруднюючі речовини, що випадають з атмосфери, транспортних засобів або надходять з інших джерел. Під час дощів та сніготанення накопичені забруднюючі речовини швидко змиваються та швидко транспортуються у водні системи. Особливо це помітно на урбанізованих територіях зі значною часткою водонепроникного покриття. Дослідження з моніторингу та моделювання неодноразово вказували на те, що навантаження міських забруднювачів безпосередньо пов'язане з водонепроникністю вододілу. У більшості імітаційних та

емпіричних моделей, що використовуються для оцінки скидів забруднюючих речовин у водні об'єкти ключовою прогностичною змінною є водонепроникність.

Відсоток непроникної поверхні або покриття в ландшафті є найбільш часто використовуваним показником урбанізації, що визначається як частка водозбору, покрита штучними поверхнями, що не інфільтрують воду, такими як бетон, асфальт і будівлі. Проте цей параметр має свої обмеження, частково через те, що він не був послідовно використаний або визначений.

Однак, з гідрологічної точки зору, це визначення є неповним з двох причин. По-

перше, воно ігнорує номінально "попередні" поверхні, які є достатньо ущільненими або мають настільки низьку проникність, що швидкість стоку з них подібна або не відрізняється від швидкості стоку з дорожнього покриття. Другим обмеженням є те, що він включає в себе деякі поверхні з твердим покриттям, які можуть ніяк не впливати на реакцію зливого стоку в руслі нижче за течією потоку.

Перше з цих обмежень – утворення значного стоку з номінально первинних поверхонь – зазвичай ігнорується при характеристиці міської забудови. Друге з цих обмежень – включення непроникних ділянок, що не беруть участі у процесі, формально вирішується за допомогою концепції ефективної непроникної площі, яка визначається як непроникні поверхні з прямим гідравлічним зв'язком з розташованою нижче за течією системою водовідведення (або струмком).

Таким чином існує два загальні способи кількісного визначення водонепроникного покриття:

Загальна водонепроникна площа (TIA) – вся водонепроникна площа водозбору.

Ефективна водонепроникна площа (EIA) або безпосередньо під'єднана водонепроникна площа ($DCIA$) – водонепроникна площа у водозбірному басейні, яка безпосередньо з'єднана з руслами потоку (тобто опади, що випадають на цю площу, ефективно транспортуються до потоку).

Багато досліджень виявили, що ефективна водонепроникна площа є кращим прогнозом зміни екосистеми в руслах міських потоків [1].

Безпосередньо під'єднана водонепроникна площа ($DCIA$) вважається кращою змінною для прогнозування обсягів стоку на основі кількості опадів, ніж загальна водонепроникна площа (TIA), оскільки безпосередньо з'єднані водонепроникні області ефективно передають опади в русло потоку з мінімальним перехопленням, накопиченням та опором потоку. У кількох дослідженнях були опубліковані результати докладних польових обстежень, які проводилися для кількісної оцінки часток TIA і $DCIA$ на різних ділянках [2-12].

Встановлено що часові витрати та вартість картування з'єднання водонепроникних поверхонь із системами водовідведення поверхневих вод та водними шляхами зазвичай є непомірно високими, навіть для невеликих водозбірних площ [13].

Таким чином, фракція $DCIA$ зазвичай оцінюється з використанням тих же методів, які використовуються для оцінки TIA .

Декілька досліджень [4, 9, 12, 14-17] використовували виміряні значення $DCIA$ для розробки рівнянь для оцінки $DCIA$. Ці моделі регресії $DCIA$ були розроблені через велику кількість зусиль, необхідних для точного картування $DCIA$. Чотири дослідження використовують моделі лінійної регресії, а три використовують моделі регресії степеневої функції. Різні рівняння дають різні оцінки $DCIA$, а доступні рівняння базуються на невеликих чи географічно обмежених вибірках.

Sutherland (1995) [15] розрахував рівняння регресії з урахуванням якісних категорій $DCIA$ для ділянок, віднесених до дуже, низького, середнього та високого ступеня зв'язку. Ці регресійні моделі забезпечують кількісне співвідношення між TIA та $DCIA$, але вони вимагають детального знання ступеня зв'язку.

Набір даних парних вимірювань TIA та $DCIA$ був зібраний для оцінки статистики коефіцієнта стоку для використання в проєкті *SELDM* (стохастичного емпіричного навантаження та розведення) (рис. 1) [18]. Цей набір даних включає виміряні значення TIA та $DCIA$ на 477 ділянках з 15 досліджень. Дані вказують, що існує істотна варіація значень $DCIA$ у всьому діапазоні TIA . Модель парних значень у діапазоні TIA вказує на те, що між TIA і $DCIA$ немає жодного значущого регресійного зв'язку. Набір рівнянь регресії, що зв'язують $DCIA$ з TIA , було розроблено для оцінки статистики коефіцієнта стоку (рис. 6-5). Парні значення TIA А і $DCIA$ були згруповані за значенням TIA в 20 інтервалів з рівною шириною фракції TIA близько 0,0495, а значення TIA 1,0 були згруповані в 21-му інтервалі.

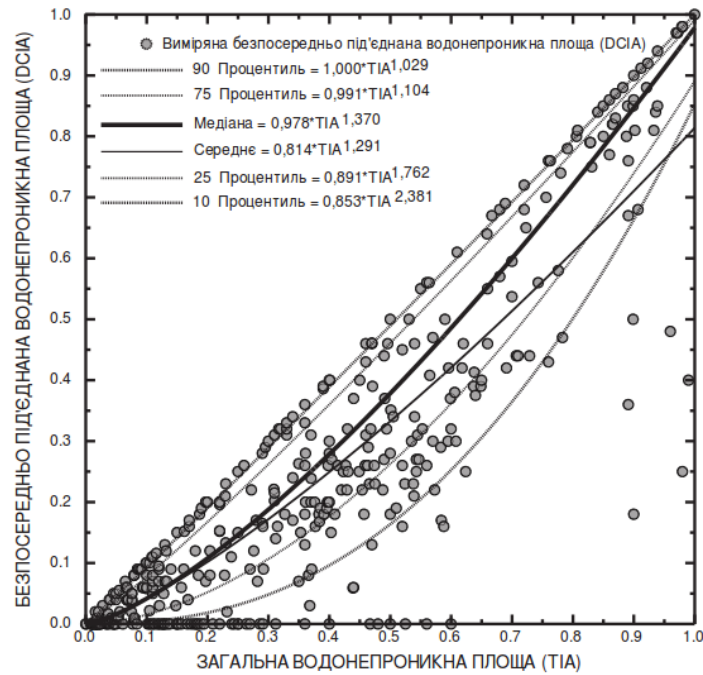


Рис. 1. Графік, що показує виміряні значення загальної водонепроникної площі (*TIA*) та безпосередньо пов'язаної водонепроникної площі (*DCIA*) на 477 ділянках з оцінними значеннями рівняння регресії для 10-го, 25-го, 75-го та 90-го процентилей, медіани та середнього *DCIA* з використанням медіанного значення *TIA* у 21 рівномірно розподілених інтервалах значень *TIA* [18]

Fig. 1. Graph showing measured values of the total impervious area (*TIA*) and directly connected impervious area (*DCIA*) at 477 sites with estimated regression-equation values for the 10th, 25th, 75th and 90th percentiles, the median, and the average *DCIA* using the median *TIA* value within 21 evenly spaced *TIA*-value bins [18]

Середнє значення *TIA* та середнє значення *DCIA*, а також 10-й, 25-й, 50-й (медіана), 75-й та 90-й процентиль значень *DCIA* в кожному діапазоні були розраховані. Регресійні співвідношення були розроблені між медіанним значенням *TIA* та кожною статистикою *DCIA*. Лінії регресії та пов'язані з ними рівняння на рис. 1 дають статистичні оцінки популяцій *DCIA*, які можуть виникнути для заданого значення *TIA*.

Отримані рівняння є більш кількісними, ніж рівняння, розроблені Sutherland (1995) [15], але користувачу все одно необхідні знання з ділянки водозбору та певні професійні судження, щоб зробити реалістичну оцінку *DCIA*.

МЕТА І МЕТОДИ

Метою даного завдання є визначення регресійну модель між загальною водонепроникною площею та ефективною водонепроникною площею для умов м. Київ з урахуванням інфільтраційного потенціалу ґрунту

та ступеня вологості водозбору.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОЯСНЕННЯ

Найбільш важливим є розрізнення між загальною водонепроникною площею (*TIA*) та ефективною водонепроникною площею (*EIA*). *TIA* – відповідає частці покритих поверхонь у загальній площі водозбору. *EIA* – це розрахункова величина, яка являє собою невимірну площу поверхні водозбору та кількісно визначається частиною площі водозбору, з якої стік поверхневих стічних вод, після вирахування ефекту змочування та заповнення депресійного накопичення, повністю отримує ефективний стік у дренажній системі. Вона визначається балансом стоку опадів, пов'язаним з застосуванням, площі водозбору

$$hP \cdot A \cdot C = hP \cdot EIA \Rightarrow EIA = A \cdot C, \quad (1)$$

де *hP* – глибина опадів; *A* – площа водозбору; *C* – коефіцієнт стоку; *EIA* – ефективна водонепроникна площа водозбору.

Величина EIA , через зв'язок з коефіцієнтом стоку, специфічним для застосування, залежить від події та представляє відповідну «ефективну поверхню стоку».

Моделі стоку поверхневих стічних вод, як правило, містять різні підходи для визначення втрат і тому повинні базуватися на фактичній площі приєднаної поверхні або, не враховувати внесок у стік водопроникних поверхонь, на асфальтовану поверхню.

Коефіцієнт стоку водозбірної площі значною мірою залежить від місцевих умов (тобто властивостей поверхні її ухилу, типу дренажних властивостей та впровадження (децентралізованих) заходів управління поверхневими водами), а також від періоду опадів або розглядуваного періоду. За наявності присутніх систем та чітко визначених підводних басейнів коефіцієнт стоку можна визначити математично за допомогою вимірювання стоку та опадів.

Використовуючи рівняння регресії для визначення параметра F/P який характеризує об'єм втрат від загальної кількості опадів

залежно від властивостей поверхні, а саме водонепроникності й коефіцієнту фільтрації [19]. Розрахуємо коефіцієнт стоку який відповідно є одиниця мінус відношення загальних втрат опадів до загальної глибини опадів.

Враховуючи зв'язок (1) для умов м. Київ були змодельовані набори даних ефективної водонепроникної площі відповідно для загальної водонепроникної площі 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 та коефіцієнтом фільтрації 0,5; 1; 2; 4; 7; 12; 20 мм/год.

Для вибірок з генерованих значень ефективної водонепроникної площі з відповідною часткою загальної водонепроникної площі обчислені статистичні показники відповідно до яких побудовані коробкові діаграми що наведені на рис. 2. Згруповані значення ефективної водонепроникної площі продемонстрували мінливість ефективної водонепроникної площі для кожного значення загальної водонепроникної площі.

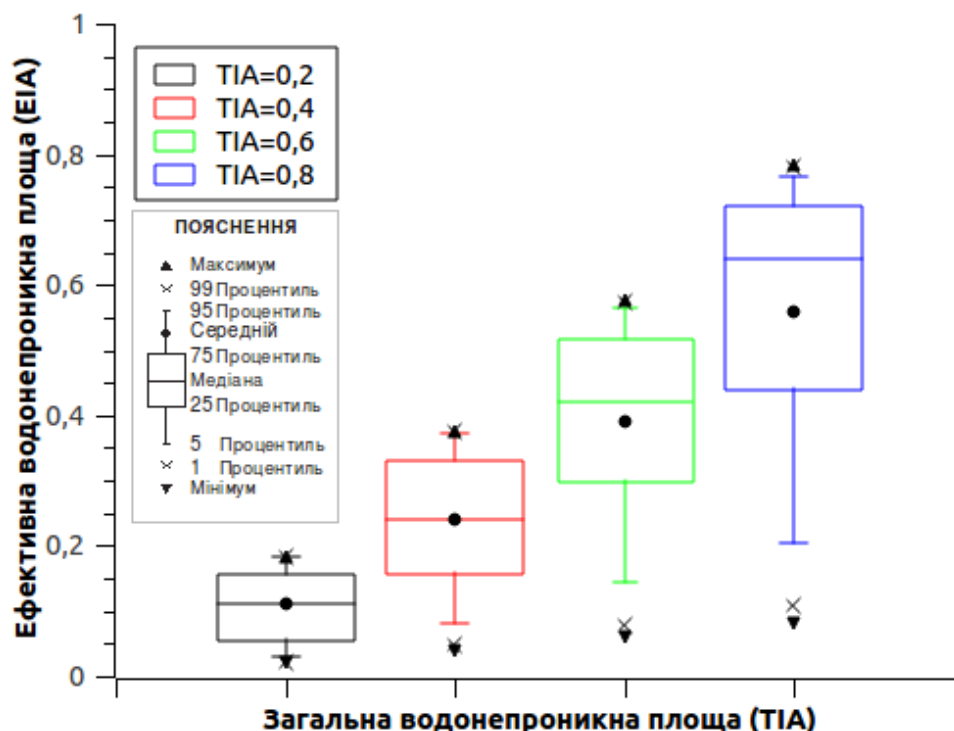


Рис. 2. Вибірки ефективної водонепроникної площі, що генеруються для загальної водонепроникної площі з часткою 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 та коефіцієнтом фільтрації 0,5; 1; 2; 4; 7; 12; 20 мм/год, розраховані з використанням рівнянь регресії для визначення параметру F/P для умов м. Київ

Fig. 2. Samples of effective impervious area generated for the total impervious area with a fraction of 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 and a filtration coefficient of 0.5, 1, 2, 4, 7, 12, 20 mm/h, were calculated using regression equations to determine the parameter F/P for the conditions of the city of Kyiv

Дескриптивна статистика вибірок ефективної водонепроникної площі для загальної водонепроникної площі з часткою 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 у вигляді функцій статистичних характеристик зображених на рис. 3. Було встановлено що функції ефективної водонепроникної площі від статистичних показників середнього значення, медіани апроксимуються ступеневою регресією.

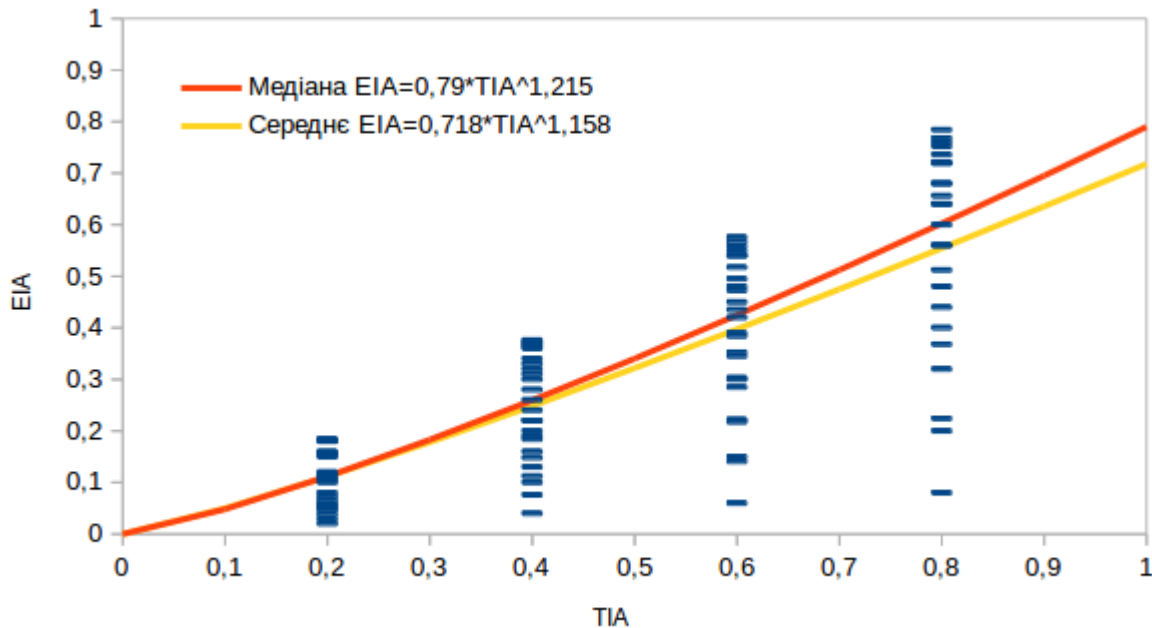


Рис. 3. Дескриптивна статистика вибірок ефективної водонепроникної площі (EIA) для загальної водонепроникної площі (TIA) з часткою 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 у вигляді функцій статистичних характеристик для умов м. Київ

Fig. 3. Descriptive statistics of samples of effective impervious area (EIA) for total impervious area (TIA) with a fraction of 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 in the form of statistical characteristic functions for the conditions of the city of Kyiv

В загальному вигляді регресійна модель, яка використана для оцінки ефективної водонепроникної площі від загальної водонепроникності площі визначається за формулою:

$$EIA = a \cdot (TIA)^b, \quad (2)$$

де TIA – загальна водонепроникна площа;
 a , b – емпіричні коефіцієнти.

Рівняння, яке описує взаємозв'язок між TIA і EIA , як і в випадку публікації Gregory E. Granato [18] продемонстрували що вони отримані в результаті статистичної оцінки популяцій EIA , які можуть виникнути для заданого значення TIA .

Рівняння та коефіцієнти кореляції отриманих залежностей ефективної

Використовуючи наведені висновки та згенеровані значення під час моделювання отримані ряди даних залежності ефективної водонепроникної площі від загальної водонепроникності площі водозбору для умов м. Київ які були апроксимовані ступеневою регресійною моделлю (див. рис. 4).

водонепроникної площі (EIA) від частки загальної водонепроникної площі (TIA) наведені в табл. 1 (для медіани EIA рівняння регресії $EIA = 0,294 \cdot (TIA)^{1,215}$, для середнього значення EIA рівняння регресії $EIA = 0,347 \cdot (TIA)^{1,158}$).

Регресійні моделі, які використовуються для оцінки значень ефективної водонепроникної площі (EIA) пов'язані з загальною водонепроникною площею басейна (TIA) [2-18]. Найбільш поширеними формулами є лінійні та ступеневі (табл. 1).

Порівняння ефективної водонепроникної площі (EIA), оцінених за допомогою різних рівнянь регресії, показує суттєві варіації по всьому діапазону значень загальної водонепроникної площі (TIA) (рис. 5).

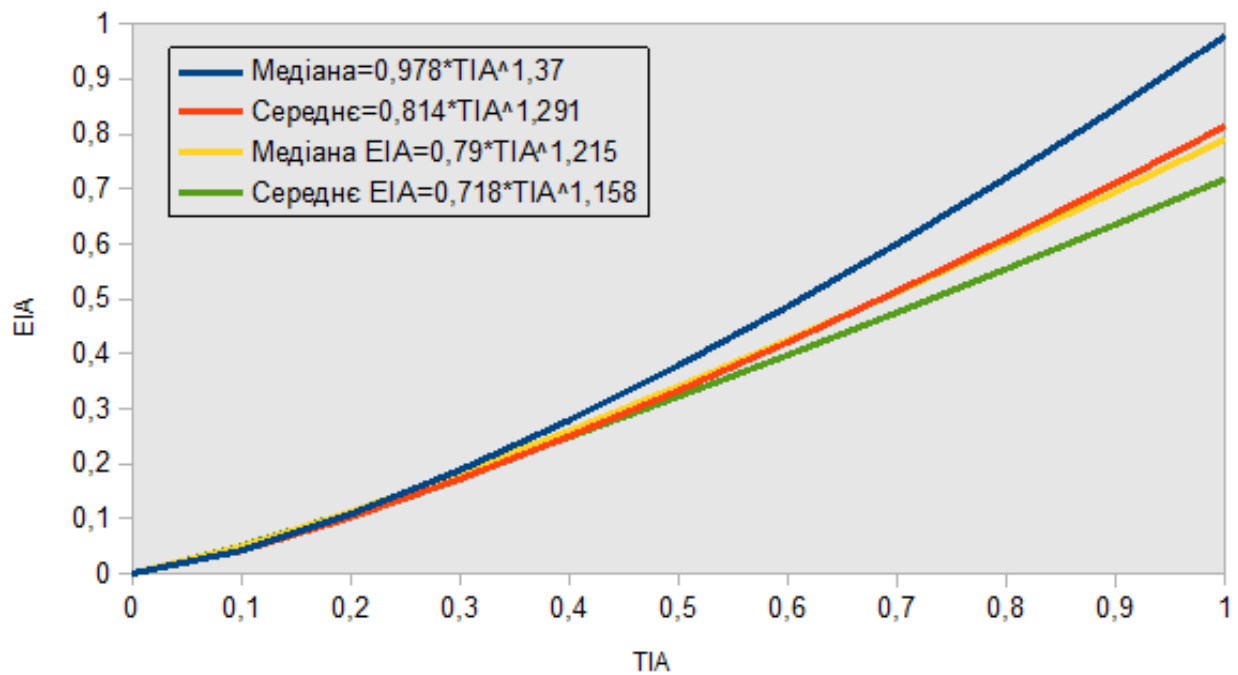


Рис. 4. Рівняння регресії для оцінки ефективної водонепроникної площі (EIA) від частки загальної водонепроникної площі (TIA) для умов м. Київ та Gregory E. Granato [18]

Fig. 4. Regression equation for estimating effective impervious area (EIA) from the fraction of total impervious area (TIA) for Kyiv city conditions and Gregory E. Granato [18]

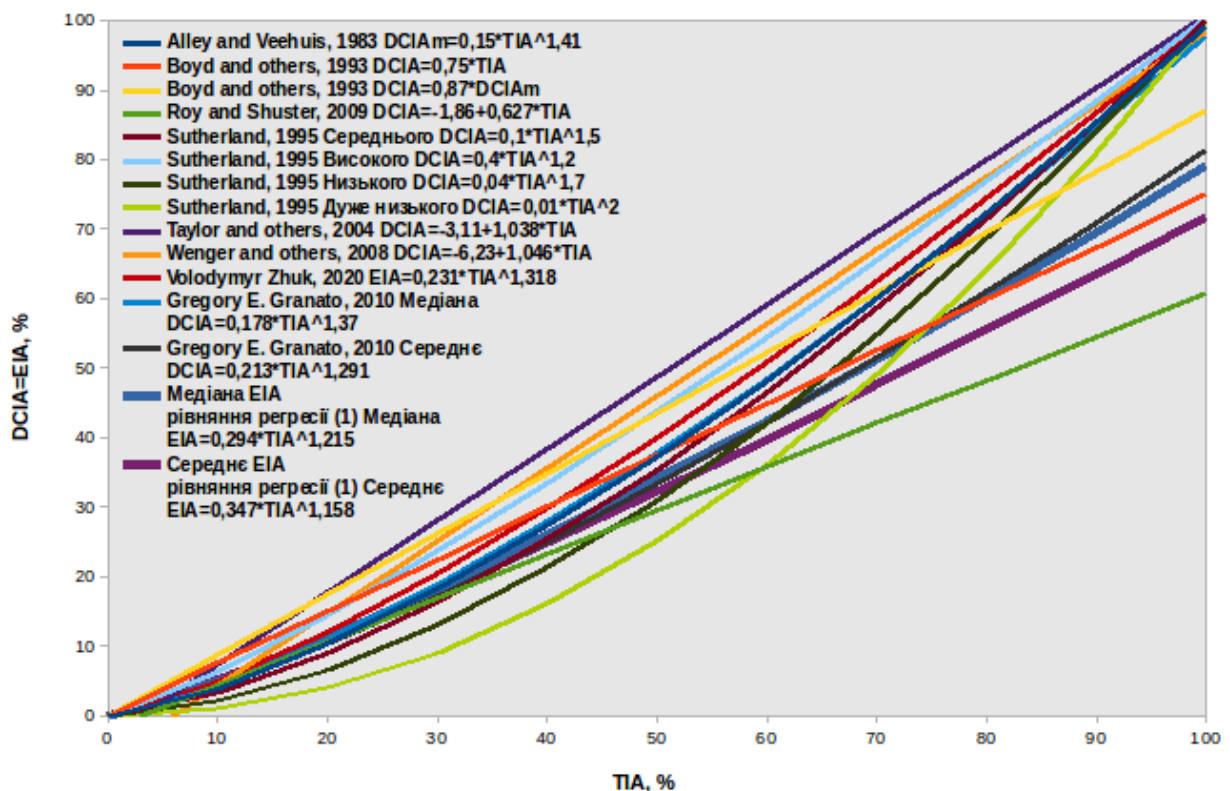


Рис. 5. Порівняння наявних регресійних моделей розроблених для оцінки показника ефективна водонепроникна площа (EIA) або безпосередньо під'єднана водонепроникна площа (DCIA) з отриманими рівняннями

Fig. 5. Comparison of existing regression models developed to estimate the effective impervious area (EIA) or directly connected impervious area (DCIA) with the resulting equations

Табл. 1. Рівняння регресії розроблені для оцінки показника ефективна водонепроникна площа (*EIA*), % або безпосередньо під'єднана водонепроникна площа (*DCIA*), %**Table 1.** Regression equations are developed to estimate the effective impervious area (*EIA*), % or directly connected impervious area (*DCIA*), %

Дослідження	Тип регресії	Кутовий коефіцієнт	Коефіцієнт ухилу	Кількість	R ²	Формула
Alley and Veehuis, 1983	Ступенева	0,15	1,41	14	0,98	$DCIA_m = 0,15 * TIA^{1,41}$
Boyd and others, 1993	Лінійна	0	0,75	38	0,86	$DCIA = 0,75 * TIA$
	Лінійна	0	0,87	38	0,87	$DCIA = 0,87 * DCIA_m$
Roy and Shuster, 2009	Лінійна	-1,86	0,627	521	0,57	$DCIA = -1,86 + 0,627 * TIA$
Sutherland, 1995	Ступенева	0,1	1,5	42	-	Середнього $DCIA = 0,1 * TIA^{1,5}$
	Ступенева	0,4	1,2	42	-	Високого $DCIA = 0,4 * TIA^{1,2}$
	Ступенева	0,04	1,7	42	-	Низького $DCIA = 0,04 * TIA^{1,7}$
	Ступенева	0,01	2	42	-	Дуже низького $DCIA = 0,01 * TIA^2$
Taylor and others, 2004	Лінійна	-3,11	1,038	16	0,985	$DCIA = -3,11 + 1,038 * TIA$
Wenger and others, 2008	Лінійна	-6,23	1,046	15	-	$DCIA = -6,23 + 1,046 * TIA$
Volodymyr Zhuk, 2020	Ступенева	0,231	1,318	75	-	$EIA = 0,231 * TIA^{1,318}$
Gregory E. Granato, 2010	Ступенева	0,178	1,37	477	-	Медіана $DCIA = 0,178 * TIA^{1,37}$
	Ступенева	0,213	1,291	477	-	Середнє $DCIA = 0,213 * TIA^{1,291}$
Медіана <i>EIA</i> рівняння регресії (2)	Ступенева	0,294	1,215	100	0,99	Медіана $EIA = 0,294 * TIA^{1,215}$
Середнє <i>EIA</i> рівняння регресії (2)	Ступенева	0,347	1,158	100	0,99	Середнє $EIA = 0,347 * TIA^{1,158}$

Отримана регресійна модель між загальною водонепроникною площею та ефективною водонепроникною площею для умов м. Київ з урахуванням інфільтраційного потенціалу ґрунту та ступеня вологості водозбору.

Апроксимовані рівняння регресії ефективною водонепроникної площі від загальної водонепроникної площі для умов м. Київ отримані в результаті статистичної оцінки популяцій *EIA*, які можуть виникнути для заданого значення *TIA*.

Для визначення ефективною водонепроникної площі водозбору для умов м. Київ можна використовувати значення

ефективної водонепроникної площі (*EIA*) які розраховані відповідно до рівняння (2).

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Підтверджено, що Ефективна водонепроникна площа (*EIA*) або Безпосередньо під'єднана водонепроникна площа (*DCIA*) є кращою прогностичною змінною для обсягів стоку та змін в міських водних об'єктах порівняно із Загальною водонепроникною площею (*TIA*), оскільки вона враховує лише гідралічно зв'язані поверхні.

2. Згруповані значення *EIA*, змодельовані для умов м. Києва, продемонстрували

істотну мінливість ефективної водонепроникної площі в залежності від фіксованих значень *TIA*.

3. Розроблена регресійна модель, що пов'язує *TIA* та *EIA* для умов м. Києва, яка враховує інфільтраційний потенціал ґрунту та ступінь вологості водозбору.

4. Встановлено, що функції *EIA* від статистичних показників (середнього значення, медіани) апроксимуються ступеневою регресією.

5. Для визначення ефективної водонепроникної площі водозбору в м. Києві рекомендовано використовувати ступеневе рівняння $EIA = a \cdot (TIA)^b$, з такими емпіричними коефіцієнтами:

– для медіани *EIA*:

$$EIA = 0,294 \cdot (TIA)^{1,215};$$

– для середнього значення *EIA*:

$$EIA = 0,347 \cdot (TIA)^{1,158}.$$

Отримані рівняння є результатом статистичної оцінки популяції *EIA*, які можуть виникнути для заданого значення *TIA*, і є більш кількісними, ніж попередні моделі, але все ще вимагають професійного судження користувача для реалістичної оцінки.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Hatt B. E., Fletcher T. D., Walsh C. J., Taylor S. L.** The Influence of Urban Density and Drainage Infrastructure on the Concentrations and Loads of Pollutants in Small Streams // *Environmental Management*, 2004, 34(1). <https://doi.org/10.1007/s00267-004-0221-8>
2. **Metzker K. D., Gold R. L., Thomas R. P.** Rainfall and runoff data for the Albuquerque, New Mexico, metropolitan area, 1984-1988 // *Open-File Report*. 1993. <https://doi.org/10.3133/ofr92653>
3. **Mustard M. H., Driver N. E., Chyr J., Hansen B. G.** US Geological Survey urban-stormwater data base of constituent storm loads; characteristics of rainfall, runoff, and antecedent conditions; and basin characteristics // *US Geological Survey*, 1987. <https://doi.org/10.3133/wri874036>
4. **Boyd M. J., Bufill M. C., Knee R. M.** Pervious and impervious runoff in urban catchments // *Hydrological Sciences Journal*, 1993. 38(6), 463–478. <https://doi.org/10.1080/02626669309492699>
5. **Kluitenberg Ed.** Determination of impervious area and directly connected impervious area: Lansing MI // *Wayne County Rouge Program Office (RPO) Memorandum*. 1994. Retrieved from <http://www.rougeriver.com/>
6. **Knutilla R. L., Veenhuis J. E.** Computer simulation of storm runoff for three watersheds in Albuquerque, New Mexico // *US Geological Survey*. 1994. <https://doi.org/10.3133/wri944143>
7. **Wigmosta M. S., Burges S. J., Meena J. M.** Modeling and monitoring to predict spatial and temporal hydrologic characteristics in small catchments: *University of Washington Water Resources Series Technical Report No. 137*. 1994.
8. **Waschbusch R. J.** Stormwater-runoff data, Madison, Wisconsin, 1993-94. *Open-File Report*. 1996. <https://doi.org/10.3133/ofr95733>
9. **Taylor S. L., Roberts S. C., Walsh C. J., Hatt B. E.** Catchment urbanisation and increased benthic algal biomass in streams: linking mechanisms to management // *Freshwater Biology*, 2004, 49(6), 835–851. Portico. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2004.01225.x>
10. **Selbig W. R., Bannerman R. T.** Evaluation of Street Sweeping as a Stormwater-Quality-Management Tool in Three Residential Basins in Madison, Wisconsin // *Scientific Investigations Report*. 2007. <https://doi.org/10.3133/sir20075156>
11. **Selbig W. R., Bannerman R. T.** A comparison of runoff quantity and quality from two small basins undergoing implementation of conventional- and low-impact-development (LID) strategies: Cross Plains, Wisconsin, water years 1999–2005 // *Scientific Investigations Report*. 2008. <https://doi.org/10.3133/sir20085008>
12. **Roy A. H., Shuster W. D.** Assessing Impervious Surface Connectivity and Applications for Watershed Management // *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 2009, 45(1), 198–209. Portico. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2008.00271.x>
13. **Lee J. G., Heaney J. P.** Estimation of Urban Imperviousness and its Impacts on Storm Water Systems // *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2003. 129(5), 419–426. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9496\(2003\)129:5\(419\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9496(2003)129:5(419))
14. **Alley W. M., Veenhuis J. E.** Effective Impervious Area in Urban Runoff Modeling // *Journal of Hydraulic Engineering*, 1983, 109(2), 313–319. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(1983\)109:2\(313\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(1983)109:2(313))
15. **Sutherland R.** Methodology for estimating effective impervious area // *Watershed Protection Techniques*, 1995, 2(1), 47–51.
16. **Wenger S. J., Peterson J. T., Freeman M. C., Freeman B. J., Homans D. D.** Stream fish

occurrence in response to impervious cover, historic land use, and hydrogeomorphic factors // Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2008, 65(7), 1250–1264. <https://doi.org/10.1139/f08-046>

17. Жук В., Вовк Л., Матлай І., Попадюк І., Мисак І., Фасуляк В. Залежність між загальною та ефективною водонепроникністю для житлових кварталів міста Львів // Журнал екологічної інженерії, 2020. 21(5). <https://doi.org/10.12911/22998993/122191>

18. Granato G. E. Methods for development of planning-level estimates of stormflow at unmonitored sites in the conterminous United States: Federal Highway Administration report FHWA-HEP-09-005. 2010. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/268034350_Methods_for_development_of_planning-level_estimates_of_stormflow_at_unmonitored_sites_in_the_conterminous_United_States

19. Ситніченко М., Анацька Г. Моделювання об'єму потоку поверхневих стічних вод на прикладах міста Києва // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки, 2023, (45), 71–77. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.45.71-77>

REFERENCES

- Hatt, B. E., Fletcher, T. D., Walsh, C. J., & Taylor, S. L. (2004). The Influence of Urban Density and Drainage Infrastructure on the Concentrations and Loads of Pollutants in Small Streams. *Environmental Management*, 34(1). <https://doi.org/10.1007/s00267-004-0221-8>
- Metzker, K. D., Gold, R. L., & Thomas, R. P. (1993). Rainfall and runoff data for the Albuquerque, New Mexico, metropolitan area, 1984-1988. *Open-File Report*. <https://doi.org/10.3133/ofr92653>
- Mustard, M. H., Driver, N. E., Chyr, J., & Hansen, B. G. (1987). US Geological Survey urban-stormwater data base of constituent storm loads; characteristics of rainfall, runoff, and antecedent conditions; and basin characteristics. *US Geological Survey*. <https://doi.org/10.3133/wri874036>
- Boyd, M. J., Bufill, M. C., & Knee, R. M. (1993). Pervious and impervious runoff in urban catchments. *Hydrological Sciences Journal*, 38(6), 463–478. <https://doi.org/10.1080/02626669309492699>
- Kluitenberg, Ed, (1994). Determination of impervious area and directly connected impervious area: Lansing MI, Wayne County Rouge Program Office (RPO) Memorandum. Retrieved from <http://www.rouge river.com/>
- Knutilla, R. L., & Veenhuis, J. E. (1994). Computer simulation of storm runoff for three watersheds in Albuquerque, New Mexico. *US Geological Survey*. <https://doi.org/10.3133/wri944143>
- Wigmosta, M. S., Burges, S. J., & Meena, J. M. (1994). Modeling and monitoring to predict spatial and temporal hydrologic characteristics in small catchments: *University of Washington Water Resources Series Technical Report No. 137*.
- Waschbusch, R. J. (1996). Stormwater-runoff data, Madison, Wisconsin, 1993-94. *Open-File Report*. <https://doi.org/10.3133/ofr95733>
- Taylor, S. L., Roberts, S. C., Walsh, C. J., & Hatt, B. E. (2004). Catchment urbanization and increased benthic algal biomass in streams: linking mechanisms to management. *Freshwater Biology*, 49(6), 835–851. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2004.01225.x>
- Selbig, W. R., & Bannerman, R. T. (2007). Evaluation of Street Sweeping as a Stormwater-Quality-Management Tool in Three Residential Basins in Madison, Wisconsin. *Scientific Investigations Report*. <https://doi.org/10.3133/sir20075156>
- Selbig, W. R., & Bannerman, R. T. (2008). A comparison of runoff quantity and quality from two small basins undergoing implementation of conventional- and low-impact-development (LID) strategies: Cross Plains, Wisconsin, water years 1999–2005. *Scientific Investigations Report*. <https://doi.org/10.3133/sir20085008>
- Roy, A. H., & Shuster, W. D. (2009). Assessing Impervious Surface Connectivity and Applications for Watershed Management1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 45(1), 198–209. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2008.00271.x>
- Lee, J. G., & Heaney, J. P. (2003). Estimation of Urban Imperviousness and its Impacts on Storm Water Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 129(5), 419–426. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9496\(2003\)129:5\(419\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9496(2003)129:5(419))
- Alley, W. M., & Veenhuis, J. E. (1983). Effective Impervious Area in Urban Runoff Modeling. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(2), 313–319. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(1983\)109:2\(313\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(1983)109:2(313))
- Sutherland, R. (1995). Methodology for estimating effective impervious area. *Watershed Protection Techniques*, 2(1), 47–51.
- Wenger, S. J., Peterson, J. T., Freeman, M. C., Freeman, B. J., & Homans, D. D. (2008). Stream fish occurrence in response to impervious cover, historic land use, and hydrogeomorphic

factors. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 65(7), 1250–1264.

<https://doi.org/10.1139/f08-046>

17. Zhuk, V., Vovk, L., Matlai, I., Popadiuk, I., Mysak, I., & Fasuliak, V. (2020). Dependency Between the Total and Effective Imperviousness for Residential Quarters of the Lviv City. *Journal of Ecological Engineering*, 21(5), 56–62.

<https://doi.org/10.12911/22998993/122191>

18. Granato, G. E. (2010). Methods for development of planning-level estimates of stormflow at unmonitored sites in the conterminous United States: Federal Highway

Administration report FHWA–HEP–09–005. Retrieved from

<https://www.researchgate.net/publication/268034350>

[Methods for development of planning-level estimates of stormflow at unmonitored sites in the conterminous United States](#)

19. Sytnichenko, M., & Anatska, G. (2023). Simulation of the volume of surface wastewater flow on examples of the city of Kyiv. *Problems of water supply, drainage and hydraulics*, (45), 71–77.

<https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.45.71-77>

Empirical model of estimation of effective waterproof area for prediction of surface runoff in the conditions of Kyiv city

Mykola Sytnichenko, Hanna Anatska

Abstract. Impermeable surfaces in urban areas accumulate pollutants and rapidly transport them into aquatic systems, making impermeable surfaces a key predictive variable for assessing pollutant discharges. Although Total Impervious Area (TIA) is a common metric, Effective Impervious Area (EIA), which is the portion of TIA directly connected to the drainage system, is recognized as a better variable for predicting runoff volumes and ecosystem change. However, direct mapping of EIA is too costly but can be taken into account by creating regional regression models. The aim of the work is: to determine a regression model between TIA and EIA for the conditions of Kyiv city, taking into account the infiltration potential of the soil and the degree of moisture of the catchment. EIA data sets were generated by simulation for different TIA fractions (0.2, 0.4, 0.6, 0.8) and different filtration coefficients. Descriptive statistics (mean, median) were calculated for these samples, on the basis of which regression relationships were approximated. It was found that the relationship between TIA and EIA statistical indicators (mean, median) is best described by a stepwise regression model of the form $EIA = a \cdot TIA^b$. Empirical equations were obtained for Kyiv, which provide a statistical estimate of EIA populations for a given TIA value.

Keywords: impervious area, total impervious area (TIA), effective impervious area (EIA), surface runoff, hydrology, stepwise regression.

Стаття надійшла до редакції 12.11.2025