

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ОСНОВИ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ ENVIRONMENTAL SAFETY AND NATURAL RESOURCES

UDK 336.72:477.42

Maryna Kravchenko, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Environmental Protection Technologies and Labour Safety
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0428-6440> **e-mail:** kravchenko.mv@knuba.edu.ua

Tetiana Tkachenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Environmental Protection Technologies and Labour Safety
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2105-5951> **e-mail:** tkachenko.tm@knuba.edu.ua

Olena Voloshkina, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Environmental Protection Technologies and Labour Safety
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3671-4449> **e-mail:** voloshkina.os@knuba.edu.ua

Lesya Vasylenko, Candidate of technical sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Environmental Protection Technologies and Labour Safety
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0428-6440> **e-mail:** vasylenko.lo@knuba.edu.ua

Illia Sviatohorov, Postgraduate student of the Department of Environmental Protection Technologies and Labour Safety
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-2793-1520> **e-mail:** tall.arh@gmail.com

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

ASSESSING THE ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL BENEFITS OF BLUE-GREEN INFRASTRUCTURE TO INCREASE URBAN RESILIENCE TO CLIMATE CHANGE

Abstract. *Climate change and intensive urbanisation pose large-scale challenges to engineering infrastructure and the livelihoods of the population in cities, in particular in the form of floods, soil degradation, droughts and increased pollution. The study focuses on the use of blue-green infrastructure (BGI) elements to improve climate resilience and ensure multifunctional development of urban areas. The article analyses the international experience of implementing the sponge city concept with a focus on the role of green structures. Particular attention is paid to assessing the costs and benefits of implementing BGI projects, in particular, the relationship between investment costs and positive effects, such as energy savings, carbon sequestration, improved air quality, and reduced urban heat island intensity. A comprehensive method for assessing the economic and environmental performance of BGI's facilities has been developed, including quantifying energy savings, determining the amount of CO₂ sequestration, oxygen production by green structures, and economic evaluation of the benefits of oxygen release. The method also includes an analysis of environmental benefits throughout the life cycle of BGI's facilities, calculation of life cycle costs and estimation of construction costs*

for individual infrastructure elements. For the applied assessment of economic and environmental benefits, a calculation based on green pavement was made, taking into account its impact on climate change mitigation. Design solutions aimed at reducing the heat load in the urban environment are proposed, in particular, the potential of facade and roof structures to improve cooling and moisture retention efficiency is revealed. The possibilities of using BGI elements for cooling the urban microclimate are determined. The study was carried out as part of the international Erasmus+ and ClimEd projects aimed at developing climate-oriented education and sustainable urban planning.

Keywords: blue-green infrastructure, green coatings, green facades, green walls, rain garden, climate change mitigation, climate change adaptation, cost analysis.

**М.В. Кравченко, Т.М. Ткаченко, О.С. Волошкіна, Л.О. Василенко,
І.О. Святогоров**

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНИХ І ЕКОЛОГІЧНИХ ПЕРЕВАГ БЛАКИТНО-ЗЕЛЕНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ МІСТ ДО ЗМІН КЛІМАТУ

Анотація. Кліматичні зміни та інтенсивна урбанізація спричиняють масштабні виклики для інженерної інфраструктури та життєдіяльності населення в містах, зокрема у вигляді паводків, деградації ґрунтового покриття, посух і зростання рівня забруднення. Дослідження зосереджено на застосуванні елементів блакитно-зеленої інфраструктури (BGI) для підвищення кліматичної стійкості та забезпечення багатофункціонального розвитку урбанізованих територій. Проаналізовано міжнародний досвід впровадження концепції міста-губки з акцентом на роль зелених конструкцій. Особливу увагу приділено оцінці витрат і вигод від реалізації проєктів BGI, зокрема встановлено взаємозв'язок між інвестиційними витратами та позитивними ефектами, такими як енергозбереження, секвестрація вуглецю, покращення якості повітря та зменшення інтенсивності міського теплового острова. Розроблено комплексний метод оцінки економічної та екологічної ефективності об'єктів BGI, який включає кількісну оцінку енергозбереження, визначення обсягів секвестрації CO₂, вироблення кисню зеленими конструкціями та економічне оцінювання вигод від вивільнення кисню. Метод також охоплює аналіз екологічних переваг протягом усього життєвого циклу об'єктів BGI, розрахунок вартості життєвого циклу та оцінку витрат на будівництво окремих елементів інфраструктури. Для прикладної оцінки економічних та екологічних вигод здійснено розрахунок на основі зеленого покриття, враховуючи його вплив на пом'якшення наслідків зміни клімату. Запропоновано конструктивні рішення, спрямовані на зниження теплового навантаження в міському середовищі, зокрема розкрито потенціал фасадних і дахових конструкцій щодо підвищення ефективності охолодження та утримання вологи. Визначено можливості використання елементів BGI для охолодження міського мікроклімату. Дослідження виконано в межах міжнародних проєктів Erasmus+ та ClimEd, що спрямовані на розвиток кліматоорієнтованої освіти та сталого міського планування.

Ключові слова: блакитно-зелена інфраструктура, зелені покриття, зелені фасади, зелені стіни, дощовий сад, пом'якшення наслідків зміни клімату, адаптація до змін клімату, аналіз витрат.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.2.7-22>

Вступ

Зміна клімату є одним із найактуальніших викликів сучасності, що посідає провідне місце у глобальному порядку денному. На міжнародному рівні екосистемна адаптація дедалі більше визнається та впроваджується міськими громадами як ефективна стратегія для мінімізації негативних наслідків урбанізації, підвищення кліматичної стійкості та сприяння екологічно збалансованому розвитку. До ключових інструментів екосистемної адаптації належать природоорієнтовані рішення (*Nature-based solutions, NBS*) [1] та концепція міста-губки (*Sponge City*) [2]. Сучасні підходи до проектування міст-губок акцентують увагу на комплексному інтегуванні зеленої та сірої інфраструктури, що утворює блакитно-зелену інфраструктуру (*BGI*) [3]. Окрім регулювання кількості та якості водних ресурсів, зелена інфраструктура забезпечує низку екологічних переваг. Зокрема, рослини відіграють ключову роль у пом'якшенні наслідків зміни клімату, поглинаючи CO₂ у процесі фотосинтезу та зменшуючи ефект міського теплового острова (*UHI*) шляхом транспірації.

У багатьох містах світу впровадження *BGI* в межах концепції міста-губки розглядається як ключова стратегія адаптації до змін клімату. Китай є світовим лідером у реалізації цієї концепції, що зумовлено кількома факторами. По-перше, країна стикається з гострими екологічними викликами, зокрема забрудненням води та повітря, що створює нагальну потребу у впровадженні ефективних рішень. Відповіддю на ці виклики стала Пілотна програма «Місто-губка», яка демонструє системний підхід до адаптації міських територій. По-друге, Китай активно інвестує в науку та технології, що включає міжнародне співробітництво в галузі сталого водного управління.

У Сполучених Штатах уряд міста Форт-Лодердейл (Флорида) в межах свого Генерального плану окреслив спеціальні зони дій, вразливі до затоплень, з акцентом на зелене управління цими територіями. Крім того, Нью-Йорк останніми роками активно розвиває політику інтегування зеленої інфраструктури, включаючи її у міське планування та актуалізацію нормативних актів задля підвищення кліматичної стійкості [4].

Німеччина стала першою країною в Європі, яка почала впроваджувати *BGI* в рамках концепції міста-губки та Стратегії біорізноманіття Європейського Союзу [5]. Частина субсидій з Європейського фонду регіонального розвитку спрямовується на інвестиції у створення «зеленої Європи, вільної від CO₂», що включає адаптацію до зміни клімату, збереження біорізноманіття та розвиток *BGI*. На відміну від багатьох інших країн, Німеччина має тривалу традицію наукових досліджень та викладання в університетах тем, пов'язаних з екологізацією будівель та міського середовища. Завдяки цьому, а також через специфічні муніципальні можливості, рівень впровадження зелених конструкцій у Німеччині є вищим, ніж у багатьох інших країнах.

Місто Лісабон, що стикається з серйозними ризиками затоплення та ефектом *UHI*, інтегрувало екологічний каркас міста у свій Генеральний план, зробивши його основним елементом просторового планування. У 2016 році в приміській зоні Копенгагена, в районі Естербро, було реалізовано унікальний проєкт *Klima Kvarter* (кліматично стійкий район), який того ж року отримав Міжнародну премію Гуанчжоу за міські інновації [6].

У Польщі активно впроваджують концепцію міст-губок як частину стратегії сталого розвитку, демонструючи її ефективність для екологічних і соціально-економічних цілей. Одним із ключових документів, що обговорює *BGI* в Польщі, є Стратегічний план адаптації до зміни клімату [7], у рамках якого 44 найбільші міста Польщі повинні бути перетворені на сталі з точки зору природи, суспільства та економіки, з особливим акцентом на розвиток *BGI*.

На польсько-німецькому кордоні вже багато років реалізуються транскордонні проекти з адаптації до зміни клімату. В рамках проектів *Transgea* («Транскордонне співробітництво з місцевої адаптації до зміни клімату») та *Wikt* (Підтримка кліматичних дій у транскордонному регіоні) створено велику базу даних мікроадаптивних заходів і каталог передового досвіду в галузі *BGI* [8]. Адаптаційні заходи, реалізовані в рамках цих проектів, є прикладом практичних рішень на локальному рівні і для малобюджетних адаптацій, що можуть бути корисними для впровадження подібних ініціатив в Україні.

Хоча концепція інтеграції сірої та зеленої інфраструктури широко впроваджується в усьому світі, її реалізація вимагає значних інвестицій. Тому для всебічної оцінки доцільності будівництва необхідно детально аналізувати багатовимірні вигоди, які вона забезпечує [9]. Дослідження витрат і вигод від впровадження *BGI* демонструють різні підходи до їх оцінки. Так, Лі та ін. [10] запропонували поділ вигод на економічні, соціальні та екологічні, тоді як автори [11] застосували комплексний підхід, що враховує вартість будівництва та гідрологічні й неточкові екологічні вигоди. Більшість наукових досліджень не враховують усі аспекти витрат і вигод від інтеграції *BGI*, зокрема будівельні витрати, а також її роль у пом'якшенні наслідків зміни клімату, зниженні ефекту *UHI*, секвестрації CO_2 та покращенні мікроклімату.

Метою роботи є розробка комплексного підходу до оцінки витрат і вигод від впровадження *BGI* в міському середовищі, який включає аналіз капітальних та експлуатаційних витрат, довгострокових економічних і екологічних вигод, зокрема енергозбереження, секвестрації CO_2 , покращення якості повітря, зменшення ефекту міського теплового острова та адаптації до зміни клімату. Додатково досліджується потенціал архітектурних рішень – дизайну фасадів і конструкцій дахів – для підвищення ефективності охолодження міського середовища та утримання вологості, а також визначається роль окремих елементів *BGI* у зниженні температури в містах і поліпшенні мікроклімату.

Основна частина. Оцінка витрат і вигод від впровадження *BGI* є важливою для порівняння з традиційними підходами. Комплексний аналіз враховує як витрати, так і довгострокові екологічні й економічні переваги, що ілюструє рисунок 1.

Зелені покриття розширюють площу міських насаджень, зменшують ефект *UHI* та сприяють охолодженню будівель, що знижує потребу в кондиціонуванні й енергоспоживання влітку [12]. Ефект енергозбереження можна розрахувати за формулою (1):

$$V_{UHI} = N_{elec} \cdot S_{GC} \cdot P_{elec}, \quad (1)$$

де V_{UNI} – економічна вигода від енергозбереження (грошова одиниця); N_{elec} – зменшення споживання електроенергії завдяки зеленим конструкціям (кВт·год/м²); S_{GC} – загальна площа зеленої конструкції (м²); P_{elec} – ціна електроенергії (грошова одиниця/кВт·год).

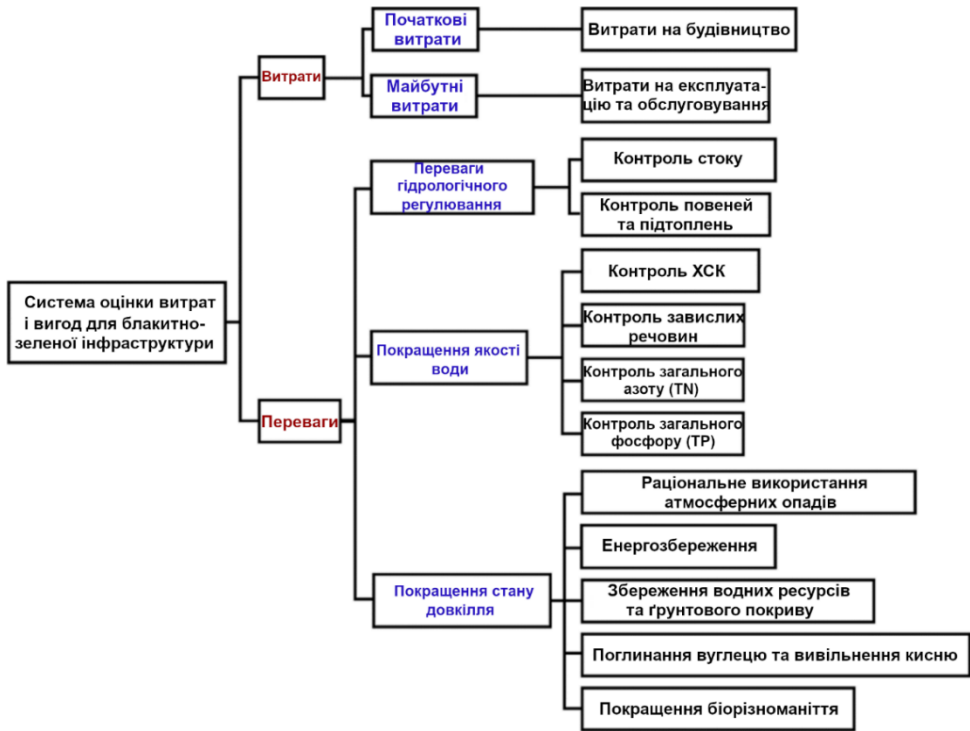


Рис. 1. Система оцінки витрат та вигод від впровадження блакитно-зеленої інфраструктури

Крім того, гектар зелених насаджень може поглинути до $8,1 \times 10^4$ кДж тепла влітку, що відповідає охолоджуючому ефекту роботи 189 кондиціонерів протягом повного дня. Загальна кількість поглиненого тепла визначається, виходячи з площі будівництва зеленого покриття, а споживання електроенергії холодильним обладнанням, необхідне для досягнення подібного ефекту охолодження, вимірюється як N_{elec} .

Зелені конструкції, як ключовий елемент BGI , відіграють важливу роль у поглинанні вуглецю та вивільненні кисню, сприяючи зменшенню викидів парникових газів у містах і, відповідно, пом'якшенню наслідків зміни клімату. З огляду на це, кількісна оцінка переваг зеленої інфраструктури щодо секвестрації вуглецю та генерації кисню проводиться за залежностями (2)–(4):

$$V_{cf} = V_{CO_2} + V_{O_2}, \quad (2)$$

$$V_{CO_2} = A_{CO_2} \cdot P_{CO_2}, \quad (3)$$

$$A_{CO_2} = S_{gp} \cdot I_{CO_2}, \quad (4)$$

де V_{cf} – загальні вигоди від секвестрації вуглецю та вивільнення кисню, [грошова одиниця]; V_{CO_2} та V_{O_2} – економічні переваги від поглинання вуглецю

зеленими насадженнями та вивільнення кисню, відповідно [грошова одиниця]; A_{CO_2} – обсяг фіксації вуглекислого газу зеленими насадженнями, [т]; P_{CO_2} – вартість секвестрації вуглецю, [грошова одиниця/т]; S_{gp} – площа нових зелених насаджень, [м²]; I_{CO_2} – інтенсивність поглинання CO₂ рослинністю, [кг/(м²·рік)].

Оцінка обсягу фіксації вуглекислого газу залежить від кліматичних умов, а також від характеристик ґрунту, рельєфу місцевості й типу рослинності. Показник I_{CO_2} визначається на основі польових досліджень або відповідних наукових даних для регіонів із подібними кліматичними умовами. Вартість поглинання вуглецю (P_{CO_2}) визначається з урахуванням місцевих ставок податків на викиди парникових газів або шляхом порівняння з аналогічними даними в інших країнах, якщо вуглецевий податок у досліджуваному регіоні відсутній або його ринковий механізм є недостатньо розвиненим.

Оцінка економічних вигод від вивільнення кисню рослинним шаром зелених конструкцій здійснюється за формулами (5) та (6):

$$V_{O_2} = A_{O_2} \cdot P_{O_2}, \quad (5)$$

$$A_{O_2} = S_{gp} \cdot I_{O_2}, \quad (6)$$

де A_{O_2} – кількість кисню, що вивільняється зеленими насадженнями, [т]; P_{O_2} – вартість промислового виробництва кисню, [грошова одиниця/т]; I_{O_2} – середній показник виділення кисню рослинністю, [кг/(м²·рік)].

Як і у випадку з CO₂, величина I_{O_2} залежить від конкретних кліматичних і екологічних умов регіону, що потребує додаткових емпіричних досліджень або використання даних з аналогічних територій. Оцінка екологічних вигод BGI є важливою для визначення її ефективності, зокрема щодо зменшення викидів CO₂ та генерації O₂. Загальні вигоди протягом життєвого циклу об'єкта можуть бути розраховані за формулою (7):

$$V_B = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \cdot V_{B,a}, \quad (7)$$

де: V_B – поточна вартість загальної вигоди об'єкта протягом життєвого циклу, [грошова одиниця]; $V_{B,a}$ – середньорічна загальна вигода від об'єкта, [грошова одиниця/рік]; n – розрахунковий термін служби об'єкта, [роки]; i – ставка дисконтування.

Оцінка вигод від секвестрації вуглецю та вироблення кисню здійснюється відповідно до формул (2)–(6), що враховують площу зелених насаджень, інтенсивність поглинання CO₂ та виділення O₂, а також економічні показники вуглецевого оподаткування й вартості виробництва кисню.

Загальна вартість проекту включає як початкові витрати на будівництво, так і витрати на експлуатацію та обслуговування, що дозволяє повноцінно оцінити економічну доцільність використання BGI . Розрахунок вартості життєвого циклу об'єкта BGI здійснюється за формулою (8):

$$V_C = V_{IC} + \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \cdot V_{C,a}, \quad (8)$$

де: V_C – теперішня вартість інженерних витрат об'єкта протягом життєвого циклу, [грошова одиниця]; V_{IC} – вартість будівництва об'єкта, [грошова одиниця]; $V_{C,a}$ – річні витрати на експлуатацію та обслуговування, [грошова одиниця/рік].

Витрати на будівництво різних елементів інфраструктури можуть бути визначені за залежностями (9)–(11):

$$V_{IC,GI} = C_{GI} \cdot S_{GI}, \quad (9)$$

$$V_{IC,R} = C_R \cdot V_{Re}, \quad (10)$$

$$V_{IC,DP} = C_{DP} \cdot L_{DP}, \quad (11)$$

де: $V_{IC,GI}$, $V_{IC,R}$, $V_{IC,DP}$ – витрати на будівництво зеленої інфраструктури, водосховищ і дренажної системи відповідно, [грошова одиниця]; C_{GI} – вартість будівництва зеленої інфраструктури на одиницю площі, [грошова одиниця/м²]; S_{GI} – площа зеленої інфраструктури, [м²]; C_R – вартість будівництва водосховищ на одиницю об'єму, [грошова одиниця/м³]; V_{Re} – об'єм водосховищ, [м³]; C_{DP} – вартість будівництва дренажної мережі на одиницю довжини, [грошова одиниця/м]; L_{DP} – довжина дренажної мережі, [м].

Згідно з існуючими дослідженнями, витрати на експлуатацію та обслуговування зазвичай становлять у середньому певний відсоток від початкової вартості будівництва. У більшості випадків цей показник визначається на рівні 3% від вартості будівництва об'єкта [13].

Для оцінки економічних та екологічних вигод від впровадження зеленого покриття проведено розрахунок з урахуванням його впливу на пом'якшення наслідків зміни клімату. Припустимо, що загальна площа зеленої конструкції становить 500 м², а зменшення споживання електроенергії завдяки її використанню дорівнює 5 кВт·год/м². За вартості електроенергії 4,32 грн/кВт·год економічна вигода від енергозбереження, розрахована за формулою (1), становить 10 800 грн на рік.

Додатково оцінено екологічні вигоди, зокрема секвестрацію вуглецю та вироблення кисню. За умови, що площа зелених насаджень на покритті становить 500 м², а інтенсивність поглинання CO₂ рослинністю – 0,5 кг/(м²·рік), загальний обсяг фіксації вуглекислого газу, розрахований за формулою (4), становить 0,25 т/рік. За середньої вартості секвестрації CO₂ у 1000 грн/т економічний еквівалент поглинання CO₂ становить 250 грн/рік. Аналогічно, при середньому показнику виділення O₂ рослинністю 0,35 кг/(м²·рік) загальна кількість виробленого кисню складає 0,175 т/рік. Враховуючи вартість промислового виробництва кисню 1500 грн/т, економічна вигода від вироблення кисню, розрахована за формулою (5), становить 262,5 грн/рік.

Сумарні щорічні економічні вигоди від зниження споживання енергії, секвестрації CO₂ та вироблення O₂ становлять 11 312,5 грн. Визначено теперішню вартість загальної вигоди протягом 20-річного життєвого циклу об'єкта за формулою (7), приймаючи ставку дисконтування 5%. Результат розрахунку показує, що загальна вигода становить 141 665 грн.

Отримані результати підтверджують доцільність інтегрування зелених технологій у міське середовище як одного з ефективних заходів адаптації до змін клімату. Водночас, окрім екологічних та економічних вигод, важливо

враховувати витрати на будівництво та експлуатацію зеленого покриття. За середньої вартості будівництва 2500 грн/м² загальні інвестиційні витрати для площі 500 м² становлять 1 250 000 грн, а операційні витрати, що включають догляд за рослинністю та технічне обслуговування, складають 3% від вартості будівництва, тобто 37 500 грн/рік. Порівняння з річною економічною вигодою у 11 312,5 грн свідчить про часткове покриття експлуатаційних витрат. У довгостроковій перспективі сукупна вигода у 141 665 грн підтверджує ефективність впровадження зеленої інфраструктури як дієвого заходу для адаптації до змін клімату, зменшення викидів CO₂ та підвищення енергоефективності будівель.

Проте витрати на будівництво та обслуговування можуть суттєво відрізнятися залежно від типу зеленої інфраструктури. У дослідженні [14] проаналізовано емергійні значення загальної вартості різних екосистемних рішень. Результати показали, що інтенсивні зелені покриття мають найвище значення (2,57·10⁹ Дж/м²·рік) порівняно з іншими варіантами, що пояснюється необхідністю застосування складного обладнання, спеціальних субстратів і значними витратами на оплату праці.

Початкові витрати на встановлення можна зменшити завдяки застосуванню технологій, адаптованих із розвинених ринків. Наприклад, згідно з дослідженням [15], вартість зеленого покриття може знизитися на 33–50% після його масштабного впровадження. Подібні закономірності спостерігаються і для інших елементів зеленої інфраструктури. Зокрема, середня вартість встановлення зеленої стіни становить 848 доларів США/м², що суттєво перевищує витрати на вуличні дерева [16]. Отримані результати свідчать, що розробка ефективних стратегій впровадження *BGI* має базуватися не лише на екологічних та економічних перевагах, а й на врахуванні потенційних обмежень та витрат.

У контексті адаптації до зміни клімату одним із важливих напрямів є впровадження конструктивних рішень, спрямованих на зниження теплового навантаження в міських середовищах. Оскільки будівлі займають значну частину міської площі, їх фасади мають суттєвий потенціал для підвищення кліматичної стійкості, який часто залишається невикористаним. Розвиток вертикального озеленення, включно із системами затінення та підвищенням альbedo поверхонь, може істотно зменшити перегрів міста та сприяти покращенню місцевого гідрологічного балансу (рис. 2). Такі заходи можуть реалізовуватися як у формі інтенсивних, так і екстенсивних систем, відповідно до наявних просторових можливостей.

Зелені фасади являють собою базову форму вертикального озеленення, яка полягає у природному або спрямованому розвитку рослинного шару на вертикальних поверхнях. Рослини можуть самостійно прикріплюватися до стін або рости за допомогою спеціальних опорних конструкцій [17]. Середовище для укорінення розташовується ззовні стіни і зазвичай представлено шаром ґрунту або контейнерами на різних рівнях фасаду. Такий підхід дозволяє ефективно використовувати вертикальні площини для формування зелених екранів, що забезпечують теплоізоляцію, фільтрацію повітря та зниження температури довкілля, як це реалізовано на прикладі фасаду в Лісабоні (рис. 3).

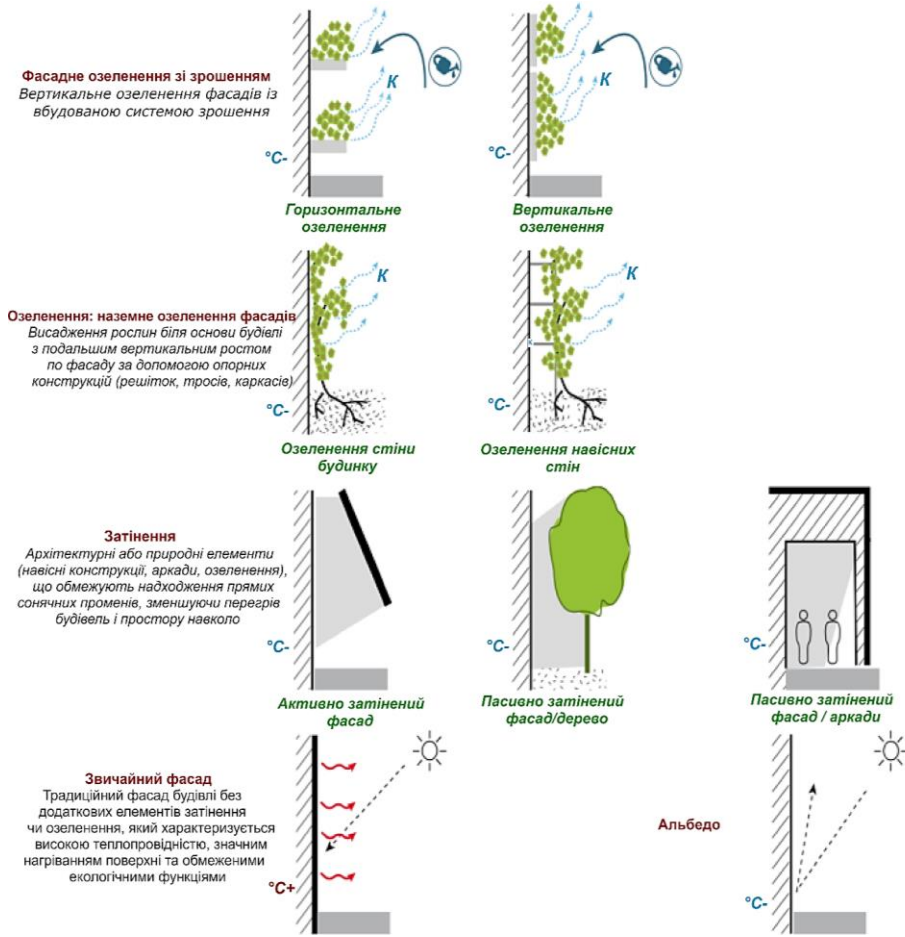


Рис. 2. Потенціал дизайну фасаду для підвищення ефективності охолодження та утримання вологи в міському середовищі



Рис. 3. Вертикальне озеленення на фасаді будівлі в Лісабоні як приклад елемента BGI для пом'якшення міського мікроклімату (авторська світлина)

Живі стіни (або активні системи вертикального озеленення) є складнішою формою інтегрування рослинності у фасади. У таких системах рослинний шар повністю інтегрований у структуру будівлі та утримується спеціальними конструкціями з підкладкою, яка охоплює всю площу фасаду. Типології зелених фасадів і живих стін також відрізняються за видовим складом рослин: для зелених фасадів використовуються переважно виткі рослини, тоді як для живих стін можуть бути застосовані широкий спектр видів, як вічнозелених, так і листяних, за умови ретельного підбору рослин з подібними екологічними вимогами.

Рослинний шар на фасадах виконує важливу кліматорегулюючу функцію: ефект затінення і евапотранспірація істотно знижують температуру поверхні стін у літній період, що підвищує енергоефективність будівель і комфорт проживання. Хоча впровадження систем вертикального озеленення може потребувати значних початкових інвестицій, у довгостроковій перспективі це дозволяє скоротити споживання енергії та експлуатаційні витрати. Крім того, евапотранспіративний ефект сприяє зниженню температури повітря у мікрооточенні озелених фасадів, що є важливим для пом'якшення явища міського теплового острова [18].

Окремий важливий елемент – дахи, які також мають великий потенціал для оптимізації. Серед забудованих поверхонь дахи мають порівнянну горизонтальну площу покриття, проте характеризуються вищим ступенем вибору у впровадженні стратегій пом'якшення міських теплових ефектів та нижчими експлуатаційними витратами порівняно з елементами вуличного каньйону (стінами, дорогами, ґрунтовим покриттям) [19]. Це робить їх перспективним рішенням для підвищення стійкості міського середовища, зокрема шляхом зменшення енергоспоживання будівель (рис. 4).

Найпоширенішими технологічними підходами є використання білих та зелених покриттів із рослинністю. Білі дахи, відомі також як «холодні» дахи, знижують температуру покриття, зменшуючи поглинання сонячної радіації, що сприяє зниженню температури покрівельних матеріалів, стель у приміщеннях та навколишнього повітря, а отже, скороченню потреби в кондиціонуванні на 5–50% [20]. Водночас ефективність білих дахів у літній період може супроводжуватися негативними наслідками, зокрема збільшенням енергоспоживання на опалення в холодну пору року через зменшення акумуляції тепла. Крім того, технологія білих дахів базується на зміні альbedo покрівельної поверхні та спрямована на зниження теплового навантаження в міських районах, зокрема для пом'якшення ефекту *UHI*. Проте дедалі очевидніше, що *UHI* є не ізольованим явищем, а взаємопов'язаним із низкою антропогенно зумовлених екологічних проблем, зокрема концентрацією викидів парникових газів і погіршенням якості повітря в міських районах [21]. Хоча підвищене альbedo дахів сприяє зниженню температури міського середовища, його вплив на якість повітря та скорочення викидів CO₂ є незначним або навіть може мати негативні наслідки.

У зв'язку з цим останнім часом *NBS*, зокрема зелені покриття та стіни, міські газони і зелені насадження, розглядаються як більш стійка альтернатива для зменшення теплового навантаження та підвищення енергоефективності будівель. Зокрема, зелені покриття, на відміну від білих, забезпечують охолодження завдяки процесам випаровування й транспірації в теплий період року, а в холодний сезон зменшують втрати тепла завдяки додатковому шару

грунту, що виконує функцію теплоізоляції. Дослідження показують, що зелені покриття здатні знижувати температуру поверхні даху на 4–12 °C та скорочувати річне енергоспоживання будівель на 2,2–16,7% [22].

Блакитно-зелені покриття, розроблені в першу чергу як технологія *LID* (Low Impact Development) для управління зливовими водами [23], поєднують водоутримувальний (блакитний) шар із зеленими покриттями, що дозволяє подолати обмеження традиційних рішень. Завдяки накопиченню та поступовому постачанню дощової води до ґрунту й рослин вони сприяють підвищенню ефективності випаровування, регулюванню мікроклімату та пом'якшенню міських теплових ефектів, що є важливим у контексті адаптації до зміни клімату. Вологість ґрунту, підтримувана за рахунок акумуляції зливових вод, сприяє зниженню теплового навантаження та підвищенню термічної стабільності будівель [24].

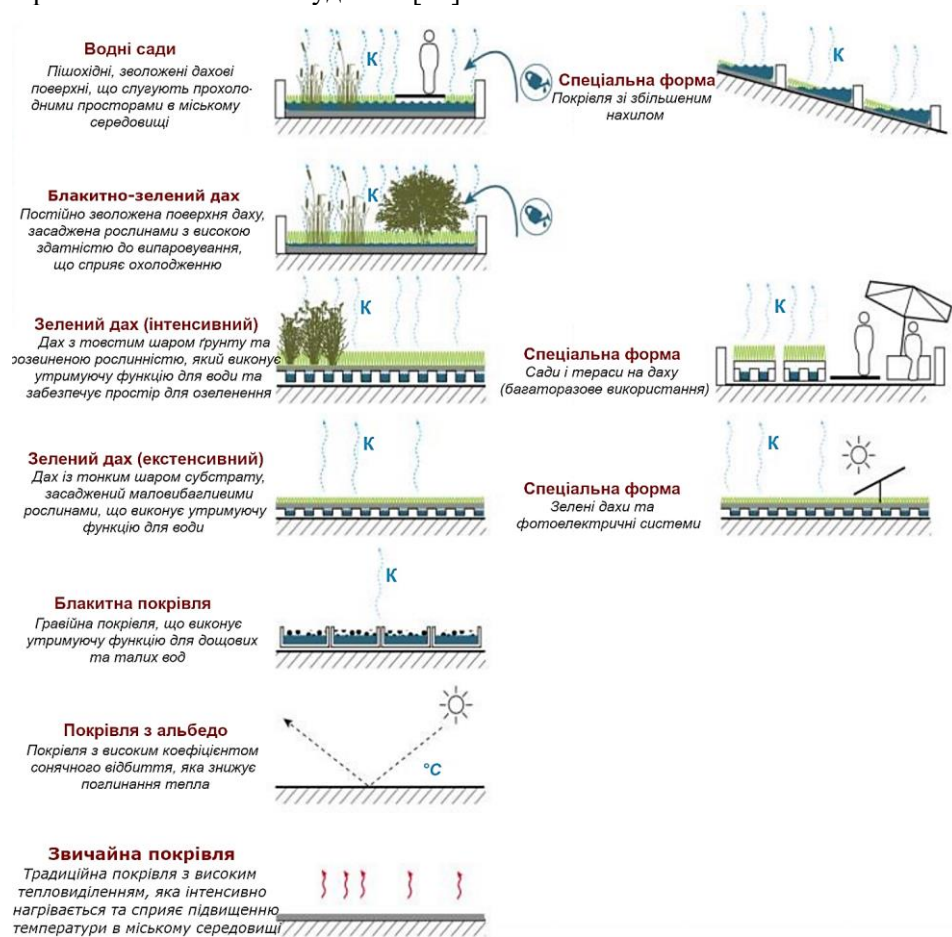


Рис. 4. Потенціал конструкції даху для підвищення ефективності охолодження міського середовища та збереження вологості

Дослідження теплових характеристик блакитно-зелених покриттів підтверджують їхню ефективність у зменшенні температури поверхні, що сприяє зниженню енергоспоживання та викидів парникових газів. Наприклад, автори в рамках дослідження [24] експериментально встановили, що температура поверхні блакитно-зелених покриттів на 5–9 °C нижча, ніж у традиційних дахів.

Останнім часом у сфері архітектури набуває популярності поєднання фотоелектричних систем із рослинністю для створення фотоелектрично-зеленого (*PV-Green*) даху [25]. Цей підхід сприяє одночасному виробництву відновлюваної енергії та збільшенню зелених насаджень, що сприяє зниженню викидів парникових газів, поліпшенню мікроклімату та адаптації міст до зміни клімату. Завдяки цьому забезпечується багатофункціональна модернізація, що дає змогу реалізувати кілька екологічно важливих функцій в оновленому просторі.

Елементи *BGI* можуть бути адаптовані до різних просторових умов міського середовища (рис. 5). Зокрема, озеленені водні поверхні, випарні зелені зони та дощові сади доцільно розміщувати у парках, на великих відкритих просторах або у приватних зелених територіях. Плаваючі рослинні острови ефективно застосовуються у стоячих та проточних водоймах, таких як озера, ставки, річки та канали. Блакитно-зелені фасади та покриття можуть бути інтегровані у структуру будівель і перекриттів підземних паркінгів, сприяючи регуляції мікроклімату.

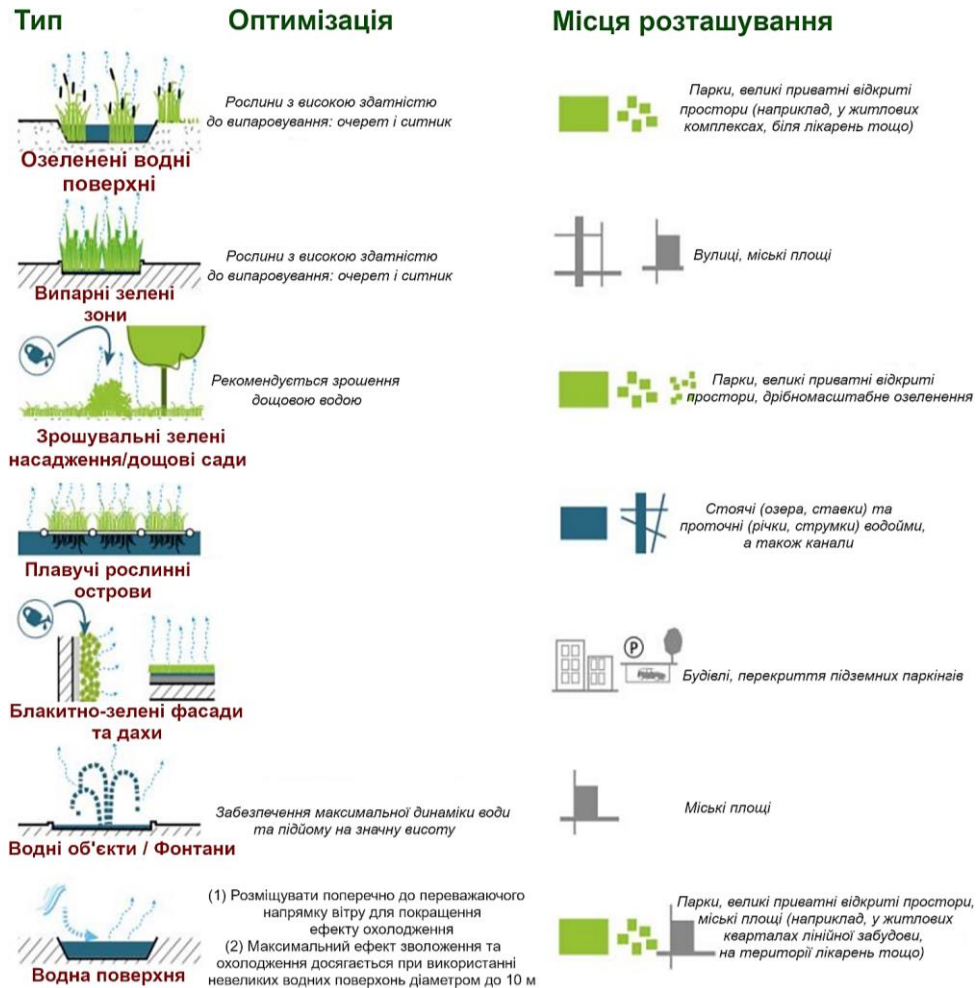


Рис. 5. Потенціал охолодження міського середовища за допомогою елементів *BGI*

Водні об'єкти та фонтани переважно впроваджуються на міських площах для посилення ефекту охолодження. Додатково, конструкції дощових садів можуть використовуватися у парках, на громадських площах та у житлових районах для покращення мікрокліматичних умов і зменшення інтенсивності ефекту міського теплового острова.

Інтегрування *BGI* у міський простір є складним процесом, що потребує всебічного врахування екологічних, соціальних та економічних чинників. Для ефективного впровадження цих технологій поряд із традиційною сірою інфраструктурою необхідне застосування розвинених інструментів підтримки прийняття рішень, здатних опрацьовувати багатовимірні дані та забезпечувати комплексний аналіз для забезпечення сталого міського розвитку. На практиці процес прийняття рішень часто базується на експертних оцінках місцевих або національних органів влади і обмежується розглядом окремих типів *BGI*, без урахування всього спектра можливих інтегровувальних рішень.

Основними проблемами при впровадженні *BGI* в міське середовище є обмежений рівень наукових знань серед фахівців суміжних галузей, недостатня підготовка громадськості та студентів, дефіцит досліджень і розробок у цій сфері [26]. Також серйозними перешкодами залишаються брак інформації про особливості впровадження та ефективність *BGI*, обмеження фізичного простору в містах, слабе та фрагментоване управління відповідними проєктами [27].

Крім того, існує нестача механізмів та індикаторів, які б сприяли своєчасній розробці та впровадженню політик підтримки *BGI* [26]. Незважаючи на поширення елементів *BGI* у багатьох країнах, в тому числі і в Україні, темпи їхнього впровадження залишаються недостатньо високими. Значним бар'єром є інституційні труднощі: дослідження, проведене в межах проєкту програми «Горизонт 2020» у семи європейських містах, показало, що внутрішньоорганізаційні процеси та нестача технічних компетенцій серйозно впливали на успішність реалізації *BGI* [28].

Для подолання цих викликів необхідно вжити низку заходів. Насамперед потрібна активна державна підтримка впровадження *BGI*, включно з фінансуванням, створенням сприятливого нормативного середовища та розвитком освітніх програм в навчальних закладах. Важливим є також вдосконалення внутрішньоорганізаційних процесів в управлінських структурах, підвищення технічної кваліфікації фахівців, а також залучення громадськості через поширення знань і підвищення обізнаності. Розв'язання цих проблем можливе через систематичне заохочення наукових досліджень, розвиток співпраці між науковими установами та органами влади, створення платформ для обміну знаннями, а також підтримку широкого залучення громадськості до процесу впровадження *BGI*.

Висновки

У межах цього дослідження здійснено інтегровану оцінку економічних і екологічних аспектів функціонування *BGI* через аналіз співвідношення капіталовкладень і отриманих екологічних та енергетичних переваг, зокрема зменшення споживання енергії, накопичення вуглецю, очищення повітря та ослаблення проявів міського теплового острова. Запропоновано методологію кількісної оцінки енергетичних заощаджень, акумуляції CO₂ та виробництва

кисню рослинними системами з подальшим розрахунком економічного ефекту від цих процесів. Дослідження також охоплює аналіз екологічної ефективності на всіх стадіях життєвого циклу елементів *BGI*, а також визначення витрат на спорудження їх окремих складових, орієнтуючись на їхню роль у протидії наслідкам глобальних кліматичних змін.

Проведена оцінка економічних та екологічних вигод від впровадження зеленого покриття підтверджує його значний потенціал для пом'якшення наслідків зміни клімату завдяки зниженню споживання енергії, секвестрації вуглецю та виробленню кисню. Розрахунки показали, що за площі зеленого покриття 500 м² щорічна економічна вигода від енергозбереження, секвестрації CO₂ та виробництва O₂ становить 11 312,5 грн, а сукупна вигода за 20-річний життєвий цикл об'єкта з урахуванням ставки дисконтування 5% складає 141 665 грн. Інвестиційні витрати на будівництво зеленого покриття становлять 1 250 000 грн, а щорічні експлуатаційні витрати – 37 500 грн, що вказує на часткове покриття операційних витрат за рахунок отриманих вигод, проте економічна ефективність повною мірою виявляється у довгостроковій перспективі. Оцінені результати свідчать про доцільність інтегрування елементів зеленої інфраструктури в міське середовище як одного з ефективних засобів адаптації до змін клімату, підвищення енергоефективності будівель і зменшення викидів парникових газів.

Водночас інтегрування *BGI* у міський простір стикається з рядом екологічних, соціальних, економічних та інституційних викликів, що уповільнюють темпи її впровадження. Для подолання цих бар'єрів необхідні комплексні заходи, зокрема активна державна підтримка, вдосконалення нормативної бази, підвищення професійної кваліфікації фахівців, розвиток наукових досліджень і залучення громадськості. Лише системний підхід і співпраця між усіма зацікавленими сторонами забезпечать ефективне впровадження *BGI* як інструменту сталого міського розвитку.

Дослідження виконано в межах міжнародних проєктів Erasmus+ та ClimEd, що спрямовані на розвиток кліматоорієнтованої освіти та сталого міського планування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Nesshöver, C.; Assmuth, T.; Irvine, K.N.; Rusch, G.M.; Waylen, K.A.; Delbaere, B.; Haase, D.; Jones-Walters, L.; Keune, H.; Kovacs, E.; et al. (2017). The science, policy and practice of nature-based solutions: An interdisciplinary perspective. *Sci. Total Environ.*, 579, 1215–1227. 10.1016/j.scitotenv.2016.11.106.
2. Yuan, Y.; Zheng, Y.; Huang, X.; Zhai, J. (2024). Climate resilience of urban water systems: A case study of sponge cities in China. *J. Clean. Prod.*, 451, 141781. 10.1016/j.jclepro.2024.141781.
3. Qiao, X.-J.; Liao, K.-H.; Randrup, T.B. (2020). Sustainable stormwater management: A qualitative case study of the Sponge Cities initiative in China. *Sustain. Cities Soc.*, 53, 101963. 10.1016/j.scs.2019.101963.
4. García Sánchez, F.; Solecki, W.D.; Ribalaygua Batalla, C. (2018). Climate change adaptation in Europe and the United States: A comparative approach to urban green spaces in Bilbao and New York City. *Land Use Policy*, 79, 164–173. 10.1016/j.landusepol.2018.08.010.
5. Hu, T.; Chang, J.; Syrbe, R.U. (2020). Green Infrastructure Planning in Germany and China. *Res. Urban. Ser.*, Vol. 6, 99-126 Pages. 10.7480/RIUS.6.96.

6. Engberg, L.A. (2018). Climate Adaptation and Citizens' Participation in Denmark: Experiences from Copenhagen. In *Climate Change in Cities*; Hughes, S., Chu, E.K., Mason, S.G., Eds.; The Urban Book Series; Springer International Publishing: Cham; pp. 139–161. ISBN 978-3-319-65002-9. 10.1007/978-3-319-65003-6_8.
7. Zaręba, A.; Krzemińska, A.; Adynkiewicz-Piragas, M.; Widawski, K.; Van Der Horst, D.; Grijalva, F.; Monreal, R. (2022). Water Oriented City – A '5 Scales' System of Blue and Green Infrastructure in Sponge Cities Supporting the Retention of the Urban Fabric. *Water*, 14, 4070. 10.3390/w14244070.
8. Katalog działań z przykładami dobrych praktyk - Transgea Available online: <http://transgea.eu/katalog-dzialan-z-przykladami-dobrych-praktyk.html> (accessed on Aug 23, 2024).
8. Sample, D.J.; Heaney, J.P.; Wright, L.T.; Fan, C.-Y.; Lai, F.-H.; Field, R. (2003). Costs of Best Management Practices and Associated Land for Urban Stormwater Control. *J. Water Resour. Plan. Manag.*, 129, 59–68. 10.1061/(ASCE)0733-9496(2003)129:1(59).
10. Li, X.J.; Deng, J.X.; Xie, W.J.; Jim, C.Y.; Wei, T.B.; Lai, J.Y.; Liu, C.C. (2022). Comprehensive Benefit Evaluation of Pervious Pavement Based on China's Sponge City Concept. *Water*, 14, 1500. 10.3390/w14091500.
11. Saadatpour, M.; Delkhosh, F.; Afshar, A.; Solis, S.S. (2020). Developing a simulation-optimization approach to allocate low impact development practices for managing hydrological alterations in urban watershed. *Sustain. Cities Soc.*, 61, 102334. 10.1016/j.scs.2020.102334.
12. Cascone, S.; Leuzzo, A. (2023). Thermal Comfort in the Built Environment: A Digital Workflow for the Comparison of Different Green Infrastructure Strategies. *Atmosphere*, 14, 685. 10.3390/atmos14040685.
13. Xie, J.; Chen, H.; Liao, Z.; Gu, X.; Zhu, D.; Zhang, J. (2017). An integrated assessment of urban flooding mitigation strategies for robust decision making. *Environ. Model. Softw.*, 95, 143–155. 10.1016/j.envsoft.2017.06.027.
14. Shah, A.M.; Liu, G.; Nawab, A.; Li, H.; Xu, D.; Yeboah, F.K.; Yang, Q.; Zhang, L. (2024). Sustainability and resilience interface at typical urban green and blue infrastructures: costs, benefits, and impacts assessment. *Front. Sustain. Cities*, 6, 1453829. 10.3389/frsc.2024.1453829.
15. Pulselli, R.M.; Pulselli, F.M.; Mazzali, U.; Peron, F.; Bastianoni, S. (2014). Emergy based evaluation of environmental performances of Living Wall and Grass Wall systems. *Energy Build.*, 73, 200–211. 10.1016/j.enbuild.2014.01.034.
16. Manso, M.; Teotónio, I.; Silva, C.M.; Cruz, C.O. (2021). Green roof and green wall benefits and costs: A review of the quantitative evidence. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 135, 110111. 10.1016/j.rser.2020.110111.
17. Manso, M.; Castro-Gomes, J. (2015). Green wall systems: A review of their characteristics. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 41, 863–871. 10.1016/j.rser.2014.07.203.
18. Nesci, V.; Ballarini, I.; Rando Mazzarino, P.; Corrado, V. (2024). Living Walls and Green Façades: An Implementation Code for Energy Simulation. *Buildings*, 14, 2040. 10.3390/buildings14072040.
19. Xu, T.; Sathaye, J.; Akbari, H.; Garg, V.; Tetali, S. (2012). Quantifying the direct benefits of cool roofs in an urban setting: Reduced cooling energy use and lowered greenhouse gas emissions. *Build. Environ.*, 48, 1–6. 10.1016/j.buildenv.2011.08.011.
20. Wang, Y.; Wang, Z.-H.; Rahmatollahi, N.; Hou, H. (2024). The impact of roof systems on cooling and building energy efficiency. *Appl. Energy*, 376, 124339. 10.1016/j.apenergy.2024.124339.
21. Wang, Z.-H. (2022). Reconceptualizing urban heat island: Beyond the urban-rural dichotomy. *Sustain. Cities Soc.*, 77, 103581. 10.1016/j.scs.2021.103581.
22. Mihalakakou, G.; Souliotis, M.; Papadaki, M.; Menounou, P.; Dimopoulos, P.; Kolokotsa, D.; Paravantis, J.A.; Tsangrassoulis, A.; Panaras, G.; Giannakopoulos, E.; et al. (2023). Green roofs as a nature-based solution for improving urban sustainability: Progress and perspectives. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 180, 113306. 10.1016/j.rser.2023.113306.

23. Waickowski, S.E.; DeGaetano, S.; Anderson, A.; Amatya, D.M.; Hunt, W. (2024). Plot Scale Evaluation of the Hydrologic and Water Quality Benefits of Blue Roofs Compared to Green and Conventional Roofs. *J. Nat. Resour. Agric. Ecosyst.*, 2, 91–102. 10.13031/jnrae.15887.
24. Eingrüber, N.; Korres, W.; Schneider, K. (2025). Comparison of heat mitigation effects of blue roofs and green roofs on building wall temperature and thermal outdoor comfort based on scenario analyses using 3D microclimate modelling for a dense urban district . 10.5194/egusphere-egu24-9967.
25. Pan, Z.; Wang, C.; Yu, B.; Chen, Z.; Yuan, Y.; Li, G.; Zhang, J.; Xiao, T. (2024). Assessing multifunctional retrofit potential of urban roof areas and evaluating the power and carbon benefits under efficient retrofit scenarios. *J. Clean. Prod.*, 444, 141270. 10.1016/j.jclepro.2024.141270.
26. Bush, J. (2020). The role of local government greening policies in the transition towards nature-based cities. *Environ. Innov. Soc. Transit.*, 35, 35–44. 10.1016/j.eist.2020.01.015.
27. Wamsler, C.; Wickenberg, B.; Hanson, H.; Alkan Olsson, J.; Stålhammar, S.; Björn, H.; Falck, H.; Gerell, D.; Oskarsson, T.; Simonsson, E.; et al. (2020). Environmental and climate policy integration: Targeted strategies for overcoming barriers to nature-based solutions and climate change adaptation. *J. Clean. Prod.*, 247, 119154. 10.1016/j.jclepro.2019.119154.
28. Croeser, T.; Garrard, G.E.; Thomas, F.M.; Tran, T.D.; Mell, I.; Clement, S.; Sánchez, R.; Bekessy, S. (2021). Diagnosing delivery capabilities on a large international nature-based solutions project. *Npj Urban Sustain.*, 1, 32. 10.1038/s42949-021-00036-8.

Стаття надійшла до редакції 11.02.2025 і прийнята до друку після рецензування 06.05.2025

The article was received 11.02.2025 and was accepted after revision 06.05.2025

Кравченко Марина Василівна

д.т.н., доцентка кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури

Адреса робоча: 03037, Україна, м. Київ, пр-т Повітряних Сил, 31

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0428-6440> **e-mail:** kravchenko.mv@knuba.edu.ua

Ткаченко Тетяна Миколаївна

д.т.н., професорка, завідувачка кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури

Адреса робоча: 03037, Україна, м. Київ, пр-т Повітряних Сил, 31

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2105-5951> **e-mail:** tkachenko.tm@knuba.edu.ua

Волошкіна Олена Семенівна

д.т.н. наук, професорка кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури

Адреса робоча: 03037 Україна, м. Київ, пр-т Повітряних Сил, 31

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3671-4449> **e-mail:** voloshkina.os@knuba.edu.ua

Василенко Леся Олексіївна

к.т.н., доцентка кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури

Адреса робоча: 03037 Україна, м. Київ, пр-т Повітряних Сил, 31

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0428-6440> **e-mail:** vasylenko.lo@knuba.edu.ua

Святогоров Ілля Олегович

аспірант кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці Київський національний університет будівництва і архітектури

Адреса робоча: 03037 Україна, м. Київ, пр-т Повітряних Сил, 31

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-2793-1520> **e-mail:** tall.arh@gmail.com