UDK 628.3:712.3

Kostiantyn Shumbar, postgraduate student
ORCID ID: https://orcid.org/0009-0000-0201-2142 ***e-mail:*** k.w.shumbar@gmail.com

Maryna Kravchenko, Dr. Sc. (Tech.), Associate Professor, Professor of the Department of Environmental Protection Technologies and Labour Safety
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-0428-6440 ***e-mail:*** marina-diek@ukr.net

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

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

Andrii Shcherbak, postgraduate student
ORCID ID: https://orcid.org/0009-0000-4594-6412 ***e-mail:*** andron.vr@gmail.com

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

COMPREHENSIVE EMERGENT ASSESSMENT OF ECOSYSTEM SERVICES AND ECONOMIC EFFICIENCY OF URBAN GREEN STRUCTURES

Abstract. *Rapid urbanisation in recent years has led to the deterioration of urban ecosystems and the emergence of numerous environmental and socio-economic problems. In response to these challenges, the implementation of green structures has gained considerable popularity as a sustainable approach to urban planning. This paper presents a comprehensive assessment of the costs, benefits (ecosystem services) and impacts (ecosystem disservices) associated with the use of green structures in the urban environment, using the emergy accounting approach, which allows for the quantitative assessment of resource costs in biophysical units through the prism of energy transformations. To achieve this goal, a new integrated assessment system is proposed, covering key components: assessment of the costs of implementing and operating green structures, assessment of ecosystem services, determination of environmental costs to compensate for damage to public health and biodiversity, and identification of ecosystem disservices. In particular, the economic efficiency of green walls in reducing noise pollution is investigated using the example of typical urban configurations of apartment buildings. The results show that green roofs provide greater benefits to the ecosystem compared to other types of green structures, but they are accompanied by high initial construction costs and require more intensive maintenance. Green walls demonstrated the highest emergent costs for noise pollution reduction (5.77×10^{12} sej/m²·year), indicating their potential effectiveness in improving the city's acoustic environment.*

© К.В. Шумбар, М.В. Кравченко, Л.О. Василенко, Т.М. Ткаченко, О.С. Волошкіна, А.І. Щербак, 2025

Cost-benefit calculations are presented for two simulated architectural configurations, reflecting the impact of green walls on noise reduction and aesthetic benefits for residents; the results show that in both cases the benefits significantly outweigh the costs. The data obtained provides valuable information for urban planners, policymakers and other stakeholders, facilitating informed decisions on the development of sustainable cities to ensure the well-being of current and future generations.
Keywords: *urban green infrastructure, green structures, ecosystem services, emergy accounting, cost-effectiveness, noise protection function.*

К.В. Шумбар, М.В. Кравченко, Л.О. Василенко, Т.М. Ткаченко, О.С. Волошкіна, А.І. Щербак

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

КОМПЛЕКСНА ЕМЕРГІЙНА ОЦІНКА ЕКОСИСТЕМНИХ ПОСЛУГ І ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ МІСЬКИХ ЗЕЛЕНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Анотація. *Стрімка урбанізація останніх років призвела до погіршення стану міських екосистем та виникнення численних екологічних і соціально-економічних проблем. Як відповідь на ці виклики, впровадження зелених конструкцій набуло значної популярності як сталий підхід до міського планування. У цій роботі представлено комплексну оцінку витрат, вигод (екосистемних послуг) та впливів (екосистемних диспослуг), пов'язаних із застосуванням зелених конструкцій у міському середовищі, з використанням підходу емергійного обліку (emergy accounting), який дозволяє кількісно оцінювати ресурсні витрати у біофізичних одиницях через призму енергетичних трансформацій. Для досягнення цієї мети запропоновано нову інтегровану систему оцінки, яка охоплює ключові компоненти: оцінку витрат на впровадження та експлуатацію зелених конструкцій, оцінку екосистемних послуг, визначення екологічних витрат на компенсацію шкоди для здоров'я населення та біорізноманіття, а також ідентифікацію екосистемних диспослуг. Зокрема, досліджено економічну ефективність зелених стін у зниженні шумового навантаження на прикладі типових міських конфігурацій багатоквартирних будинків. Результати показують, що зелені дахи забезпечують більші переваги для екосистеми порівняно з іншими типами зелених конструкцій, однак вони супроводжуються високими початковими витратами на будівництво та потребують більш інтенсивного обслуговування. Зелені стіни продемонстрували найвищі емергійні витрати на зниження шумового забруднення ($5{,}77\times10^{12}$ sej/м²·рік), що вказує на їхню потенційну ефективність у покращенні акустичного середовища міста. Наведено розрахунки співвідношення вигод і витрат для двох імітованих архітектурних конфігурацій, що відображають вплив зелених стін на зниження шумового навантаження та естетичні переваги для мешканців; результати свідчать, що в обох випадках вигоди суттєво перевищують витрати. Отримані дані надають цінну інформацію для міських планувальників, політиків та інших зацікавлених сторін, сприяючи прийняттю обґрунтованих рішень щодо розвитку сталих міст для забезпечення добробуту нинішніх і майбутніх поколінь.*
Ключові слова: *міська зелена інфраструктура, зелені конструкції, екосистемні послуги, емергійний облік, економічна ефективність, шумозахисна функція.*

https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.4.20-34

Вступ

Міські території стикаються зі зростаючими екологічними та соціальними проблемами, такими як підвищення температури, погіршення якості повітря, обмеженість зелених насаджень та шумове забруднення [1]. Основними факторами цих проблем є поширення твердих поверхонь [2], швидка урбанізація [3] та технологічний розвиток, що сприяє надмірному накопиченню тепла [4], погіршенню циркуляції повітря та підвищенню залежності від енергоємних систем охолодження. Наслідком цього є не лише зниження комфорту проживання та якості повітря, а й посилення ефекту міських теплових островів та збільшення енергоспоживання для охолодження [5].

Одним із перспективних напрямів екологічної трансформації міського простору є впровадження елементів зеленої інфраструктури, зокрема зелених конструкцій – дахів, стін, фасадів і дощових садів, які поєднують екологічні, соціальні та естетичні функції в умовах щільної урбанізації. Стратегічні документи, зокрема Порядок денний ООН у сфері сталого розвитку міст, акцентують на необхідності збільшення площі зелених елементів у містах. Європейська політика у сфері інновацій підтримує інтеграцію природоорієнтованих рішень, зокрема вертикального та покрівельного озеленення, у просторове планування як ефективну відповідь на соціально-екологічні виклики [6]. У межах сучасної концепції зелена інфраструктура розглядається як система природних і техногенно адаптованих компонентів, що забезпечують ключові екосистемні послуги – зниження забруднення повітря і температури, акумуляцію дощової води, поглинання CO_2, підвищення біорізноманіття та зменшення шуму в міських умовах [7].

Конкретні типи зелених конструкцій мають спеціалізовані функціональні переваги, які дозволяють адаптувати їх до просторових і кліматичних особливостей міських територій [8]. На відміну від традиційних зелених насаджень, які потребують значних площ, ці системи дозволяють максимально ефективно використовувати покрівельні та вертикальні поверхні, зберігаючи щільність міської забудови та водночас забезпечуючи екологічну ефективність [9].

Недостатньо обґрунтоване впровадження або неналежна експлуатація зелених конструкцій у міському середовищі може призводити до порушення надання екосистемних послуг і виникнення так званих екосистемних диспослуг – негативних екологічних або соціальних наслідків [10]. Важливо визначити межу, за якої зелена конструкція перестає бути корисною та починає створювати ризики для добробуту населення. Наприклад, надмірне пилкування рослин може провокувати алергічні реакції, а незбалансоване озеленення вертикальних або дахових поверхонь – сприяти накопиченню шкідників або поширенню небажаних видів [11].

Зелені конструкції, що потребують регулярного технічного обслуговування, можуть створювати додаткові навантаження. Зокрема, використання важкої техніки для догляду за інтенсивними зеленими дахами спричиняє ущільнення субстрату, зниження його водоутримуючої здатності та деградацію ґрунтових функцій [12]. За відсутності ефективного дренажу у дощовий період можливе накопичення вологи, що ускладнює експлуатацію конструкцій. Також рослинне опадання з фасадів і дахів може потрапляти у вентиляційні системи або створювати дискомфорт для мешканців.

Попри потенційні ризики, зелені конструкції залишаються важливою складовою сталого міського розвитку. Їх інтеграція має базуватися на урахуванні можливих диспослуг і заходах щодо їх мінімізації. Оцінка еколого-економічної цінності таких конструкцій є міждисциплінарним завданням, яке досі не охоплює повною мірою кількісне визначення як вигод, так і ризиків, пов'язаних з їх функціонуванням у міському середовищі [13].

Альтернативою до економікоцентричних методів є підхід emergy accounting, що дозволяє кількісно оцінювати ресурсні витрати в біофізичних одиницях через енергетичні трансформації. Згідно з концепцією Г.Т. Одума [14], емергія – це сукупна (пряма і непряма) енергія, необхідна для створення продукту чи послуги, виражена у сонячних джоулях. Метод передбачає облік усіх потоків ресурсів (енергії, матеріалів, праці, інформації) в єдиній уніфікованій одиниці виміру. Це дає змогу розглядати зелені конструкції не лише як архітектурні елементи, а як частину енергетично відкритих екосистем, що взаємодіють із локальними та глобальними біофізичними процесами.

Попри успішне застосування підходу emergy для оцінки екосистемних послуг у зелених зонах, досі відсутня уніфікована система для масштабного аналізу вигод і ризиків різних типів зелених конструкцій. Хоча низка досліджень [15] підтверджує ефективність методу у виявленні екологічних переваг, нерідко поза увагою залишаються потенційні негативні наслідки – пошкодження інфраструктури, ризики біологічної активності або недооцінка гідрологічної ефективності в дощовий період.

Метою дослідження є розробка методики оцінки екосистемних функцій та супутніх впливів зелених конструкцій за емергетичним підходом, а також аналіз переваг і диспослуг найпоширеніших типів зелених рішень у міському середовищі.

Практична цінність методології полягає в її використанні як інструменту екологічного планування, що поєднує емергетичний та екосистемний підходи, дозволяючи кількісно оцінювати ефективність зелених конструкцій для забезпечення довгострокової екологічної стійкості. Результати можуть слугувати для оптимізації проєктів, обґрунтування інвестицій у зелену інфраструктуру та розробки муніципальних політик екологічної трансформації міського середовища.

Матеріали та методи

Для комплексного аналізу функціонування міських зелених конструкцій було застосовано метод емергійного аналізу, який охоплює чотири взаємопов'язані напрями оцінки:

1) *Оцінка витрат на впровадження та експлуатацію*. Цей аспект відображає ресурси, необхідні для проєктування, будівництва та обслуговування зелених конструкцій. Розрахунок проводиться шляхом множення витратних потоків (матеріальних, енергетичних, трудових, інформаційних) на одиничні емергетичні значення (*UEV* – Unit Emergy Value). Сумарна енергія дозволяє кількісно визначити енергоємність конструкції та обсяг вкладеного природного капіталу.

2) *Оцінка екосистемних послуг*. Зелені конструкції виконують низку корисних функцій, які класифікуються як проміжні послуги (наприклад, чиста первинна продуктивність – Net Primary Production, *NPP*) та кінцеві послуги

(зокрема, регулювання мікроклімату, шумопоглинання, секвестрація вуглецю, акумуляція дощової води тощо). Для кожної з послуг визначається її кількісний показник $S(P_i)$, після чого застосовується відповідне значення UEV з метою розрахунку емергії, необхідної для забезпечення відповідної екосистемної функції:

$$E_m = S(P_i) \times UEV_i, \quad (1)$$

де $S(P_i)$ – кількість i-ї послуги (наприклад, секвестрації CO_2), а UEV_i – одиничне значення емергії на одиницю цієї послуги або процесу (наприклад, секвестрація 1 г CO_2). Значення $S(P_i)$ для конкретної зеленої конструкції та відповідне UEV для розглянутого процесу визначаються на основі наявних даних у спеціалізованій літературі та дослідженнях у сфері міських зелених інфраструктур.

3) *Оцінка екологічних витрат на компенсацію шкоди для здоров'я населення та біорізноманіття*. Зелені конструкції здатні виконувати компенсаторну функцію, знижуючи ризики та негативні наслідки для довкілля і здоров'я населення, які виникають під впливом соціально-економічних чинників. Їх наявність дозволяє зменшити потребу в енергоємних технологічних заходах, спрямованих на ліквідацію екологічної шкоди. Для кількісної оцінки таких ефектів використовується підхід життєвого циклу – ReCiPe Endpoint 2016 (*LCA*), реалізований із застосуванням бази даних Ecoinvent 3.5 [16].

Зазначена методика дозволяє оцінити два ключові індикатори: шкоду для здоров'я населення, виражену в роках життя з поправкою на інвалідність (*DALY* – Disability-Adjusted Life Years); шкоду для біорізноманіття, що розраховується як зникла частка видів на одиницю площі за певний проміжок часу (PDF × м² × рік, де PDF – Potentially Disappeared Fraction of species).

Обидва показники перетворюються в емергійні одиниці через множення на відповідні UEV, що дозволяє оцінювати втрати як екологічну вартість у термінах енергії для запобігання або компенсації шкоди. За відсутності зелених конструкцій оцінюють альтернативні витрати на інженерні чи технологічні рішення, наприклад, штучну секвестрацію вуглецю або медичні та екосистемні заходи для зменшення впливу глобального потепління. Загальні емергійні витрати (Em_p) у цьому випадку визначаються за формулою:

$$Em_{health} = P \times DALY \times UEV_{DALY}, \quad (2)$$

де P – інтенсивність впливу (наприклад, концентрація CO_2), а UEV – одинична емергійна вартість для відповідного типу шкоди. Отже, порівняння між емергійними витратами на профілактику шкоди за рахунок зелених конструкцій і витратами на технологічну компенсацію дозволяє оцінити екологічну ефективність таких природоорієнтованих рішень у міському середовищі.

4) *Визначення екосистемних диспослуг*. Зелені конструкції, попри численні переваги, можуть спричиняти негативні ефекти: підвищення алергенності повітря, пошкодження інфраструктури кореневими системами, накопичення сміття або ризики, пов'язані з діяльністю тварин. Для кількісної оцінки цих впливів застосовують емергетичний облік, що визначає енергію та ресурси, необхідні для їх усунення або пом'якшення, забезпечуючи комплексну оцінку як вигод, так і потенційних ризиків зелених конструкцій.

1.1. Екосистемні послуги

Генерація чистої первинної продуктивності. NPP відображає обсяг вуглецю, акумульованого рослинністю через фотосинтез з урахуванням дихання, і є ключовим показником біологічної продуктивності зелених конструкцій [17]. В емергетичному аналізі його збільшення свідчить про синергію природних енергетичних потоків та залучених антропогенних ресурсів, що забезпечують сталу роботу конструкції. Емергійна оцінка *NPP* проводиться за формулою:

$$Em_{NPP} = \sum R_{(i)} + \sum P_{(i)}, \quad (3)$$

де Em_{NPP} – загальна емергія (sej/м²/рік), асоційована з формуванням чистої первинної продуктивності; $\sum R_{(i)}$ – сукупна емергія (від i = a до e), що надходить до системи з відновлюваних джерел, які забезпечують підтримку фотосинтетичних процесів: (a) сонячна енергія (Em_{solar}), (b) геотермальні потоки (Em_{geoth}), (c) енергія вітру (Em_{wind}), (d) енергетичний потенціал опадів, включаючи енергію випаровування (Em_{rain}), (e) геопотенціальна та хімічна енергія поверхневого стоку (Em_{runoff}); $\sum P_{(i)}$ – сумарна емергія (від i = 1 до n), пов'язана з антропогенними ресурсами, що застосовуються для експлуатації зелених конструкцій: матеріали, зрошення, добрива, пестициди тощо (у розрахунку на одиницю площі).

Поглинання вуглецю. У системах зелених конструкцій атмосферний CO_2 фіксується фотосинтезом і накопичується у фітомасі та ґрунті у вигляді органічних сполук. Частина вуглецю надходить у ґрунт через опадання листя, кореневу ексудацію та мінералізацію органіки. Сумарне поглинання вуглецю визначається як сума фіксації у вегетативній масі та стабільного збереження у ґрунті. Емергійна оцінка цього процесу для зелених конструкцій проводиться за формулою:

$$Em_{CS} = \sum_i (C_{FRi} \times UEV_{CSi}), \quad (4)$$

де: Em_{CS} – емергія, що підтримує механізм поглинання вуглецю (sej/м²/рік); C_{FRi} – щорічна швидкість фіксації вуглецю компонентом і (г/м²/рік); UEV_{CSi} – одиничне емергійне значення секвестрації вуглецю для відповідної зеленої конструкції (sej/гС).

Акумуляція води в ґрунті. Зелені дахи, конструкції дощових садів та інші зелені конструкції здатні затримувати дощову воду завдяки високій водоутримувальній здатності ґрунтово-рослинного шару. Це сприяє зменшенню об'єму поверхневого стоку та підвищенню локальної водоутримувальної здатності [18]. Емергійна вартість утримання води в межах таких систем обчислюється за формулою:

$$Em_{WR} = \sum_i (R_{wri} \times 0.001 \times R_f) \times UEV_{ws}, \quad (5)$$

де: Em_{WR} – емергія, необхідна для акумуляції води в субстраті зелених конструкцій (sej/м²/рік); R_{wri} – обсяг затриманої дощової води конструкцією i-го типу (г/м²/добу); R_f – кількість днів із опадами протягом року (днів/рік); UEV_{ws} – емергійне значення для утримання 1 кг води (sej/кг).

Регулювання мікроклімату. Зелені конструкції впливають на мікроклімат шляхом випаровування води, охолодження поверхонь і підвищення відносної

вологості повітря. Енергія, що витрачається на випаровування води, розглядається як індикатор впливу на мікрокліматичні умови. Емергійна оцінка мікрокліматичної регуляції визначається наступним чином:

$$Em_{ET} = \sum_i (E_{tri} \times \rho \times 1{,}000) \times UEV_{mr}, \quad (6)$$

де: Em_{ET} – емергія, що відповідає за регуляцію мікроклімату (sej/м²/рік); E_{tri} – річний обсяг випаровування в конструкції *i*-го типу (мм/рік); ρ – густина води (кг/м³); 1,000 – коефіцієнт перерахунку з кг в г; UEV_{mr} – одинична емергія водяної пари (sej/г).

Поповнення ґрунтових вод. Зелені конструкції сприяють поповненню та підтримці ґрунтових вод через інфільтрацію опадів, взаємодію поверхневих і підземних вод та регулювання зливових стоків. Дощові сади та проникні зелені зони забезпечують надходження води у водоносні горизонти, що посилюється проникністю субстрату та активністю кореневих систем. Емергійна оцінка цього внеску проводиться за формулою:

$$Em_{gw} = \sum (R_i \times \rho \times G \times k_i) \times UEV_{gw}, \quad (7)$$

де: Em_{gw} – емергія, що відповідає за поповнення підземних вод (sej/м²/рік); R_i – кількість опадів у зоні впливу і-ї конструкції (м/рік); G – вільна енергія Гіббса (Дж/г); k_i – коефіцієнт інфільтрації для конкретного типу зеленої конструкції; UEV_{gw} – емергійне значення для підземних вод (sej/Дж).

Утримання ґрунту в зелених конструкціях. Взаємозв'язок біорізноманіття та ерозії ґрунтів є багатофакторним. Щорічно на планеті втрачається близько 2,8 т ґрунту на гектар [19]. У міському середовищі зелені конструкції ефективно протидіють ерозії: коренева система підвищує структурну стійкість ґрунту, а надземні частини рослин зменшують інтенсивність опадів, захищаючи слабкі рослини та запобігаючи вимиванню пухких шарів. Кількісна оцінка цієї екосистемної послуги проводиться за формулою:

$$Em_{er} = (S_{er} - R_{er}) \times 10^{-3} \times UEV_C, \quad (8)$$

де: Em_{er} – емергійне значення утримання ґрунту (sej/м²/рік); S_{er} – потенційна ерозія ґрунту в системі зелених конструкцій (т/км²); R_{er} – фактична ерозія ґрунту (т/км²); 10^{-3} – коефіцієнт перерахунку з г у кг; UEV_C – питома емергія ґрунту (sej/кг).

Цей підхід дозволяє кількісно визначити внесок зелених конструкцій у стабілізацію ґрунтового покриву та мінімізацію втрат ґрунту в урбанізованих середовищах.

1.2. Вплив на стан здоров'я населення та біорізноманіття

Вплив забруднення повітря. У минулому для оцінки впливу шкідливих викидів на навколишнє середовище застосовувалися різноманітні методи. Водночас доцільно інтегрувати підхід прямого емергійного обліку в методологію, здатну оцінювати як екологічні витрати на шкоду довкіллю, так і вплив на здоров'я людей з точки зору емергії [20]. Рамкова методика Eco-Indicator 99 передбачає кількісну оцінку шкоди для здоров'я людини через *DALY* та шкоди екосистемам за допомогою *PDF*. Цей підхід став основою для пізніших методик *LCA* [21].

У цьому дослідженні для оцінки ролі зелених конструкцій у покращенні якості повітря застосовано адаптовану методику, яка відображає зниження негативного впливу на здоров'я людей та стан біорізноманіття.

Параметр зменшення шкоди для здоров'я людей обчислюється за допомогою рівняння:

$$Em_{HH} = \sum_i (P_i \times 10^{-3} \times DALY_i) \times UEV_{health}, \quad (9)$$

де: Em_{HH} – емергійна оцінка ресурсів, необхідних для зменшення шкоди здоров'ю людей (sej/m²/рік); P_i – здатність зеленої конструкції поглинати *i*-й забруднювач повітря (г/м²/рік); $DALY_i$ – втрати здоров'я людини через *i*-й забруднювач (людина·рік/кг); 10^{-3} – коефіцієнт перерахунку з г у кг; UEV_{health} – одинична емергійна вартість для охорони здоров'я (sej/особа/рік).

Показник зменшення деградації якості екосистем розраховується за наступним рівнянням:

$$Em_{EQ} = \sum_i (P_i \times 10^{-3} \times PDF_i) \times UEV_{PDF}, \quad (10)$$

де: Em_{EQ} – емергія, необхідна для зменшення шкоди від деградації якості екосистеми (sej/m²/рік); PDF_i – потенційно зникла фракція видів, спричинена *i*-м забруднювачем (м²·рік/кг); UEV_{PDF} – середнє одиничне емергетичне значення біомаси екосистеми (sej/м²/рік).

Загальна оцінка послуги очищення повітря:

$$Em_{AP} = Em_{HH} + Em_{EQ}. \quad (11)$$

Цей підхід дозволяє інтегрувати внесок зелених конструкцій у покращення міського середовища, оцінюючи одночасно вигоди для здоров'я населення та екосистемних компонентів.

Наслідки глобального потепління. Глобальна зміна клімату проявляється підвищенням середньорічних температур, посиленням кислотних опадів та руйнуванням озонового шару, при цьому найбільшу загрозу для здоров'я людини становить глобальне потепління. Зелені конструкції секвеструють атмосферний вуглець, пом'якшуючи вплив змін клімату та підтримуючи природні механізми регулювання. Обсяг цієї екосистемної послуги оцінюють за емергетичним підходом:

$$Em_{CRHH} = \sum_i (P_{csi} \times 10^{-3} \times DALY_{CSHHi}) \times UEV_{health}, \quad (12)$$

де Em_{CRHH} – емергія, необхідна для пом'якшення наслідків глобального потепління для здоров'я людини (sej/м²/рік); P_{csi} – річна кількість парникових газів, поглинутих *i*-ю складовою зелених конструкцій (г/м²/рік); $DALY_{CSHHi}$ – рік життя з поправкою на інвалідність, втрачений через вплив *i*-го парникового газу (людина·рік/кг); UEV_{health} – одинична емергійна вартість охорони здоров'я людини (sej/особа/рік).

Вплив шумового забруднення на здоров'я. Шумове забруднення у міському середовищі, зумовлене транспортним рухом, будівельною діяльністю та різними соціальними процесами, є значним фактором ризику для фізичного та психологічного здоров'я населення. Зелені конструкції здатні зменшувати рівень шумового впливу шляхом поглинання, відбиття та заломлення звукових хвиль. Рослинність впливає на акустичне середовище за трьома основними механізмами: поглинання звуку, коли звукові хвилі проходять крізь рослинний

шар; дифузія або розсіювання звуку, що виникає при взаємодії хвиль із листям, гілками та стеблами; відбиття звуку назад у простір, що знижує рівень енергії звукової хвилі, що досягає навколишніх об'єктів [22].

Застосування рослинності на фасадах будівель підвищує ефективність акустичного пом'якшення за рахунок численних відбиттів звукових хвиль, тоді як у відкритих просторах ефекти поглинання та дифузії сприяють зменшенню негативного впливу звукових відбиттів від земної поверхні.

Емергетичне визначення цієї екосистемної послуги здійснюється за формулою:

$$Em_{NHH} = \sum_i (N_{hai} \times DALY_i) \times UEV_{health}, \quad (13)$$

де Em_{NHH} – емергія, що відображає необхідні витрати для пом'якшення впливу шуму на здоров'я людини (sej/м²/рік); N_{hai} – ефективність i-ї компоненти зеленої конструкції у пом'якшенні шумового забруднення (дБ/м²); $DALY_i$ – втрати здоров'я через вплив шумового забруднення (людина·рік/дБ); UEV_{health} – одинична емергійна вартість охорони здоров'я людини (sej/особа).

1.3. *Екосистемні диспослуги*

Зелені відходи в зелених конструкціях. Після скошування трав'яного покриву в різних типах зелених конструкцій утворюються зелені відходи незалежно від способу проведення робіт – механічного чи ручного. Кількісну оцінку цих відходів здійснюють за допомогою формули:

$$Em_{GW} = D_{cost} \times EMR, \quad (14)$$

де: Em_{GW} – емергія зелених відходів (sej/м²/рік); D_{cost} – вартість збору та утилізації зелених відходів у межах GBI ($/м²/рік); EMR – одиничне емергійне значення утилізації відходів через трудові витрати (sej/$).

Пошкодження інфраструктури в зелених конструкціях. Серед екосистемних диспослуг зелених конструкцій варто виділити фізичне ушкодження міської інфраструктури внаслідок росту кореневої системи. На зелених дахах коріння трав і чагарників може проникати в гідроізоляційні шари, спричиняючи тріщини та пошкодження покриттів. У зелених стінах ліани створюють тиск на фасад, що призводить до відшарування облицювання та пошкодження герметиків. На наземних ділянках коріння дерев і чагарників, спрямоване до вологи й поживних речовин під твердими покриттями, здатне деформувати асфальт або бетон, утворюючи тріщини та підняття.

Для кількісної оцінки таких ушкоджень застосовують формулу:

$$Em_{IR} = ID \times UEV_{IR}, \quad (15)$$

де: Em_{IR} – емергійне значення, необхідне для усунення пошкоджень інфраструктури (sej/м²/рік); ID – кількість ушкоджень покриття чи фасаду в межах зелених конструкцій (г/м²/рік); UEV_{IR} – одиничне емергійне значення матеріалу інфраструктури (sej/г).

Результати та їх обговорення

Емергійна вартість будівництва та обслуговування зелених конструкцій. Оцінювання енергетичної доцільності міських зелених конструкцій потребує аналізу ресурсів на всіх етапах їх життєвого циклу. У межах емергійного

підходу ресурси класифікуються як відновлювані (сонячна енергія, опади) та невідновлювані (будівельні матеріали, енергія, праця, добрива, вода тощо). На прикладі інтенсивного зеленого даху встановлено, що частка відновлюваних ресурсів у структурі емергії становить лише ~0,02%, що свідчить про домінування антропогенних вкладень. Основне джерело відновлюваної енергії – атмосферні опади. Серед невідновлюваних ресурсів переважають мінеральні матеріали (пісок, перліт, ПГС) та верхній шар ґрунту, емергійна вартість якого сягає $7{,}04\times10^{12}$ sej/м²·рік.

У зелених стінах застосовуються легші субстрати з меншою водоємністю, що знижує витрати, але обмежує видовий склад та екосистемні функції. Для дощових садів характерне використання щебеню і гравію, які забезпечують фільтрацію, акумуляцію опадів і розвантаження зливової системи. Порівняльний аналіз показує, що оптимізація матеріалів, зокрема їх заміна на локальні або відновлювані, дозволяє знизити енерговитрати. Емергійний підхід дає змогу виявити ресурси з найвищим енергетичним навантаженням і сформувати рекомендації для екологічно ефективного проєктування.

Аналіз переваг зелених конструкцій за емергійними показниками. У межах дослідження було здійснено порівняльну емергійну оцінку екосистемних послуг, що генеруються різними типами зелених конструкцій у міському середовищі. Отримані результати наведено в таблиці 1, де відображено емергійні значення основних екосистемних функцій на одиницю площі.

Таблиця 1. Емергійні значення екосистемних послуг та пов'язані витрати на здоров'я людини і біорізноманіття для різних зелених конструкцій, sej/м²/рік

Екосистемні послуги	Параметр	Тип зелених конструкцій		
		Зелений дах	Дощовий сад	Зелена стіна
Чиста первинна продуктивність	Em_{NPP}	$1{,}08\times10^{14}$	$9{,}20\times10^{13}$	$2{,}57\times10^{12}$
Секвестрація вуглецю	Em_{CS}	$2{,}55\times10^{12}$	$1{,}33\times10^{12}$	$6{,}97\times10^{8}$
Акумуляція води в ґрунті	Em_{WR}	$2{,}54\times10^{8}$	$8{,}05\times10^{10}$	$1{,}33\times10^{10}$
Регулювання мікроклімату	Em_{ET}	$1{,}79\times10^{7}$	$4{,}04\times10^{9}$	$3{,}64\times10^{10}$
Зменшення ерозії ґрунту	Em_{er}	-	$5{,}24\times10^{11}$	-
Сумарна екосистемна послуга (з *NPP*)	$\mathrm{Max}(Es_i)$	$1{,}08\times10^{14}$	$9{,}20\times10^{13}$	$2{,}57\times10^{12}$
Сумарна екосистемна послуга (без *NPP*)	ΣEs_i	$2{,}55\times10^{12}$	$1{,}94\times10^{12}$	$5{,}05\times10^{10}$
Необхідні витрати на шкоду здоров'ю та біорізноманіттю				
Збитки від забруднення повітря	Em_{AP}	$3{,}62\times10^{10}$	$1{,}60\times10^{11}$	$2{,}57\times10^{10}$
Збитки від глобальної зміни клімату	Em_{CRHH}	$4{,}60\times10^{9}$	$2{,}45\times10^{9}$	$1{,}26\times10^{6}$
Збитки від шумового забруднення	Em_{NHH}	-	-	$5{,}77\times10^{12}$
Сумарні необхідні витрати на шкоду здоров'ю та біорізноманіттю	$\Sigma E_{DALY+PDF}$	$3{,}62\times10^{10}$	$1{,}60\times10^{11}$	$5{,}79\times10^{12}$

Найвищі сумарні значення екосистемних послуг (включно з *NPP*) зафіксовані для зелених дахів – $1{,}08\times10^{14}$ sej/м²·рік, що вказує на їх багатофункціональний потенціал. Для дощових садів цей показник становить $9{,}20\times10^{13}$ sej/м²·рік, а для зелених стін – лише $2{,}57\times10^{12}$ sej/м²·рік. При порівнянні сумарної екосистемної послуги без урахування *NPP*, зберігається розподіл*: зелений дах > дощовий сад > зелена стіна*. Найвищий потенціал поглинання вуглецю спостерігається у зелених дахів – $2{,}55\times10^{12}$ sej/м²·рік. Порівнянний рівень демонструють дощові сади ($1{,}33\times10^{12}$ sej/м²·рік). Натомість зелені стіни мають значно нижчий показник – лише $6{,}97\times10^{8}$ sej/м²·рік, що пояснюється обмеженим об'ємом субстрату, специфічною вертикальною геометрією та менш розвиненою фотосинтетичною активністю озеленення.

Серед усіх типів конструкцій зелені стіни демонструють найвищий потенціал мікрокліматичної регуляції – $3{,}64\times10^{10}$ sej/м²·рік. Це значення перевищує відповідні показники для дощових садів ($4{,}04\times10^{9}$) і зелених дахів ($1{,}79\times10^{7}$). Такий результат зумовлений щільною вертикальною поверхнею озеленення, що забезпечує ефективне затінення фасаду, зменшення теплового навантаження на будівлю та посилене випаровування з вертикальних площин. Однак, попри високі емергійні показники, ефективність зелених стін значною мірою залежить від наявності систем зрошення та виду рослинності. Дощові сади мають найвищу здатність до акумулювання дощової води ($8{,}05\times10^{10}$ sej/м²·рік), що обумовлено глибоким фільтраційним шаром і повільним поверхневим стоком. Для зелених дахів цей показник становить $2{,}54\times10^{8}$ sej/м²·рік, а для зелених стін – $1{,}33\times10^{10}$ sej/м²·рік.

Незважаючи на нижчі агреговані значення екосистемних послуг, зелені стіни демонструють виняткову ефективність у зниженні шумового забруднення. За показником емергійних витрат на зменшення шкоди від шуму цей тип конструкції має найвищий результат серед усіх: $5{,}77\times10^{12}$ sej/м²·рік, у той час як зелені дахи та дощові сади за цим показником не зазначені. Така шумоізоляційна функція зелених стін особливо цінна в умовах щільної міської забудови, де зниження рівня акустичного навантаження має прямий позитивний ефект на здоров'я людини.

Оцінка диспослуг зелених конструкцій. У практиці екосистемного управління важливо враховувати не лише користь, але й потенційні негативні наслідки (диспослуги), що супроводжують функціонування зелених конструкцій. Таблиця 2 демонструє, що найбільші емергійні витрати пов'язані з утилізацією зелених відходів, особливо для зелених дахів ($4{,}66\times10^{13}$ sej/м²/рік), що пояснюється потребою регулярного скошування й вивезення біомаси.

Таблиця 2. Емергійна оцінка екосистемних диспослуг зелених конструкцій, sej/м²/рік

Екосистемні диспослуги	Зелений дах	Дощовий сад	Зелена стіна
Зелені відходи	$4{,}86\times10^{13}$	$1{,}58\times10^{13}$	$2{,}36\times10^{12}$
Пошкодження інфраструктури	-	-	$8{,}91\times10^{13}$
Сумарна величина диспослуг	$4{,}59\times10^{13}$	$1{,}41\times10^{13}$	$9{,}16\times10^{13}$

Для зелених стін характерна висока енергетична вартість інфраструктурного обслуговування, пов'язана зі складною конструкцією, необхідністю спеціального обладнання та обмеженим доступом до вертикальних поверхонь. Обслуговування таких систем часто потребує риштувань або висотного спорядження, що підвищує витрати. У дощових садах основні диспослуги пов'язані з періодичним очищенням від наносів і біомаси, проте їхній загальний емергійний слід є нижчим.

Економічна ефективність зелених стін у зниженні шумового навантаження на прикладі типових міських конфігурацій. Серед досліджених зелених конструкцій зелені стіни продемонстрували найвищі емергійні витрати на зниження шуму ($5{,}77\times10^{12}$ sej/м²·рік), що свідчить про їхню ефективність у покращенні акустичного середовища міста. Для детального аналізу розглянуто два типові багатоквартирні будинки в Україні: шестиповерхові, по 48 квартир, розташовані у вуличному каньйоні з трафіком 20 000 авт./добу. В обох випадках оцінено вплив зелених стін на фасаді внутрішнього двору з висотою 3 м (58 м² покриття) та 19,2 м (369 м²). Вартість установки становить 500 €/м² (термін служби 10 років), щорічне обслуговування – 25 €/м².

Оцінка зниження шумового навантаження за допомогою зеленої стіни проводилась на основі методики HEATCO [22], яка передбачає економічну оцінку шумового дискомфорту на рівні 10,095 євро/особу/дБ(А)/рік для шуму нижче 71 дБ(А). Естетичний ефект від наявності рослинного фасаду оцінювався у 5,8 євро на домогосподарство на рік, що еквівалентно приблизно 2,4 євро на особу на рік. Обидва показники були приведені до значень 2025 року шляхом коригування за індексом споживчих цін, який використовується як базовий рік аналізу.

Загальна кількість мешканців у вибраних будівлях, які отримують вигоду від зелених стін, становить приблизно 115 осіб (48 квартир, у середньому 2,4 особи на квартиру). Для малої стіни висотою 3 м прямий візуальний контакт з озелененням забезпечує перевагу лише одній квартирі у протилежному будинку, тоді як у варіанті з повним озелененням висотою 19,2 м таких квартир – шість. Внаслідок цього щорічна економічна вигода від шумозахисної функції становить 56,01 євро на особу для конфігурації з 3-метровою стіною та 51,03 євро на особу для конфігурації з висотою 19,2 м. Естетичні вигоди для обох варіантів оцінюються як 2,47 євро на особу на м² озелененого фасаду.

У табл. 3 узагальнено результати розрахунків співвідношення вигод і витрат для двох імітованих архітектурних конфігурацій багатоквартирних будинків, що відображають вплив зеленої стіни на зниження шумового навантаження та естетичні вигоди для мешканців.

Розрахунки співвідношення вигод до витрат свідчать, що в обох випадках переваги суттєво перевищують витрати. Для меншої зеленої стіни загальні вигоди становлять 18 867 євро, тоді як витрати – 3 495 євро. Для більшої конфігурації з фасадом 369 м² вигоди становлять 120 458 євро при витратах 22 235 євро. Варто зазначити, що з урахуванням акустичної ефективності зелена стіна, меншої висоти (3 м) демонструє кращі результати шумопоглинання (внаслідок розташування на рівні основних джерел звуку), що забезпечує їй вищу ефективність у контексті вартості вигоди. Це свідчить про необхідність адаптації параметрів конструкції до конкретних просторових умов для досягнення максимального результату.

Таблиця 3. Розрахунок співвідношення вигод і витрат для двох імітованих проєктів зелених стін різної висоти (3 м та 19,2 м)

Тип конструкції	Площа	Переваги (EUR)	Витрати (EUR)
Зелена стіна, висотою 3 м	58 м²		
– Переваги загасання шуму		1 932	
– Естетичні та функціональні переваги		16 935	
– Інвестиційні витрати			3 301
– Витрати на утримання			194
Підсумок		*18 867*	*3 495*
Зелена стіна, висотою 19,2 м	369 м²		
– Переваги загасання шуму		1 761	
– Естетичні та функціональні переваги		118 698	
– Інвестиційні витрати			20 999
– Витрати на утримання			1 236
Підсумок		*120 458*	*22 235*

Висновки

Результати дослідження підтверджують ефективність зелених конструкцій як важливого елементу сталого міського розвитку, здатного забезпечувати значний обсяг екосистемних послуг – від секвестрації вуглецю до шумозниження. Комплексна емергійна оцінка дозволила кількісно порівняти різні типи зелених рішень, виявивши, що зелені дахи мають найвищі показники сумарних екосистемних вигод, тоді як зелені стіни – найвищу ефективність у зниженні шумового забруднення. Водночас встановлено, що потенційні диспослуги, зокрема зелені відходи та пошкодження інфраструктури, можуть суттєво впливати на загальну екологічну вартість конструкцій. Запропонований емергійний підхід дозволяє враховувати як вигоди, так і ризики функціонування зелених систем у міському середовищі, що є важливим для прийняття збалансованих рішень у плануванні та управлінні міською зеленою інфраструктурою.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Karunaratne, T.L.W.; Chow, C.L. (2022). Fire Spread along Vertical Greenery Systems from Window Ejected Flame: A Study Based on a Fire Dynamic Simulator Model. *J. Build. Eng.*, *62*, 105359, doi:10.1016/j.jobe.2022.105359.
2. Pichlhöfer, A.; Korjenic, A.; Sulejmanovski, A.; Streit, E. (2023). Influence of Facade Greening with Ivy on Thermal Performance of Masonry Walls. *Sustainability*, *15*, 9546, doi:10.3390/su15129546.
3. Bagheri Moghaddam, F.; Fort Mir, J.M.; Navarro Delgado, I.; Redondo Dominguez, E. (2021). Evaluation of Thermal Comfort Performance of a Vertical Garden on a Glazed Façade and Its Effect on Building and Urban Scale, Case Study: An Office Building in Barcelona. *Sustainability*, *13*, 6706, doi:10.3390/su13126706.
4. Kim, H.; Oh, K.; Yoo, I. (2023). Analysis of Spatial Characteristics Contributing to Urban Cold Air Flow. *Land*, *12*, 2165, doi:10.3390/land12122165.

5. Lin, H.; Ni, H.; Xiao, Y.; Zhu, X. (2023). Couple Simulations with CFD and Ladybug + Honeybee Tools for Green Façade Optimizing the Thermal Comfort in a Transitional Space in Hot-Humid Climate. *J. Asian Archit. Build. Eng.*, *22*, 1317–1342, doi:10.1080/13467581.2022.2081574.
6. Kravchenko, M.V.; Tkachenko, T.M. (2023). Problems of Improving the Terminology and Modern Classification of "Green" Constructions for the Creation of Ukrainian "Green" Standards. *Collect. Sci. Publ. NUS*, *493*, 194–204, doi:10.15589/znp2023.4(493).26.
7. Kravchenko, M.; Trach, Y.; Trach, R.; Tkachenko, T.; Mileikovskyi, V. (2024). Improving the Efficiency and Environmental Friendliness of Urban Stormwater Management by Enhancing the Water Filtration Model in Rain Gardens. *Water*, *16*, 1316, doi:10.3390/w16101316.
8. Tkachenko, T.; Kravchenko, M.; Vasylenko, L.; Shumbar, K.; Shcherbak, A.; Zozulya, S. (2024). «Green» Structures in the Urbanized Environment: Studying the Impact of «green» Roofs on Environmental Parameters and Rainwater Quality. Bibliographic Review. *Probl. Water Supply Sewerage Hydraul.*, 48–64, doi:10.32347/2524-0021.2024.46.48-64.
9. Prudencio, L.; Null, S.E. (2018). Stormwater Management and Ecosystem Services: A Review. *Environ. Res. Lett.*, *13*, 033002, doi:10.1088/1748-9326/aaa81a.
10. Blanco, J.; Dendoncker, N.; Barnaud, C.; Sirami, C. (2019). Ecosystem Disservices Matter: Towards Their Systematic Integration within Ecosystem Service Research and Policy. *Ecosyst. Serv.*, *36*, 100913, doi:10.1016/j.ecoser.2019.100913.
11. Tian, Y.; Wu, H.; Zhang, G.; Wang, L.; Zheng, D.; Li, S. (2020). Perceptions of Ecosystem Services, Disservices and Willingness-to-Pay for Urban Green Space Conservation. *J. Environ. Manage.*, *260*, 110140, doi:10.1016/j.jenvman.2020.110140.
12. Saco, P.M.; McDonough, K.R.; Rodriguez, J.F.; Rivera-Zayas, J.; Sandi, S.G. (2021). The Role of Soils in the Regulation of Hazards and Extreme Events. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.*, *376*, 20200178, doi:10.1098/rstb.2020.0178.
13. Kravchenko, M.V.; Tkachenko, T.M. (2024). Calculation of the Ecological and Economic Effect of Collecting Rainwater with «green» Roofs. *Environ. Saf. Nat. Resour.*, *49*, 34–48, doi:10.32347/2411-4049.2024.1.34-48.
14. Odum, H.T. (1996). *Environmental Accounting: EMERGY and Environmental Decision Making*; Wiley: New York, NY, ISBN 978-0-471-11442-0.
15. Duan, N.; Liu, X.D.; Dai, J.; Lin, C.; Xia, X.H.; Gao, R.Y.; Wang, Y.; Chen, S.Q.; Yang, J.; Qi, J. (2011). Evaluating the Environmental Impacts of an Urban Wetland Park Based on Emergy Accounting and Life Cycle Assessment: A Case Study in Beijing. *Ecol. Model.*, *222*, 351–359, doi:10.1016/j.ecolmodel.2010.08.028.
16. Song, X.; Lv, X.; Li, C. (2015). Willingness and Motivation of Residents to Pay for Conservation of Urban Green Spaces in Jinan, China. *Acta Ecol. Sin.*, *35*, 89–94, doi:10.1016/j.chnaes.2015.06.003.
17. Chapin, F.S.; Eviner, V.T. (2007). Biogeochemistry of Terrestrial Net Primary Production. In *Treatise on Geochemistry*; Elsevier, pp. 1–35 ISBN 978-0-08-043751-4.
18. Kravchenko, M.; Wrzesiński, G.; Pawluk, K.; Lendo-Siwicka, M.; Markiewicz, A.; Tkachenko, T.; Mileikovskyi, V.; Zhovkva, O.; Szymanek, S.; Piechowicz, K. (2024). Improving Urban Stormwater Management Using the Hydrological Model of Water Infiltration by Rain Gardens Considering the Water Column. *Water*, *16*, 2339, doi:10.3390/w16162339.
19. Global Soil Erosion - ESDAC - European Commission Available online: https://esdac.jrc.ec.europa.eu/themes/global-soil-erosion (accessed on 19 August 2025).
20. Liu, G.; Yang, Z.; Chen, B.; Ulgiati, S. (2011). Monitoring Trends of Urban Development and Environmental Impact of Beijing, 1999–2006. *Sci. Total Environ.*, *409*, 3295–3308, doi:10.1016/j.scitotenv.2011.05.045.
21. Huijbregts, M.A.J.; Steinmann, Z.J.N.; Elshout, P.M.F.; Stam, G.; Verones, F.; Vieira, M.; Zijp, M.; Hollander, A.; Van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: A Harmonised Life Cycle Impact Assessment Method at Midpoint and Endpoint Level. *Int. J. Life Cycle Assess.*, *22*, 138–147, doi:10.1007/s11367-016-1246-y.

22. Veisten, K.; Smyrnova, Y.; Klæboe, R.; Hornikx, M.; Mosslemi, M.; Kang, J. (2012). Valuation of Green Walls and Green Roofs as Soundscape Measures: Including Monetised Amenity Values Together with Noise-Attenuation Values in a Cost-Benefit Analysis of a Green Wall Affecting Courtyards. *Int. J. Environ. Res. Public. Health*, *9*, 3770–3788, doi:10.3390/ijerph9113770.

Стаття надійшла до редакції 26.06.2025 і прийнята до друку після рецензування 18.09.2025

The article was received 26.06.2025 and was accepted after revision 18.09.2025

Шумбар Костянтин Вікторович
аспірант 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/0009-0000-0201-2142 ***e-mail:*** k.w.shumbar@gmail.com

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

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

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

Щербак Андрій Ігорович
аспірант 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/0009-0000-4594-6412 ***e-mail:*** andron.vr@gmail.com