

«ЗЕЛЕНІ» КОНСТРУКЦІЇ В УРБАНІЗОВАНОМУ СЕРЕДОВИЩІ: ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ «ЗЕЛЕНИХ» ДАХІВ НА ЯКІСТЬ ДОЩОВОЇ ВОДИ ТА ІНШІ ЕКОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ. БІБЛІОГРАФІЧНИЙ ОГЛЯД

Тетяна Ткаченко¹, Марина Кравченко², Леся Василенко³,
Костянтин Шумбар⁴, Андрій Щербак⁵, Сергій Зозуля⁶

Київський національний університет будівництва і архітектури
31, пр. Повітрофлотський, м. Київ, Україна, 03037

⁶ Національний авіаційний університет
1, пр. Любомира Гузара, м. Київ, Україна, 03058

¹ докт. техн. наук, tkachenko.tm@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0003-2105-5951

² канд. техн. наук, marina-diek@ukr.net, orcid.org/0000-0003-0428-6440

³ канд. техн. наук, lesya.kiev@ukr.net, orcid.org/0000-0003-4201-5481

⁴ аспірант, k.w.shumbar@gmail.com, orcid.org/0009-0000-0201-2142

⁵ аспірант, andron.vr@gmail.com, orcid.org/0009-0000-4594-6412

⁶ канд. техн. наук, sergeyzoz@ukr.net, orcid.org/0000-0002-1192-8088

DOI: 10.32347/2524-0021.2024.46.48-64

Анотація. Проведено кількісний аналіз найбільш цитованих статей, опублікованих у наукометричній базі даних Scopus до 2023 року. Показано, що більшість публікацій, об'єктом вивчення яких стали «зелені» конструкції, фокусуються на дослідженні «зелених» дахів. Наведено, що з 1981 року кількість досліджень «зелених» дахів неухильно зростає: приблизно 45% статей зосереджені на вивченні переваг у контексті термічного впливу та теплоізоляції, 18% – відведення дощової води, 15% – на якості повітря, 5% – на шумопоглинальних властивостях «зелених» дахів та 17% – витрати на будівництво та експлуатацію «зелених» дахів, рекреаційні об'єкти, протипожежний захист та інші супутні питання. Описано вимоги та загальноживані матеріали для стандартного «зеленого» даху, а також відсоткова частка наукових публікацій, залежно від функцій та задіяних шарів конструкції «зелених» дахів. Проведено аналіз найбільш цитованих наукових досліджень щодо впливу систем «зелених» дахів на якість дощового стоку. Показано, що результати досліджень, викладені в наведених публікаціях, свідчать про необхідність подальшого вивчення впливу «зеленого» даху на обсяг забруднення у воді, що стікає з її поверхні. Підкреслено, що подальші дослідження повинні бути зосереджені на конструктивних шарах даху (товщина і використовувані матеріали), а саме на товщині та видах шарів підкладки, а також на умовах догляду за рослинами (наприклад, внесення добрив), особливо на інтенсивних «зелених» дахах. Крім того, повинно бути вивчено та проаналізовано, як затримка дощової води рослинами та шаром ґрунту «зеленого» даху впливає на відносну вологість повітря поблизу будівлі в періоди без дощу. Виділено сукупність факторів, які відіграють головну роль в процесі впливу «зелених» дахів на якість дощового стоку. Здійснено аналіз найбільш цитованих наукових досліджень, присвячених зменшенню забруднюючих речовин повітря за допомогою «зелених» дахів. Зроблено висновок, що майбутні дослідження повинні бути зосереджені на вивченні видів рослин, які добре пристосовані до вирощування на дахах (в помірному кліматі) та найбільш ефективно здійснюють процес фотосинтезу, поглинаючи CO₂ і виділяючи O₂ в атмосферу навколо будівлі. Наведено аналіз найбільш цитованих наукових публікацій, присвячених дослідженню шумопоглинальних властивостей «зелених» дахів. Обґрунтовано необхідно максимально підвищувати відсоток впровадження «зелених» дахів на всіх будівлях і спорудах у місті для того, щоб «зелені» дахи могли суттєво впливати на якість навколишнього середовища в урбанізованих районах.

Ключові слова: «зелені» конструкції, «зелений» дах, переваги, перспективи, якість води, якість повітря, шумоізоляція, урбанізоване середовище.

© Ткаченко Т., Кравченко М., Василенко Л.,
Шумбар К., Щербак А., Зозуля С., 2024

ВСТУП

Сталий розвиток урбанізованих міст сьогодні є одним із найбільших викликів останніх кількох десятиліть, оскільки зміна клімату, антропогенна діяльність та посилення урбанізації призвели до низки негативних екологічних наслідків, таких як глобальне потепління, перевантаження міських каналізаційних систем внаслідок зливових опадів, забруднення повітря, ефект міського теплового острова, надмірний шум, зменшення біорізноманіття, сприяючи погіршенню психічного, психологічного та фізичного здоров'я людини. Для часткового вирішення цих проблем вже було розроблено та впроваджено багато сталих підходів, природоорієнтованих рішень, практичних заходів, методологій і алгоритмів, включаючи будівництво енергоефективних будівель, використання альтернативних джерел енергії, розширення зеленої інфраструктури тощо [1].

Сучасні природоорієнтовані рішення включають, в першу чергу, стратегії пом'якшення наслідків екологічних проблем шляхом розширення зеленої інфраструктури та впровадження різних систем озеленення будівель і споруд, які являють собою не просто поверхні, вкриті рослинністю, а складають єдину систему живої і неживої складової біогеоценозів урбанізованих міст в концепції сталого розвитку.

Сьогодні ринок пропонує кілька систем «зелених» конструкцій, таких як «зелені» покриття (дахи), «зелені» стіни, «зелені» фасади, які розробляються для підвищення продуктивності та довговічності будівель і споруд, а також часто використовуються як їх естетичний елемент для покращення відеоекологічного сприйняття. Однак сучасні технології, задіяні в цих системах, можуть максимізувати функціональні переваги рослин для продуктивності будівель, їх модернізації та часткового відновлення урбанізованих міст.

«Зелені» конструкції проєктуються та впроваджуються як штучні екосистеми, які покращують стійкість міст, виконуючи численні функції та надаючи широкий спектр взаємодіючих послуг і переваг у різних масштабах. Наукова спільнота за останні кілька

десятиліть виявила і дослідила значну кількість пов'язаних переваг, що охоплюють широкий спектр сфер сталого розвитку та визнають «зелені» конструкції ефективною технологією у всьому світі для боротьби зі зміною клімату, пом'якшення його наслідків та покращення якості міського повітря і води.

Переваги, які забезпечують системи «зелених» конструкцій в цілому, можна класифікувати наступним чином:

Енергетичні переваги. Численні теоретичні та експериментальні дослідження оцінювали потенціал енергозбереження системами «зелених» конструкцій [2 - 5]. Енергетичні переваги, що безпосередньо виражаються в зниженні навантаження на охолодження і обігрів, залежать від характеристик будівлі і процесів тепло- і масопередачі, які в першу чергу визначаються коефіцієнтами теплопередачі компонентів конструкції. Крім того, тип клімату, параметри конфігурації системи і характеристики рослинного покриву, виражені індексом площі листя, які впливають на затінення, випаровування, а також приховані та конвективні теплові потоки, мають значний вплив на енергетичну поведінку системи [6].

Екологічні переваги. Якість повітря. Зелена інфраструктура, включаючи «зелені» конструкції, сприяє збільшенню кількості та швидкості осадження забруднювачів повітря на рослинних ділянках, зменшуючи таким чином їх концентрацію та очищуючи повітря [7, 8], а також знижуючи концентрацію вуглекислого газу (CO₂), в першу чергу, за рахунок меншого енергоспоживання будівлею та фотосинтезу рослинами [9 – 11].

Екологічні переваги. Управління дощовими водами. «Зелені» конструкції мають значний регулюючий вплив на об'єм дощових вод, тим самим пом'якшуючи наслідки повеней. Крім того, вони сприяють покращенню якості стічних вод та зменшенню концентрації забруднювачів у зливових водах, оскільки рослини та ґрунтовий субстрат поглинають і фільтрують забруднюючі речовини, особливо нітратний та аміачний азот [12, 13].

Екологічні переваги. Шумопоглинання. Відомо, що рослинність може знижувати рівень шуму трьома способами. По-перше, звук може відбиватись і розсіюватись (дифрагувати) такими рослинними елементами, як стовбури і листя. Другим механізмом є поглинання звуку рослинністю. Цей ефект можна пояснити механічними коливаннями рослинних елементів, викликаними звуковими хвилями, що призводять до розсіювання шляхом перетворення звукової енергії в тепло. Свій внесок у загасання звуку вносять також термов'язкі ефекти прикордонного шару на поверхнях рослинності. В якості третього механізму можна також згадати, що рівень звуку може знижуватись за рахунок руйнівної інтерференції звукових хвиль через ґрунтовий шар «зелених» конструкцій. Цей ефект часто називають акустичним граунд-ефектом або зануренням у землю. Як правило, можна вважати, що шумопоглинальний ефект від рослинності в міському середовищі невеликий, і складає від 5 до 10 дБ. Факторів, що впливають на функцію рослинності в шумопоглинанні, безліч, таких як вид, розміри екрану, а також форма і розташування по відношенню до джерела шуму. Сама рослинність може знижувати рівень шуму до 8 дБ, а іноді і більше [14].

Переваги «зелених» конструкцій у якості екосистеми. «Зелені» конструкції можуть забезпечувати важливі екосистемні послуги для сталого розвитку міст, насамперед пов'язаних зі збільшенням біорізноманіття та ренатурацією міст [15].

Соціально-естетичні переваги. «Зелені» конструкції створюють середовище спокою та гарного настрою в центрі урбанізованого міста, тим самим сприяючи покращенню психологічного, фізичного здоров'я та благополуччя [16].

Економічні переваги. «Зелені» конструкції збільшують вартість нерухомості, що може сприяти збільшенню доходу та прибутку власників будівель, а також дозволяють отримати податкові пільги та відшкодування, оскільки місцеві органи влади та організації можуть пропонувати фінансові

стимули або знижки на впровадження «зелених» конструкцій у рамках своїх ініціатив щодо сталого розвитку, які допомагають компенсувати витрати на встановлення. Крім того, «зелені» конструкції можуть сприяти виконанню нормативних вимог щодо сталого розвитку та екологічних стандартів, тим самим уникаючи можливих штрафів та пені.

Для вивчення недоліків та тенденцій розвитку, пов'язаних із перевагами, які надають «зелені» конструкції, було проведено кількісний аналіз найбільш цитованих статей, опублікованих у Scopus до 2023 року. Більшість публікацій, об'єктом вивчення яких стали «зелені» конструкції, фокусуються на дослідженні «зелених» дахів, що свідчить про значний інтерес саме до цього виду конструкцій. Результати показують, що з 1981 року кількість досліджень «зелених» дахів неухильно зростає: приблизно 45% статей зосереджені на вивченні переваг у контексті термічного впливу та теплоізоляції, 18% – відведення дощової води, 15% – на якості повітря, 5% – на шумопоглинальних властивостях «зелених» дахів та 17% – витрати на будівництво та експлуатацію «зелених» дахів, рекреаційні об'єкти, протипожежний захист та інші супутні питання. За останні 30 років найбільша кількість дослідницьких проєктів, з отриманими науковими публікаціями, була виконана в США (понад 20% всіх опублікованих у світі робіт).

Не дивлячись на статистику, ми вирішили спрямувати нашу увагу на дослідженні трьох основних, на нашу думку, екологічних переваг, які забезпечують «зелені» дахи в сучасному урбанізованому середовищі, що дозволить ідентифікувати можливі напрямки для подальших досліджень та визначити шляхи вдосконалення екологічних практик у міському плануванні.

Метою роботи є аналіз найбільш цитованих наукових публікацій останніх років, що стосуються наукових процесів, моделей та методів оптимізації, які цілісно описують характеристики систем «зелених» дахів в аспекті трьох основних екологічних переваг: управління дощовими водами, покращення якості повітря та зниження рівня шуму.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Протягом останніх десятиліть було проведено значний обсяг наукових досліджень та опубліковано велику кількість наукових робіт, що відображають широкий спектр застосувань «зелених» конструкцій, переважно у формі «зелених» дахів, які можна розділити на три основні групи: (а) екстенсивні [17], визначені як одне з найефективніших рішень для впровадження сталого розвитку в будівельному секторі, що характеризуються невеликою глибиною ґрунту (менше 20 см) та рослинністю (наприклад, низькорослі рослини, трави та мохи), не потребують особливого догляду і не мають постійної системи зрошення, що дозволяє вважати їх економічно ефективною системою; б) прості або напівінтенсивні [18], рослинний шар яких може бути представлений зла-

ково-трав'яними видами, включаючи дикорослі рослини, багаторічні невеликі чагарники та деревні рослини, що вимагають помірного догляду та періодичного зрошення; і (с) інтенсивні [19], які характеризуються глибокими субстратами, що досягають глибини 1 м, здатними підтримувати більші рослини, такі як великі чагарники, кущі, клумби і навіть дерева, що вимагають систематичного догляду та зрошення.

Значна частина проаналізованих публікацій відображає результати експериментів у рамках окремих тематичних досліджень. Невелика кількість досліджень – пропонує опис математичних моделей впливу «зелених» дахів на окремі параметри навколишнього середовища. Оглядові статті складають невелику частину публікацій.

Деякі з цих тематичних груп, безпосередньо, пов'язані з шарами «зеленого» даху, представлені в таблиці 1.

Табл. 1. Вимоги та загальноновживані матеріали для стандартного «зеленого» даху

Table 1. Requirements and commonly used materials for a standard «green» roof

Пункт	Шари стандартного «зеленого» даху	Вимога	Типи матеріалів
1	2	3	4
1	Рослинний шар	Забезпечення ряду екологічних переваг, зокрема покращення якості повітря та стоку дощової води, а також шумопоглинання	Рослинність різних видів, в залежності від типу «зеленого» покриття
2	Культурний шар	Підтримка протягом тривалого часу агрономічних умов, необхідних для правильного розвитку рослинності	Суміш інертних пористих мінералів (лапілус, пемза і керамзит) і органічних матеріалів (компост і торф), на частку інертної фракції яких припадає від 50% до 90% об'єму ґрунту
3	Фільтрувальний елемент	Відокремлення культурного шару і дренажного елементу. Сприяння уникненню засмічення підстилаючих шарів дрібнозернистими матеріалами, які містяться в культурному шарі і переносяться водою	Геотекстиль, що складається з полімерних матеріалів, але може бути виготовлений і з зернистих заповнювачів

Закінчення табл.1 на ст. 52

1	2	3	4
4	Дренажний елемент	Забезпечення необхідного балансу між повітряними і водними системами конструкції «зеленого» даху. Відведення надмірної кількості води, накопиченої внаслідок опадів або поливу, з уникненням перенасичення пор, що може заважати належному доступу коренів до кисню	Зернисті заповнювачі: гравій та дрібний щебінь; лава та пемза; керамзит і сланець (подрібнений, неподрібнений). Вторинна сировина: черепиця; шлак; піноскло; дренажні мати: структуровані геомати; шиповані пластикові мати; мати з тканних волокон; пінопластові мати. Дренажні панелі: шиповані гумові панелі; профільовані жорсткі пластикові панелі; профільовані пластикові пінопластові панелі; панелі з модифікованого пінопласту
5	Водонакопичувальний елемент	Затримання води під час опадів або поливу з подальшим вивільненням її із системи за необхідності	Гранульовані заповнювачі або попередньо сформовані пластикові елементи
6	Шар захисту від коренів	Захист конструкції від потенційної дії коренів	Бітумні або ПВХ-мембрани.
7	Гідроізоляційний елемент	Захист конструкції від потенційного проникнення води	Бітумні або ПВХ-елементи, синтетичні каучуки (етиленпропілендієновий мономер і стирол-бутадієн-стирол)
8	Теплоізоляційний шар	Теплоізоляція, обігрів та охолодження поверхні даху	
9	Ущільнювальний елемент	Водонепроникність	Бітумні мембрани Синтетичні мембрани (поліолефінові та полівінілхлоридні)

Починаючи з кінця ХХ століття конструкції «зелених» дахів доповнюються додатковими шарами та елементами, спрямованими на додаткове накопичення, затримку, фільтрування і випаровування дощової води. Саме з цього моменту розглядається концепція «місто-губка», яка ґрунтується на природних механізмах відведення надлишку дощових стічних вод за допомогою природних елементів ландшафту та «зеленим» конструкціям. Крім того, сьогодні на практиці широко вживається поняття «блакитні» покрівлі та вторинне використання

дощових стічних вод для побутових потреб, де вода розглядається як важливий та цінний природний ресурс, що вимагає ефективного управління та раціонального використання в міському середовищі [13].

У таблиці 2 наведено тематичний розподіл наукових публікацій щодо «зелених» дахів за останні 30 років, які були індексовані в наукометричній базі даних Scopus. Також вказано відсоткову частку публікацій, які відносяться до конкретних тематичних груп.

Табл. 2. Відсоткова частка наукових публікацій, в залежності від функцій та задіяних шарів конструкції «зелених» дахів

Table 2. Percentage share of scientific publications, depending on the functions and layers of «green» roof construction involved

Предметна область	Проведені дослідження	Задіяний шар «зеленого» даху (згідно нумерації пунктів таблиці 1)	Відсоткова частка публікацій
Термічний вплив	Тепло- і масообмінні процеси в системі «зеленого» даху, усунення ефекту «міського теплового острова»	2, 8, 9	45%
Відведення дощової води та вплив на її якісний склад	Зменшення стоку опадів, утримання дощової води, фільтрація дощової води від забруднюючих речовин	1 – 5, 7, 9	18%
Архітектура та будівництво	Рекреаційні функції даху, довговічність покрівельного покриття, вологоізоляція	1–9	11%
Рослини (флора)	Підбір рослин під конкретні умови вирощування, секвестрація CO ₂ , виділення O ₂ , створення середовища існування тварин, евапотранспірація та випаровування, підтримка біорізноманіття урбанізованого середовища	1, 2	7%
Зменшення шуму	Звукоізоляція інтер'єру будівлі	1, 2, 8	5%
Забруднювачі повітря	Поглинання CO ₂ , NO _x , SO ₂ , захоплення зважених частинок, накопичення важких металів	1, 2	5%
Інші	Витрати на будівництво та експлуатацію «зеленого» даху, рекреаційні об'єкти, протипожежний захист та інші супутні питання	1–9	9%

«Зелені» дахи та покращення якості дощових вод. Урбанізовані території сучасних міст мають дуже обмежену здатність проникнення для дощових вод, особливо, інтенсивного ступеню. Це стає серйозною проблемою під час сильних опадів, штормів або танення снігу, оскільки системи водовідведення виявляються неефективними у відношенні великих обсягів стоку, що надходять протягом короткого часу. «Зелені» дахи можуть стати ефективним рішенням цієї проблеми, оскільки вони здатні накопичувати

та частково випаровувати дощову воду, тим самим сповільнюючи відведення води до каналізаційної системи.

Численні дослідження вивчали здатність «зелених» дахів затримувати дощові опади [20 – 22]. Ступінь затримки дощових вод, який зазвичай коливається від 40 до 60% від загальної кількості опадів, залежить від кількох факторів, таких як тип «зеленого» даху, глибина субстрату, склад і вологість, види рослинності, розмір рослин, а також тривалість та інтенсивність опадів [12].

Незважаючи на те, що здатність «зелених» дахів управляти кількістю дощових опадів добре висвітлена в науковій літературі, вплив цих систем на якість стоку залишається недостатньо вивченим та неоднозначним. Основним аргументом у цьому питанні є те, чи вони функціонують як поглиначі забруднень чи, навпаки, виступають джерелами забруднення.

У таблиці 3 представлено узагальнені результати найбільш цитованих досліджень, що стосуються впливу «зелених» дахів на якість дощових вод, з основним акцентом на те, як система «зеленого» даху взаємодіє з рівнем забруднення води.

Табл. 3. Аналіз найбільш цитованих наукових досліджень щодо впливу систем «зелених» дахів на якість стічних вод

Table 3. Analysis of the most cited scientific studies on the impact of «green» roof systems on wastewater quality

Джерело	Місце	Тип «зеленого» даху	Основні результати
1	2	3	4
[23]	Коннектикут, США	Екстенсивний «зелений» дах, площею 248 м ²	1. «Зелений» дах виступав в якості поглинача для NH ₃ -N, Zn і Pb, а також в якості джерела для Cu, NO ₃ ⁺ і NO ₂ -N, TP, PO ₄ -P, Hg та Zn. 2. «Зелений» дах сприяв підвищенню значення показника рН стічних вод до 7 або 8, таким чином нейтралізувавши вплив кислотних дощів.
[24]	Японія та Швеція	Інтенсивний «зелений» дах в Японії та екстенсивний «зелений» дах у Швеції	1. Обидва «зелені» дахи виконували роль поглинача нітратного та амонійного азоту (NO ₃ -N та NH ₄ -N). 2. Обидва «зелені» дахи виступали джерелом органічного вуглецю і калію. 3. Екстенсивний «зелений» дах сприяв вивільненню фосфору. 4. Спостерігалось підвищення показника рН стічних вод, що нейтралізувало вплив кислотних дощів.
[25]	Індія	Пілотний проєкт «зеленого» даху з різними ґрунтовими субстратами та конфігураціями, включаючи системи з рослинами та без рослин, а також різні умови штучного поливу	1. «Зелені» дахи виступали в якості поглинача для металів, таких як Ca, Mg, Al, Fe, Cr, Cu, Ni, Zn, Pb, Cd. 2. «Зелені» дахи сприяли підвищенню рівня показника рН дощової води. 3. Вибір ґрунтового субстрату та рослинності був додатковим фактором, що впливав на якість води.

Закічення табл.3 на ст. 55

Закінчення табл.3

1	2	3	4
[26]	Чунцин, Китай	Пілотний проєкт «зеленого» даху	<ol style="list-style-type: none"> 1. Було досягнуто задовільного рівня утримання забруднюючих речовин, що коливається від 35,5 до 100%, при середньому показнику 77,2%. 2. Досягнуто нейтралізації рівня показника рН дощової води. 3. «Зелений» дах виступав як поглинач для NH_4 і як джерело для $\text{NO}_3\text{-N}$, K^+, Si_4^+, Ca_2^+, ТОС (загальний органічний вуглець).
[27]	Пекін, Китай	9 типів екстенсивних «зелених» дахів з різними ґрунтовими субстратами та глибиною, типами рослинності, часом їх висадки та характеристиками опадів	<ol style="list-style-type: none"> 1. «Зелені» дахи сприяли зниженню концентрації деяких поживних речовин. 2. «Зелені» дахи підвищили концентрацію загального азоту, аміачного азоту ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) та нітратного азоту ($\text{NO}_3\text{-N}$).
[28]	Дінсі, провінція Ганьсу, Китай	Екстенсивний «зелений» дах	<ol style="list-style-type: none"> 1. Екстенсивний «зелений» дах виступав джерелом більшості забруднюючих речовин у зливових стоках. 2. Тип субстрату мав значний вплив на рівень показника рН, електропровідність, концентрації F^-, NO_3^-, і $\text{NO}_2\text{-N}$. 3. Тип рослинності виявився фактором впливу на концентрації Cl^-, SO_4^{2-}, і загального фосфору.

Отже, «зелені» дахи можуть зменшити забруднення міських дощових вод, фільтруючи та поглинаючи забруднюючі речовини, але вони також можуть виділяти забруднюючі речовини з ґрунту, рослин та добрив у воду. Аналізуючи проведений літературний огляд експериментальних досліджень, що присвячені впливу «зелених» дахів на якість дощового стоку, можна виділити наступну сукупність факторів, які відіграють головну роль в цьому процесі: техніка будівництва (глибина і склад ґрунтового шару, тип рослинності і дренажного шару); особливості установки та обслуговування (розробка плану обслуговування, включаючи частоту та типи робіт, які потрібно виконувати. Наприклад, регулярне видалення забруднень з поверхні покрівлі, а також контроль за станом дренажних сис-

тем); інтенсивність та динаміка опадів; напрям вітру; особливості землекористування навколишнього середовища (житлові або промислові райони); наявність локальних джерел забруднюючих речовин; якість поливної води та кількість внесених до субстрату добрив; наявність решток рослинної підстилки, мертвого коріння; вік покрівлі (час, що минув з моменту монтажу «зеленої» покрівлі).

Результати досліджень, викладені в наведених публікаціях, свідчать про необхідність подальшого вивчення впливу «зеленого» даху на обсяг забруднення у воді, що стікає з її поверхні. Подальші дослідження повинні бути зосереджені на конструктивних шарах даху (товщина і використовувані матеріали), а саме на товщині та видах шарів підкладки, а також на умовах догляду за ро-

слинами (наприклад, внесення добрив), особливо на інтенсивних «зелених» дахах. Крім того, повинно бути вивчено та проаналізовано, як затримка дощової води рослинами та шаром ґрунту «зеленого» даху впливає на відносну вологість повітря поблизу будівлі в періоди без дощу.

«Зелені» дахи та покращення якості повітря. Забруднення повітря є серйозною проблемою, особливо в центрах міст і урбанізованих районах.

Рослини володіють рядом властивостей, що сприяють зменшенню забруднення повітря та обмеженню кількості викидів, а саме: видаляють забруднюючі речовини з повітря (O_3 , NO_x , SO_2) та захоплюють тверді частинки ($PM_{2,5}$; PM_{10}) і пил через продиhi листків з використанням процесів осадження [29]; знижують температуру поверхні шляхом затінення або природного охолодження через випаровування (евапотраспірацію),

що сприяє зменшенню фотохімічних реакцій, які призводять до утворення забруднювачів повітря, і економії енергії для охолодження, тим самим зменшуючи викиди CO_2 [30]; відіграють ключову роль у поглинанні вуглецю шляхом фотосинтезу, що є основним механізмом, у якому рослини поглинають вуглекислий газ (CO_2) і перетворюють його на кисень. Продиhi, розташовані на епідермісі листя і стеблах рослин, є первинною зоною, де відбувається процес газообміну [31].

У таблиці 4 наведено аналіз найбільш цитованих наукових робіт, присвячених дослідженню однієї з основних переваг «зелених» дахів – поліпшення якості повітря в урбанізованих містах за рахунок значного зниження концентрації забруднюючих речовин і поглинання вуглецю, тим самим забезпечуючи внесок у кліматичну нейтральність.

Табл. 4. Аналіз найбільш цитованих наукових досліджень, присвячених зменшенню забруднюючих речовин повітря за допомогою «зелених» дахів

Table 4. Analysis of the most cited scientific studies on the reduction of air pollutants by means of «green» roofs

Джерело	Методологія	Місце	Забруднюючі речовини	Ефективність
1	2	3	4	5
[32]	Модель сухого осадження, яка була застосована для 170 екстенсивних, напівінтенсивних та інтенсивних «зелених» дахів	Чикаго, США	NO_2 , SO_2 , O_3 , PM_{10}	1675 кг забруднювачів повітря було видалено з 19,8 га «зелених» дахів за один рік, з яких 52% припадає на O_3 , 27% - на NO_2 , 14% - на PM_{10} і 7% - на SO_2
[33]	Експериментальне дослідження, спрямоване на порівняння 4 видів рослинності «зеленого» даху (<i>Agrostis stolonifera</i> , <i>Festuca rubra</i> , <i>Plantago lanceolata</i> , <i>Sedum album</i>) щодо здатності видаляти PM_{10}	Манчестер, Великобританія	Тверді частинки (PM_{10})	<i>A. stolonifera</i> і <i>F. rubra</i> виявились більш ефективними у видаленні PM_{10} . Розроблено модель для розрахунку річного потенціалу видалення PM_{10} для центру Манчестера, припускаючи, що всі плоскі дахи в даній області є «зеленими». Згідно з цією моделлю було виявлено можливість видалення PM_{10} у кількості 0,21 тонни

Закінчення табл.4 на ст. 57

Закінчення табл.4

1	2	3	4	5
[34]	Експериментальне дослідження вертикального профілю $PM_{2.5}$ вздовж градієнту висоти на «зеленому даху» ферми в США, на висоті 26 метрів над землею за різних метеорологічних умов	Бруклін Грейндж, США	Тверді частинки ($PM_{2.5}$)	Експерименти та спостереження показали зниження концентрації $PM_{2.5}$ на 7-33%, порівняно з рівнем концентрації на узбіччі
[35]	Польові вимірювання та моделювання сухого осадження	Портленд, США	O_3	Досягнуте зниження концентрації O_3 варіювалося від 0,25 до 1,8 мкг/м ³
[36]	Експериментальна кількісна оцінка поглинання вуглецю, що забезпечується «зеленим» дахом з регулярним поливом та без поливу	Японія	Поглинання вуглецю	Секвестр вуглецю для <i>Sedum mexicanum</i> на «зеленому» даху склав 336 г C/m^2 на рік для вологих умов з регулярним поливом і 276 г C/m^2 на рік – на періоди без поливу. Загальна річна секвестрація вуглецю для <i>Sedum aizoon</i> склала 459 г C/m^2 на рік при регулярному поливі і 336 г C/m^2 на рік – для неіригаційних умов
[37]	Експериментальне дослідження впливу систем «зелених» дахів» на поглинання вуглецю	Мешхед, Іран	Поглинання вуглецю	Використання таких трьох видів рослин, як <i>Sedum acre</i> , <i>Frankenia thymifolia</i> та <i>Vinca major</i> , дозволило скоротити річне споживання енергії для типової будівлі на 8,5; 8 і 7,1% відповідно, в той час як річний обсяг CO_2 , поглиненого цими рослинами в процесі фотосинтезу, становив 0,14; 2,07 і 0,61 кг/м ² відповідно
[38]	Польові вимірювання швидкості поглинання CO_2 рослинами «зеленому» даху в субтропічному кліматі Гонконгу та інтенсивності викидів у герметичній скляній камері, а також теоретичні розрахунки профілю концентрації CO_2 навколо «зеленого» даху	Гонконг	Поглинання вуглецю	У типовий сонячний період літа спостерігалось значно вище поглинання CO_2 вдень, що було викликано процесами фотосинтезу. Рівень поглинання CO_2 виявився залежним від виду та стану рослин, а також від положення «зеленого» даху і напрямку потоку навколишнього повітря. У сонячний день «зелений» дах проявляв потенціал зменшення викиду CO_2 в атмосферу на 2%
[39]	Метод коваріації Едді, що використовувався для вимірювання річного обміну CO_2 між поверхнею і атмосферою над «зеленим» дахом	Берлін, Німеччина	Поглинання вуглецю	Досліджуваний «зелений» дах поглинав вуглець зі швидкістю 85 г C/m^2 . Зроблено висновок, що наявність води, відповідні види рослинності і ґрунтовий субстрат можуть значно оптимізувати процес поглинання вуглецю

Добір рослинного асортименту для «зелених» дахів повинен проводитися, в першу чергу, з урахуванням покращення параметрів міського середовища і зниження газоподібних і твердих забруднювачів повітря. Проведені дослідження показують дуже різні результати впливу окремих видів рослин на параметри навколишнього середовища всередині будівлі, а також в навколишньому середовищі. Це дуже тісно пов'язано з кліматичними умовами і листковою поверхнею, характерною для конкретного виду рослин. Тому майбутні дослідження повинні бути зосереджені на вивченні видів рослин, які добре пристосовані до вирощування на дахах (в помірному кліматі) та найбільш ефективно здійснюють процес фотосинтезу, поглинаючи CO_2 і виділяючи O_2 в атмосферу навколо будівлі.

«Зелені» дахи та шумопоглинання. Системи «зелених» дахів на будівлях та спорудах сприяють зниженню шуму як у міському урбанізованому середовищі ззовні будівлі, так і в житловому, робочому або рекреаційному середовищі всередині будівлі. Перше пояснюється підвищеними характеристиками звукопоглинання «зеленим» дахом, порівняно із традиційним (без рослинності), тоді як друге – підвищеними втратами при передачі звуку, які забезпечує дах з рослинністю, порівняно зі стандартною покрівлею.

Частина звукової енергії, яка досягає покриття будівлі, передається через кілька шарів конструкції «зеленого» даху. Втрати при передачі T_L або індекс звукоізоляції R , обчислені або виміряні для кожної частоти, показують звукову енергію, втрачену при передачі на певній частоті. Діапазони частот, які зазвичай розглядаються для звуку в приміщенні, становлять 125–4000 Гц. Загальний зважений індекс шумопоглинання R_w є одним числом для всіх частот. Високі значення T_L , R або R_w , які вимірюються в дБ, свідчать про поліпшену звукоізоляцію та тишу в середовищі всередині будівлі.

Опубліковані експериментальні дані щодо шумопоглинальних властивостей «зелених» дахів є недостатніми і стосуються лише екстенсивних типів «зелених» дахів.

Проте, вони однозначно підтверджують вищевикладену гіпотезу.

Автори [40] показали, що екстенсивні «зелені» дахи можуть підвищити рівень шумопоглинання на 10 дБ на низьких частотах та до 20 дБ – на середніх частотах. Зменшення шуму на низьких частотах є важливим процесом, оскільки цього складно досягнути іншими методами.

Ґрунтуючись на експериментальних дослідженнях, автори [41] показали, що загальний зважений індекс шумопоглинання R_w , досягнутий в системі «зеленого» даху, є ідентичним з показниками стандартних дахів. Зокрема, «зелений» дах в поєднанні з фанерними панелями має зважений індекс шумопоглинання, який можна порівняти зі стандартною скатною покрівлею з черепиці (R_w складає від 43 до 47 дБ). «Зелений» дах з повітряною порожниною під ним, глибиною біля 80 мм, сприяє формуванню індексу шумопоглинання, який можна порівняти з показником від 100-метрового бетонного даху (R_w дорівнює 50 дБ).

Обидва дослідження показали, що глибина підкладки (і відповідна маса, яку вона додає системі) є одним з основних параметрів, що впливають на шумоізоляцію, яку забезпечує конструкція «зеленого» даху. Крім того, в рамках цих робіт було досліджено декілька інших конструктивних параметрів «зеленого» даху. Наприклад, автори [40] виявили вплив різних кореневих систем рослин на загальну звукоізоляцію. Гальбрун і Скеррі [41] досліджували вплив таких матеріалів дренажних систем, як мембрана, гравій і галька. Цікавим експериментальним результатом було те, що додавання повітряної порожнини в систему збільшило загальний зважений індекс шумопоглинання на 13 дБ. Таким чином, «зелені» дахи можна безумовно розглядати як альтернативу або як підсилюючий елемент шумопоглинання для традиційних дахів.

Основними параметрами, які впливають на шумопоглинальні властивості «зелених» дахів, є: вологість та ущільнення культурного шару; наявність органічних речовин в субстраті; рослинний покрив; площа листя;

щільність та орієнтація листя; наявність листя на поверхні культурного шару; розвиток рослин.

Так, ступінь шумопоглинання чистого субстрату збільшується обернено пропорційно до його вологості, глибини та з відсотком органічних речовин в субстраті, але зменшується зі ступенем ущільнення, а наявність листя на поверхні субстрату підвищує шумопоглинальні властивості «зеленого» даху, збільшуючи коефіцієнт поглинання на всіх частотах [40].

Результати досліджень, проведених на різних континентах і в різних кліматичних зонах, показують, що існують значні відмінності як у видах рослинності для «зелених» дахів, так і в конструктивних особливостях і їх впливові на параметри навколишнього середовища всередині і зовні будівель та споруд.

Тому постає необхідність в проведенні досліджень в лабораторних умовах, а також на існуючих зразках «зелених» дахів, щоб мати можливість визначити вплив рослинного шару та конструктивних особливостей в заданих умовах на окремі параметри міського середовища. У майбутньому це дозволить створити імітаційні програми для оцінки впливу нових будівель із «зеленими» дахами на навколишнє та урбанізоване середовище.

Крім того, варто підкреслити, що вплив «зелених» дахів на якість навколишнього середовища в містах багато в чому залежить від площі поверхні будівель з цим конструктивним рішенням. На сьогодні немає точних даних щодо загальної площі «зелених» дахів у масштабах світу. Єдині опубліковані цифри це ті, які охоплюються тематичними дослідженнями для окремих міст або оцінками для окремих країн світу. Вони представляють відсоткову частку «зелених» дахів у загальній площі покриттів, яка значно відрізняється в різних джерелах. Тому розробити алгоритм визначення поверхні «зелених» дахів в різних країнах, на континентах або в глобальному масштабі практично неможливо.

Ця стаття призначена, в першу чергу, для стимулювання рішень та сприяння розвитку

впровадження «зелених» дахів як ефективного методу поліпшення якості навколишнього середовища в урбанізованих районах. Наша мета полягає в обґрунтуванні важливості та переваг цього екологічного підходу, а також у заохоченні здійснення практичних ініціатив, спрямованих на впровадження «зелених» дахів, з метою забезпечення сталого розвитку та збереження природного середовища в міському контексті.

ВИСНОВКИ

Зелена інфраструктура – це набір елементів і стратегій, які сприяють більш сталому та ефективному розвитку урбанізованого середовища, і «зелені» дахи є частиною цієї системи. Впровадження «зелених» дахів в будівлях і спорудах спрямоване на використання ряду переваг, таких як економія енергії, покращення якості повітря та води, шумоізоляція, а також інших переваг, які досягаються за рахунок природних процесів, що здійснюються, в першу чергу, рослинним шаром.

Для того, щоб «зелені» дахи могли суттєво впливати на якість навколишнього середовища в урбанізованих районах, необхідно максимально підвищувати відсоток впровадження «зелених» дахів на всіх будівлях і спорудах у місті. Це можливо лише за умови, якщо орендодавці та місцева влада віддадуть перевагу саме такому типу рішення.

Однак впровадження систем «зеленого» даху пов'язане з низкою проблем, які необхідно врахувати. Витрати на впровадження, обслуговування та утримання такого типу конструкцій є вищими, порівняно із традиційною покрівлею. Крім того, при проектуванні будівель необхідно враховувати значну вагу від системи «зеленого» даху, а також надавати особливу увагу тепло- і гідроізоляції перекриття верхнього поверху будівлі.

Аналіз літератури дозволив систематизувати переваги «зелених» дахів та їх вплив на якість навколишнього середовища в міських умовах та сформував майбутній план наукових досліджень, який враховує методологію, що використовуються різними вченими

у своїх дослідженнях, проведених в умовах помірного клімату.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Mihalakakou G., Souliotis M., Papadaki M., Menounou P., Dimopoulos P., Kolokotsa D.** Green roofs as a nature-based solution for improving urban sustainability: Progress and perspectives // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023. Vol. 180. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113306>
2. **Maier D.** Perspective of using green walls to achieve better energy efficiency levels. A bibliometric review of the literature // *Energy and Buildings*, 2022. Vol. 264. 112070. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112070>
3. **Jameia E., Chaua H.W., Seyedmahmoudianb M., Stojcevskib A.** Review on the cooling potential of green roofs in different climates // *Science of The Total Environment*, 2021. Vol. 791. 148407. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148407>
4. **Bevilacqua P., Coma J., Perez G., Chocarro C., Juarez A., Sole C., De Simone M., Cabeza L.F.** Plant cover and floristic composition effect on thermal behaviour of extensive green roofs // *Building and Environment*, 2015. Vol. 92. P. 305–316. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.026>
5. **Berardi U.** The outdoor microclimate benefits and energy saving resulting from green roofs retrofits // *Energy and Buildings*, 2016. Vol. 121. P. 217-229. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.021>
6. **Alcazar S. S., Olivieri F., Neila J.** Green roofs: experimental and analytical study of its potential for urban microclimate regulation in Mediterranean-continental climates // *Urban Clim.* 2016. Vol. 17. P. 304-317. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.02.004>
7. **Tkachenko T., Mileikovskiy V., Konovaliuk V., Kravchenko M., Satin I.** Biotechnical approach for a continuous simultaneous increase of indoor and outdoor air quality // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 1254(1), 01 2074. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012074>
8. **Tomson M., Kumar P., Barwise Y., Perez P., Forehead H., French K.** Green infrastructure for air quality improvement in street canyons // *Environ Int.* 2021. Vol. 146. Article 106288. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106288>
9. **Syedabadi R., Eicker U., Karimi S.** Plant selection for green roofs and their impact on carbon sequestration and the building carbon footprint // *Environ Chall.* 2021. Vol. 4. Article 100119. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100119>
10. **Кравченко М. В., Ткаченко Т. М.** Роль «зелених» конструкцій у зменшенні викидів CO₂ в урбанізованих містах // *Екологічні проблеми сучасності: матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції*. 2023. С. 82-86.
11. **Ткаченко Т. М., Кравченко М. В.** Порівняльний аналіз ефективності різних типів «зелених» конструкцій в поглинанні CO₂ залежно від типу рослинності та субстрату // *Екологічні проблеми сучасності: матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції*. 2023. С. 94-98.
12. **Ткаченко Т. М., Мілейковський В. О., Кравченко М. В.** Вплив «зелених» покрівель на управління дощовими водами: огляд наукових досліджень та перспективи використання // *Екологічна безпека та природокористування: збірник наукових праць*. 2023. № 2 (46). С. 35 - 53. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.2.35-53>
13. **Кравченко М. В., Ткаченко Т. М., Мілейковський В. О.** Модифікація «зеленої» покрівлі з використанням технічних рішень для зменшення негативного впливу зливових вод в міських умовах // *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. 2023. № 43. С. 16 – 28. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.43.16-28>
14. **Azkorra Z., Pérez G., Coma J., Cabeza L.F., Bures S., Álvaro J.E., Erkoreka A., Urrestarazu M.** Evaluation of green walls as a passive acoustic insulation system for buildings // *Applied Acoustics*. 2015. Vol. 89. P. 46-56. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.09.010>
15. **Köhler M., Ksiazek-Mikenas K.** Green roofs as habitats for biodiversity. *Nature Based Strategies for Urban and Building // Sustainability*, 2018. P. 239–249. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812150-4.00022-7>
16. **Zhang W.Z. et al.** Synergistic effects of edible plants with light environment on the emotion and sleep of humans in long-duration isolated environment // *Life Sciences in Space Research*, 2020. Vol. 24. P. 42-49. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2019.11.003>
17. **Kolokotsa D., Lilli A. A., Lilli M. A., Nikolaidis N. P.** On the impact of nature-based solutions on citizens' health & well being // *Energy Build*, 2020. Vol. 229. Article 110527, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110527>
18. **Shafique M., Kim R., Rafiq N.** Green roof benefits, opportunities and challenges-A review // *Renew Sustain Energy Rev.*, 2018. Vol. 90. P. 757-773. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.006>
19. **Cadcone S.** Green roof design: state of the art on technology and materials // *Sustainability*. 2019.

- Vol. 11. P. 3020.
<https://doi.org/10.3390/su11113020>
20. **Gong Y., Yin D., Li J., Zhang X., Wang W., Fang X.** Performance assessment of extensive green roof runoff flow and quality control capacity based on pilot experiments // *Sci Total Environ.* 2019. Vol. 687. P. 505-515.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.100>
21. **Karteris M., Theodoridou I., Mallinis G., Tsiros E., Karteris A.** Towards a green sustainable strategy for Mediterranean cities: assessing the benefits of large-scale green roofs implementation in Thessaloniki, Northern Greece, using environmental modelling, GIS and very high spatial resolution remote sensing data // *Renew Sustain Energy Rev.*, 2016. Vol. 58. P. 510-525.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.098>
22. **Liu W., Qian Y., Yao L., Feng Q., Engel B.A., Chen W.** Identifying city-scale potential and priority areas for retrofitting green roofs and assessing their runoff reduction effectiveness in urban functional zones // *J. Clean Prod.*, 2022. Vol. 332.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130064>
23. **Gregoire B. G., Clausen J. C.** Effect of a modular extensive green roof on stormwater runoff and water quality // *Ecol Eng.*, 2011. Vol. 37. P. 963-969.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.02.004>
24. **Berndtsson J. C., Bengtsson L., Jinno K.** Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs Justyna // *Ecol Eng.*, 2009. Vol. 35. P. 369-380.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.09.020>
25. **Vijayaraghavan K., Joshi U. M.** Can green roof act as a sink for contaminants? A methodological study to evaluate runoff quality from green roofs // *Environ Pollut.*, 2014. Vol. 194. P. 121-129.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.07.021>
26. **Zhang Q., Miao L., Wang X., Liu D., Zhu L., Zhou B.** The capacity of greening roof to reduce stormwater runoff and pollution // *Landsc Urban Plann.*, 2015. Vol. 144. P. 142-150.
<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.08.017>
27. **Gong Y., Yin D., Li J., Zhang X., Wang W., Fang X.** Performance assessment of extensive green roof runoff flow and quality control capacity based on pilot experiments // *Sci Total Environ.*, 2019. Vol. 687. P. 505-515.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.100>
28. **Liu W., Angel B. A., Chen W., Wei W., Wang Y., Feng Q.** Quantifying the contributions of structural factors on runoff water quality from green roofs and optimizing assembled combinations using Taguchi method // *J. Hydrol.*, 2021. Vol. 593.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125864>
29. **Su Y., Liang Y.** Foliar uptake and translocation of formaldehyde with Bracket plants (*Chlorophytum comosum*) // *Journal of Hazardous Materials*, 2015. Vol. 291. P. 120-128.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.03.001>
30. **Akbari H., Pomerantz M., Taha H.** Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas // *Sol Energy*, 2001. Vol. 70. P. 295-310.
[https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00089-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00089-X)
31. **Wei Z., Le Q., Peng W., Yang Y., Yang H., Gu H., Lam S.S., Sonne C.A.** Review on Phytoremediation of Contaminants in Air, Water and Soil // *J. Hazard. Mater.*, 2021. 403. 123658.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123658>
32. **Yang J., Yu Q., Gong P.** Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago // *Atmos. Environ.* 2008. Vol. 42. P. 7266-7273.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.003>
33. **Speak A.F., Rothwell J.J., Lindley S.J., Smith C.L.** Urban particulate reduction by four species of green roof vegetation in a UK city // *Atmos Environ.* 2012. Vol. 61. P. 283-293.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.07.043>
34. **Tong Z., Whitlow T.H., Landers A., Flanner B.** A case study of air quality above an urban roof top vegetable farm // *Environ Pollut.* 2016. Vol. 208. P. 256-260.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.07.006>
35. **Ramasubramanian P., Starry O., Rosenstiel T., Gall E.T.** Pilot study on the impact of green roofs on ozone levels near building ventilation air supply // *Build Environ.* 2019. Vol. 151. P. 45-53.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.01.023>
36. **Kuronuma T., Watanabe H.** Relevance of carbon sequestration to the physiological and morphological traits of several green roof plants during the first year after construction // *American Journal of Plant Sciences.* 2017. Vol. 08. P. 14-27.
<https://doi.org/10.4236/ajps.2017.81002>
37. **Seyedabadi R., Eicker U., Karimi S.** Plant selection for green roofs and their impact on carbon sequestration and the building carbon footprint // *Environ Chall.* 2021. Vol. 4. Article 100119.
<https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100119>
38. **Li J.F., Wai O.W.H., Li Y.S., Zhan J.M., Ho Y.A., Li J.** Effect of green roof on ambient CO₂ concentration // *Build Environ.* 2010. Vol. 45. P. 2644-2651.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.05.025>
39. **Heusinger J., Weber S.** Extensive green roof CO₂ exchange and its seasonal variation quantified by eddy covariance measurements // *Sci Total*

Environ. 2017. Vol. 607–608. P. 623–632. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.052>

40. Connelly M., Hodgson M. Experimental investigation of the sound transmission of vegetated roofs // Appl Acoust. 2013. Vol. 74. P. 1136–1143. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.04.003>

41. Galbrun L., Scerri L. Sound insulation of lightweight extensive green roofs // Build Environ. 2017. Vol. 116. P. 130–139. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.02.008>

REFERENCES

1. Mihalakakou, G., Souliotis, M., Papadaki, M., Menounou, P., Dimopoulos, P., & Kolokotsa, D. (2023). Green roofs as a nature-based solution for improving urban sustainability: Progress and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 180, 113306. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113306>
2. Maier, D. (2022). Perspective of using green walls to achieve better energy efficiency levels. A bibliometric review of the literature. *Energy and Buildings*, 264, 112070. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112070>
3. Jameia, E., Chaua, H.W., Seyedmahmoudianb, M., & Stojcevskib, A. (2021). Review on the cooling potential of green roofs in different climates. *Science of The Total Environment*, 791, 148407. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148407>
4. Bevilacqua, P., Coma, J., Perez, G., Chocarro, C., Juarez, A., Sole, C., De Simone, M., & Cabeza, L.F. (2015). Plant cover and floristic composition effect on thermal behaviour of extensive green roofs. *Building and Environment*, 92, 305–316. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.026>
5. Berardi, U. (2016). The outdoor microclimate benefits and energy saving resulting from green roofs retrofits. *Energy and Buildings*, 121, 217–229. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.021>
6. Alcazar, S. S., Olivieri, F., & Neila, J. (2016). Green roofs: experimental and analytical study of its potential for urban microclimate regulation in Mediterranean-continental climates. *Urban Clim.*, 17, 304–317. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.02.004>
7. Tkachenko, T., Mileikovskiy, V., Konovaliuk, V., Kravchenko, M., & Satin I. (2023). Biotechnical approach for a continuous simultaneous increase of indoor and outdoor air quality. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 1254(1), 01 2074. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012074>
8. Tomson, M., Kumar, P., Barwise, Y., Perez, P., Forehead, H., & French, K. (2021). Green infrastructure for air quality improvement in street canyons. *Environ Int.* 146, 106288. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106288>
9. Seyedabadi, R., Eicker, U., & Karimi, S. (2021). Plant selection for green roofs and their impact on carbon sequestration and the building carbon footprint. *Environ Chall.*, 4, 100119. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100119>
10. Kravchenko, M. V., Tkachenko, T. M. (2023). The role of "green" structures in reducing CO₂ emissions in urbanized cities. *Environmental problems of our time: materials of the I International Scientific and Practical Conference*. 82–86. [in Ukrainian]
11. Tkachenko, T. M., & Kravchenko, M. V. (2023). Comparative analysis of the effectiveness of different types of "green" structures in absorbing CO₂ depending on the type of vegetation and substrate. *Ecological problems of our time: materials of the I International Scientific and Practical Conference*. 94–98. [in Ukrainian]
12. Tkachenko, T. M., Mileikovskiy, V. O., & Kravchenko, M. V. (2023). Influence of "green" roofs on rainwater management: a review of scientific research and prospects for use. *Ecological safety and nature management: a collection of scientific papers*, 2(46), 35–53. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.2.35-53>
13. Kravchenko, M. V., Tkachenko, T. M., & Mileikovskiy, V. O. (2023). Modification of the "green" roof using technical solutions to reduce the negative impact of stormwater in urban areas. *Problems of water supply, sewage and hydraulics*, 43, 16–28. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.43.16-28>
14. Azkorra, Z., Pérez, G., Coma, J., Cabeza, L.F., Bures, S., Álvaro, J.E., Erkoreka, A., & Urrestarazu, M. (2015). Evaluation of green walls as a passive acoustic insulation system for buildings. *Applied Acoustics*, 89, 46–56. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.09.010>
15. Köhler, M., & Ksiazek-Mikenas, K. (2018). Green roofs as habitats for biodiversity. *Nature Based Strategies for Urban and Building Sustainability*, 239–249. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812150-4.00022-7>
16. Zhang, W. Z., Liu, H., Li, Z., & Liu, H. (2020). Synergistic effects of edible plants with light environment on the emotion and sleep of humans in long-duration isolated environment. *Life Sciences in Space Research*, 24, 42–49. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2019.11.003>

17. Kolokotsa, D., Lilli, A. A., Lilli, M. A., & Nikolaidis, N. P. (2020). On the impact of nature-based solutions on citizens' health & wellbeing. *Energy Build.*, 229. 110527. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110527>
18. Shafique, M., Kim, R., & Rafiq, N. (2018). Green roof benefits, opportunities and challenges-A review. *Renew Sustain Energy Rev.*, 90. 757-773. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.006>
19. Cadcone, S. (2020). Green roof design: state of the art on technology and materials. *Sustainability*, 11. 3020. <https://doi.org/10.3390/su11113020>
20. Gong, Y., Yin, D., Li, J., Zhang, X., Wang, W., & Fang, X. (2019). Performance assessment of extensive green roof runoff flow and quality control capacity based on pilot experiments. *Sci Total Environ.*, 687. 505-515. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.100>
21. Karteris, M., Theodoridou, I., Mallinis, G., Tsiros, E., & Karteris, A. (2016). Towards a green sustainable strategy for Mediterranean cities: assessing the benefits of large-scale green roofs implementation in Thessaloniki, Northern Greece, using environmental modelling, GIS and very high spatial resolution remote sensing data. *Renew Sustain Energy Rev.*, 58. 510-525. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.098>
22. Liu, W., Qian, Y., Yao, L., Feng, Q., Engel, B. A., & Chen, W. (2022). Identifying city-scale potential and priority areas for retrofitting green roofs and assessing their runoff reduction effectiveness in urban functional zones. *J. Clean Prod.*, 332. 130064. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130064>
23. Gregoire, B. G., & Clausen, J. C. (2011). Effect of a modular extensive green roof on stormwater runoff and water quality. *Ecol Eng.*, 37(6). 963-969. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.02.004>
24. Berndtsson, J. C., Bengtsson, L., & Jinno, K. (2009). Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs Justyna. *Ecol Eng.*, 35(3). 369-380. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.09.020>
25. Vijayaraghavan, K., & Joshi, U. M. (2014). Can green roof act as a sink for contaminants? A methodological study to evaluate runoff quality from green roofs. *Environ Pollut.*, 194. 121-129. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.07.021>
26. Zhang, Q., Miao, L., Wang, X., Liu, D., Zhu, L., & Zhou, B. (2015). The capacity of greening roof to reduce stormwater runoff and pollution. *Landsc Urban Plann.*, 144. 142-150. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.08.017>
27. Gong, Y., Yin, D., Li, J., Zhang, X., Wang, W., & Fang, X. (2019). Performance assessment of extensive green roof runoff flow and quality control capacity based on pilot experiments. *Sci Total Environ.*, 687. 505-515. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.100>
28. Liu, W., Angel, B. A., Chen, W., Wei, W., Wang, Y., & Feng, Q. (2021). Quantifying the contributions of structural factors on runoff water quality from green roofs and optimizing assembled combinations using Taguchi method. *J. Hydrol.* 593. 125864. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125864>
29. Su, Y., & Liang, Y. (2015). Foliar uptake and translocation of formaldehyde with Bracket plants (*Chlorophytum comosum*). *Journal of Hazardous Materials.* 291. 120-128. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.03.001>
30. Akbari, H., Pomerantz, M., & Taha, H. (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Sol Energy.* 70. 295-310. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00089-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00089-X)
31. Wei, Z., Le, Q., Peng, W., Yang, Y., Yang, H., Gu, H., Lam, S. S., & Sonne, C. A. (2021). Review on Phytoremediation of Contaminants in Air, Water and Soil. *J. Hazard. Mater.*, 403. 123658. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123658>
32. Yang, J., Yu, Q., & Gong, P. (2008). Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. *Atmos. Environ.*, 42. 7266-7273. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.003>
33. Speak, A. F., Rothwell, J. J., Lindley, S. J., & Smith, C. L. (2012). Urban particulate reduction by four species of green roof vegetation in a UK city. *Atmos Environ.*, 61. 283-293. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.07.043>
34. Tong, Z., Whitlow, T. H., Landers, A., & Flanner, B. (2016). A case study of air quality above an urban roof top vegetable farm. *Environ Pollut.*, 208. 256-260. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.07.006>
35. Ramasubramanian, P., Starry, O., Rosenstiel, T., & Gall, E.T. (2019). Pilot study on the impact of green roofs on ozone levels near building ventilation air supply. *Build Environ.*, 151. 45-53. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.01.023>
36. Kuronuma, T., & Watanabe, H. (2017). Relevance of carbon sequestration to the physiological and morphological traits of several green roof plants during the first year after construction. *American Journal of Plant Sciences.* 08. 14-27. <https://doi.org/10.4236/ajps.2017.81002>

37. Seyedabadi, R., Eicker, U., & Karimi, S. (2021). Plant selection for green roofs and their impact on carbon sequestration and the building carbon footprint. *Environ Chall.*, 4. 100119. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100119>
38. Li, J. F., Wai, O. W. H., Li, Y. S., Zhan, J. M., Ho, Y. A., & Li, J. (2010). Effect of green roof on ambient CO₂ concentration. *Build Environ.*, 45. 2644-2651. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.05.025>
39. Heusinger, J., & Weber, S. (2017). Extensive green roof CO₂ exchange and its seasonal variation quantified by eddy covariance measurements. *Sci Total Environ.*, 607–608. 623-632. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.052>
40. Connelly, M., & Hodgson, M. (2013). Experimental investigation of the sound transmission of vegetated roofs. *Appl Acoust.*, 74. 1136-1143. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.04.003>
41. Galbrun, L., & Scerri, L. (2017). Sound insulation of lightweight extensive green roofs. *Build Environ.*, 116. 130-139. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.02.008>

«Green» structures in the urbanized environment: studying the impact of «green» roofs on environmental parameters and rainwater quality. Bibliographic review

*Tetiana Tkachenko, Maryna Kravchenko, Lesya Vasylenko,
Kostyantyn Shumbar, Andrii Shcherbak, Serhiy Zozulya*

Abstract. A quantitative analysis of the most cited articles published in the Scopus scientometric database by 2023 is carried out. It is shown that most of the publications, the object of study of which are "green" structures, focus on the study of "green" roofs. It is shown that since 1981, the number of studies on green roofs has been steadily increasing: approximately 45% of articles focus on the benefits in terms of thermal impact and thermal insulation, 18% on rainwater drainage, 15% on air quality, 5% on the noise-absorbing properties of green roofs, and 17% on the costs of building and operating green roofs, recreational facilities, fire protection, and other related issues. The requirements and commonly used materials for a standard green roof are described, as well as the percentage of scientific publications, depending on the functions and layers of green roof construction involved. An analysis of the most cited scientific studies on the impact of green roof systems on wastewater quality was conducted. It is shown that the results of the studies presented in these publications indicate the need for further study of the impact of a "green" roof on the amount of pollution in the water flowing from its surface. It is emphasized that further research should focus on the structural layers of the roof (thickness and materials used), namely the thickness and types of substrate layers, as well as on the conditions of plant care (e.g., fertilization), especially on intensive green roofs. In addition, it should be studied and analyzed how the retention of rainwater by plants and the soil layer of a green roof affects the relative humidity of the air near the building during periods without rain. The most cited scientific studies on the reduction of air pollutants by means of green roofs are analyzed. It is concluded that future research should focus on the study of plant species that are well adapted to growing on roofs (in temperate climates) and most effectively carry out the process of photosynthesis, absorbing CO₂ and releasing O₂ into the atmosphere around the building. The article analyzes the most cited scientific publications on the noise-absorbing properties of green roofs. It is substantiated that it is necessary to maximize the percentage of green roofs implementation on all buildings and structures in the city so that green roofs can significantly affect the quality of the environment in urbanized areas.

Keywords: "green" structures, "green" roof, benefits, prospects, water quality, air quality, noise insulation, urbanized environment.

Стаття надійшла до редакції 16.01.2024