

УДК 628.3:712.3

DOI <https://doi.org/10.32782/geotech2023.37.10>

Ткаченко Т.М., Кравченко М.В., Василенко Л.О.

Ткаченко Т.М., доктор технічних наук, професор, Київський національний університет будівництва і архітектури, ORCID: 0000-0003-2105-5951, tkachenko.tm@knuba.edu.ua

Кравченко М.В., кандидат технічних наук, доцент, Київський національний університет будівництва і архітектури, ORCID: 0000-0003-0428-6440, marina-diek@ukr.net

Василенко Л.О., кандидат технічних наук, доцент, Київський національний університет будівництва і архітектури, ORCID: 0000-0003-4201-5481, lesya.kiev@ukr.net

ВПЛИВ «ЗЕЛЕНИХ» ПОКРІВЕЛЬ НА ЯКІСТЬ ДОЩОВОГО СТОКУ В МІСЬКОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Наведено результати досліджень, які спрямовані на оцінку якості стоку із «зелених» дахів – як джерела забруднювальних речовин, зокрема важких металів. Обґрунтовано, що більшість наукових досліджень, присвячених вивченню якості зливної води із «зелених» покрівель, вказують на те, що ці системи здатні покращити якість стоку шляхом зменшення концентрації забруднювальних речовин і підвищення показників регулювання водного балансу в міських районах. Наведено результати досліджень, що підтверджують зміну показника рН у зливових водах із «зелених» покрівель порівняно з дощовою водою. Проаналізовано вплив типів рослинності та субстрату «зеленої» покрівлі на зміну фізико-хімічного складу дощової води. Показано, що «зелені» дахи з подвійним субстратом, у яких як адсорбційний шар може використовуватися суміш активованого вугілля з перлітом і вермикулітом, є ефективними в поглинанні органічних речовин, важких металів і всіх форм азоту для різної інтенсивності дощових опадів. Проаналізовано вплив віку (терміну експлуатації) «зеленої» покрівлі на якість стоку, а саме: наведено, що найнижча якість стоку спостерігається на ранніх стадіях експлуатації «зелених» покрівель, але якість води, як правило, покращується із часом, коли субстрат і рослинність стабілізуються в умовах екосистеми. Показано, що значення індексу якості стоку із «зелено-блакитного» даху є вищим порівняно із «зеленою» та традиційною покрівлею. Наведено результати наукових досліджень, які підтверджують ефективність «зелених» покрівель стосовно зміни концентрації органічних речовин (ХСК, БСК), важких металів, азоту, фосфору, рН і каламутності. Обґрунтовано та запропоновано перелік основних факторів, які впливають на якість поверхневого стоку води із «зеленої» покрівлі. Наведено схему циркуляції забруднювальних речовин у системі «зеленого» даху та потенціал різних факторів, які можуть виступати в ролі джерела або поглинача забруднювальних речовин.

Ключові слова: «зелений» дах, якість стоку, управління зливовими водами, фільтрація, дощова вода, фактори впливу, вік покрівлі, ефект «першого» зливу.

Вступ. Нестача води у всьому світі стає все більш актуальною проблемою. Дослідження в цій галузі показують, що управління водними ресурсами за допомогою оборотного водопостачання має основоположне значення в рамках концепції сталого розвитку та мінімізації екологічних ризиків. Використання дощової води є важливим альтернативним джерелом, яке потрібно враховувати під час водної кризи, з якою стикається планета. За інтеграції з концепцією «зелених» конструкцій збір та очищення дощової води в цих системах стає ще більш екологічною і стійкою практикою.

Ідея використання рослинного покриття на даху для управління дощовими водами має свої коріння ще з давніх часів. Відомо, що «зелені» конструкції існували з початку історії, проте, незважаючи на великі переваги, протягом багатьох років вони не мали широкої популярності, що було пов'язано з їх конструктивною складністю, технічними викликами та високою вартістю будівництва й обслуговування. Однак із розвитком технологій та появою нових матеріалів ці проблеми поступово вирішувалися, а вдосконалені

технічні рішення й інноваційні матеріали стали ключовими факторами, які сприяли зростанню інтересу до «зелених» конструкцій, зокрема, у галузі управління дощовими водами.

Розвиток «зелених» технологій у галузі збору, утримання та використання дощової води отримав значний поштовх наприкінці 90-х – на початку 2000-х років, коли відбулися суттєві прориви в дослідженнях та впровадженні цих систем, що привело до широкого визнання їх потенціалу.

Вагомі результати досліджень, пов'язані з кількістю та якістю дощового стоку із систем «зеленого» даху, були отримані вченими з Німеччини та США. Наприклад, у своїй роботі Міллер [1] досліджував процес управління дощовими стоками залежно від інтенсивності опадів і типів «зеленого» даху. Автори [2] протягом 1997–1998 років проводили дослідження щодо ефективності утримання дощового стоку з двох великих «зелених» дахів площею 360 м² з різною товщиною ґрунту (5 і 12 см) у місцевості поблизу Берліна. У цих дослідженнях встановлено, що загальний об'єм

утримання становив 30 і 40 мм відповідно до товщини ґрунту. Шмідт і Тешнер [3] вивчали особливості стоку із «зелених» дахів залежно від різних типів субстрату, включно з ґрунтом із високим вмістом органічних речовин.

У своїх дослідженнях автори [4, 5] зосередилися на вивченні впливу таких факторів, як товщина підкладки, глибина субстрату і вміст вологи в підкладці безпосередньо перед опадами, на процес утримання дощової води «зеленими» дахами.

Крім того, Делійський Центр науки та навколишнього середовища (Centre for Science and Environment, Індія), перша неурядова організація, яка досягнула значних здобутків у галузі створення системи управління водними ресурсами з використанням підходу збору дощової води, отримала Стокгольмську водну премію 2005 року. CSE присвятила багато досліджень різним системам збору дощової води, включно з резервуарами, ставками та технологіями на дахах, а також вивчала її перспективи використання для підживлення підземних вод, для поливу та в питних цілях [6].

Однією з головних проблем у разі використання дощової води, у тому числі і в непитних цілях, є її якість, яка може становити ризик для здоров'я споживачів. Встановлення «зелених» дахів є одним із варіантів, який може мінімізувати негативний вплив міського розвитку, забезпечуючи при цьому численні економічні та соціальні переваги.

Тобто перевага «зелених» дахів в урбоценозах полягає не тільки в зниженні навантаження на міські каналізаційні системи, а й у фільтрації дощових вод. Тому важливим фактором, який часто не береться до уваги в багатьох наукових дослідженнях, опублікованих у літературі, є якість стоку із «зелених» покрівель [7].

Крім того, серйозною екологічною проблемою сьогодні є кислотні дощі, до яких стають усе більш схильними міські райони через великі обсяги споживання енергії та викиди транспортних засобів. Дощова вода, проходячи через «зелені» дахи, утворює лужний або слабколужний стік, що допомагає запобігти закисленню міських дренажних систем, тому пом'якшення кислотних дощів стало ще однією з важливих екологічних послуг, які надають «зелені» покрівлі.

Однак результати експериментальних досліджень і висновки різної наукової спільноти світового рівня щодо переваг і недоліків ефективності процесу зміни якості дощової води «зеленими» покрівлями суттєво відрізняються.

Метою роботи є проведення наукового аналізу досліджень, пов'язаних із вивченням впливу різних факторів і типів «зелених» покрівель на параметри якості дощової води та визначення можливості покращення якості дощового стоку через використання таких систем.

Основна частина. Теоретично «зелені» дахи можуть виступати як адсорбенти для забруднювачів різної природи. Однак вони також потенційно можуть сприяти і погіршенню якості дощових вод

забруднюючими речовинами, що виділяються із субстрату, рослин і конструктивних елементів.

Дослідження, які спрямовані на оцінку якості стоку із «зелених» дахів як джерела забруднювальних речовин, мають дуже обмежену кількість наукових публікацій. Це свідчить про те, що ця тема є маловивченою і потребує подальшого розвитку із врахуванням різних факторів, таких як кліматичні умови, тип рослинності, що використовується для «зелених» покрівель, і методи очищення стоків, що виходять із них.

Так, дослідження, проведені на «зелених» дахах у Мальме, Швеція, показали, що рослинні дахи виступають як джерело забруднювальних речовин, зокрема важких металів [8].

Інше дослідження «зеленого» даху в Тарту, Естонія [9], підтвердило, що «зелена» покрівля із шаром щеглено значною мірою вплинула на якість дощової води, а саме: у стоці було виявлено вищі значення показників рН, БСК₇, твердих частинок і PO₄ порівняно зі стоком із дернового даху.

Протягом 9-місячного періоду моніторингу на двох «зелених» дахах, побудованих у басейні річки Нейз у Північній Кароліні, автори [10] визначили, що «зелений» дах функціонує як ефективна практика для утримання дощової води та зменшення пікового потоку. Проте результати аналізу якості води свідчать про виявлення вищих концентрацій забруднювальних речовин у стоці із «зеленого» даху порівняно з дощовими опадами і контрольним стоком.

Однак більшість наукових досліджень, присвячених вивченню якості дощової води із «зелених» покрівель, вказують на те, що такі конструкції дійсно здатні покращити якість стоку шляхом зменшення концентрації забруднювальних речовин і підвищення показників регулювання водного балансу в міських районах.

Так, у роботі [11] було досліджено п'ятнадцять зразків, зібраних із трьох експериментальних ділянок «зеленого» даху в Бразилії. Отримані результати вказують, що «зелена» покрівля сприяла збільшенню показника рН у зливових водах порівняно з дощовою водою. Дренажна вода із «зеленого» даху характеризувалася вищими значеннями каламутності через концентрації зважених частинок, а значення вільного залишкового хлору та мікробіологічні показники відповідали стандартам, встановленим законодавством Бразилії.

Інша робота [12] зосереджена на дослідженні «зеленого» даху як модифікованої неглибокої вертикальної системи для очищення дощової води в будівлях. Для визначення оптимальної конструкції такої системи були досліджені субстрат (перліт або вермикуліт), глибина субстрату (15 або 25 см) і види рослин (*Geranium zonale*, *Polygala myrtifolia* та *Atriplex halimus*). Експеримент проводився протягом 12 місяців у типових середземноморських кліматичних умовах на острові Лесвос, Греція. Результати показали, що «зелені» дахи, засаджені *Atriplex halimus* і заповнені вермикулітом на 20 см, проявили найвищу ефективність щодо ХСК (91 %), БСК (91 %) і каламутності (93 %).

Стосовно суміші субстратів, які використовуються в «зелених» покриттях, інші автори [13] стверджують, що додавання 60 або 80 % компосту призводить до інтенсифікації росту рослин і врожаю плодів.

З іншого боку, деякі дослідження показали [14], що наявність органічних речовин у субстраті може бути причиною появи забруднювальних речовин у стоці із «зеленого» даху. Крім того, було продемонстровано, що органічні компоненти, такі як кокосовий торф, підвищують у 5,2 раза свою початкову вагу за найвищого вмісту води.

Рекомендації німецьких вчених, розроблені для «зелених» дахів [15], вказують, що субстрат повинен містити лише 4–8 % і 6–12 % органічної речовини за об'ємом для екстенсивних та інтенсивних «зелених» дахів відповідно.

Ще одне дослідження [16] довело здатність великих «зелених» дахів із подвійним субстратом утримувати дощову воду та зменшувати вилуговування забруднювальних речовин. Субстрати в «зелених» дахах із подвійним шаром зазвичай складаються з верхнього покриття, який відповідає за органічне живлення рослин і нижнього шару, де завдяки адсорбції відбувається утримання води та зменшення концентрації забруднювальних речовин. Результати експериментальних досліджень показали, що «зелені» дахи з подвійним субстратом, у яких як адсорбційний шар використовувалася суміш активованого вугілля з перлітом і вермикулітом, мали вищі показники утримання опадів (65,9 і 55,4 %), ніж односубстратно-шарова «зелена» покриття (52,5 %). Крім того, «зелені» дахи з двома шарами підкладки виявилися ефективнішими в поглинанні органічних речовин, важких металів і всіх форм азоту для різної інтенсивності дощових опадів, а також сприяли пом'якшенню кислотних дощів, підвищивши значення рН приблизно з 5,6 в опадах до 6,5–7,6 в дощовому стоці. Також у стоці із «зеленого» даху не було виявлено ознак ефекту «першого» змиву для фосфатів, загального фосфору, аміачного азоту, нітратного азоту, загального азоту, органічних речовин, цинку, свинцю, хрому, марганцю, міді, рН або каламутності.

В іншій роботі [17] експериментально проаналізовано якість дощової води, що зливається в прототип «зеленого» даху, для цілей повторного використання. Досліджені фізико-хімічні показники води включали колірність, каламутність, показник рН, концентрації аміаку, азоту, нітритів, нітратів, ортофосфатів, загальних коліформ і термотолерантних коліформ. Більшість оцінених параметрів були в межах допустимих значень, тоді як ортофосфатів, фекальних коліформ, колірності та каламутності не було виявлено, тому авторами зроблено висновок, що використання «зелених» дахів демонструє потенціал і переваги порівняно з іншими методами боротьби з водною кризою.

Дослідження, проведені авторами [1] на інтенсивному «зеленому» даху в Японії та на екстенсивному «зеленому» даху в Швеції, показують, що як екстенсивні, так і інтенсивні рослинні дахи є поглиначами нітратного азоту ($\text{NO}_3\text{-N}$) і амонійного азоту ($\text{NH}_4\text{-N}$),

а вивільнення фосфору (у перерахунку на $\text{PO}_4\text{-P}$) спостерігається з обох типів даху, що може залежати, наприклад, від метеорологічних параметрів. Так, інтенсивний дощ вимиває більшу кількість фосфатів із «зеленого» даху, а в талій сніговій воді концентрація фосфатів є вищою через акумулювання забруднювальних речовин з атмосфери [18].

Матеріали, які використовуються в шарах підкладки, мають також суттєвий вплив на якість дощового стоку. Так, автори [19] охарактеризували вміст та обмінювальну здатність металів і мікроелементів у кількох шарах «зеленого» даху (аркаліт, гайдит, лассеніт, лавова порода) та дослідили ступінь впливу рослинного покриття на вилуговування із субстратів. Експериментальні результати, отримані в Південному Іллінойському університеті, свідчать про те, що жоден із розглянутих субстратів не є джерелом металів.

Дослідження, проведене авторами [20], демонструє значний вплив додавання біовугілля, отриманого з кукурудзяного та рисового лушпиння, на якість дощового стоку із «зелених» покриттів протягом 6 місяців. З додаванням біовугілля (10–20 %), спостерігалось зниження середньої загальної концентрації азоту (TN) у стоці з 103,68 мг/дм³ до 26,21–52,77 мг/дм³, зниження середньої концентрації розчиненого органічного вуглецю (DOC) з 94,47 мг/дм³ до 59,41 мг/дм³, а також підвищення рН із 7,15 до 7,50. Однак середня загальна концентрація фосфору (TP) збільшилася з 0,27 мг/дм³ до 0,57 мг/дм³. Як висновок, автори рекомендують додавати 10 % біовугілля до субстрату «зеленого» даху, щоб знизити ступінь первинного вимивання забруднювальних речовин і покращити якість води, що стікає.

Щодо впливу властивостей дренажного шару й інших конструктивних елементів на виділення забруднювальних речовин «зеленим» дахом, то літератури та наукових досліджень у цій сфері поки що мало.

Суше осадження, вивітрювання будівельних матеріалів і забруднення атмосфери у вигляді частинок, газів і аерозолів сприяють виникненню так званого явища першого змиву, яке визначається як непропорційне збільшення забруднювальних речовин за концентрацією або масою.

Ефект «першого змиву» – це явище, коли більша частина забруднювальних речовин вимивається під час початкової стадії дощової події [21]. Здебільшого це викликано швидким змиванням забруднювальних речовин, накопичених на поверхнях водозбору.

Так, у роботі [22] автори дослідили ефект «першого змиву» на дорогах, дахах і, зокрема, на «зелених» дахах. Виявилось, що основними забруднювальними компонентами «першого змиву» є азот і фосфор, концентрація яких у перших пробах становила понад 50 %.

Ще одним важливим фактором, який слід враховувати для оцінки якості стічної дощової води, є вік (тривалість експлуатації від моменту встановлення) «зеленої» покриттів.

У першій половині свого передбачуваного терміну експлуатації «зелена» покриття функціонує як джерело

поживних речовин, особливо фосфорних, завдяки наявності добрив у ґрунті, при цьому вона поводить як поглинач металів, зі значним їх зменшенням щодо початкової маси в річних масштабах [23].

Багато досліджень показали, що якість стоку із «зеленого» даху містить високий рівень азоту та фосфору. Так, автори [24] виявили, що концентрація фосфатів у стоці із «зелених» покрівель у перший рік після їх встановлення була близькою до рівнів концентрації в стічних водах, але знизилася до значень, характерних для сільськогосподарських систем, уже на четвертий рік експлуатації.

Найнижча якість стоку спостерігається на ранніх стадіях експлуатації «зелених» покрівель [25], але якість води зазвичай покращується з часом, коли субстрат і рослинність стабілізуються в умовах екосистеми [26].

Актуальним і цікавим є дослідження [27], у якому вивчалися різні екопокрівлі («зелені», «блакитні» та «зелено-блакитні»), які забезпечували зменшення кількості забруднювальних речовин у стічному водовідведенні, на відміну від традиційних дахів.

Зокрема, забруднювальні компоненти, такі як NO_3^- , DCr , DFe та DNi (розчинені хром, залізо та нікель), були виявлені у всіх типах екологічних дахів. «Блакитний» дах сприяв зменшенню концентрації розчиненого купрум (DCu) на 21,9 % і не вплинув на кумулятивне навантаження PO_3^- у стічному водовідведенні. Однак «зелений» і «зелено-блакитний» дахи стали джерелами PO_3^- та DCu. Значення індексу якості стоку (RQI) для «блакитного» даху було найвищим. Значення RQI для «зеленого» даху було значно нижчим, ніж у «блакитного» та «зелено-блакитного» дахів ($P < 0,05$). Ці результати свідчать про те, що якість стоку із «зелено-блакитного» даху була найкращою, а додавання додаткового шару утримання води до «зелених» дахів може значно покращити якість стоку.

Отже, аналізуючи проведений літературний огляд експериментальних досліджень, що присвячені впливу «зелених» покрівель на якість дощового стоку, можна виділити таку сукупність факторів, які відіграють головну роль у цьому процесі:

- техніка будівництва (глибина і склад ґрунтового шару, тип рослинності та дренажного шару);
- особливості встановлення й обслуговування (робота плану обслуговування, включно із частотою та типами робіт, які потрібно виконувати. Наприклад, регулярне видалення забруднень із поверхні покрівлі, а також контроль за станом дренажних систем);
- інтенсивність і динаміка опадів;
- напрямки вітру;
- особливості землекористування навколишнього середовища (житлові або промислові райони);
- наявність місцевих джерел забруднювальних 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).

Встановлено, що «зелена» покрівля чинить як позитивний, так і негативний вплив на якість стоку дощової води. Це також залежить від особливостей стоку, а саме: чим менша швидкість стоку, тим вища концентрація, наприклад, загального N, $\text{NH}_4\text{-N}$ і органічних речовин (BСК_7 і ХСК) в стічних водах.

Крім того, «зелені дахи» зазвичай виконують роль накопичувача: забруднювальні речовини акумулюються в шарах субстрату і можуть частково мігрувати в процесі вимивання їх інтенсивною дощовою водою. Унаслідок евапотранспірації частина розчинених у субстраті речовин випадає в осад і зв'язується з ґрунтом або з твердою матрицею дренажного шару. Зміна фізико-хімічних показників стоку здебільшого пов'язана з продуктивністю рослинності, взаємодією з їх кореневою системою, застосуванням добрив, складом ґрунту і дренажним шаром, що може впливати на поглинання деяких металів і органічних сполук, які провокують їх виділення [28].

Загальна схема циркуляції забруднювальних речовин у системі «зеленого» даху запропонована авторами на рис. 1.

У таблиці 1 авторами запропоновано порівняльний аналіз різних факторів, які можуть виступати як у ролі джерела, так і в ролі поглинача забруднювальних речовин у системі «зеленої» покрівлі. Для ефективного використання стічної води із «зеленого» даху в будівлях повинна бути визначена чітка мета водокористування, що може означати більші чи менші обмеження, пов'язані з її якістю, і передбачати різні методи очищення для забезпечення якості системи та здоров'я користувачів.

Варто підкреслити, що вік «зеленого» даху виступає як фактор, що може бути як джерелом, так і поглиначем забруднювальних речовин, оскільки із часом відбуваються різні процеси, які впливають на якість стоку та здатність субстрату утримувати або виводити забруднювальні речовини. Крім того, вік «зеленого» даху є одним із зовнішніх факторів, оскільки він є незалежним від самої структури та конструкції «зеленої» покрівлі й визначається терміном, протягом якого «зелений» дах функціонує і піддається впливу навколишнього середовища, такого як погодні умови, кліматичні зміни й інші зовнішні чинники.

Висновки. Важливими еколого-економічними перевагами «зелених» дахів у сучасних урбоценозах є: зменшення кількості стічних вод через випаровування та поглинання вологи рослинами; зниження навантаження на зливову каналізацію через зниження норми потоку води; покращення якості зливових вод завдяки природній фільтрації.

Ряд досліджень показали, що системи «зелених» дахів здатні накопичувати забруднювальні речовини з дощової води, але ступінь цього процесу все ще потрібно дослідити в деталях. Крім того, для мінімізації ризику міграції забруднювальних речовин, зокрема фосфору, потребуються подальші дослідження впливу

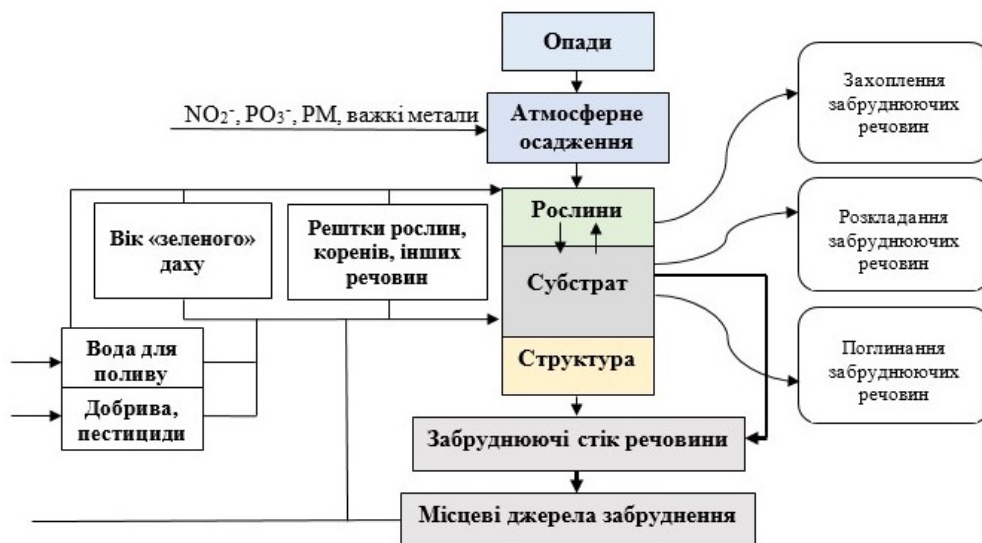


Рис. 1. Схема циркуляції забруднювальних речовин в системі «зеленого» даху
 Fig. 1. Scheme of the circulation of pollutants in the «green» roof system

Таблиця 1. Потенціал різних факторів, які можуть виступати в ролі джерела або поглинача забруднювальних речовин
 Table 1. The potential of various factors that can act as a source or absorber of pollutants

Фактори	Джерела забруднювальних речовин	Поглиначі забруднювальних речовин
Внутрішні фактори	<ol style="list-style-type: none"> 1. <i>Субстрат</i> «зеленої» покрівлі, включно з різними компонентами і глибиною, може містити важкі метали та поживні речовини, що здатні сприяти забрудненню зливної води. 2. <i>Конструкційні шари</i> можуть сприяти накопиченню важких металів через металеві, пластикові та полімерні матеріали, які використовуються в конструкції «зеленого» даху. 3. <i>Рослини</i> мають двобічний характер. З одного боку, вони можуть діяти як поглинач забруднювальних речовин, а з іншого – можуть бути джерелом забруднювальних речовин 	<ol style="list-style-type: none"> 1. <i>Рослини</i> виступають як поглиначі забруднювальних речовин шляхом фізіологічного метаболізму рослинної тканини та ризосферних мікроорганізмів. 2. Природні або штучні <i>субстрати</i>, додані компоненти, які мають здатність утримувати поживні речовини
Зовнішні фактори	<ol style="list-style-type: none"> 1. <i>Зрошення</i>, якщо вода, що подається, забруднена (особливо регенерована вода) різними поживними речовинами, такими як N і P. 2. <i>Добрива та пестициди</i>, включаючи органічні та хімічні речовини і органічний фосфор, хлор і азот. 3. <i>Атмосферне осадження</i>, у тому числі сухе та мокре осадження внаслідок сили тяжіння й опадів відповідно. 4. <i>Вік</i>, оскільки із часом біомаса рослин і екологічні функції «зеленої» покрівлі, а також рівні забруднювальних металів збільшуються, а поживні речовини субстрату зменшуються 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Вік «зеленого» даху може впливати на гідрологічні характеристики води та утримання забруднювальних речовин субстрату. 2. Вік рослинного покриву впливає на вміст поживних речовин у стоці. Порівняно «молоді зелені» покрівлі мають тимчасово високий рівень поживних речовин, які стабільно засвоюються та деградують із часом

різних субстратних сумішей і технічних операцій з обслуговування.

З кожним роком публікується все більше і більше статей на тему «зелених» конструкцій, але широкі огляди, які дають такий необхідний переріз цієї галузі досліджень і систематично оприлюднюють дані та визначають наявні прогалини, мало.

Подальші дослідження повинні бути зосереджені на матеріалах, які використовуються для будівництва «зеленої» покрівлі, особливо шари підкладки, а також

на проблемах технічного обслуговування «зелених» дахів (наприклад, внесення добрив).

Хоча ця стаття показує, що «зелені» дахи мають різні наслідки з погляду впливу на якість фізико-хімічного складу дощової води, але, безумовно, характер цього процесу є більше позитивним, а «зелені» покрівлі відіграють важливу роль у поліпшенні якості урбанізованого навколишнього середовища.

Розуміння впливу «зелених» дахів на якість стоку може допомогти в розвитку та впровадженні більш

стійких, екологічних технологій будівництва й забезпечити благоустрій міст. У зв'язку із цим науково-практична співпраця між науковцями, політиками та практиками є важливою для передачі нових знань про «зелені» конструкції, допомагаючи містам і міським регіонам розробляти відповідні стратегії їх впровадження, зокрема в управлінні якістю та кількістю дощових вод.

Література

1. Miller C. Vegetated roof covers. A new method for controlling runoff in urbanized areas. *Pennsylvania Storm Water Management Symp.* 1998.
2. Köhler M., Schmidt M., Grimme F.W., Laar M., Gusmao F. Urban water retention by greened roofs in temperate and tropical climate. *Technology Resource Management & Development – Scientific Contributions for Sustainable Development.* 2001. Vol. 2. P. 151–162.
3. Schmidt M., Teschner K. Kombination von Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen: Ergebnisse der Voruntersuchungen für das Projekt Potsdamer Platz. Teil 1: Stoffrückhalt extensiver Dachbegrünung. *Wasser-Abwasser.* 2000. Vol. 141 (10). P. 670–675.
4. Steusloff S. Input and Output of Airborne Aggressive Substances on Green Roofs in Karlsruhe. *Urban Ecology.* 1998. P. 144–148. DOI: 10.1007/978-3-642-88583-9_24.
5. Monterusso M.A., Rowe D.B., Rugh C.L., Russell D.K. Runoff water quantity and quality from green roof systems. *XXVI International Horticultural Congress: Expanding Roles for Horticulture in Improving Human Well-Being and Life Quality.* 2002. DOI: 10.17660/ActaHortic.2004.639.49.
6. Ram Karan Singh, Nitin Jakhar. Rooftop Rainwater Harvesting and its Potential - Case Studies in New Delhi. *Rainwater Harvesting and Water Management.* 2006. P. 189–196.
7. Berndtsson C., Bengtsson L., Jinno K. Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs. *Ecological Engineering.* 2009. Vol. 35, Issue 3. P. 369–380. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.09.020>.
8. Berndtsson J., Emilsson T., Bengtsson L. The influence of extensive vegetated roofs on runoff water quality. *Science of The Total Environment.* 2006. Vol. 355, Issues 1–3. P. 48–63. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.02.035>.
9. Teemusk A., Mander Ü. The Influence of Green Roofs on Runoff Water Quality: A Case Study from Estonia. *Water Resources Management.* 2011. Vol. 25. P. 3699–3713.
10. Davis B., Birch G. Comparison of heavy metal loads in stormwater runoff from major and minor urban roads using pollutant yield rating curves. *Environmental Pollution.* 2010. Vol. 158, Iss. 8. P. 2541–2545. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.05.021>.
11. Santana T., Guiselini C., Lopes Cavalcanti S. Quality of rainwater drained by a green roof in the metropolitan region of Recife, Brazil. *Journal of Water Process Engineering.* 2022. Vol. 49. 102953. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102953>.
12. Thomaidi V., Petousi I., Kotsia D., Kalogerakis N. Use of green roofs for greywater treatment: Role of substrate, depth, plants, and recirculation. *Science of The Total Environment.* 2022. Vol. 807, Part 3. 151004. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151004>.
13. Eksi M., Rowe D.B., Fernándezca R., Cregg B.M. Effect of substrate compost percentage on green roof vegetable production. *Urban For. Urban Green.* 2015. Vol. 14. P. 315–322. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.03.006>.
14. Cascone S. Green Roof Design: State of the Art on Technology and Materials. *Sustainability.* 2019. Vol. 11. 3020. <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/11/3020/html>.
15. Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofs; Landscape Development and Landscaping Research Society e.V. (FLL); Bonn, Germany, 2018.
16. Wang X., Tian Y., Zhao X. The influence of dual-substrate-layer extensive green roofs on rainwater runoff quantity and quality. *Science of The Total Environment.* Vol. 592. 2017. P. 465–476. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.124>.

17. Schatzmayr Welp Sá, Mohammad K. Najjar, Ahmed W.A. Hammad. Assessing rainwater quality treated via a green roof system. *Clean Technologies and Environmental Policy.* 2022. Vol. 24. P. 645–660. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10098-021-02144-6>.

18. Teemusk A., Mander Ü. Rainwater runoff quantity and quality performances from a greenroof: The effects of short-term events. *Ecol. Eng.* 2007. Vol. 30. P. 271–277. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2007.01.009>.

19. Alsup S., Ebbs S., Retzlaff W. The exchangeability and leachability of metals from select green roof growth substrates. *Urban Ecosyst.* 2010. Vol. 13. P. 91–111. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11252-009-0106-y>.

20. Xiong W., Li J., Wang H., Wu Y., Li D., Xue J. Biochar Addition and the Runoff Quality of Newly Constructed Green Roofs: A Field Study. *Sustainability.* 2023. Vol. 15 (5). P. 4081. <https://doi.org/10.3390/su15054081>.

21. Xichao G. Temperature Dependence of Hourly, Daily, and Event-based Precipitation Extremes Over China. *Scientific Reports.* 2018. Vol. 8(1). 17564. P. 1–10. <https://www.nature.com/articles/s41598-018-35405-4>.

22. Zeng J., Huang G., Luo H., Mai Y., Wu H. First flush of non-point source pollution and hydrological effects of LID in a Guangzhou community. *Scientific Reports.* 2019. Iss. 9. 13865. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50467-8>.

23. Emilsson T., Berndtsson C.J., Mattsson J.E., Rolf K. Effect of using conventional and controlled release fertiliser on nutrient runoff from various vegetated roof systems. *Journal of Ecological Engineering.* 2007. Vol. 29. P. 260 – 271. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.01.001>.

24. Lim H.S., Segovia E., Ziegler A.D. Water quality impacts of young green roofs in a tropical city: a case study from Singapore. *Blue-Green Syst.* 2021. Vol. 3. P. 145–163. DOI: 10.2166/bgs.2021.007.

25. Lim H.S. What happens to nitrogen and phosphorus nutrient contributions from green roofs as they age? A review. *Environmental Advances.* 2023. Vol. 12. 100366. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100366>.

26. Kuoppamäki K. Setälä H., Hagner M. Nutrient dynamics and development of soil fauna in vegetated roofs with the focus on biochar amendment. *Nat.-based Solut.* 2021. Vol. 1. 100001. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2021.100001>.

27. Zhang S.X., Zhang S.H., Yan J., Wang K. Effects of Green, Blue, and Blue-green Roofs on Runoff Quality. *Huan Jing ke Xue = Huanjing Kexue.* 2023. Vol. 44(1): 303–311. DOI: 10.13227/j.hj.kx.202203191.

28. Palla A., Gnecco I., Lanza L.G. Hydrologic Restoration in the Urban Environment Using Green Roofs. *Water.* 2010. Vol. 2(2). P. 140–154. <https://doi.org/10.3390/w2020140>.

References

1. Miller C. (1998), “Vegetated roof covers. A new method for controlling runoff in urbanized areas“, *Pennsylvania Storm Water Management Symp.*
2. Köhler M., Schmidt M., Grimme F.W., Laar M., Gusmao F. (2001), *Technology Resource Management & Development – Scientific Contributions for Sustainable Development*, 2: 151 – 162.
3. Schmidt M., Teschner K. (2000). Teil 1: Stoffrückhalt extensiver Dachbegrünung“, *Wasser-Abwasser*, 141 (10): 670 – 675.
4. Steusloff S. (1998). *Urban Ecology*, 1: 144–148. DOI: 10.1007/978-3-642-88583-9_24.
5. Monterusso M.A., Rowe D.B., Rugh C.L., Russell D.K. (2002), *XXVI International Horticultural Congress: Expanding Roles for Horticulture in Improving Human Well-Being and Life Quality*. DOI: 10.17660/ActaHortic.2004.639.49
6. Ram Karan Singh, Nitin Jakhar. (2006), *Rainwater Harvesting and Water Management*, 1: 189–196.
7. Berndtsson C., Bengtsson L., Jinno K. (2009), *Ecological Engineering*, 35: 369–380. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.09.020>
8. Berndtsson J., Emilsson T., Bengtsson L. (2006), *Science of The Total Environment*, 355: 48–63. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.02.035>

9. Teemusk A., Mander Ü. (2011), *Water Resources Management*, 25: 3699–3713.
10. Davis B., Birch G. (2010), *Environmental Pollution*, 158: 2541 - 2545. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.05.021>
11. Santana T., Guiselini C., Lopes Cavalcanti S. (2022), *Journal of Water Process Engineering*, 49: 102953. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102953>
12. Thomaidi V., Petousi I., Kotsia D., Kalogerakis N. (2022), *Science of The Total Environment*, 807: 151004. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151004>
13. Eksi M., Rowe D.B., Fernándezca R., Cregg B.M. (2015), *Urban For. Urban Green.*, 14: 315–322. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.03.006>
14. Cascone S. (2019), *Sustainability*, 11: 3020. <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/11/3020/htm>
15. Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofs; Landscape Development and Landscaping Research Society e.V. (FLL): Bonn, Germany, 2018.
16. Wang X., Tian Y., Zhao X. (2017), *Science of The Total Environment*, 592: 465-476. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.124>
17. Schatzmayr Welp Sá, Mohammad K. Najjar, Ahmed W.A. Hammad (2022), *Clean Technologies and Environmental Policy*, 24: 645 – 660. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10098-021-02144-6>
18. Teemusk A., Mander Ü. (2007), *Ecol. Eng.*, 30: 271–277. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2007.01.009>
19. Alsup S., Ebbs S., Retzlaff W. (2010), *Urban Eco-syst.*, 13: 91–111. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11252-009-0106-y>
20. Xiong W., Li J., Wang H., Wu Y., Li D., Xue J. (2023), *Sustainability*, 15(5): 4081. <https://doi.org/10.3390/su15054081>
21. Xichao G. (2018), *Scientific Reports*, 8(1): 1-10. <https://www.nature.com/articles/s41598-018-35405-4>
22. Zeng J., Huang G., Luo H., Mai Y., Wu H. (2019), *Scientific Reports*, 9: 13865. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50467-8>
23. Emillson T., Berndtsson C.J., Mattsson J.E., Rolf K. (2007), *Ecol. Eng.*, 29: 260–271. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.01.001>
24. Lim H.S., E. Segovia, A.D. Ziegler. (2021), *Blue-Green Syst.*, 3: 145-163. doi: 10.2166/bgs.2021.007
25. Lim H.S. (2023), *Environmental Advances*, 12: 100366. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100366>
26. Kuoppamäki K., Setälä H., Hagner M. (2021), *Nat.-based Solut.*, 1: 100001. <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2021.100001>
27. Zhang S.X., Zhang S.H., Yan J., Wang K. (2023), *Huan Jing ke Xue = Huanjing Kexue*, 44(1): 303-311. DOI: 10.13227/j.hjx.202203191
28. Palla A., Gnecco I., Lanza L.G. (2010), *Water*, 2(2): 140-154. <https://doi.org/10.3390/w2020140>

THE INFLUENCE OF “GREEN” ROOFS ON THE QUALITY OF RAINFLOW IN THE URBAN ENVIRONMENT

Tkachenko T.M., Kravchenko M.V., Vasylenko L.O.

Tkachenko T.M., Doctor of Technical Sciences, Professor, Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture, ORCID: 0000-0003-2105-5951, tkachenko.tm@knuba.edu.ua

Kravchenko M.V., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture, ORCID: 0000-0003-0428-6440, marina-diek@ukr.net

Vasylenko L.O., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture, ORCID: 0000-0003-4201-5481, lesya.kiev@ukr.net

The results of research aimed at assessing the quality of runoff from ‘green’ roofs as a source of pollutants, particularly heavy metals, are presented. It is justified that the majority of scientific studies dedicated to studying the quality of stormwater from “green” roofs indicate that these systems can improve the quality of runoff by reducing the concentration of pollutants and enhancing water balance regulation in urban areas. The results of research confirming the change in pH values in stormwater from “green” roofs compared to rainwater are provided. The influence of vegetation types and substrate composition of “green” roofs on the physicochemical composition of rainwater is analyzed. It is shown that “green” roofs with a dual substrate, where a mixture of activated carbon with perlite and vermiculite can be used as an adsorption layer, are effective in absorbing organic substances, heavy metals, and all forms of nitrogen for varying intensities of rainfall. The impact of the age (duration of use) of the “green” roof on the quality of runoff is analyzed. It is mentioned that the lowest quality of runoff is observed in the early stages of “green” roof operation, but water quality generally improves over time as the substrate and vegetation stabilize within the ecosystem conditions. It is shown that the quality index of runoff from a “green-blue” roof is higher compared to a ‘green’ or traditional roof. The results of scientific research confirming the effectiveness of “green” roofs in terms of changing the concentration of organic substances (COD, BOD), heavy metals, nitrogen, phosphorus, pH, and turbidity are presented. The main factors influencing the quality of surface water runoff from “green” roofs are justified and proposed. A diagram illustrating the circulation of pollutants in the “green” roof system and the potential of different factors acting as sources or absorbers of pollutants is provided.

Key words: “green” roof, runoff quality, stormwater management, filtration, rainwater, influencing factors, roof age, effect of “first” wash.