

УДК 628.3:712.3

DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2025-42.0520>**¹Марина Кравченко,**

кандидат технічних наук, доцент кафедри Технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці, <https://orcid.org/0000-0003-0428-6440>, e-mail: marina-diek@ukr.net

¹Тетяна Ткаченко,

доктор технічних наук, завідувачка кафедри Технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці, <https://orcid.org/0000-0003-2105-5951>, e-mail: tkachenkoknuba@gmail.com

¹Андрій Щербак,

аспірант кафедри Технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці, <https://orcid.org/0009-0000-4594-6412>, e-mail: andron.vr@gmail.com

¹Київський Національний Університет Будівництва і Архітектури, просп. Повітрофлотський 31, м. Київ, 03037, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РОСЛИН НА ФУНКЦІОНАЛЬНУ ЕФЕКТИВНІСТЬ КОНСТРУКЦІЙ ДОЩОВИХ САДІВ: АНАЛІЗ РЕКОМЕНДАЦІЙ ТА НАУКОВИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

АНОТАЦІЯ. Дощові сади є поширеною практикою управління зливовими водами, включаючи їх якість, у міських районах багатьох країн світу. Рослини відіграють важливу роль у системах дощових садів, а рекомендації з їх проектування, поширені у всьому світі, містять розширені вказівки та поради щодо ролі вибору рослин для підвищення ефективності та стійкості системи.

На основі дослідження рекомендацій щодо проектування дощових садів було визначено чотири основні гіпотези, що стосуються ролі рослин: 1) системи з рослинністю є більш ефективними, ніж без них; 2) види рослин відрізняються своєю ефективністю; 3) місцеві види є ефективнішими, ніж інтродуковані; 4) конструкції дощових садів з різноманітним видовим складом є ефективнішими, ніж з монокультурами.

У дослідженні було розглянуто ефективність систем дощових садів з точки зору гідравлічних і гідрологічних властивостей, а також з точки зору видалення забруднюючих речовин. У роботі проаналізовано відповідність визначених гіпотез результатам наукових досліджень, що надає значне наукове підґрунтя для розробки відповідних нормативних документів, стандартів та рекомендацій в Україні, які на сьогоднішній день відсутні. Вид рослинності безпосередньо впливає на гідравлічну продуктивність і процес видалення азоту, причому характеристики коріння є важливим фактором, який впливає на ці процеси. Обґрунтовано, що кореневі системи рослин сприяють підтримці гідравлічної провідності та зменшенню рівня забруднення. Наукових результатів, які б підтвердили гіпотезу, що місцеві рослини або дощові сади з високою видовою різноманітністю мають вищу продуктивність порівняно з системами з меншою кількістю видів або з інтродукованими видами знайдено не було.

Залишаються мало дослідженими питання щодо взаємодії рослин і мікробоценозу у системі дощового саду, ролі макропор у міграції забруднюючих речовин або диференційованого впливу вибору рослин на продуктивність системи.

Ключові слова: дощовий сад, зелена інфраструктура, рослинність, зливі води, якість дощової води, функціональні ознаки, ризосфера, різноманітність рослин

STUDYING THE IMPACT OF PLANTS ON THE FUNCTIONAL EFFICIENCY OF RAIN GARDENS: ANALYSIS OF RECOMMENDATIONS AND SCIENTIFIC RESULTS

ABSTRACT. Rain gardens are a common practice for managing stormwater, including its quality, in urban areas of many countries around the world. Plants play an important role in rain garden systems, and design guidelines distributed around the world provide extensive guidance and advice on the role of plant selection in improving system efficiency and sustainability.

Based on a study of rain garden design guidelines, four main hypotheses regarding the role of plants were identified: 1) systems with vegetation are more efficient than those without; 2) plant species differ in their efficiency; 3) native species are more efficient than introduced species; and 4) rain garden designs with diverse species composition are more efficient than those with monocultures.

The study examined the effectiveness of rain garden systems in terms of hydraulic and hydrological properties, as well as in terms of pollutant removal. The paper analyses the correspondence of the defined hypotheses to the results of scientific research, which provides a significant scientific basis for the development of relevant regulations, standards and recommendations in Ukraine, which are currently absent. The type of vegetation directly affects the hydraulic performance and the process of nitrogen removal, and the characteristics of the roots are an important factor affecting these processes. It is proved that plant root systems contribute to the maintenance of hydraulic conductivity and reduce pollution. No scientific results have been found to support the hypothesis that native plants or rain gardens with high species diversity have higher productivity than systems with fewer species or introduced species.

There is little research on the interaction between plants and microbial communities in a rain garden system, the role of macropores in pollutant migration, or the differential impact of plant selection on system performance.

Keywords: rain garden, green infrastructure, vegetation, stormwater, rainwater quality, functional traits, rhizosphere, plant diversity

1. Постановка проблеми. Швидкі темпи урбанізації призвели до значного збільшення площі водонепроникного покриття ландшафту, що становить великий відсоток міської поверхні. Водонепроникні поверхні обмежують просочування опадів у ґрунт, що призводить до збільшення стоку як з точки зору його швидкості, так і об'єму [1]. Дощова вода у міському середовищі переважно спрямовується у каналізаційну систему, що створює серйозні проблеми під час інтенсивних опадів, таких як місцеві повені, затоплення річок тощо, а також погіршує якість та доступність води [2]. Міський стік є значним джерелом забруднення води, що викликає погіршення якості водних ресурсів та загрозу для екосистем [3]. У той же час зміни клімату призводять до зміни характеру, частоти та інтенсивності опадів, загострюючи цю проблему [4]. Для ефективного управління зливовими стоками у міських районах були запропоновані деякі екологічно стійкі підходи до міського розвитку як альтернатива традиційним методам [5–10]. Для опису технологій управління зливовими водами, таких як конструкції дощових садів, «зелені» дахи, інфільтраційні траншеї, водопроникні тротуари також був введений термін «зелена» інфраструктура [11]. Практики «зеленої» інфраструктури можна легко інтегрувати в будівлі, ландшафтний дизайн, застосовуючи децентралізований підхід для розсіювання потоків і управління стоком біля джерела його витoku [12].

Дощові сади – це вид «зелених» конструкцій, які імітують гідрологічну функцію природного ландшафту, забезпечуючи як контроль за повенями, так і переваги для якості води [13]. Окрім здатності зменшувати піковий стік, що формується непроникними поверхнями, та покращувати якість води, вони мають такі переваги: займають невеликий простір в порівнянні з їхньою водозбірною площею; створюють середовище для підтримки та захисту біорізноманіття; легко інтегруються в місцевий міський дизайн; надають вищий рівень зручності, ніж звичайна бетонна дренажна система; слугують інструментом для відновлення зв'язку екосистем з природним кругообігом води; мають позитивний вплив на місцевий мікроклімат, сприяючи випаровуванню та охолодженню навколишнього повітря [14]. Основними компонентами конструкцій дощових садів є рослинність, висаджена у ґрунтове середовище (субстрат), інфільтраційний шар, гравійний шар та дренажна система (рис. 1) [15].

Як і в більшості сфер практик та методів, фахівці, які беруть участь у їх реалізації, значною мірою покладаються на місцеві, регіональні чи національні настанови щодо проєктування, будівництва та обслуговування систем дощових садів. За останні роки у різних країнах світу було розроблено багато посібників, деякі з яких навіть стали стандартами [16]. Такі рекомендації можуть значно вплинути на дизайн та ефективність дощових садів у керуванні зливовими стоками по всьому світу. Ці рекомендації містять різноманітні гіпотези та твердження щодо ефективності систем, зокрема, впливу рослинності.

На сьогоднішній день в Україні відсутні рекомендації та нормативні документи щодо проєктування, впровадження та обслуговування конструкцій дощових садів, що призводить до грубого порушення технологій, техніки безпеки та зниження термінів експлуатації об'єктів. Перші конструкції дощових садів в Україні з'явилися у м. Львові, створені активістами громадської організації «Плато» (рис. 2, а), на Подолі у м. Києві (рис. 2, б) та в ЖК Файна

Таун у м. Києві (рис. 2, в). До кінця 2024 року в місті Києві планується впровадження ще 10 конструкцій дощових садів з метою зниження навантаження на основну систему каналізації [17].

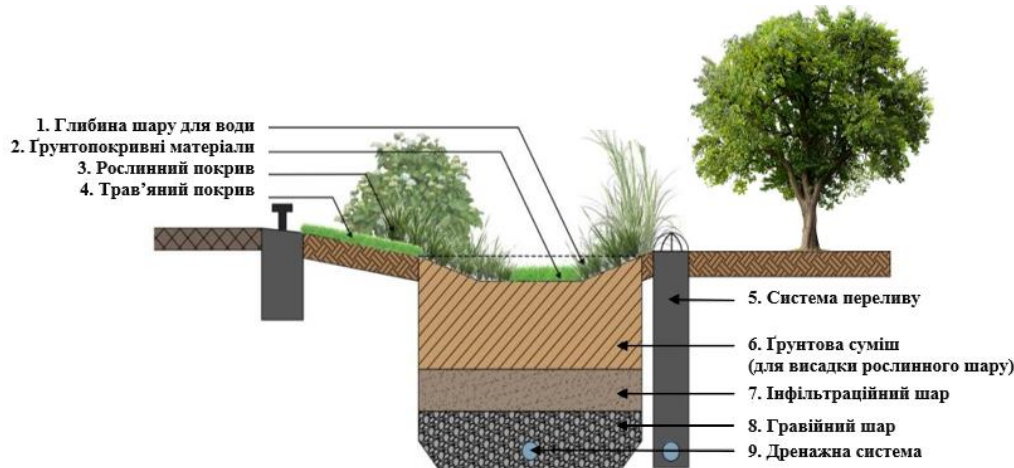


Рис. 1. Основні елементи конструкції дощового саду – поперечний переріз (авторська розробка)
Fig. 1. The main elements of the rain garden construction - cross section (author's design)

Для розробки рекомендацій з проєктування та впровадження дощових садів в Україні необхідно проаналізувати та дослідити рекомендації, розроблені в різних країнах світу, та їхню відповідність науковим висновкам. Як показали дослідження у подібних технологіях, наприклад, у водно-болотних угіддях, наявність рослинності є ключовим елементом для забезпечення функціональності та естетики дощових садів, тому правильний вибір видів має вирішальне значення [18]. В представленій роботі ми зосереджуємося лише на рослинності (ігноруючи, наприклад, специфікації ґрунтового середовища чи схеми дренажу), оскільки ця тема, незважаючи на її складність і важливість, залишається мало дослідженою у контексті систем дощових садів [19].



Рис. 2. Приклади перших конструкцій дощових садів в Україні:
а) м. Львів; б) Поділ (м. Київ); в) ЖК Файна Таун (м. Київ)
Fig. 2. Examples of the first rain gardens in Ukraine:
a) Lviv; b) Podil (Kyiv); c) Faina Town (Kyiv)

2. Мета цієї роботи полягає в перевірці того, наскільки гіпотези та припущення щодо ролі та вибору рослинності, наведені в багатьох визнаних рекомендаціях щодо дощових садів, підтримуються науковою літературою. Це надасть значне наукове підґрунтя для розробки відповідних нормативних документів, стандартів та рекомендацій в Україні, а також, принаймні, дозволить запропонувати список відповідних видів рослин.

Для досягнення поставленої мети ми будемо орієнтуватись на дослідження, що стосуються чотирьох загальних гіпотез:

1. Системи дощових садів з рослинами є більш ефективними, ніж без них.

2. Види рослин відрізняються за своєю ефективністю.
3. Місцеві види ефективніші, ніж інтродуковані.
4. Конструкції дощових садів з різноманітним видовим складом ефективніші, ніж з монокультурами.

У нашому дослідженні ми розглядаємо ефективність систем дощових садів з точки зору гідравлічних і гідрологічних властивостей, а також з точки зору видалення забруднюючих речовин. Оцінюючи, наскільки наявні рекомендації, включені в посібники та стандарти, відображають стан поточного наукового розуміння, ми також визначаємо прогалини в знаннях і потреби для майбутніх досліджень.

3. Основна частина. Рослини, які складають верхній шар конструкцій дощових садів, виконують різні екологічні і естетичні функції. Вони можуть покращувати якість стоку шляхом видалення поживних речовин, металів, завислих твердих речовин і органіки, а також впливати на гідрологічні показники, запобігаючи засміченню субстрату, мінімізуючи об'єм зливної води через випаровування, зменшуючи ерозію та впливаючи на шляхи потоку. Крім того, рослини дозволяють системам дощових садів досягати інших переваг, таких як озеленення міст (естетика), створення середовища проживання для комах та інших видів і покращення якості повітря [20]. Важливість рослинності в дощових садах визнана у світових рекомендаціях з проектування таких систем, причому більшість з них пропонують конкретні критерії відбору відповідної рослинності [21]. Основною вимогою до рослинності для систем дощових садів є їх здатність до пристосування та розвитку в суворих погодних умовах, їх естетична привабливість та доступність для використання в певному регіоні.

Таблиця 1. Якісний аналіз впливу рослин на ефективність функціонування дощових садів, виходячи з результатів наукових досліджень

Table 1. Qualitative analysis of the impact of plants on the efficiency of rain gardens based on the results of scientific research

Функціональна роль конструкції дощового саду	Можливі механізми впливу рослин	Емпіричні дані експериментальних досліджень	Якісна роль рослин з точки зору продуктивності системи
Гідрологічна ефективність	Транспірація	Невеликий розмір дощового саду, мала площа листя відносно водозбірної площі. Відсутність результатів досліджень щодо транспірації (тільки евапотранспірації).	+
	Проникність/пористість: фізіологічний розвиток рослин та деградація коренів утворюють пори, які сприяють підтримці необхідного ступеню пористості ґрунту	Розвиток макропор кореневою системою рослин. Необхідні додаткові дослідження для підтвердження гіпотези того, що рослинність сприяє підтримці інфільтрації води у дощових садах	++
Фільтрація зливної води	Надземні частини рослин сприяють зменшенню швидкості стоку і сприяють осіданню зважених речовин	Відсутність даних щодо впливу рослин згідно з емпіричними дослідженнями	0

Видалення азоту	Видалення шляхом поглинання рослинами. Ризосфера сприяє процесам нітрифікації та денітрифікації, формуючи зони насичення ґрунту	Відсутність рослинності може фактично сприяти експорту азоту, здебільшого у формі нітратів, який видаляється через біотичну асиміляцію	+++
Видалення фосфору	Видалення шляхом поглинання рослинами	Для добре сформованих рослинних угруповань у ненасиченому ґрунті може спостерігатися позитивний ефект від ризосфери. Поглинання металів рослинами низьке (наприклад, 0,5%–14% від загальної кількості металів). Зміна властивостей ґрунту рослинами, таких як зниження рівня рН і підвищення розчинності органічних сполук, може збільшити кількість металів у стічних водах	+
Видалення металів	Видалення шляхом поглинання рослинами		+ –
Органічні забруднювачі (нафтові вуглеводні)	Видалення шляхом поглинання рослинами. Ризосфера підтримує умови, які сприяють бактеріальному розкладанню вуглеводнів	Відсутність ефекту або опосередкований вплив може бути зумовлений підвищенням мікробної активності в ризосфері	?

Примітка. Роль рослин: відсутня (0), незначна (+), суттєва (++), вирішальна (+++), від незначної до негативної (+ –), потрібні додаткові дослідження (?).

Гіпотеза 1. З точки зору функціонального призначення дощових садів, питання позитивного впливу рослин на ефективність гідрологічних процесів чи видалення забруднюючих речовин не є тривіальним. Навіть без рослин дощові сади будуть виконувати свої функції (принаймні частково) шляхом проходження води через ґрунтові середовища. Фізичні та хімічні процеси, такі як фільтрація, адсорбція та осадження, сприятимуть видаленню забруднюючих речовин. Мікробоценоз ґрунтового середовища сприятиме таким процесам, як нітрифікація, окислення, бродіння тощо. Пористість середовища забезпечуватиме інфільтрацію, тимчасове зберігання, а потім ексфільтрацію через ґрунт, що дозволить зменшити швидкість пікових зливових стоків [22].

Деякі рекомендації підкреслюють роль рослинності у досягненні окремих гідравлічних, гідрологічних та фільтрувальних цілей. Наприклад, рекомендації Австралії [23] зазначають, що «рослинність поглинає поживні речовини, сприяє розвитку мікробіологічних спільнот (важливе для очищення зливових вод), підтримує та посилює пористість ґрунту». Посібники можуть надавати теоретичне пояснення ролі рослинності або вказувати на основні її ознаки (структуру кореня, швидкість росту, розмір рослини, стійкість до умов), які пов'язані з різними функціями дощових садів.

Основним підходом до оцінювання впливу рослин на різні функції систем дощових садів є порівняння систем з рослинністю та без неї. Однак дуже мало експериментальних досліджень було проведено з конструкціями дощових садів без рослинності. Результати якісного аналізу впливу рослин на ефективність функціонування дощових садів на основі наукових досліджень наведені в таблиці 1.

Дослідження впливу рослинності на *гідрологічну ефективність* та водний баланс дощових садів відносно обмежені, що пояснюється складністю вимірювання евапотранспірації в системах, які вимагають спеціалізованих камер у польових умовах [24] або лізіметрів у

лабораторних умовах [25]. Крім того, невеликий розмір систем дощових садів, в порівнянні з площею водозбору, призводить до того, що площа листя дуже мала по відношенню до об'єму стоку [26]. Рослини впливають на динаміку системи «грунт-вода» різними способами. Дослідження авторів [27] та [28] показали збільшення рівня інфільтрації в середовищі дощового саду за рахунок покращеної проникності та пористості ґрунту внаслідок адаптації рослинності. Дощова вода може тимчасово затримуватися в рослинних тканинах [29], але основний внесок в утримання відбувається через випаровування (ЕТ) [30]. Декілька досліджень підтверджують вплив рослинності на процес інфільтрації зливової води з часом у системах дощових садів. Наприклад, дослідники [31] виявили, що в дощових садах з рослинністю процес інфільтрації відбувається інтенсивніше, ніж в системах без рослинності. В рамках роботи [32] було проведено подібне дослідження з рослинними колонами в лабораторних умовах. Загалом, емпіричні дані підтверджують гіпотезу про те, що рослинність збільшує або підтримує інфільтрацію в конструкціях дощових садів, хоча це область, яка потребує подальших досліджень, особливо, що стосуються видів рослин.

Рослини покращують якість зливового стоку за допомогою таких механізмів, як фітодеградація, фітоекстракція та ризосферні взаємодії [16]. Фітодеградація, також відома як фітотрансформація, сприяє розщепленню складних органічних хімічних речовин, наприклад, поліциклічних ароматичних вуглеводнів (ПАВ), за допомогою метаболічних процесів у рослинах, що призводить до виробництва специфічних ферментів. Цей процес зменшує токсичність забруднень і перетворює їх на простіші сполуки, які підтримують ріст рослин [33]. Фітоекстракція полягає в прямому поглинанні забруднювачів з ґрунту та їх транспортуванні в тканинах рослин. Фітовипаровування передбачає активне надходження забруднювачів, наприклад, летких органічних сполук, токсичних неорганічних елементів, таких як селен (Se) та ртуть (Hg), та виділення продуктів їх розпаду в повітря через листя.

Кілька досліджень підтвердили, що системи дощових садів є ефективними для видалення металів з забрудненої дощової води [34,35]. Однак важливо зауважити, що видалення металів конструкціями дощових садів відбувається переважно за рахунок сорбційного потенціалу ґрунтового субстрату. Таким чином, рослини відіграють другорядну роль, а їхній вплив на видалення металів відбувається через механізми фіторемедіації [36], адсорбції/елюювання та утворення комплексів з органічними складовими [37]. Деякі види рослин демонструють гіперакумулятивні властивості, що вказує на високий потенціал до сорбції та накопичення специфічних металів у своїх пагонах і листі. Дослідження впливу рослин на рекультивацію металів включає порівняння ефективності конструкцій дощових садів з рослинністю та без неї, проте результати відрізняються. Наприклад, для очищення зливової води від таких металів, як Fe, Cu, Cd, Ca, Al, Pb, Cr, K, Na, Ni, Zn і Mg автори [38] порівняли ефективність рослинної (*Dracaena marginata*) конструкції дощового саду з системою без рослинності. Результати експерименту підтвердили, що рослинність сприяла підвищенню загальної ефективності видалення металів конструкцією, оскільки ступінь рекультивації був понад 99,8% для всіх досліджених металів після. Для оцінки ефективності різних установок щодо видалення конкретних забруднювачів потрібні детальні експериментальні дослідження, які включають контрольовані лабораторні та польові експерименти. Загалом, використання у системах дощових садів рослин з високою гіперакумуляційною можливістю сприятиме високому ступеню видалення не лише металів, а й інших забруднюючих речовин.

Більшість видів рослин видаляють поживні речовини зі зливової води ефективніше, ніж метали. Декілька досліджень підтвердили, що системи дощових садів демонструють високу ефективність у видаленні азоту (N), особливо тоді, коли рослини сприяють цьому процесу [39,40]. Механізми видалення поживних речовин рослинами в системах дощових садів включають пряме поглинання або адсорбцію, а також непряме поглинання, що відбувається через зміну фізико-хімічних властивостей ґрунту та активності ґрунтових мікроорганізмів, наприклад, шляхом оксигенації ризосфери [41]. Рослини у системах дощових садів асимілюють азот (переважно у формі NO_3^- і NH_4^+) з зливових стоків, оскільки азот є необхідним для їхнього вегетативного росту [20].

Під час контрольованих експериментів з 20 різними видами рослин, що використовують в австралійських системах дощових садів, автори [42] виявили значні відмінності в концентраціях азотних сполук у очищених зливових водах. Наприклад, концентрація нітратів та нітритів відрізнялася в 170 разів, а концентрація амонію – в 570 разів. У наступних дослідженнях [43] автори також показали, що концентрації амонію та нітратів у напівсинтетичних зливових водах, зібраних із дощового саду, були обернено пропорційні загальній масі рослин, довжині коренів рослин, відносній швидкості росту та глибині укорінення.

Враховуючи, що *фосфор (P)* є життєво важливим елементом для росту рослин, можна припустити, що рослини відіграють значну роль у загальному зниженні його концентрації в зливових водах. Лю і Девіс [44], базуючись на агрономічних дослідженнях, припустили, що механізми утримання P включають комбінацію оборотної швидкої адсорбції на поверхні частинок ґрунту та повільних процесів, залежних від часу. Лукас і Грінвей [31] порівняли кілька конструкцій дощових садів без рослинності та з рослинністю з точки зору їх ефективності для видалення N та P із зливної води. Результати показали, що ступінь видалення P і N рослинними системами становив 90 і 80%, порівняно з лише 75 і 43% нерослинними системами, відповідно.

Рослинність також відіграє важливу роль у рекультивації нафтових вуглеводнів через конструкції дощових садів. Хоча ґрунтові середовища дощових садів переважно видаляють вуглеводні з дощової води шляхом адсорбції та фільтрації, рослинність безпосередньо впливає на долю вуглеводнів, зокрема низькомолекулярних ПАВ [20]. Очищення зливної води від вуглеводнів через рослини передбачає їх пряме поглинання та непряму діяльність, залучаючи ризосферні мікробні спільноти. Ризосфера має унікальні біотичні та абіотичні характеристики, які впливають на долю органічних забруднювачів у ґрунті [45]. Загалом, основні механізми видалення органічних забруднювачів в системах дощових садів базуються на процесах із залученням мікробних спільнот (нітрифікація/денітрифікація, деградація органічних забруднювачів тощо), а не на прямому поглинанні рослинами [41].

Незважаючи на обмежену кількість досліджень, присвячених видаленню вуглеводнів системами дощових садів, більшість із них доходять висновку, що саме вид рослинності визначає долю вуглеводнів у системі. Прітчард та інші [46] виявили, що конструкція дощового саду з рослинністю сприяє видаленню 97,1% бензотриазолу з дощової води. Авторі спостерігали високі концентрації глікозильованого бензотриазолу та бензотриазолу в тканині та листі виду *Carex praegracilis*. Хоча сорбція субстрату виявилася основним механізмом видалення бензотриазолу, наявність рослин має кілька переваг. Крім підвищення гідравлічної провідності в системі, *C. Praegracilis* значно знизив концентрацію бензотриазолу в середовищі протягом досліджуваних періодів, забезпечуючи процес фіторе mediaції навіть після дощових подій. Таким чином, через десорбцію та деградацію бензотриазолу, адсорбційний потенціал середовища було відновлено, що приводить до збільшення терміну служби систем дощових садів. В результаті лабораторних експериментів авторами [47] було встановлено ступінь видалення нафталіну 78% у колонах без рослинності, яка зросла до 93% у колонах з рослинами. Хоча сорбція нафталіну ґрунтовим середовищем була основним процесом видалення (56–73%), автори вказали, що поглинання рослинами (2–23%) та мінералізація (12–18%) ще більше підвищили ефективність цих процесів в колонах з рослинністю.

Отже, існує багато переконливих доказів того, що рослинність справді відіграє важливу роль у підтримці функціональної ефективності систем дощових садів. Рослини ефективно видаляють азот, фосфор зі зливної води, а також підвищують рівень інфільтрації в системі. Щодо видалення металів, рослини певних видів можуть сприяти цьому процесу шляхом поглинання, проте не відіграють істотної ролі. Для деяких функцій дощових садів позитивна роль рослин ще потребує уточнень. Наприклад, потенціал утворення макропор, створених рослинами, не був належним чином вивчений у контексті дощових садів. Вплив рослин на видалення органічних забруднювачів у дощових садах все ще залишається предметом дискусій. Важливо зауважити, що більшість досліджень, присвячених впливу рослинності на

функціональність дощових садів, проведені в лабораторному масштабі, тому необхідні повномасштабні експерименти в польових умовах.

Гіпотеза 2. Рослини відрізняються за кореневою структурою, водним режимом, толерантністю до забруднення та здатністю до очищення, що залежить від їх виду або функціональної групи. Трав'янисті рослини, наприклад, ефективно фільтрують тверді частинки у стоках, утримуючи їх своїм густим листям [48]. Деревя можуть відтіснити велику кількість води за допомогою транспірації та поліпшувати здатність ґрунту утримувати вологу, особливо у поєднанні з трав'янистими видами рослинності [49]. Трав'янисті рослини мають різну кореневу систему, яка сприяє максимальній інфільтрації та поліпшенню фільтрації забруднюючих речовин у ґрунті [50]. Коренева система рослин впливає на ґрунтове середовище, забезпечуючи його стабілізацію, формування агрегатів та утворення макропор, які сприяють інфільтрації [51].

Більшість посібників та рекомендацій не пов'язують вибір рослин для систем дощових садів із конкретними ознаками, але деякі посібники наполягають на цьому. Наприклад, найновіша версія «Рекомендацій щодо технічного проектування дощових садів» в Австралії [52] вказує на конкретні характеристики рослинності (структура кореня, швидкість росту, розмір рослини, стійкість до умов), які пов'язані із загальною ефективністю або більш специфічними функціями дощових садів. Наприклад, зазначається, що рослини з мичкуватою та глибокою кореневою системою є більш ефективними та забезпечують видалення забруднюючих речовин на різній глибині. Інші «Рекомендації щодо вибору рослинності для дощових садів» [53] вказують на використання таких видів, як осока та рогаза, оскільки вони сприяють поглинанню поживних речовин. Крім того, їх надземні частини можуть підвищити видалення твердих частинок при щільній висадці.

В наукових дослідженнях вплив видів рослин на гідрологічну проникність зливових потоків у системах дощових садів досліджено досить детально. Кореневі системи рослин сприяють підтримці гідравлічної провідності та зменшенню рівня забруднення [54]. Для цієї функції найбільш підходять види рослин з великою щільністю кореневої маси та діаметром коренів, зокрема деревні породи [55]. Різні види рослин також різняться за своїм впливом на процес видалення поживних речовин. Наприклад, дослідники [42] встановили, що концентрація азоту у зливових водах може змінюватися до трьох разів, що корелює з великими відмінностями між видами рослин. У подальших дослідженнях [43] було показано, що морфологічні ознаки рослин, такі як довжина і глибина коренів, маса коренів і швидкість росту, мають значний вплив на ефективність видалення азоту. Проте у роботі [32], де було досліджено 22 різних види рослин, класифікованих за типом (газонні трави, трави, осока, чагарники), виявлено, що відмінності між ними відносно невеликі. Частково це може бути пов'язано з мінливістю в кожній групі або з вибором ґрунтового середовища з низьким вмістом азоту. У порівнянні ефективності дощових садів з рослинністю та без неї, Кім та інші [56] виявили суттєву різницю у видаленні кишкової палички в залежності від виду рослин.

Єдиною опублікованою інформацією про різницю між рослинами щодо деградації нафтопродуктів системами дощових садів є польове дослідження 58 дощових садів і 4 гірських ділянок як контроль. У цьому дослідженні LeFevre [47] показали, що копії мікробних функціональних генів, що кодують ферменти, які використовуються для розкладання нафтових вуглеводнів, були більш поширені в дощових садах, засаджених рослинами з глибоким корінням, ніж у тих, що містять дернову траву або мульчу. Важливо зазначити, що продуктивність одного виду рослин може варіюватися від позитивної до негативної, залежно від досліджуваної функції. Наприклад, як було показано в дослідженні [57], вид *Carex apressa* ефективно видаляє зі зливної води азот, проте майже не видаляє кишкову паличку, порівняно з іншими видами. Оцінка впливу морфологічних ознак та видів рослин на функціональну ефективність дощових садів наведена в таблиці 2.

Таблиця 2. Оцінка впливу морфологічних ознак та видів рослин на функціональну ефективність дощових садів на основі наукових досліджень

Table 2. Evaluation of the influence of morphological characteristics and plant species on the functional efficiency of rain gardens based on scientific research

Функціональна роль конструкції дощового саду	Морфологічні ознаки рослин	Пояснення
Гідрологічна ефективність	Товсте коріння	Вище значення гідравлічної провідності спостерігається у дощових садах, засадженими деревами, на відміну від кущів, осоки та трав'яних видів. Товсте коріння сприяє утворенню значних макропор, що підвищують інфільтрацію в системі дощових садів.
Видалення азоту	Довжина і маса коренів, швидкість зростання рослин	Відмінності спостерігаються між видами з певними морфологічними ознаками рослин, а не між конкретними типами (газонна трава, трава, осока, чагарники). Можлива взаємодія між видами рослин та ґрунтовим середовищем (субстратом).
Видалення фосфору	Вплив конкретних характеристик рослин відсутній	Вплив рослин вважається незначним.
Видалення металів	Вплив конкретних характеристик рослин відсутній	Вплив рослин вважається незначним.
Видалення патогенів	Характеристики пов'язані з гідрологічною проникністю ґрунту, його складом та функціонуванням мікробіоценозу ризосфери	1. Прямий вплив видів рослин на ризосферу (конкуренція, хижацтво, антимікробні кореневі екsudати). 2. Непрямий вплив рослин на швидкість інфільтрації. Одне дослідження підтверджує більшу ефективність кущів.

Наукові дослідження підтверджують, що деякі види рослин мають більший вплив на ефективність дощових садів порівняно з іншими, проте це залежить від функціонального призначення системи. Рослини з товстим корінням сприяють підтримці водопроникності ґрунтового середовища. Існують переконливі докази того, що довжина та маса коріння, а також швидкість росту рослин є важливими морфологічними ознаками, які впливають на видалення азоту. Різні види рослин відрізняються за ступенем видалення кишкової палички та інших патогенів. Видалення твердих частинок не залежить від виду рослин чи певних їх морфологічних ознак. Видалення металів у конструкції дощових садів може істотно відрізнятися між видами рослин. Однак загалом рослинність має незначний вплив на цей процес. Потрібні додаткові дослідження для детального вивчення впливу видів рослин на гідравлічну продуктивність системи, видалення азоту та патогенів у різних експериментальних та польових умовах і кліматичних режимах. Детальнішого вивчення потребує і вплив характеристик та видів рослин на деградацію нафтопродуктів у ґрунтових середовищах дощових садів. Суттєва увага повинна бути приділена дослідженню дерев, які широко використовуються в системах дощових садів, але недостатньо досліджені в цьому контексті.

Гіпотеза 3. Термін «аборигенний», «місцевий» або «автохтонний» визначається по-різному в різних рекомендаціях, залежно від кліматичного регіону, особливостей території і

т.д. Місцеві види рослин можна описати як ті, що природні для певного регіону чи місцевості і виникли або здавна живуть в її межах. Існує гіпотеза, що місцеві рослини ефективніше функціонують у дощових садах, ніж інтродуковані види, і цю гіпотезу можна знайти як у літературі для садівників-любителів, так і в публікаціях професійних асоціацій [58]. Більшість посібників, які стосуються настанов для систем дощових садів, також рекомендують використовувати місцеві, а не екзотичні види рослин. Наприклад, у рекомендаціях щодо проектування систем для управління зливовою водою в штаті Меріленд [59] зазначено, що «Слід віддавати перевагу місцевим рослинам через їхні естетичні якості та здатність сприяти підтримці відеоекології місцевості». Також існує теорія, що «Місцеві рослини швидше ростуть і потребують менше догляду, оскільки вони більш пристосовані до місцевого середовища. Вища адаптаційна здатність сприяє підвищенню ефективності дощових садів». У рекомендаціях Мінесоти [60] стверджується, що місцеві рослини «рекомендовані виключно через їхню стійкість і широкий спектр функцій, які вони забезпечують».

У науковій літературі практично немає переконливих емпіричних доказів того, що місцеві види рослин забезпечують більш ефективне функціонування конструкцій дощових садів, порівняно з інтродукованими видами. Деякі з цих досліджень порівнюють продуктивність систем, засаджених сумішшю місцевих рослин, із системами без рослинності. У цих випадках неможливо зробити висновок щодо ефективності місцевої рослинності порівняно з немісцевою, оскільки остання не була включена в план експерименту [31,61]. В інших дослідженнях відносні показники ефективності систем дощових садів з місцевими і неміцевими видами рослин можуть бути або однаковими [47], або гіршими [62], залежно від дослідження. Автори [47,62,63] висувують гіпотезу, що краща продуктивність виду чи спільноти рослин пояснюється кращою адаптацією до конкретних умов експлуатації дощових садів або специфічних функціональних ознак рослин (швидкість росту, біомаса, глибина укорінення, тип кореневої системи). Існують значні дискусії щодо відповідності місцевої або екзотичної рослинності в конкретному контексті, але багато авторів стверджують, що принцип підтримки естетичності місцевості та цінності біорізноманіття є вагомими аргументами на користь використання місцевих рослин [64]. Важливість використання місцевих видів з причин, відмінних від ефективності (виживання та менші вимоги до обслуговування, забезпечення середовища проживання, неінвазивність, естетичність) також пропагується для інших типів «зелених» конструкцій, таких як «зелені» дахи та «зелені» стіни [65].

Отже, не зважаючи на те, що деякі рекомендації віддають перевагу місцевим видам рослин для забезпечення вищої ефективності систем дощових садів, чітких доказів того, чому це має бути так, немає. Використання місцевих рослин може сприяти підтримці місцевого біорізноманіття, хоча інтродуковані рослини також можуть забезпечити цю функцію. Однак не слід виключати можливості використання інтродукованих видів рослин, оскільки це може бути ефективнішим у деяких ситуаціях, наприклад, у більш стресових умовах, коли місцеві рослини відчувають пригнічення. Звичайно, як часто зазначається в науковій літературі, такі види рослин, як інвазивні, не повинні використовуватися в системах дощових садів.

Гіпотеза 4. З метою поліпшення якості середовища та підвищення естетичної привабливості більшість посібників та рекомендацій пропонують використовувати різні види рослин у системах дощових садів. Однак основна перевага різноманітності рослин полягає у їх здатності адаптуватися до мінливих умов, таких як наявність води, які можуть змінюватися як у просторі, так і в часі. Наприклад, Управління охорони природи Канади у своїх рекомендаціях з ландшафтного дизайну LID [66] підкреслює, що «Останні кліматичні дані вказують на те, що в більшості регіонів Канади спостерігається як дуже вологе літо, так і періоди посухи. Це підкреслює необхідність висаджувати адаптивні, різноманітні рослини, які можуть витримати міські умови вологості». Австралійські рекомендації щодо дощових садів [23] дають подібні вказівки. Незалежно від змін умов навколишнього середовища, рослини також можуть відрізнятися за фенологією, включаючи різний час активності протягом вегетацій-

ного періоду. Таким чином, в рекомендаціях щодо дощових садів [67] пропонується використовувати мінімум три види дерев і три види чагарників для забезпечення стабільної швидкості випаровування та поглинання поживних речовин протягом вегетаційного періоду.

Результати досліджень щодо позитивного впливу різноманітності видів або функціонального складу рослин на екологічні процеси в природних системах підтверджують, що комбінація різних видів рослин може підвищити ефективність рослинних систем, таких як «зелені» дахи [30], фітореMediaція ґрунту [68] або водно-болотні угіддя [69]. Можна припустити, що це ствердження залишається актуальним і для дощових садів, оскільки ці конструкції включають різноманітні мікросередовища з точки зору вологості ґрунту, концентрації забруднюючих речовин тощо [70].

Підтвердження цієї гіпотези в наукових дослідженнях майже відсутні. В одному опублікованому дослідженні [71] ефективність систем дощових садів та різноманітність видів порівнювали за допомогою експериментального підходу. Результати дослідження показали, що системи дощових садів, в яких були поєднані види *Carex appressa* та *Lomandra longifolia*, мали вищий рівень утримання поживних речовин порівняно з системами, де ці види рослин були висаджені окремо.

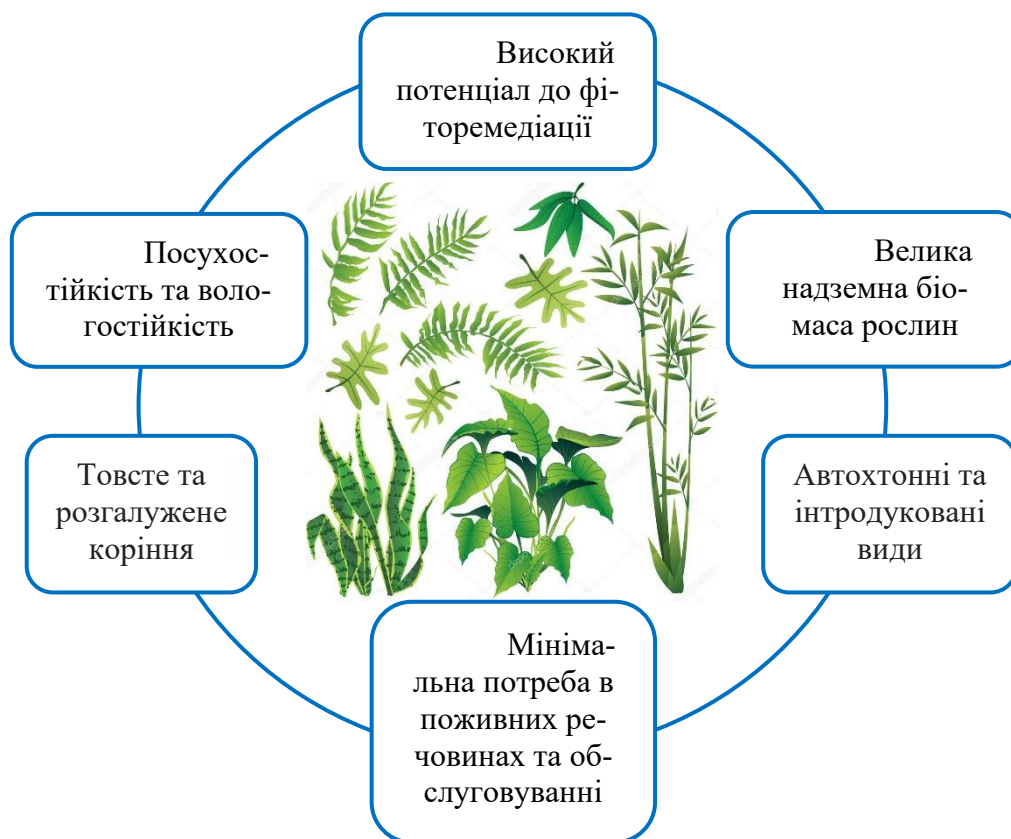


Рис. 3. Рекомендовані характеристики рослинності для систем дощових садів
Fig. 3. Recommended vegetation characteristics for rain garden systems

Не дивлячись на відсутність конкретних досліджень у системах дощових садів, ми можемо проаналізувати результати, отримані для подібних технологій, наприклад, водно-болотних угідь. Різні види рослин можуть мати різні характеристики кореневої системи, такі як здатність до транспортування кисню, придатність для колонізації мікроорганізмами, потенціал до поглинання поживних речовин і органічних сполук, а також моделі сезонного росту. Це може підвищити ефективність видалення забруднюючих речовин у водно-болотних угіддях [72]. Декілька експериментальних досліджень порівнювали ефективність систем, висаджених з різним видовим різноманіттям рослин. Так, автори [73] не виявили впливу різно-

манітності на виробництво біомаси, видалення азоту чи фосфору. Інші автори [69] спостерігали позитивний вплив різноманітності рослин на видалення деяких забруднюючих речовин. Ця неоднозначність залежить від видів рослин, а також від конкретного забруднювача.

Результати експериментальних досліджень водно-болотних угідь можуть надати корисну інформацію для систем дощових садів. Проте слід пам'ятати про відмінності між цими двома типами конструкцій. У порівнянні з системами дощових садів, побудовані водно-болотні угіддя певною мірою затоплені, і багаті поживними речовинами (залежно від природи стічних вод). Таким чином, вплив різноманітності рослин може не мати такого ж характеру, як у системах дощових садів, де волого-сухий стан впливає на рослинні та мікробні процеси [19].

Хоча теоретичні припущення стверджують, що система дощового саду з різноманітністю видів рослин є більш стійкою та ефективнішою в порівнянні з монокультурами, емпіричних доказів, щоб підтвердити цю гіпотезу, недостатньо. Тому постає потреба в подальших експериментальних дослідженнях систем з різним видовим складом рослин для визначення найкращої комбінації, заснованої, наприклад, на їхніх функціональних ознаках. До того часу можна вважати, що відсутність наукових доказів щодо застосування в системах дощових садів різноманітних видів рослин не повинно перешкоджати їх впровадженню. Крім того, різноманітність рослин надає дощовим садам інші переваги, такі як естетична цінність, підтримка біорізноманіття та вища стійкість до різних впливів навколишнього середовища.

Таким чином, ретельний відбір рослинності під час проєктування систем дощових садів має вирішальне значення для досягнення запланованих практичних результатів. Загальні рекомендовані характеристики рослинності для конструкцій дощових садів запропоновано авторами на рис. 3.

4. Висновки. Запропоновані рекомендації різних країн світу та результати експериментальних досліджень підтверджують важливу роль рослин у конструкціях дощових садів, яка змінюється залежно від функціональної ефективності систем. Результати наукових досліджень доводять гіпотезу про те, що ефективність дощових садів залежить від вибору виду рослин, переважно через їхні функціональні ознаки, такі як характеристики коренів та швидкість росту. Рослини сприяють видаленню азоту, фосфору та безпосередньо підвищують рівень інфільтрації в системі. На процес видалення поживних речовин найбільший вплив здійснюють морфологічні ознаки рослин, тому потрібні подальші дослідження, щоб зрозуміти, як вони впливають на видалення конкретних забруднювачів, таких як патогени або нафтові вуглеводні.

Незважаючи на те, що багато посібників з проєктування дощових садів рекомендують використовувати місцеві види рослин, чітких експериментальних доказів, що підтверджують цю гіпотезу, немає. Існують аргументи на користь інших факторів, таких як підтримка місцевого біорізноманіття, поліпшення ландшафту та мікроклімату, які слід враховувати при виборі рослин.

Не дивлячись на теоретичні припущення, які підтримують переваги різноманітності рослин у системах дощових садів порівняно з монокультурами, наразі недостатньо експериментальних доказів, щоб підтвердити цю гіпотезу. Дослідження у цій області повинні охоплювати різні умови, а також враховувати функціональні характеристики рослин для кращого розуміння їхнього впливу на ефективність систем дощових садів.

Дослідження систем дощових садів мають потенціал для поліпшення їх ефективності, особливо з урахуванням останніх досягнень у використанні мікробіоти та фітореMediaції. Експериментальні дослідження ролі рослин в майбутньому повинні охоплювати як реалістичні умови повнорозмірних систем, так і лабораторні експериментальні установки (наприклад, колони), що мають свої обмеження (краєві ефекти, нереалістична щільність коренів) та переваги (повторюваність і контроль за обробками). Крім того, дослідження рослинних сис-

тем дощових садів необхідно розширювати, щоб охопити ширший спектр регіонів і кліматичних умов, адже результати, отримані з експериментальних досліджень у одному кліматі, можуть не відповідати іншому.

Список використаних джерел:

1. Zanin, G.; Bortolini, L.; Borin, M. (2018). Assessing Stormwater Nutrient and Heavy Metal Plant Uptake in an Experimental Bioretention Pond. *Land*, 7, 150. 10.3390/land7040150.
2. Kozak, C.; Fernandes, C.V.S.; Braga, S.M.; Do Prado, L.L.; Froehner, S.; Hilgert, S. (2019). Water quality dynamic during rainfall episodes: integrated approach to assess diffuse pollution using automatic sampling. *Environ Monit Assess*, 191, 402. 10.1007/s10661-019-7537-6.
3. Chen, J.; Theller, L.; Gitau, M.W.; Engel, B.A.; Harbor, J.M. (2017). Urbanization impacts on surface runoff of the contiguous United States. *Journal of Environmental Management*, 187, 470–481. 10.1016/j.jenvman.2016.11.017.
4. Apel, H.; Martínez Trepát, O.; Hung, N.N.; Chinh, D.T.; Merz, B.; Dung, N.V. (2016). Combined fluvial and pluvial urban flood hazard analysis: concept development and application to Can Tho city, Mekong Delta, Vietnam. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 16, 941–961. 10.5194/nhess-16-941-2016.
5. Ahmed, W.; Hamilton, K.; Toze, S.; Cook, S.; Page, D. (2019). A review on microbial contaminants in stormwater runoff and outfalls: Potential health risks and mitigation strategies. *Science of The Total Environment*, 692, 1304–1321. 10.1016/j.scitotenv.2019.07.055.
6. Guptha, G.C.; Swain, S.; Al-Ansari, N.; Taloor, A.K.; Dayal, D. (2022). Assessing the role of SuDS in resilience enhancement of urban drainage system: A case study of Gurugram City, India. *Urban Climate*, 41, 101075. 10.1016/j.uclim.2021.101075.
7. Hager, J.K.; Mian, H.R.; Hu, G.; Hewage, K.; Sadiq, R. (2023). Integrated planning framework for urban stormwater management: one water approach. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 8, 48–69. 10.1080/23789689.2020.1871542.
8. Horvath, I.R.; Zhang, K.; Mayer, B.K.; Parolari, A.J. (2023). Effects of Regional Climate and BMP Type on Stormwater Nutrient Concentrations in BMPs: A Meta-Analysis. *Environ. Sci. Technol.*, 57, 5079–5088. 10.1021/acs.est.2c05942.
9. Liu, T.; Lawluy, Y.; Shi, Y.; Yap, P.-S. (2021). Low Impact Development (LID) Practices: A Review on Recent Developments, Challenges and Prospects. *Water Air Soil Pollut*, 232, 344. 10.1007/s11270-021-05262-5.
10. Wang, H.; Mei, C.; Liu, J.; Shao, W. (2018). A new strategy for integrated urban water management in China: Sponge city. *Sci. China Technol. Sci.*, 61, 317–329. 10.1007/s11431-017-9170-5.
11. Li, C.; Peng, C.; Chiang, P.-C.; Cai, Y.; Wang, X.; Yang, Z. (2019). Mechanisms and applications of green infrastructure practices for stormwater control: A review. *Journal of Hydrology*, 568, 626–637. 10.1016/j.jhydrol.2018.10.074.
12. Sharma, R.; Malaviya, P. (2021). Management of stormwater pollution using green infrastructure: The role of rain gardens. *WIREs Water*, 8, e1507. 10.1002/wat2.1507.
13. Kravchenko, M.V.; Tkachenko, T.M. (2023). Problems of improving the terminology and modern classification of “green” constructions for the creation of ukrainian “green” standards. *Collection of Scientific Publications NUS*, 493, 194–204. 10.15589/znp2023.4(493).26.
14. Bāk, J.; Barjenbruch, M. (2022). Benefits, Inconveniences, and Facilities of the Application of Rain Gardens in Urban Spaces from the Perspective of Climate Change—A Review. *Water*, 14, 1153. 10.3390/w14071153.
15. Kravchenko, M.V.; Tkachenko, T.M.; Mileikovskiy, V.O. (2024). Study of the influence of the main parameters of the rain garden on its hydrological parameters by modeling. *Collection of Scientific Publications NUS*, 166–176. 10.15589/znp2024.1(494).23.
16. Dagenais, D.; Brisson, J.; Fletcher, T.D. (2018). The role of plants in bioretention systems; does the science underpin current guidance? *Ecological Engineering*, 120, 532–545. 10.1016/j.ecoleng.2018.07.007.
17. Kyiv plans to create 10 rain gardens as part of an experiment. Available online: <https://life.liga.net/all/news/v-kieve-planiruyut-obustroit-10-dojdevyh-sadov-v-ramkah-eksperimenta> (accessed on May 11, 2024).

18. Gagnon, V.; Chazarenc, F.; Kõiv, M.; Brisson, J. (2012). Effect of plant species on water quality at the outlet of a sludge treatment wetland. *Water Research*, 46, 5305–5315. 10.1016/j.watres.2012.07.007.
19. Payne, E.G.I.; Fletcher, T.D.; Cook, P.L.M.; Deletic, A.; Hatt, B.E. (2014). Processes and Drivers of Nitrogen Removal in Stormwater Biofiltration. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 44, 796–846. 10.1080/10643389.2012.741310.
20. Muerdter, C.P.; Wong, C.K.; LeFevre, G.H. (2018). Emerging investigator series: the role of vegetation in bioretention for stormwater treatment in the built environment: pollutant removal, hydrologic function, and ancillary benefits. *Environ. Sci.: Water Res. Technol.*, 4, 592–612. 10.1039/C7EW00511C.
21. Payne, E.G.I.; Pham, T.; Deletic, A.; Hatt, B.E.; Cook, P.L.M.; Fletcher, T.D. (2018). Which species? A decision-support tool to guide plant selection in stormwater biofilters. *Advances in Water Resources*, 113, 86–99. 10.1016/j.advwatres.2017.12.022.
22. Davis, A.P.; Traver, R.G.; Hunt, W.F.; Lee, R.; Brown, R.A.; Olszewski, J.M. (2012). Hydrologic Performance of Bioretention Storm-Water Control Measures. *J. Hydrol. Eng.*, 17, 604–614. 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000467.
23. Water Sensitive Cities Australia Available online: <https://wscaustralia.org.au/> (accessed on Apr 18, 2024).
24. Hamel, P.; Mchugh, I.; Coutts, A.; Daly, E.; Beringer, J.; Fletcher, T.D. (2015). Automated Chamber System to Measure Field Evapotranspiration Rates. *J. Hydrol. Eng.*, 20, 04014037. 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001006.
25. Denich, C.; Bradford, A. (2010). Estimation of Evapotranspiration from Bioretention Areas Using Weighing Lysimeters. *J. Hydrol. Eng.*, 15, 522–530. 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000134.
26. Bratieres, K.; Fletcher, T.D.; Deletic, A.; Zinger, Y. (2008). Nutrient and sediment removal by stormwater biofilters: A large-scale design optimisation study. *Water Research*, 42, 3930–3940. 10.1016/j.watres.2008.06.009.
27. Gonzalez-Merchan, C.; Barraud, S.; Bedell, J.-P. (2014). Influence of spontaneous vegetation in stormwater infiltration system clogging. *Environ Sci Pollut Res*, 21, 5419–5426. 10.1007/s11356-013-2398-y.
28. Virahsawmy, H.K.; Stewardson, M.J.; Vietz, G.; Fletcher, T.D. (2014). Factors that affect the hydraulic performance of raingardens: implications for design and maintenance. *Water Science and Technology*, 69, 982–988. 10.2166/wst.2013.809.
29. Nagase, A.; Dunnett, N. (2012). Amount of water runoff from different vegetation types on extensive green roofs: Effects of plant species, diversity and plant structure. *Landscape and Urban Planning*, 104, 356–363. 10.1016/j.landurbplan.2011.11.001.
30. Lundholm, J.; MacIvor, J.S.; MacDougall, Z.; Ranalli, M. (2010). Plant Species and Functional Group Combinations Affect Green Roof Ecosystem Functions. *PLoS ONE*, 5, e9677. 10.1371/journal.pone.0009677.
31. Lucas, W.C.; Greenway, M. (2008). Nutrient Retention in Mature Vegetated Bioretention Systems under Elevated Nutrient Loads. In *Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress 2008*; American Society of Civil Engineers: Honolulu, Hawaii, United States, pp. 1–10. 10.1061/40976(316)4.
32. The influence of vegetation in stormwater biofilters on infiltration and nitrogen removal: preliminary findings — Monash University Available online: <https://research.monash.edu/en/publications/the-influence-of-vegetation-in-stormwater-biofilters-on-infiltrat> (accessed on May 11, 2024).
33. Vijayaraghavan, K.; Biswal, B.K.; Adam, M.G.; Soh, S.H.; Tsen-Tieng, D.L.; Davis, A.P.; Chew, S.H.; Tan, P.Y.; Babovic, V.; Balasubramanian, R. (2021). Bioretention systems for stormwater management: Recent advances and future prospects. *Journal of Environmental Management*, 292, 112766. 10.1016/j.jenvman.2021.112766.
34. Gülbaz, S.; Kazezyılmaz-Alhan, C.M.; Coptý, N.K. (2015). Evaluation of Heavy Metal Removal Capacity of Bioretention Systems. *Water Air Soil Pollut*, 226, 376. 10.1007/s11270-015-2640-y.
35. Wang, J.; Zhao, Y.; Yang, L.; Tu, N.; Xi, G.; Fang, X. (2017). Removal of Heavy Metals from Urban Stormwater Runoff Using Bioretention Media Mix. *Water*, 9, 854. 10.3390/w9110854.
36. Glick, B.R. (2003). Phytoremediation: synergistic use of plants and bacteria to clean up the environment. *Biotechnology Advances*, 21, 383–393. 10.1016/S0734-9750(03)00055-7.
37. Sarwar, N.; Imran, M.; Shaheen, M.R.; Ishaque, W.; Kamran, M.A.; Matloob, A.; Rehman, A.; Hussain, S. (2017). Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: Modifications and future perspectives. *Chemosphere*, 171, 710–721. 10.1016/j.chemosphere.2016.12.116.

38. Vijayaraghavan, K.; Praveen, R.S. (2016). *Dracaena marginata* biofilter: design of growth substrate and treatment of stormwater runoff. *Environmental Technology*, 37, 1101–1109. 10.1080/09593330.2015.1102330.
39. Fan, G.; Li, Z.; Wang, S.; Huang, K.; Luo, J. (2019). Migration and transformation of nitrogen in bioretention system during rainfall runoff. *Chemosphere*, 232, 54–62. 10.1016/j.chemosphere.2019.05.177.
40. Chen, X.C.; Huang, L.; Chang, T.H.A.; Ong, B.L.; Ong, S.L.; Hu, J. (2019). Plant Traits for Phytoremediation in the Tropics. *Engineering*, 5, 841–848. 10.1016/j.eng.2019.07.019.
41. Dagenais, D.; Brisson, J.; Fletcher, T.D. (2018). The role of plants in bioretention systems; does the science underpin current guidance? *Ecological Engineering*, 120, 532–545. 10.1016/j.ecoleng.2018.07.007.
42. Read, J.; Wevill, T.; Fletcher, T.; Deletic, A. (2008). Variation among plant species in pollutant removal from stormwater in biofiltration systems. *Water Research*, 42, 893–902. 10.1016/j.watres.2007.08.036.
43. Read, J.; Fletcher, T.D.; Wevill, T.; Deletic, A. (2009). Plant Traits that Enhance Pollutant Removal from Stormwater in Biofiltration Systems. *International Journal of Phytoremediation*, 12, 34–53. 10.1080/15226510902767114.
44. Liu, J.; Davis, A.P. (2014). Phosphorus Speciation and Treatment Using Enhanced Phosphorus Removal Bioretention. *Environ. Sci. Technol.*, 48, 607–614. 10.1021/es404022b.
45. Feng, N.-X.; Yu, J.; Zhao, H.-M.; Cheng, Y.-T.; Mo, C.-H.; Cai, Q.-Y.; Li, Y.-W.; Li, H.; Wong, M.-H. (2017). Efficient phytoremediation of organic contaminants in soils using plant–endophyte partnerships. *Science of The Total Environment*, 583, 352–368. 10.1016/j.scitotenv.2017.01.075.
46. Pritchard, J.; Cho, Y.-M.; Ashoori, N.; Wolfand, J.; Sutton, J.; Carolan, M.; Gamez, E.; Doan, K.; Wiley, J.; Luthy, R. (2018). Benzotriazole Uptake and Removal in Vegetated Biofilter Mesocosms Planted with *Carex praeegracilis*. *Water*, 10, 1605. 10.3390/w10111605.
47. LeFevre, G.H.; Novak, P.J.; Hozalski, R.M. (2012). Fate of Naphthalene in Laboratory-Scale Bioretention Cells: Implications for Sustainable Stormwater Management. *Environ. Sci. Technol.*, 46, 995–1002. 10.1021/es202266z.
48. Van Dijk, C.N.; Lim, L.S.L.; Bossuyt, P.M.M.; Marti, R.K. (1996). Physical examination is sufficient for the diagnosis of sprained ankles. *The Journal of Bone and Joint Surgery. British volume*, 78-B, 958–962. 10.1302/0301-620X.78B6.0780958.
49. Dudrick, R.; Hoffman, M.; Antoine, J.; Austin, K.; Bedoya, L.; Clark, S.; Dean, H.; Medina, A.; Gotsch, S.G. (2024). Do plants matter?: Determining what drives variation in urban rain garden performance. *Ecological Engineering*, 201, 107208. 10.1016/j.ecoleng.2024.107208.
50. Boldrin, D.; Knappett, J.A.; Leung, A.K.; Brown, J.L.; Loades, K.W.; Bengough, A.G. (2022). Modifying soil properties with herbaceous plants for natural flood risk-reduction. *Ecological Engineering*, 180, 106668. 10.1016/j.ecoleng.2022.106668.
51. Bodner, G.; Leitner, D.; Kaul, H.-P. (2014). Coarse and fine root plants affect pore size distributions differently. *Plant Soil*, 380, 133–151. 10.1007/s11104-014-2079-8.
52. Bioretention Technical Design Guidelines - Water by Design Available online: <https://waterbydesign.com.au/download/bioretention-technical-design-guidelines> (accessed on May 12, 2024).
53. Biofilter vegetation guidelines for southwest. Available online: https://watersensitivecities.org.au/wp-content/uploads/2016/07/381_Biofilter_vegetation_guidelines_for_southwestWA.pdf
54. Le Coustumer, S.; Fletcher, T.D.; Deletic, A.; Barraud, S.; Poelsma, P. (2012). The influence of design parameters on clogging of stormwater biofilters: A large-scale column study. *Water Research*, 46, 6743–6752. 10.1016/j.watres.2012.01.026.
55. Goh, H.W.; Zakaria, N.A.; Lau, T.L.; Foo, K.Y.; Chang, C.K.; Leow, C.S. (2017). Mesocosm study of enhanced bioretention media in treating nutrient rich stormwater for mixed development area. *Urban Water Journal*, 14, 134–142. 10.1080/1573062X.2015.1076861.
56. Kim, M.H.; Sung, C.Y.; Li, M.-H.; Chu, K.-H. (2012). Bioretention for stormwater quality improvement in Texas: Removal effectiveness of *Escherichia coli*. *Separation and Purification Technology*, 84, 120–124. 10.1016/j.seppur.2011.04.025.
57. Chandrasena, G.I.; Pham, T.; Payne, E.G.; Deletic, A.; McCarthy, D.T. (2014). *E. coli* removal in laboratory scale stormwater biofilters: Influence of vegetation and submerged zone. *Journal of Hydrology*, 519, 814–822. 10.1016/j.jhydrol.2014.08.015.

58. American Society of Landscape Architects Available online: <https://www.asla.org/> (accessed on May 13, 2024).
59. Water and Science Available online: <https://mde.maryland.gov/programs/Water/Pages/index.aspx> (accessed on May 13, 2024).
60. Plants for Stormwater Design: Species Selection for the Upper Midwest — Urban Forestry South Available online: <https://urbanforestrysouth.org/resources/library/ttresources/plants-for-stormwater-design-species-selection-for-the-upper-midwest> (accessed on May 13, 2024).
61. Zinger, Y.; Blecken, G.-T.; Fletcher, T.D.; Viklander, M.; Deletić, A. (2013). Optimising nitrogen removal in existing stormwater biofilters: Benefits and tradeoffs of a retrofitted saturated zone. *Ecological Engineering*, 51, 75–82. 10.1016/j.ecoleng.2012.12.007.
62. Houdeshel, C.D.; Hultine, K.R.; Johnson, N.C.; Pomeroy, C.A. (2015). Evaluation of three vegetation treatments in bioretention gardens in a semi-arid climate. *Landscape and Urban Planning*, 135, 62–72. 10.1016/j.landurbplan.2014.11.008.
63. Lucas, W.C.; Greenway, M. (2008). A Study of Nutrient Retention Dynamics in Vegetated and Non-Vegetated Bioretention Mesocosms. In *Proceedings of the Low Impact Development; American Society of Civil Engineers: Wilmington, North Carolina, United States*, pp. 140–158. 10.1061/41007(331)13.
64. Kendle, A.D.; Rose, J.E. (2000). The aliens have landed! What are the justifications for ‘native only’ policies in landscape plantings? *Landscape and Urban Planning*, 47, 19–31. 10.1016/S0169-2046(99)00070-5.
65. Butler, C.; Butler, E.; Orians, C.M. (2012). Native plant enthusiasm reaches new heights: Perceptions, evidence, and the future of green roofs. *Urban Forestry & Urban Greening*, 11, 1–10. 10.1016/j.ufug.2011.11.002.
66. LID-SWM-Guide-v1.0_2010_3. Available online: https://trcaca.s3.ca-central-1.amazonaws.com/app/uploads/2021/10/20091521/LID-SWM-Guide-v1.0_2010_1_no-appendices.pdf
67. MD: Prince George’s County: Bioretention Manual. Available online: <https://www.slideshare.net/Sotirakou964/md-prince-georges-county-bioretention-manual> (accessed on Apr 18, 2024).
68. Hechmi, N.; Aissa, N.B.; Abdenaceur, H.; Jedidi, N. (2014). Phytoremediation Efficiency of a PCP-Contaminated Soil using Four Plant Species as Mono- and Mixed Cultures. *International Journal of Phytoremediation*, 16, 1241–1256. 10.1080/15226514.2013.828009.
69. Zhu, S.-X.; Ge, H.-L.; Ge, Y.; Cao, H.-Q.; Liu, D.; Chang, J.; Zhang, C.-B.; Gu, B.-J.; Chang, S.-X. (2010). Effects of plant diversity on biomass production and substrate nitrogen in a subsurface vertical flow constructed wetland. *Ecological Engineering*, 36, 1307–1313. 10.1016/j.ecoleng.2010.06.007.
70. Tedoldi, D.; Chebbo, G.; Pierlot, D.; Branchu, P.; Kovacs, Y.; Gromaire, M.-C. (2017). Spatial distribution of heavy metals in the surface soil of source-control stormwater infiltration devices – Inter-site comparison. *Science of The Total Environment*, 579, 881–892. 10.1016/j.scitotenv.2016.10.226.
71. Mixed plantings of *Carex appressa* and *Lomandra longifolia* improve pollutant removal over a monoculture of “*L. longifolia*” in stormwater biofilters. Available online: <https://search.informit.org/doi/abs/10.3316/informit.827759356913626> (accessed on May 13, 2024).
72. Liang, M.-Q.; Zhang, C.-F.; Peng, C.-L.; Lai, Z.-L.; Chen, D.-F.; Chen, Z.-H. (2011). Plant growth, community structure, and nutrient removal in monoculture and mixed constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 37, 309–316. 10.1016/j.ecoleng.2010.11.018.
73. Picard, C.R.; Fraser, L.H.; Steer, D. (2005). The interacting effects of temperature and plant community type on nutrient removal in wetland microcosms. *Bioresource Technology*, 96, 1039–1047. 10.1016/j.biortech.2004.09.007.