
ПОТЕНЦІАЛ ЕКОЛОГІЧНОЇ РЕЗИЛЬЄНТНОСТІ МІСЬКИХ ҐРУНТОВО-ЛАНДШАФТНИХ СИСТЕМ ДО КОМБІНОВАНИХ ШОКІВ: МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ ОБҐРУНТУВАННЯ РОБАСТНИХ УПРАВЛІНСЬКИХ РІШЕНЬ

Тітенко Ганна

DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-714-7-19>

ВСТУП

Міські території функціонують як складні, відкриті, просторово неоднорідні, адаптивні соціо-еколого-технологічні системи, в яких екологічні проблеми зазвичай зумовлені кількома чинниками, ідентифікація, аналіз та врахування яких є обов'язковою умовою наближення до ефективного управління міськими територіями^{1, 2}. Серед таких чинників – поєднання кліматичних екстремумів, хронічних урбанізаційних тисків, техногенних навантажень, змін землекористування, деградації природних систем та багато іншого. Для міст, що зазнають воєнного впливу, до них додаються різні типи порушення ґрунтового покриву, пожежі, накопичення будівельних уламків, локальне забруднення та інші.

Попри визнання множинності впливів, у сучасній науковій літературі відсутня чітка методологія розрізнення хронічних тисків, стресорів і гострих шоків, а також оцінки їх взаємодії в межах міських ґрунтово-ландшафтних систем (ІЛС). Транспортне забруднення, запечаткування поверхні та поступове ущільнення ґрунту формують тривалі тиски, тоді як екстремальна злива, пожежа або аварійне надходження забруднювача мають ознаки раптового шоку. Важливим є не об'єднання всіх

¹ McPhearson T., Cook E. M., Berbés-Blázquez M. et al. A social-ecological-technological systems framework for urban ecosystem services. *One Earth*. 2022. Vol. 5, No. 5. P. 505–518. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.04.007>.

² Pickett S. T. A., Cadenasso M. L., Grove J. M., Nilon C. H., Pouyat R. V., Zipperer W. C., Costanza R. Urban ecological systems: Linking terrestrial ecological, physical, and socioeconomic components of metropolitan areas. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 2001. Vol. 32. P. 127–157. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.32.081501.114012>.

несприятливих чинників, а встановлення того, як гостра подія взаємодіє з уже сформованою вразливістю території³.

У цьому дослідженні поняття «комбіновані шоки» застосовується до сценаріїв, за яких кілька небезпечних подій, стресорів або фонових тисків одночасно, послідовно чи просторово пов'язано формують спільний функціональний наслідок. Такий підхід узгоджується із сучасною типологією compound events, у межах якої розрізняють попередньо зумовлені, багатофакторні, послідовні та просторово поєднані події.

Поняття «резильентність» у сучасних наукових підходах пов'язують зі здатністю системи підтримувати або досить швидко відновлювати бажані функції, адаптуватися до змін, а за необхідності трансформувати структури, що обмежують майбутню адаптивну спроможність. Для міських ГЛС це означає, що потенціал резильентності не є універсальною властивістю території, він залежить від виду шоку, критичної функції, вихідного стану ґрунту, просторової структури ландшафту та можливостей управлінського реагування.

Водночас значна частина традиційних процедур екологічного контролю та територіального планування орієнтована на порівняння окремих показників із нормативними значеннями. Такий підхід є необхідним для виконання регламентів безпеки, але має обмежену здатність характеризувати поведінку системи за нестандартних або змінних умов.

Альтернативою прогнозно-оптимізаційній логіці є обґрунтування робастних управлінських рішень як таких, що забезпечують прийнятний рівень збереження або відновлення критичних функцій за широкого спектра умов. Методологія Robust Decision Making (RDM) передбачає формування множини сценаріїв, тестування управлінських альтернатив та пошук рішень, найменш чутливих до невизначеності вихідних припущень.

Метою дослідження є розроблення методичних засад оцінювання потенціалу екологічної резильентності міських ГЛС до комбінованих шоків та обґрунтування робастних управлінських рішень за умов глибокої невизначеності.

Для досягнення поставленої мети передбачено уточнити понятійний апарат дослідження, визначити критичні функції міських ГЛС, розробити типологію комбінованих шоків і механізмів їх взаємодії, сформувати систему показників опірності, відновлюваності та адаптивності, обґрунтувати принципи визначення референтних і порогових станів, запропонувати процедуру побудови функціонально-сценарного профілю

³ Zscheischler J., Westra S., van den Hurk B. J. J. M. et al. Future climate risk from compound events. *Nature Climate Change*. 2018. Vol. 8. P. 469–477. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0156-3>.

резильєнтності, визначити критерії сценарного тестування та робастності управлінських альтернатив.

Об'єктом дослідження є міські ГЛС, що функціонують під впливом природних та антропогенних чинників.

Предметом дослідження є структурні, функціональні, просторові та управлінські передумови потенціалу резильєнтності міських ГЛС, а також методи обґрунтування управлінських рішень, здатних забезпечувати прийнятний результат за певних сценаріїв комбінованих шоків.

В основу дослідження покладено припущення, що потенціал резильєнтності міської ГЛС визначається не лише її поточним екологічним станом, а поєднанням функціональних резервів, просторової організації, характеру можливих шоків, природної відновлюваності та адаптивної спроможності управління.

1. Концептуальні засади екологічної резильєнтності міських ґрунтово-ландшафтних систем (ГЛС)

Міська ГЛС як об'єкт екологічного менеджменту. Міські території являють собою складні просторово неоднорідні системи, у межах яких природні процеси взаємодіють із забудовою, транспортною та інженерною інфраструктурою, різними формами землекористування й управлінськими практиками. Ґрунтовий покрив у такій системі не існує ізольовано, його властивості визначаються походженням і складом ґрунтоутворних порід (субстрату), рельєфом, водним режимом, рослинністю, ступенем запечаткування поверхні, характером техногенного навантаження та історією використання території. Водночас стан ґрунту впливає на інфільтрацію атмосферних опадів, формування поверхневого стоку, життєздатність рослинності, міський мікроклімат, геохімічну міграцію речовин і безпеку використання незапечатаних територій. З огляду на це необхідна системна одиниця аналізу, яка поєднує ґрунтові властивості з просторовою організацією ландшафту, потоками речовини та енергії, зовнішніми впливами й механізмами управління. У вітчизняних дослідженнях методичні передумови формалізації урболандшафту пов'язуються з визначенням системи критеріїв і параметрів, необхідних для побудови його моделі. Це створює підґрунтя для переходу від загального опису міської території до виокремлення її структурних компонентів, просторових зв'язків і функціонально значущих характеристик⁴.

⁴ Тітенко Г. В., Баскакова Л. В. Критерії та параметри для розробки моделі урболандшафту. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2013. № 1070, вип. 9. С. 91–95. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKhNU_2013_1070_9_15 (дата звернення: 30.07.2026).

У межах дослідження під міською ГЛС розуміємо просторово обмежену та ієрархічно організовану соціоекологічну підсистему міста, утворену природними, антропогенно трансформованими і техногенними ґрунтами та ґрунтоподібними тілами, рельєфом, рослинністю, поверхневими й ґрунтовими водами, запечатаними поверхнями та інженерною інфраструктурою, функціонування яких визначається характером землекористування, зовнішніми навантаженнями, внутрішніми взаємозв'язками та управлінськими практиками⁵.

Просторові межі міської ГЛС не збігаються з адміністративними межами ділянки, кварталу або району. Вони мають визначатися відповідно до процесу, функції або ризику, що досліджується. Для оцінювання регулювання поверхневого стоку функціональною одиницею може бути локальний водозбір, який включає як незапечатані ґрунтові ділянки, так і дороги, покритві, дренажні споруди та пониження рельєфу. Для аналізу життєздатності міських дерев межі системи мають охоплювати доступний кореневий простір, зону надходження води, прилегли запечатані поверхні та підземні комунікації. Для оцінювання забруднення територіальна одиниця має враховувати джерело надходження речовин, напрям поверхневого та внутрішньогрунтового перенесення речовин та зони потенційної акумуляції речовин.

Отже, залежно від мети оцінювання вбачаємо можливість використання кількох вкладених типів меж, як-то морфологічні (за рельєфом і ґрунтовим покривом); гідрологічні (за напрямками стоку й межами водозбору); функціональні (за реалізацією певної екосистемної функції); експозиційні (за поширенням певного впливу) та управлінські (за юрисдикцією та відповідальністю суб'єктів управління).

Вибір меж є не технічним, а методологічним рішенням. Надто вузькі межі можуть приховувати каскадні процеси, які виходять за межі пробної ділянки. Надто широкі можуть ускладнювати встановлення причинних зв'язків і створювати хибне усереднення просторово неоднорідних умов⁶⁷.

В аспекті ієрархічної організації міська ГЛС є багаторівневою. З урахуванням ієрархічно-патчового підходу⁸ до моделювання міських

⁵ Meerow S., Newell J. P., Stults M. Defining urban resilience: A review. *Landscape and Urban Planning*. 2016. Vol. 147. P. 38–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.11.011>.

⁶ Lempert R. J. Robust Decision Making (RDM). *Decision Making under Deep Uncertainty: From Theory to Practice* / eds. V. A. W. J. Marchau, W. E. Walker, P. J. T. M. Bloemen, S. W. Popper. Cham : Springer, 2019. P. 23–51. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-05252-2_2.

⁷ Hall J. W., Lempert R. J., Keller K. et al. Robust climate policies under uncertainty: A comparison of Robust Decision Making and Info-Gap methods. *Risk Analysis*. 2012. Vol. 32, No. 10. P. 1657–1672. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2012.01802.x>.

⁸ Zhang C., Wu J., Grimm N. B., McHale M., Buyantuyev A. A hierarchical patch mosaic ecosystem model for urban landscapes: Model development and evaluation. *Ecological Modelling*. 2013. Vol. 250. P. 81–100. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.09.020>.

екосистем, відповідно до якого локальні екосистеми, типи земного покриву, землекористування, ландшафти та урбанізовані регіони утворюють вкладену просторово-функціональну структуру, у дослідженні запропоновано чотирирівневу класифікацію міських ґрунтово-ландшафтних систем: мікроділянка, функціональна ділянка, локальний ландшафтний комплекс і міська мережа. Авторська класифікація, розроблена на основі Hierarchical Patch Mosaic-Urban Ecosystem Model (HPM-UEM) та концепції динамічної неоднорідності⁹.

1. Мікроділянка як окремий ґрунтовий профіль, пристовбурна зона, газон, спеціально створений біоретенційний елемент або локальний осередок порушення ґрунтового покриву.

2. Функціональна ділянка, а саме парк, двір, сквер, транспортна смуга, промисловий майданчик, територія житлової забудови.

3. Локальний ландшафтний комплекс, а саме водозбір, зелений коридор, заплавна або схилова система.

4. Міська мережа як сукупність пов'язаних ґрунтових (коричневих), зелених, блакитних та інженерних елементів міста.

Показник, отриманий на мікроділянці, не може автоматично переноситися на вищий рівень. Наприклад, висока інфільтрація в окремій точці не означає ефективного регулювання стоку на рівні кварталу, якщо більша частина поверхні запечатана, а потоки води обминають відкриту ґрунтову ділянку. Аналогічно задовільний стан ґрунту в межах окремого парку не характеризує зв'язність усієї зеленої мережі міста.

Щодо компонентної структури та внутрішніх зв'язків міська ГЛС охоплює не лише ґрунтовий покрив, а щонайменше п'ять взаємозалежних компонентів.

Ґрунтовий компонент представлений природними ґрунтами, урбоземами, техноземами, насипними субстратами, похованими горизонтами, змішаними ґрунтово-будівельними матеріалами та іншими ґрунтоподібними тілами.

Геоморфологічний компонент включає природний і штучно змінений рельєф, схили, пониження, насипи, виїмки, вирви та мікроформи, які визначають перерозподіл води, осадів і забруднювальних речовин.

Біотичний компонент охоплює деревну, чагарникову й трав'янисту рослинність, кореневі системи, ґрунтову мікробіоту, безхребетних та інші організми, які беруть участь у формуванні структури ґрунту, кругообігу речовин і відновленні системи. Так, дослідження міських зелених просторів

⁹ Pickett S. T. A., Cadenasso M. L., Rosi-Marshall E. J. et al. Dynamic heterogeneity: A framework to promote ecological integration and hypothesis generation in urban systems. *Urban Ecosystems*. 2017. Vol. 20. P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11252-016-0574-9>.

у 56 муніципалітетах на шести континентах¹⁰ показало зв'язок ґрунтового й рослинного біорізноманіття з широким набором екосистемних функцій, що підтверджує недоцільність розгляду біоти лише як другорядного індикатора озеленення.

Гідрологічний компонент включає надходження атмосферних опадів, інфільтрацію, перерозподіл вологи в профілі, поверхневий стік, підтоплення, дренаж і зв'язок із водними об'єктами.

Антропогенно-інженерний компонент представлений будівлями, дорогами, покриттями, підземними комунікаціями, дренажними системами, об'єктами благоустрою та джерелами навантаження.

Між цими компонентами наявні горизонтальні та вертикальні зв'язки. Горизонтальні зв'язки забезпечують переміщення води, осадів, забруднювачів, органічної речовини та біоти між ділянками. Вертикальні охоплюють взаємодію поверхні, ґрунтового профілю, кореневої зони, насипних матеріалів, підґрунтя та підземних вод.

Особливе значення мають зворотні зв'язки. Так, наприклад, ущільнення ґрунту → зменшення інфільтрації → посилення поверхневого стоку → ерозія і втрата органічної речовини → подальше погіршення структури ґрунту. Або інший приклад, дефіцит ґрунтової вологи → пригнічення рослинності → зменшення затінення та транспірації → підвищення температури поверхні → зростання випаровування → подальше посилення дефіциту вологи. Такі зворотні зв'язки можуть переводити тимчасове порушення у стійкий деградований стан.

Також вважаємо за потрібне розділяти зовнішню дію та властивості системи, які визначають її реакцію (внутрішню вразливість). Екстремальна злива є зовнішнім впливом, але масштаб підтоплення залежить від частки запечатування, ущільнення, особливостей рельєфу, стану дренажної системи й попередньої вологості ґрунту. Хвиля спеки є кліматичним шоком, однак функціональні втрати рослинності визначаються доступним об'ємом ґрунту, запасом вологи, глибиною кореневмісного шару та видовим складом насаджень.

Отже, реакцію міської ГЛС не можна пояснювати лише силою шоку. Вона є результатом взаємодії характеру небезпеки + експозиції + вихідної вразливості + функціональних резервів + управлінської спроможності.

Таке розмежування відповідає загальній логіці оцінювання кліматичних ризиків, у якій наслідки формуються не самим існуванням небезпеки, а її взаємодією з експозицією та вразливістю системи.

¹⁰ Fan K., Chu H., Eldridge D. J. et al. Soil biodiversity supports the delivery of multiple ecosystem functions in urban greenspaces. *Nature Ecology & Evolution*. 2023. Vol. 7. P. 113–126. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41559-022-01935-4>.

Міська ГЛС стає об'єктом екологічного менеджменту, коли для неї визначені критичні функції та цільовий стан, суб'єкти управління, правові й організаційні повноваження, система моніторингу, можливі управлінські заходи, ресурси для їх реалізації, показники результативності, а також пороги й тригери перегляду рішень.

Управлінський контур не є зовнішнім доповненням до природної системи. Режим прибирання листя, частота косіння, організація руху відвідувачів, використання протиожеледних матеріалів, розміщення нової забудови, спосіб поводження зі знятим ґрунтом і характер відновлення пошкоджених територій безпосередньо змінюють структуру та функціональність системи.

Тому екологічний менеджмент має охоплювати повний адаптивний цикл. Від діагностики та встановлення цільових функцій через аналіз шоків і сценаріїв, вибір заходів, їх реалізацію, моніторинг та оцінювання результатів до коригування рішення.

Підхід до міських екологічних інфраструктур також підкреслює необхідність інтегрованого управління природними компонентами міста¹¹ та подолання інституційної фрагментації, за якої ґрунти, рослинність, вода й інженерні системи плануються окремо¹².

Ґрунтова інфраструктура (brown infrastructure) у структурі міста. Концепція brown infrastructure використовується в окремих напрямках урбоєкології для позначення ґрунтової основи міських екологічних систем. У концепції brown urban ecological infrastructure виділяється поряд із зеленими, блакитними та іншими екологічними компонентами й охоплює неозеленені наземні елементи та міські ґрунти, які забезпечують екосистемні функції й послуги. У літературі з міського ґрунтознавства ґрунти також описуються як brown infrastructure^{13, 14} за аналогією із зеленою інфраструктурою.

Водночас термін ще не має настільки уніфікованого й інституційно закріпленого змісту, як green infrastructure. Тому в роботі до поняття «ґрунтова інфраструктура (brown infrastructure)» пропонується таке робоче

¹¹ Fan K., Chu H., Eldridge D. J. et al. Soil biodiversity supports the delivery of multiple ecosystem functions in urban greenspaces. *Nature Ecology & Evolution*. 2023. Vol. 7. P. 113–126. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41559-022-01935-4>.

¹² Childers D. L., Bois P., Hartnett H. E. et al. Urban Ecological Infrastructure: An inclusive concept for the non-built urban environment. *Elementa: Science of the Anthropocene*. 2019. Vol. 7. Article 46. DOI: <https://doi.org/10.1525/elementa.385>.

¹³ Pouyat R. V., Day S. D., Brown S. et al. Urban soils. Forest and Rangeland Soils of the United States Under Changing Conditions / eds. R. V. Pouyat, D. S. Page-Dumroese, T. Patel-Weynand, L. H. Geiser. Cham : Springer, 2020. P. 127–144. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-45216-2_7.

¹⁴ Shankar M., Ng M., Rogers M. et al. Unearthing the role of soils in urban climate resilience planning. *Nature Sustainability*. 2024. Vol. 7. P. 1374–1376. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-024-01436-1>.

визначення. Під ґрунтовою інфраструктурою міста розуміємо просторово-функціональну сукупність відкритих і частково трансформованих міських ґрунтів, техноземів, ґрунтових конструкцій та доступних ґрунтових об'ємів, стан, розміщення і зв'язність яких забезпечують реалізацію водорегулювальних, біопродукційних, біогеохімічних, кліматорегулювальних і захисних функцій міського середовища.

Сучасна дискусія про міську кліматичну резильєнтність дедалі чіткіше підкреслює роль ґрунтів як essential infrastructure, необхідної для підтримання водорегулювання, рослинності та інших функцій міста.

Ґрунтова, зелена й блакитна інфраструктура не мають розглядатися як три незалежні категорії. Ґрунтова інфраструктура забезпечує субстрат, кореневий простір, інфільтрацію, утримання води, сорбцію речовин і середовище існування ґрунтової біоти. Втрата ґрунтової ланки порушує роботу всієї системи. Систематичні огляди підтверджують широкий спектр екосистемних послуг міських ґрунтів, але водночас показують, що їх мультифункціональність і зв'язки з іншими міськими компонентами часто оцінюються фрагментарно. Відповідно, ґрунтову інфраструктуру ми розглядаємо як функціональну рамку оцінювання міського ґрунтового ресурсу.

Потенціал екологічної резильєнтності. Екологічну резильєнтність міської ГІС доцільно розглядати не як її статичну характеристику або синонім задовільного екологічного стану, а як динамічну здатність системи реагувати на порушення, зберігаючи або відновлюючи критично важливі функції. У цьому контексті поточний стан ґрунту характеризує властивості системи на певний момент часу, тоді як резильєнтність описує характер її реакції на конкретний шок або сукупність взаємодіючих впливів.

Методологічно важливо розрізняти потенційну і фактично проявлену резильєнтність. Потенціал резильєнтності є сукупністю структурних, функціональних, просторових та управлінських передумов, які можуть забезпечити опірність системи, її відновлення або адаптацію до змін. Фактично проявлена резильєнтність може бути встановлена лише після виникнення конкретного порушення на основі спостереження за величиною функціональних втрат, тривалістю відновлення та станом системи після завершення відновного періоду. Отже, за відсутності часових рядів, що охоплюють стан системи до, під час і після шоку, науково коректніше оцінювати саме потенціал резильєнтності.

Для міських ГІС потенціал резильєнтності пропонується розглядати через три взаємопов'язані здатності: опірність, відновлюваність та адаптивність. Така модель дає змогу перейти від загального твердження про «стійкість території» до аналізу конкретних механізмів збереження і відтворення її функціональності.

Опірність міської ГЛС характеризує здатність системи обмежувати масштаб функціональних втрат під час дії шоку. Вона показує, наскільки істотно змінюється функціонування системи безпосередньо під впливом посухи, хвилі спеки, інтенсивних опадів, механічного порушення, забруднення, пожежі або іншої несприятливої події.

Опірність не означає повної відсутності змін. Навіть резильєнтна система може зазнавати тимчасового погіршення стану, проте величина цього погіршення не повинна перевищувати межу, після якої відбувається втрата критичної функції або перехід системи до іншого, небажаного функціонального стану.

Для міських ГЛС критичними можуть бути такі функції¹⁵, як:

- інфільтрація та утримання атмосферних опадів;
- регулювання поверхневого стоку;
- підтримання життєздатності міських насаджень;
- буферизація і сорбція забруднювачів;
- підтримання ґрунтового біорізноманіття;
- акумулювання органічної речовини;
- забезпечення безпечного використання території;
- участь у регулюванні локального мікроклімату.

Опірність залежить не від одного показника, а від поєднання властивостей системи. Наприклад, здатність ґрунту протистояти наслідкам посухи визначається гранулометричним складом, пористістю, вмістом органічної речовини, глибиною функціонального ґрунтового шару, характером кореневої системи, рівнем затінення та можливістю поповнення запасів вологи. Високий вміст гумусу може підвищувати водоутримувальну здатність, але не гарантує опірності, якщо ґрунт сильно ущільнений або ізольований від надходження води запечатаними поверхнями.

У разі оцінювання опірності важливо визначати:

- 1) вихідний рівень функціональності до впливу;
- 2) мінімальний рівень функціональності під час або одразу після шоку;
- 3) величину функціональної втрати;
- 4) наявність критичного порога;
- 5) просторовий масштаб порушення;
- 6) можливість поширення наслідків на суміжні компоненти міського ландшафту.

¹⁵ O’Riordan R., Davies J., Stevens C., Quinton J. N., Boyko C. The ecosystem services of urban soils: A review. *Geoderma*. 2021. Vol. 395. Article 115076. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115076>.

Висока опірність однієї функції не означає високої опірності всієї системи. Наприклад, ґрунт може зберігати здатність підтримувати трав'яний покрив, але втрачати інфільтраційну функцію через ущільнення¹⁶. Так само буферна здатність ґрунту щодо окремих забруднювачів може залишатися високою, тоді як біологічна активність і коренепроникність уже суттєво знижені.

Відновлюваність міської ГЛС характеризує здатність системи повертати втрачені функції після припинення або послаблення дії шоку. Її не можна оцінювати лише за фактом появи рослинності або часткового покращення окремого показника. Необхідно враховувати швидкість, повноту, стабільність і просторову рівномірність відновлення.

До основних характеристик відновлюваності належать:

- час початку відновної реакції;
- швидкість відновлення;
- частка відновленої функціональності;
- тривалість періоду до досягнення прийнятного стану;
- стабільність відновленого стану;
- залежність від зовнішнього втручання;
- імовірність повторної деградації;
- можливість відновлення кількох функцій одночасно.

Відновлення не обов'язково означає повернення до точного попереднього стану. Міські ґрунти переважно є антропогенно трансформованими, мозаїчними та просторово неоднорідними системами. Тому повернення до історичного або умовно природного стану може бути неможливим або недоцільним. Практичним орієнтиром має бути відновлення визначеного набору критичних функцій до рівня, достатнього для вибраного функціонального використання території.

Наприклад, для міського парку пріоритетними можуть бути підтримання деревної рослинності, інфільтрація опадів, терморегуляція та безпечне рекреаційне використання. Для біоретенційної ділянки основним критерієм буде здатність приймати, утримувати та очищувати поверхневий стік. Для території житлової забудови першочергового значення можуть набувати безпечність контакту населення з ґрунтом і відсутність вторинного пилового забруднення.

Відновлюваність визначається збереженням функціональних резервів системи. До них можуть належати:

- збережена структура ґрунту;
- достатня потужність незруйнованого ґрунтового шару;

¹⁶ Frene J. P., Pandey B. K., Castrillo G. Under pressure: Elucidating soil compaction and its effect on soil functions. *Plant and Soil*. 2024. Vol. 502. P. 267–278. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06573-2>.

- наявність органічної речовини;
- життєздатна ґрунтова біота;
- насіннєвий банк;
- збережені кореневі системи;
- гідрологічний зв'язок із незапечатаними територіями;
- відсутність незворотного токсичного забруднення;
- можливість проведення відновних заходів.

Після сильного механічного порушення, змішування горизонтів або значного забруднення природне відновлення може бути повільним або недостатнім. У такому разі слід розрізняти внутрішню відновлюваність системи та кероване відновлення, яке досягається за допомогою розуцільнення, внесення органічних матеріалів, відновлення рослинного покриву, регулювання стоку, локалізації забруднення або інших управлінських заходів.

Швидке відновлення окремого видимого компонента не завжди свідчить про відновлення системи. Наприклад, поява трав'янистої рослинності на порушеній ділянці не доводить відновлення ґрунтової структури, водного режиму, біологічного різноманіття чи буферної здатності. Відновлення необхідно оцінювати за функціями, а не лише за зовнішніми ознаками.

Адаптивність міської ГЛС характеризує здатність системи та пов'язаної з нею системи управління змінювати структуру, просторову організацію, режими функціонування або практики управління у відповідь на нові умови, не допускаючи неприйнятної втрати критичних функцій¹⁷.

На відміну від опірності, орієнтованої на обмеження безпосередніх втрат, і відновлюваності, спрямованої на повернення функціональності, адаптивність передбачає можливість функціональної перебудови. У міському середовищі вона часто залежить не лише від природних властивостей ґрунту, а й від інституційної спроможності, доступності даних, гнучкості планування та можливості змінювати управлінські рішення.

Адаптивність може передбачати:

- зміну складу рослинності відповідно до нового водного або температурного режиму;
- перерозподіл поверхневого стоку;
- створення додаткових інфільтраційних або біоретенційних ділянок;
- зменшення частки запечатаних поверхонь;
- зміну режиму рекреаційного використання;

¹⁷ Ribeiro P. J. G., Pena Jardim Gonçalves L. A. Urban resilience: A conceptual framework. *Sustainable Cities and Society*. 2019. Vol. 50. Article 101625. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101625>.

- просторове перенесення найбільш чутливих функцій;
- зміну функціонального призначення сильно порушеної території;
- поетапну ремедіацію;
- запровадження адаптивного моніторингу;
- перегляд управлінських рішень після досягнення визначених порогів.

Адаптивність не зводиться до необмеженого пристосування системи до будь-яких змін. Деякі зміни можуть призводити до збереження певних процесів, але супроводжуватися втратою бажаних екосистемних послуг. Наприклад, заміщення різноманітного рослинного угруповання кількома стійкими рудеральними або інвазійними видами може забезпечувати постійний рослинний покрив, але необов'язково підтримувати біорізноманіття, рекреаційну цінність або регулювання мікроклімату на необхідному рівні.

У певних концепціях міської резильєнтності поряд із адаптацією виділяють трансформацію¹⁸. Трансформація потрібна тоді, коли збереження попередньої структури або функціонального використання стає неможливим, економічно невиправданим чи екологічно небезпечним. У межах запропонованої трикомпонентної моделі трансформаційну здатність ми розглядаємо як вищий рівень адаптивності.

Прикладом трансформаційного рішення може бути перетворення території, непридатної для житлового або рекреаційного використання через складне забруднення чи повторюване підтоплення, на контрольовану буферну зону, водорегулювальний простір або ділянку з обмеженим доступом. У такому разі система не повертається до попереднього стану, але набуває нової конфігурації, здатної безпечніше виконувати визначені функції.

Опірність, відновлюваність і адаптивність не є взаємозамінними характеристиками. Система може мати високу опірність, але низьку відновлюваність, якщо після перевищення критичного порога її функції відновлюються дуже повільно. Інша система може сильно реагувати на короткочасний шок, але швидко відновлюватися після його завершення. Висока адаптивність може частково компенсувати недостатню опірність, однак лише за наявності своєчасного моніторингу, ресурсів і можливості змінювати управління.

Для характеристики потенціалу резильєнтності доцільно використовувати не один інтегральний бал, а функціональний профіль, який окремо відображає опірність кожної критичної функції, очікувану

¹⁸ Cariolet J.-M., Vuillet M., Diab Y. Mapping urban resilience to disasters – A review. *Sustainable Cities and Society*. 2019. Vol. 51. Article 101746. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101746>.

швидкість і повноту її відновлення, доступні механізми адаптації, критичні пороги, ключові невизначеності та залежність від управлінського втручання.

Такий профіль дає змогу виявити асиметрію резильєнтності. Наприклад, територія може мати достатню здатність підтримувати рослинність, але низьку здатність регулювати зливовий стік; або прийнятний водний режим, але неприйнятний рівень хімічного ризику для населення. Усереднення таких характеристик в одному індексі може приховати критичну проблему.

Екологічний стан є важливою передумовою резильєнтності, але не її достатнім доказом. Поточний стан описує систему в конкретний момент, тоді як резильєнтність стосується її поведінки під впливом порушення і після нього. Ґрунт може бути відносно хімічно незабрудненим, але переущільненим, малопотужним, біологічно збідненим або ізольованим запечатаними поверхнями. Після посухи, пожежі чи механічного порушення відновлення його функцій може бути тривалим і потребувати значного зовнішнього втручання.

Так само наявність зеленої зони не гарантує функціональної стійкості. Площа, позначена на карті як парк або сквер, може мати деградований ґрунтовий покрив, низьку інфільтраційну здатність, дефіцит доступної для рослин вологи, фрагментовану кореневу зону та недостатню різноманітність насаджень. Формальна наявність рослинного покриву в такому разі приховує високу вразливість до посухи, спеки, рекреаційного навантаження або інтенсивних опадів.

Показовим є приклад міського парку з прийнятним хімічним станом ґрунту. Відсутність значного забруднення може свідчити про безпечність території за хімічними критеріями, але не характеризує її здатність протистояти кліматичним шокам. За високої щільності складення, слабкої інфільтрації, низької водоутримуючої здатності та обмеженого об'єму ґрунту для розвитку коренів парк може бути вразливим до тривалої посухи. У період спеки дерева відчуватимуть дефіцит вологи, їхня транспірація і охолоджувальна функція зменшуватимуться, а відмирання частини насаджень посилюватиме нагрівання поверхні. У такій ситуації прийнятний хімічний стан поєднується з низькою функціональною опірністю і недостатньою відновлюваністю.

Отже, оцінювання потенціалу резильєнтності має виходити за межі нормативного порівняння концентрацій забруднювачів. Воно повинно охоплювати фізичні, хімічні, біологічні, гідрологічні, просторові та управлінські характеристики, безпосередньо пов'язані зі збереженням і відновленням критичних функцій.

Під потенціалом екологічної резильєнтності міської ГЛС пропонується розуміти сукупність її структурних, функціональних, просторових та управлінських властивостей, які визначають здатність обмежувати втрату критичних функцій під час комбінованих шоків, відновлювати ці функції після порушення та адаптувати структуру і режими управління до зміни умов без переходу до екологічно або соціально неприйнятного стану.

Таке визначення векторизує дослідження не на пошук абстрактної «стійкості», а на встановлення конкретних функцій, порогів, часових горизонтів, механізмів відновлення та можливостей адаптивного управління.

2. Методичний підхід до оцінювання потенціалу резильєнтності в умовах комбінованих шоків

Оцінювання потенціалу екологічної резильєнтності міських ГЛС потребує переходу від традиційного опису екологічного стану території до функціонально та сценарно-орієнтованого аналізу. Визначення концентрацій забруднювачів, фізичних властивостей ґрунту або частки зелених насаджень саме по собі не дає відповіді на питання, як система поводитиметься під час екстремального впливу, які функції вона зможе зберегти, наскільки швидко відновиться та чи буде здатною адаптуватися до нових умов.

У межах запропонованого підходу потенціал резильєнтності розглядається як сценарно залежна характеристика. Одна й та сама територія може демонструвати відносно високий потенціал резильєнтності до короточасної посухи, але бути вразливою до екстремальної зливи, хімічного забруднення або поєднання пожежі з наступним ерозійним зливом. Тому оцінка не повинна формулюватися абстрактно як «територія має високий рівень резильєнтності». Коректним є твердження про потенціал збереження або відновлення конкретних функцій за визначеного сценарію впливу, просторового масштабу та часового виміру.

Методичну основу дослідження становить причинно-функціональний ланцюг: вихідний стан системи → хронічні тиски і стреси → шок або комбінація шоків → первинна реакція компонентів → втрата критичних функцій → каскадні наслідки → відновлення або перехід до іншого стану → управлінська відповідь. Такий підхід дає змогу відокремити властивості самої ГЛС від характеристик зовнішнього впливу, а природну відновлюваність від результатів цілеспрямованого управлінського втручання.

Віднесення певного чинника до тиску, стресу або шоку не може ґрунтуватися лише на його назві. Воно залежить від швидкості виникнення, тривалості, інтенсивності, повторюваності, просторового охоплення,

попереднього стану системи, характерного часу її реакції та наявності порогу функціонального порушення.

Наприклад, посуха може бути тривалим стресором, якщо дефіцит вологи нарастає поступово, але може функціонувати як шок, якщо швидка та інтенсивна атмосферна посуха виникає в критичний період розвитку рослинності. Забруднення може бути хронічним тиском за поступового накопичення або шоком за аварійного викиду. Ущільнення може формуватися поступово внаслідок рекреаційного навантаження або виникати раптово після проходження важкої техніки.

Відповідно, доцільно класифікувати вплив за набором часово-просторових параметрів, а не за формальною назвою (табл. 1).

«Комбінований шок» пропонується визначати як ситуацію, у якій два або більше драйверів, стресорів чи небезпечних подій діють одночасно, послідовно або в просторово пов'язаних частинах системи та спільно визначають функціональний наслідок. При цьому комбінований шок необов'язково передбачає доведений синергетичний ефект.

Таблиця 1

**Критерії ідентифікації впливів у разі оцінювання потенціалу
екологічної резильєнтності міських ГЛС**

№	Критерій	Хронічний тиск	Тривалий стресор	Шок
1.	Початок	Поступовий або постійний	Поступовий чи сезонний	Відносно раптовий
2.	Тривалість	Тривала, часто невизначена	Від днів до років	Переважно коротша за час відновлення
3.	Повторюваність	Систематична	Періодична або тривала	Разова або серійна
4.	Основний ефект	Накопичення змін	Виснаження резервів	Різке функціональне відхилення
5.	Роль у резильєнтності	Формує фонову вразливість	Зменшує функціональний резерв	Перевіряє опірність і запускає відновлення
-	Типовий приклад	Транспортне забруднення	Тривала посуха	Екстремальна злива

Наприклад, комбінацію «спека + посуха + ущільнення» точніше описувати як кліматичний комбінований вплив, посилений попередньо сформованою фізичною вразливістю ґрунту. Саме ущільнення в цьому випадку є необов'язково шоком, а умовою, яка зменшує доступний функціональний резерв.

Комбінація «вибухове порушення + пожежа + забруднений поверхневий стік» є складним послідовно-каскадним шоком. Механічне та термічне

порушення змінюють властивості поверхні, а подальші опади забезпечують мобілізацію та просторове перенесення речовин.

Типологію комбінованих шоків для міських ГЛС доцільно формувати за двома критеріями – за походженням чинників та за механізмом їх поєднання (табл. 2).

Класифікація лише за походженням є недостатньою, оскільки одна подія може одночасно належати до кількох категорій. Наприклад, руйнування дренажу внаслідок воєнного впливу¹⁹, подальша злива та перенесення забруднювачів формують воєнний, гідрологічний і каскадний компоненти одного сценарію.

Наслідки кліматичного шоку значною мірою залежать від попереднього стану ґрунту. Ущільнений або малопотужний ґрунт із низьким вмістом органічної речовини може мати значно нижчу опірність до посухи, ніж ґрунт із розвиненою структурою та доступним для коренів профілем. Водночас після тривалої посухи інтенсивна злива може викликати не відновлення запасів вологи, а поверхневий стік, ерозію та локальне підтоплення.

Воєнний вплив не слід автоматично ототожнювати з токсичним забрудненням. Наявність вирви, уламків або слідів пожежі є підставою для скринінгу, але не доказом перевищення концентрацій конкретних речовин. Хімічний ризик має встановлюватися аналітично з урахуванням типу події, джерела забруднення, властивостей ґрунту та шляхів перенесення²⁰.

Каскадний шок характеризується передаванням наслідків між компонентами системи. Каскадний аналіз потребує виходу за межі окремої пробної ділянки. Необхідно враховувати рельєф, водозбір, напрями стоку, просторову зв'язність зелених зон, розташування інженерних мереж і можливість перенесення речовин.

Більшість урбанізаційно-техногенних впливів є хронічними тисками або накопичувальними стресорами, а не шоками у вузькому значенні. Проте вони визначають попередню вразливість і можуть суттєво посилювати наслідки кліматичних або аварійних подій. Прикладом є поєднання запечатування, ущільнення залишкових незабудованих ділянок та інтенсивних опадів. У цьому сценарії запечатування скорочує площу інфільтрації, ущільнення зменшує водопроникність відкритого ґрунту, а злива стає тригером швидкого формування поверхневого стоку.

¹⁹ Solokha M., Demyanyuk O., Symochko L. et al. Soil degradation and contamination due to armed conflict in Ukraine. *Land*. 2024. Vol. 13, No. 10. Article 1614. DOI: <https://doi.org/10.3390/land13101614>.

²⁰ Bonchkovskiy O., Ostapenko P., Bonchkovskiy A., Shvaiko V. War-induced soil disturbances in north-eastern Ukraine (Kharkiv region): Physical disturbances, soil contamination and land use change. *Science of the Total Environment*. 2025. Vol. 964. Article 178594. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178594>.

Таблиця 2

Групи шоків та ризики, які вони створюють (приклади)

Група шоків та впливів	Явища	Функції під ризиком
Кліматичні та гідрометеорологічні шоки	<ul style="list-style-type: none"> – Хвилі спеки; – атмосферні та ґрунтові посухи; – інтенсивні опади; – швидке танення снігу; – різкі переходи температури через 0°C; – сильні вітри; – поєднання спеки з посухою; – посуха, за якою настає екстремальна злива. 	<ul style="list-style-type: none"> – Утримання вологості; – інфільтрація; – регулювання поверхневого стоку; – підтримання рослинності; – біологічна активність; – регулювання температури міського середовища; – протигерозійна функція.
Воєнно зумовлені шоки	<ul style="list-style-type: none"> – Вибухове механічне порушення; – утворення вивр і штучного мікрорельєфу; – перемішування ґрунтових горизонтів; – пожежі; – руйнування будівель; – осідання пилу та продуктів горіння; – надходження уламків і будівельних матеріалів; – ущільнення важкою технікою; – руйнування дренажних систем; – зміну напрямів поверхневого стоку; – потенційне локальне хімічне забруднення. 	<ul style="list-style-type: none"> – Фізична цілісність ґрунтового профілю; – інфільтрація; – підтримання рослинності; – буферизація забруднювачів; – безпечність контакту з ґрунтом; – можливість подальшого землекористування; – природна відновлюваність
Каскадні та системні шоки	<p><i>1 варіант.</i></p> <p>Руйнування дренажу → → локальне підтоплення → → зміна окисно-відновних умов → → мобілізація забруднювачів → → перенесення до понижень рельєфу → → ризик для водних об'єктів або населення.</p> <p><i>2 варіант.</i></p> <p>пожежа → → втрата рослинного й органічного покриву → зниження структурної стабільності → → екстремальна злива → → ерозійний змив → → замулення дренажної системи → → повторне підтоплення.</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Регулювання поверхневого стоку та інфільтрація опадів; – акумулювання та підтримання доступних запасів ґрунтової вологості; – підтримання життєздатності міської рослинності; – терморегуляція міського середовища; – буферизація, сорбція і трансформація забруднювальних речовин; – збереження фізичної стабільності ґрунтового покриву; – підтримання біогеохімічних циклів і ґрунтового біорізноманіття; – просторової та функціональної зв'язності міської природної інфраструктури.
Урбанізаційно-техногенні впливи	<ul style="list-style-type: none"> – Ущільнення, – запечаткування поверхні; – зняття або перемішування ґрунтових горизонтів; – забруднення потенційно небезпечними елементами; – надходження нафтопродуктів та органічних забруднювачів; – засолення, – зміна рельєфу; – фрагментація зелених ділянок; – порушення природних шляхів стоку; – теплове навантаження від штучних поверхонь. 	<ul style="list-style-type: none"> – Інфільтраційно-водорегулювальна; – структурно-фізична; біопродукційна; – буферно-фільтраційна; – біогеохімічна; – вуглецерегулювальна; – біотопічна; – кліматорегулювальна функції.

Управлінська неспроможність працює як модифікатор вразливості. Відсутність моніторингу, затримка реагування, невизначеність відповідальності або дефіцит фінансування не є фізичними чи екологічними шоками. Їх доцільно трактувати як інституційні модифікатори вразливості. Вони можуть збільшувати тривалість негативного впливу; зменшувати ймовірність раннього виявлення; перешкоджати локалізації забруднення; збільшувати час відновлення; сприяти повторенню порушення; переводити оборотну деградацію у стійкий небажаний стан.

Отже, потенціал резильєнтності міської території визначається не лише природними властивостями ґрунту, а й здатністю системи управління розпізнавати шоки, своєчасно реагувати й коригувати рішення.

Щодо формування системи показників потенціалу резильєнтності вважаємо, що вибір показників має здійснюватися за принципом «функція – механізм – показник».

Алгоритм пропонується такий:

- 1) визначення критичної функції;
- 2) встановлення механізму її порушення;
- 3) вибір властивостей, які контролюють цей механізм;
- 4) визначення вимірюваних індикаторів;
- 5) встановлення референтного або порогового значення;
- 6) оцінювання невизначеності інтерпретації.

Наприклад, для функції регулювання зливого стоку важливими є не всі хімічні показники ґрунту, а передусім водопроникність, щільність, структура, потужність ґрунтового профілю, положення в рельєфі, частка запечатування та зв'язок із дренажною мережею.

Блок А. Параметри шоку й експозиції. Запропоновані чотири блоки показників (табл. 2) необхідно доповнити окремим блоком, який характеризує зовнішній вплив. Без цього неможливо відокремити високу резильєнтність від слабкої інтенсивності шоку.

До блоку належать тип події; інтенсивність; тривалість; швидкість виникнення; частота повторення; сезон; просторове охоплення; послідовність подій; час між повторними подіями; частка території, яка зазнала впливу; наявність зовнішнього надходження забруднювачів; потенційні шляхи поширення наслідків. Наприклад, невелика функціональна втрата після слабкої зливи не є доказом високої опірності до екстремальних опадів.

Блок Б. Стан і функціональність ґрунту. Фізичні показники: гранулометричний склад; щільність складення; загальна та функціональна пористість; опір penetрації; водостійкість агрегатів; інфільтраційна здатність; водоутримувальна здатність; потужність

функціонального ґрунтового шару; наявність ущільнених або техногенних горизонтів.

Хімічні показники: рН; електропровідність; вміст органічного вуглецю або гумусу; ємність катіонного обміну; доступні елементи живлення; валові та рухомі форми потенційно небезпечних елементів; нафтопродукти, поліциклічні ароматичні вуглеводні або інші органічні забруднювачі (лише за наявності обґрунтованого джерела ризику).

Біологічні показники: ґрунтове дихання; мікробна біомаса; активність ферментів; чисельність або різноманітність ґрунтових безхребетних; інтенсивність розкладання органічної речовини; стан кореневої системи; ознаки біологічного відновлення після порушення. Включення біологічних показників є принциповим, оскільки фізико-хімічно прийнятний ґрунт може мати низьку біологічну функціональність. Однак конкретний набір має визначатися можливостями лабораторії та цінністю показника для обраної функції.

Блок В. Просторово-ландшафтні характеристики. Показники для визначення: частка запечатаних поверхонь; площа й конфігурація незапечатаних ділянок; структура рослинного покриву; частка деревної, чагарникової та трав'янистої рослинності; зв'язність зелених ділянок; положення в рельєфі; крутизна схилу; належність до водозбору; напрями поверхневого стоку; відстань до джерел забруднення; близькість до транспортної мережі; фрагментація кореневого простору; просторове сусідство з водними об'єктами; частка території з порушеним ґрунтовым профілем.

Ці показники можуть визначатися за допомогою польового картування, GIS, цифрових моделей рельєфу, дистанційного зондування та аналізу землекористування.

Блок Г. Ознаки вразливості. Вразливість характеризує схильність системи до втрати конкретної функції за визначеного сценарію. Ознаками вразливості можуть бути: ущільнення; низька структурна стабільність; дефіцит органічної речовини; мала потужність кореневмісного шару; ерозійна нестійкість; токсичне забруднення; засолення; порушення дренажу; велика частка запечатування; просторове роз'єднання зелених ділянок; низьке видове та функціональне різноманіття рослинності; відсутність альтернативних шляхів відведення стоку; залежність від постійного зовнішнього догляду; попередня історія повторних порушень.

Один і той самий показник може характеризувати стан, вразливість або функціональність залежно від мети оцінювання. Наприклад, щільність складення є фізичною властивістю, але її високе значення стає ознакою вразливості щодо інфільтрації й розвитку коренів.

Блок Д. Управлінська та адаптивна спроможність. До цього блоку належать: наявність систематичного моніторингу; доступність актуальних просторових і лабораторних даних; визначеність відповідального суб'єкта; наявність плану реагування; швидкість мобілізації ресурсів; доступність території для втручання; технічна здійсненність заходів; фінансова забезпеченість; можливість поетапної реалізації; наявність резервних сценаріїв; можливість зміни функціонального використання; нормативні та безпекові обмеження; участь місцевих зацікавлених сторін; система індикаторів і тригерів перегляду рішення.

Цей блок не слід механічно поєднувати з ґрунтовими показниками. Він характеризує соціоекологічний контур управління та здатність компенсувати природні обмеження системи.

Щодо класифікації показників за динамічністю. Для оцінювання резильентності корисно розрізняти відносно сталі властивості (гранулометричний склад, природне положення в рельєфі), повільно змінні властивості (потужність профілю, запас органічного вуглецю), динамічні властивості (вологість, температура, електропровідність, біологічна активність), швидкі індикатори реакції (інфільтрація після опадів, стан рослинності, поверхневий стік), управлінські індикатори (час реагування, наявність даних, реалізація заходів).

Поєднання показників із різним часом реакції дає змогу відрізнити структурні передумови резильентності від короткострокової реакції на подію.

Пропонуємо таку процедуру оцінювання потенціалу резильентності. По-перше, вважаємо за доцільне не створювати один універсальний індекс резильентності. Агрегований бал може приховати критичну вразливість, бо високі значення другорядних показників здатні математично компенсувати втрату функції, яка фактично не може бути компенсована. По-друге, вважаємо за максимально надійний підхід формування функціонально-сценарного профілю резильентності.

Етап 1. Визначення меж системи. Необхідно встановити просторові межі; вертикальну потужність ґрунтового профілю; тип землекористування; пов'язані зелені, водні та інженерні елементи; суб'єктів управління; часовий горизонт оцінювання.

Межі мають визначатися відповідно до процесів. Для аналізу стоку доцільною одиницею може бути локальний водозбір²¹, для оцінки деревостану – кореневий простір, для забруднення – зона потенційного перенесення.

²¹ Casal-Campos A., Sadr S. M. K., Fu G., Butler D. Reliable, resilient and sustainable urban drainage systems: An analysis of robustness under deep uncertainty. *Environmental Science & Technology*. 2018. Vol. 52, No. 16. P. 9008–9021. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01193>.

Етап 2. Визначення критичних функцій. Для конкретної території вибираються функції, втрата яких є екологічно або соціально неприйнятною, а саме інфільтрація; регулювання стоку; підтримання рослинності; буферизація забруднювачів; біологічна активність; терморегуляція; безпечність використання; стабілізація поверхні. Не всі функції повинні мати однакову пріоритетність. Вона залежить від призначення території та потреб зацікавлених сторін.

Етап 3. Оцінювання поточної забезпеченості функцій. Для кожної функції визначається набір прямих і непрямих показників; референтна основа; поточний рівень; просторове варіювання; достовірність даних; основні обмежувальні фактори. Результатом є не загальна «якість ґрунту», а профіль забезпеченості функцій.

Етап 4. Формування сценаріїв комбінованих шоків. Сценарій має містити склад чинників; послідовність; інтенсивність; тривалість; частоту повторення; просторове охоплення; сезон; фонові тиски; управлінські умови.

Доцільно формувати не один прогноз, а набір правдоподібних сценаріїв: помірний, несприятливий, екстремальний та сценарій із невизначеними параметрами.

Етап 5. Визначення чутливості функцій. Для кожної комбінації «функція – сценарій» встановлюється механізм впливу; напрям зміни; очікувана величина втрати; імовірність перевищення порога; можливість каскадного поширення; рівень доказовості причинного зв'язку.

Чутливість бажано подавати окремо від експозиції. Територія може бути дуже чутливою до підтоплення, але не експонованою до нього через положення на вододілі²².

Етап 6. Оцінювання опірності. Опірність характеризується очікуваною або фактичною величиною втрати критичної функції під час шоку. Оцінювання опірності передбачає визначення максимальної відносної втрати критичної функції в межах заданого сценарію та часового вікна. Вихідний і мінімальний рівні функціональності мають бути визначені за зіставних умов, а показники приведені до єдиного напрямку інтерпретації. За наявності часових спостережень опірність розраховують за фактичною траєкторією функцій; за їх відсутності формують сценарну оцінку на основі механістичного моделювання, просторових або історичних аналогів та структурованого експертного судження. Результат слід подавати разом із діапазоном невизначеності, характеристиками шоку та інформацією про можливе перетинання критичних функціональних порогів.

²² Urich C., Rauch W. Exploring critical pathways for urban water management to identify robust strategies under deep uncertainties. *Water Research*. 2014. Vol. 66. P. 374–389. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.08.020>.

Етап 7. Оцінювання відновлюваності. Оцінюються очікуваний час початку відновлення; тривалість повернення до прийнятного рівня; повнота відновлення; стабільність відновленого стану; імовірність повторного порушення; залежність від зовнішнього втручання; наявність природних резервів відновлення.

Є сенс окремо розрізняти природне відновлення; кероване відновлення; відновлення до попереднього стану; відновлення до іншого, але функціонально прийнятного стану.

Етап 8. Оцінювання адаптивності. Адаптивність визначається через наявність альтернативних способів виконання функції; можливість зміни просторової організації; наявність функціональної надлишковості; можливість зміни режиму використання; гнучкість управління; доступність ресурсів; якість моніторингу; можливість поетапного втручання; наявність тригерів перегляду рішення.

Етап 9. Формування профілю резильєнтності. Для кожної критичної функції формується набір характеристик, у т.ч. поточне забезпечення, опірність, відновлюваність, адаптивність, критичний поріг, невизначеність.

Профіль може відображатися у вигляді матриці, теплової карти або радарної діаграми. Однак графічне узагальнення не повинно замінювати аналіз причин функціональних обмежень.

Етап 10. Виявлення критичних вразливостей. Доцільно застосовувати принцип функціонального «вузького місця», якщо одна критична функція переходить у неприйнятний стан, високі значення інших функцій не завжди можуть її компенсувати. Наприклад, висока водопроникність не компенсує небезпечне забруднення або добре озеленення не компенсує ризик контакту дітей із токсичним ґрунтом²³, або високий вміст органічної речовини не компенсує повне запечатування, або висока природна відновлюваність не усуває необхідності термінової локалізації забруднення. Тому функції є сенс поділити на взаємозамінні; частково компенсовані; незамінні або обмежувальні.

Етап 11. Оцінювання невизначеності. Профіль резильєнтності має супроводжуватися оцінкою невизначеності. Основні її типи: вимірювальна (похибка аналізу та просторового відбору), структурна (неповне розуміння причинних зв'язків), модельна (залежність результату від вибраної моделі), сценарна (невідомі характеристики майбутніх шоків), нормативна (невизначеність щодо прийнятного стану), управлінська (невідомі

²³ Yin D., Zhang X., Cheng Y., Jia H., Jia Q., Yang Y. Can flood resilience of green-grey-blue system cope with future uncertainty? *Water Research*. 2023. Vol. 242. Article 120315. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120315>.

ресурси, строки та спроможність реалізації), епістемічна (нестача знань, яку потенційно можна зменшити), варіабельність (природна або соціальна мінливість, яку не можна усунути додатковими дослідженнями).

Результатом оцінювання має бути:

- 1) визначення критичних функцій конкретної території;
- 2) ідентифікація шоків і фонових стресорів;
- 3) встановлення причинних механізмів функціональних втрат;
- 4) оцінка опірності, відновлюваності та адаптивності;
- 5) виявлення функціональних «вузьких місць»;
- 6) визначення рівня невизначеності;
- 7) формування інформаційної основи для сценарного тестування робастних управлінських рішень.

Таким чином, оцінювання потенціалу резильєнтності є не завершальним рейтингуванням, а проміжною аналітичною процедурою, яка пов'язує дані про міські ґрунти, ландшафтну структуру та управлінську спроможність із вибором заходів, здатних забезпечувати прийнятний результат за різних сценаріїв комбінованих шоків.

3. Обґрунтування робастних управлінських рішень для міських територій

Управлінські рішення щодо міських ІЛС ухвалюються за умов неповноти даних, просторової неоднорідності території, мінливості кліматичних впливів, обмеженого фінансування та невизначеної спроможності відповідальних суб'єктів реалізовувати й підтримувати заплановані заходи. Для міст, що функціонують в умовах воєнного ризику, до цих чинників додаються можливість повторних пошкоджень, порушення енергопостачання, обмеження доступу до територій, нестабільність бюджетів і зміна пріоритетів відновлення. За таких умов орієнтація на одне «найкраще» рішення, розраховане для найбільш імовірного сценарію, є недостатньою.

У межах цього дослідження робастним управлінським рішенням пропонується вважати рішення або портфель взаємопов'язаних заходів, який:

- 1) забезпечує збереження або відновлення критичних функцій за широкого діапазону правдоподібних сценаріїв;
- 2) не призводить до неприйнятних наслідків за несприятливих умов;
- 3) залишається технічно, фінансово й інституційно здійсненним;
- 4) допускає коригування, розширення або заміну окремих компонентів у міру надходження нової інформації;
- 5) не блокує реалізацію перспективних альтернатив у майбутньому.

Робастність не означає, що рішення є найефективнішим у кожному окремому сценарії. Воно може поступатися вузько оптимізованому рішенням за сприятливих умов, але має менший ризик функціонального провалу, неприйнятних витрат або незворотних негативних наслідків за несприятливих комбінацій шоків.

Робастне рішення не є окремим інженерним або природоорієнтованим заходом, а є структурованою управлінською конструкцією, яка включає початкові дії, резервні можливості, систему моніторингу, порогові значення та правила переходу до наступного етапу.

Окремий захід не здатен підтримувати всі критичні функції міської території за різних комбінацій шоків. Збільшення поливу може тимчасово зменшити водний стрес рослинності, але не усуває ущільнення ґрунту, не гарантує надходження води до активної кореневої зони та створює залежність від стабільного водо- й енергопостачання. Розширення зливової труби може збільшити відведення води, але не розв'язує проблеми засмічення зливоприймачів, поверхневого спрямування стоку до підвальних входів або підпору нижче за течією.

Тому об'єктом порівняння повинні бути не ізольовані заходи, а портфелі рішень, які поєднують природоорієнтовані заходи, ґрунтово-відновлювальні дії, інженерні рішення, просторове проектування, організаційні процедури, моніторинг наслідків, експлуатаційне обслуговування та резервні дії на випадок перевищення проектної спроможності.

У прийнятті рішень за глибокої невизначеності найбільш робастними часто виявляються не одиничні заходи, а гібридні стратегії, що поєднують інженерні, природоорієнтовані та організаційні компоненти. Водночас результат залежить від вибраних сценаріїв і критеріїв робастності, тому такі висновки не можна механічно переносити між територіями.

Послідовність обґрунтування робастного рішення розглянемо у практичному кейсі для міського парку у великому місті (Сад імені Тараса Шевченка, м. Харків, Україна).

1. Визначення просторових і управлінських меж. На першому етапі визначаємо територію, на яку безпосередньо поширюється рішення, функціонально пов'язані території, джерела зовнішніх впливів, просторовий рівень, на якому проявляється наслідок, власників і балансоутримувачів, суб'єктів, відповідальних за реалізацію й обслуговування, часовий горизонт рішення.

Сад імені Тараса Шевченка розташований у центральній частині Харкова.

Під час реконструкції саду були реалізовані^{24, 25}:

- 1) близько 95 тис. м² газонів;
- 2) близько 57 тис. м² асфальтового та гранітного дорожнього покриття;
- 3) система автоматичного поливу;
- 4) зливово каналізація;
- 5) штучна водойма;
- 6) пішохідні та рекреаційні об'єкти;
- 7) заходи зі збереження старовікових дубів, вік яких у проєктних матеріалах оцінювався у 200–300 років.

Ці дані свідчать про значну внутрішню неоднорідність території. Сад поєднує деревні насадження, газони, відкриті рекреаційні площі, алеї, що інтенсивно використовуються, водний об'єкт та інженерні мережі. За задокументованими площами газонів і дорожнього покриття останнє становить приблизно 37,5% їхньої сумарної площі. Це не частка запечатування всього саду, оскільки проєктні дані не охоплюють усіх типів поверхонь, але показник підтверджує істотну роль твердих покриттів у водному й тепловому режимі території.

В офіційному переліку природно-заповідного фонду ботанічна пам'ятка природи «Сад ім. Т. Г. Шевченка» має площу 0,75 га²⁶. Цю величину не слід помилково використовувати як загальну площу всього саду, вона характеризує площу охоронного об'єкта у відповідному реєстрі.

Для Саду імені Тараса Шевченка формальна межа парку недостатня для аналізу водного режиму, оскільки необхідно враховувати надходження стоку з твердих поверхонь, систему поливу, дренаж і розподіл рекреаційного навантаження.

2. Визначення критичних функцій. Рішення має оцінюватися не за кількістю реалізованих заходів, а за здатністю підтримувати визначені функції.

Для паркового кейсу такими функціями є доступність ґрунтової вологи²⁷; підтримання деревної рослинності; терморегуляція; збереження ґрунтової структури; стабільність поверхні; рекреаційний комфорт.

²⁴ Kharkiv Development & Investment. Реконструкція Саду імені Тараса Шевченка [Електронний ресурс]. URL: <https://inkharkiv.com/projects/rekonstruktsiia-sadu-imeni-tarasa-shevchenka/> (дата звернення: 30.07.2026).

²⁵ Харківська міська рада. Новий каскад, озеро і зони відпочинку – у Харкові реконструюють сад Шевченка [Електронний ресурс]. 11.05.2018. URL: <https://city.kharkiv.ua/news/misto/noviy-kaskad-ozero-i-zoni-vidpochinku---u-kharkovi-rekonstruyuyut-sad-shevchenka> (дата звернення: 30.07.2026).

²⁶ Харківська обласна державна адміністрація. Перелік територій та об'єктів природно-заповідного фонду Харківської області станом на 01.10.2021 року [Електронний ресурс]. URL: https://kharkivoda.gov.ua/content/documents/1127/112691/Attaches/perelik_pzf_na_sayt_hoda.pdf (дата звернення: 30.07.2026).

²⁷ Tams L., Paton E., Kluge B. Urban tree drought stress: Sap flow measurements, model validation, and water management simulations. *Science of the Total Environment*. 2024. Vol. 957. Article 177221. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177221>.

Функції мають бути ранжовані за критичністю. Безпечність людей, захист житлових приміщень і збереження старовікових дерев не повинні математично компенсуватися другорядними благоустроєвими перевагами.

3. Встановлення прийняттого та неприйняттого станів. Для кожної критичної функції необхідно встановити бажаний стан; прийнятний мінімум; поріг управлінського реагування; критичний поріг; неприйнятний результат.

Порогом може бути фізичний показник; функціональна втрата; тривалість порушення; площа ураження; кількість користувачів під ризиком; перевищення бюджету; неможливість відновлення в заданий строк.

Наприклад, для парку не досить встановити, що дерева залишилися живими. Необхідно визначити прийнятний рівень збереження листкового покриву, транспірації, охолоджувальної функції²⁸ та стану кореневої зони.

4. Ідентифікація функціонального «вузького місця». «Вузьким місцем» є компонент або процес, який першим обмежує збереження критичної функції. Його не можна встановлювати лише за найгіршим значенням окремого індикатора. Потрібно визначити причинний механізм.

Для Саду імені Тараса Шевченка можливий ланцюг має вигляд: рекреаційне навантаження → ущільнення → зменшення макропористості та інфільтрації → недостатнє поповнення вологи в кореневій зоні → водний стрес → зменшення транспірації → ослаблення охолодження.

Якщо фактичне «вузьке місце» визначено неправильно, навіть технічно якісне рішення може не дати очікуваного результату. Оцінювання за одним середнім значенням для всього саду буде методично слабким. Пропонується виділити шість типів функціональних зон (табл. 3).

Для кожної зони доцільно сформувати окремий профіль, а потім узагальнювати результати на рівні саду. Особливо важливим є порівняння зон Z1 і Z3: вони можуть мати подібний деревний покрив, але різний стан кореневмісного ґрунту через близькість до алей та рекреаційне навантаження.

5. Формування реєстру невизначеностей. Невизначеності для такого кейсу можна розділити на чотири групи, а саме зовнішні впливи (тривалість спеки, дефіцит опадів, повторюваність посух), стан системи (глибина ущільнення, доступний кореневий об'єм, стан дерев), управлінська спроможність (доступність води, справність поливу, контроль рекреації) та зовнішні обмеження (перебої електроенергії, воєнні пошкодження). Не всі невизначеності потрібно намагатися усунути додатковими дослідженнями. Частина з них дешевше врахувати через сценарне тестування.

²⁸ Stumpe B., Bechtel B., Heil J. et al. Soil texture mediates the surface cooling effect of urban and peri-urban green spaces during a drought period in the city area of Hamburg (Germany). *Science of the Total Environment*. 2023. Vol. 897. Article 165228. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165228>.

Таблиця 3

**Функціональні зони для функціонально-сценарного профілю Саду
імені Тараса Шевченка**

Код	Функціональна зона	Основні ознаки	Очікувана роль у сценарії
Z1	Старовікові деревні насадження	Зімкнений намет, значні кореневі системи, затінення	Висока кліматорегульовальна цінність; висока критичність збереження коренових зон
Z2	Газони та відкриті галявини	Трав'янистий покрив, інсоляція, рекреаційне використання	Швидко реагують на посуху; індикатор водного дефіциту й витоптування
Z3	Буферні смуги вздовж основних алей	Контакт ґрунту з твердим покриттям, інтенсивний рух	Найімовірніші осередки рекреаційного ущільнення і обмеження кореневого простору
Z4	Вузли високої рекреаційної активності	Входи, пам'ятники, майданчики, місця відпочинку	Локальне витоптування, оголення поверхні, високий антропогенний тиск
Z5	Запечатані й напівпроникні поверхні	Асфальт, граніт, площі, основні доріжки	Нагрівання, формування стоку, обмеження надходження води до ґрунту
Z6	Водойма, каскад, пониження і дренажні вузли	Накопичення або відведення води	Потенційний ресурс перерозподілу води, але необов'язково джерело доступної вологості для дерев

6. Побудова набору реалістичних сценаріїв. Сценарії не мають обмежуватися категоріями «нормальний», «поганий» і «найгірший». Кожен сценарій має відображати конкретну комбінацію сили й тривалості шоку; вихідного стану; попередніх стресів; технічного стану інфраструктури; доступності ресурсів; ефективності управлінського реагування.

Сценарії для парку.

R1 коротка хвиля спеки, достатня вологість ґрунту, справний полив;

R2 тривала спека після дефіциту опадів, полив доступний;

R3 тривала спека, обмеження водопостачання на 50%;

R4 спека, посуха, несправність частини системи поливу;

R5 спека й посуха за високого рекреаційного навантаження;

R6 повторення посушливих сезонів без повного відновлення ґрунту та дерев.

Польові дослідження міських дерев показують, що водний стрес залежить від вологості ґрунту, розміру водозбірної площі та управління водою; збільшення надходження води може зменшувати, але не завжди повністю усувати посуховий стрес. Охолоджувальна ефективність зелених територій також знижується за сухого ґрунту, навіть якщо деревний покрив формально збережений.

Узагальнений функціонально-сценарний профіль саду імені Тараса Шевченка побудовано для шести пріоритетних функцій з урахуванням опірності, відновлюваності та адаптивності.

Таблиця 4

**Узагальнений функціонально-сценарний профіль Саду
імені Тараса Шевченка**

Функція	Поточний потенціал	Опірність до короткої події	Опірність до тривалої події	Відновлюваність	Головне «вузьке місце»
F1 Водний режим	Середній	Середня	Низько-середня	Середня	Ущільнення і просторове відокремлення води від корневих зон
F2 Рослинистість	Середньо-високий	Середньо-висока	Середня або низька локально	Середня	Доступний кореневий простір і ґрунтова волога
F3 Охолодження	Високий у звичайних умовах	Висока через затінення	Середня через втрату транспірації	Середня	Водозабезпечення дерев
F4 Біологічні функції	Невизначений	Середня	Низько-середня	Повільна	Волога, агрегатна структура, органічні надходження
F5 Стабільність поверхні	Середня	Середня	Низька в рекреаційних вузлах	Середня	Оголення ґрунту і неформальні стежки
F6 Рекреаційний комфорт	Високий під наметом	Середньо-високий	Середній	Швидка після закінчення спеки, повільніша після деградації рослинності	Відкриті нагріті поверхні

Сад імені Тараса Шевченка має значний базовий потенціал кліматичної резильєнтності завдяки сформованому деревному намету, ґрунтовим площам, старовіковим деревам і створеній системі поливу. Водночас цей потенціал суттєво обмежений просторовою мозаїкою запечатаних поверхонь, локальним рекреаційним ущільненням і недостатнім надходженням води безпосередньо до активних корневих зон.

7. Формування управлінських альтернатив. Альтернативи мають бути взаємно порівнюваними за складом, строком реалізації та необхідними ресурсами. Неправильно порівнювати, наприклад, один дощовий сад

із повною реконструкцією дренажної мережі без урахування різниці в масштабі та функціях.

Для кожного заходу складається паспорт з інформацією про зміст, особливості та наслідки:

- цільова функція (яку функцію підтримує захід);
- механізм (як саме він змінює систему);
- просторовий масштаб (точка, ділянка, квартал, водозбір);
- строк реалізації (негайний, сезонний, багаторічний);
- капітальні витрати (проектування і будівництво);
- експлуатаційні витрати (обслуговування, вода, енергія, персонал);
- термін служби (очікуваний період працездатності);
- умови провалу (коли захід не забезпечує функцію);
- побічні ефекти (позитивні й негативні);
- оборотність (можливість зміни або демонтажу);
- відповідальний суб'єкт (хто реалізує і підтримує);
- показник результативності (що вимірюється після реалізації).

8. Робастний портфель рішень. Робастне управління не потребує реалізації всіх можливих заходів одночасно. Метод *Dynamic adaptive policy pathways*²⁹ передбачає реалізацію обґрунтованих короткострокових дій, збереження майбутніх можливостей і перехід до наступного заходу після досягнення заздалегідь встановленого порогу.

Для кожної території формується адаптивна траєкторія, що представлена ланцюгом: базове рішення → моніторинг → сигнал зміни → перевірка → додатковий захід → повторна оцінка.

Основний ланцюг впливу для Саду імені Тараса Шевченка пропонується представити так: інтенсивне рекреаційне використання → ущільнення та втрата макропористості → зниження інфільтрації й доступного кореневого об'єму → недостатнє поповнення запасів вологи → посуха → закриття продихів і зменшення транспірації → ослаблення охолоджувальної функції → підвищення температури поверхні → прискорене висушування ґрунту.

Формується позитивний зворотний зв'язок менше доступної вологи → слабше випаровувальне охолодження → вища температура → більший дефіцит вологи. Корені дерев можуть суттєво покращувати інфільтрацію навіть у відносно щільних міських ґрунтах, але ефект залежить від розподілу коренів, глибини ґрунту та ступеня ущільнення³⁰. В окремих експериментальних дослідженнях кореневі системи збільшували швидкість

²⁹ Haasnoot M., Kwakkel J. H., Walker W. E., ter Maat J. Dynamic adaptive policy pathways: A method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world. *Global Environmental Change*. 2013. Vol. 23, No. 2. P. 485–498. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.12.006>.

³⁰ Gregory J. H., Dukes M. D., Jones P. H., Miller G. L. Effect of urban soil compaction on infiltration rate. *Journal of Soil and Water Conservation*. 2006. Vol. 61, No. 3. P. 117–124. DOI: <https://doi.org/10.1080/00224561.2006.12435870>.

інфільтрації порівняно з бездеревними ділянками, причому важливими контролюючими показниками були пористість і щільність ґрунту.

Під час посухи теплорегульовальна функція парку складається з двох частин затінення, яке може певний час зберігатися навіть за водного стресу та еватранспіраційного охолодження, яке безпосередньо залежить від доступної вологості.

Дослідження міських зелених територій показують, що в умовах посухи охолоджувальна дія рослинності істотно залежить від водозабезпечення, текстури ґрунту та його гідралічних властивостей; просторові відмінності часто сильніше пов'язані з індексами вологості, ніж лише з кількістю зеленої біомаси.

Тригери (табл. 5) мають відповідати чотирьом вимогам:

- 1) бути вимірюваними;
- 2) реагувати раніше, ніж стан стане незворотним;
- 3) мати визначеного відповідального за спостереження;
- 4) бути безпосередньо пов'язаними з управлінською дією.

Таблиця 5

Робочі тригери для Саду імені Тараса Шевченка

Тригер (сигнал)	Робоча умова	Дія (управлінська реакція)
Дефіцит вологості	вологість кореневої зони нижча за локальний 10-й перцентиль протягом 5–7 діб	пріоритетний адресний полив
Дистанційний водний стрес	стійка негативна аномалія NDMI, а саме NDMI нижчий за середній сезонний рівень більш ніж на 1 стандартне відхилення у двох послідовних сценах	польова перевірка і коригування режиму поливу
Втрата рослинності	NDVI або проєктивне покриття зменшилися більш ніж на 20% від референту	обмеження доступу, відновлення покриття
Перегрівання	температура поверхні ділянки більш ніж на 3°C перевищує медіану затінених ділянок саду	посилення затінення, перегляд покриття й водного режиму
Ущільнення	опір penetрації більш ніж у 1,5 рази вищий за референт, а інфільтрація нижча за 50% референтної	локальне обмеження доступу, локальна діагностика й обережне розущільнення
Слабке відновлення	функція не повернулася до 90% референтного рівня через 30–45 днів	перехід від очікування природного відновлення до керованого втручання, перехід до структурної реконструкції кореневої зони
Втрата покриття (оголення поверхні)	оголений ґрунт займає понад 20% управлінської комірки	перенаправлення потоків відвідувачів і відновлення поверхні

Метою рішення щодо практичного обґрунтування портфеля для Саду імені Тараса Шевченка є підтримка життєздатності дерев, водного режиму ґрунту та охолоджувальної функції парку за поєднання хвилі спеки; тривалої посухи; рекреаційного ущільнення; можливої обмеженості поливної води; перебоїв енергопостачання.

Функціональним «вузьким місцем» є не загальна відсутність поливу, а просторова й часова недоступність води для активних коренів унаслідок ущільнення, запечаткування, обмеженого ґрунтового об'єму та нерівномірного надходження води.

Ущільнення міських ґрунтів здатне істотно знижувати інфільтрацію; водночас розвинені кореневі системи можуть частково відновлювати макропористість і збільшувати проникнення води³¹. Це означає, що втручання має захищати корені, а не розглядати ґрунт як однорідний субстрат, який можна механічно розпушити.

Таблиця 6

Порівняння альтернативних варіантів

Альтернатива	Очікуваний результат	Основний ризик	Попередня робастність
Календарний полив без моніторингу	підтримує газони й частину дерев за звичайних умов	перевитрата води, недополив корневих зон, залежність від енергії	низька
Локальне розуцільнення	може покращити інфільтрацію	пошкодження коренів, короткочасний ефект без контролю рекреації	низько-середня
Лише висадження нових дерев	збільшує перспективний намет	не захищає старі дерева, висока смертність саджанців за посухи	низька в короткому горизонті
Моніторинг + адресний полив	краще розподіляє воду	не усуває ущільнення й рекреаційний тиск	середня
Захист корневих зон + адресний полив + контроль потоків	впливає на причину й наслідок	потребує координації благоустрою та експлуатації	висока
Повний адаптивний портфель	поєднує воду, ґрунт, рекреацію, покриття й моніторинг	вищі організаційні вимоги	найвища

³¹ Xie C., Cai S., Yu B., Yan L., Liang A., Che S. The effects of tree root density on water infiltration in urban soil based on a Ground Penetrating Radar in Shanghai, China. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2020. Vol. 50. Article 126648. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126648>.

Рекомендовано такий робастний портфель³² для паркового кейсу.

На першому етапі (один сезон) картування кореневих зон старовікових і найбільш уразливих дерев; встановлення 10–20 репрезентативних датчиків вологості замість рівномірного дорогого покриття всієї території; польове вимірювання інфільтрації та опору пенетрації; виділення референтних і рекреаційно навантажених ділянок; перевірка фактичного розподілу поливної води; локальне перенаправлення відвідувачів; збереження органічної підстилки у визначених зонах; адресний полив за вологістю ґрунту, а не лише за календарем.

На другому етапі (після виявлення стабільних осередків вразливості) обережне пневматичне або інше малотравматичне розущільнення після картування коренів; локальна заміна непроникних покриттів; спрямування чистого покрівельного або поверхневого стоку до кореневих зон; створення невеликих накопичувачів поливної води; диференційований режим управління газонами; підбір ґрунтопокривних рослин для затінених і витоптуваних ділянок.

На резервному етапі³³ реконструкція окремих корневих просторів; заміна частини покриттів; створення структурних ґрунтових комірок; коригування видового складу насаджень; зміна функціонального режиму ділянок, які неможливо одночасно використовувати для інтенсивної рекреації та збереження коренів.

Серед заходів, що мають бути відхилені без додаткового обґрунтування, визначаємо масове механічне розпушення без картування кореневої зони; збільшення поливу без вимірювання вологості; герметичне покриття пристовбурних зон; заміна старих дерев молодими як формальна компенсація; повне прибирання листя з усіх ділянок; оцінювання результату лише за кольором газону або середнім NDVI.

Запропонована методика не зводить резильєнтність до загального індексу озеленення, стану ґрунту або рівня інженерного оснащення. Вона розрізняє різну часову природу шоків; різні причинні механізми; різні критичні функції; різні типи відновлення; різні вимоги до моніторингу; різні портфелі управлінських рішень.

Робастність повинна бути закріплена не лише в проєктній документації, а й у системі управління. Сучасні дослідження природоорієнтованої політики підкреслюють, що окремі демонстраційні проєкти залишаються

³² Hölscher K., Frantzeskaki N., Collier M. J. et al. Strategies for mainstreaming nature-based solutions in urban governance capacities in ten European cities. *npj Urban Sustainability*. 2023. Vol. 3. Article 54. DOI: <https://doi.org/10.1038/s42949-023-00134-9>.

³³ Davies C., Sheikholeslami D., Laforteza R. Nature-based policy as a pathway to urban sustainability transitions. *Urban Sustainability*. 2026. DOI: <https://doi.org/10.1038/s42949-026-00430-0>.

фрагментарними, якщо природні рішення не інтегровані в інвестиційні, експлуатаційні та міжсекторальні процедури міста.

Повноцінна цифрова модель міста не є обов'язковою умовою початку робастного управління. Для пілотних територій досить системи, яка фіксує ключові функції й тригери. Для парку це 10–20 датчиків вологості на контрастних ділянках; сезонні вимірювання опору пенетрації; інфільтраційні тести; оцінка стану дерев; Sentinel-2 NDVI та NDMI; температура поверхні; картування рекреаційного навантаження; облік обсягів поливу. Моніторинг повинен відповідати управлінському рішення. Збір показників, для яких не визначено порога та відповідної дії, створює дані, але не забезпечує адаптивного управління.

8. Методичні обмеження. Робастний підхід не усуває невизначеності та не гарантує відсутності пошкоджень. Його завдання зменшити залежність рішення від помилкового прогнозу та зробити умови провалу видимими до реалізації.

За визначеного набору сценаріїв, порогів і обмежень вибраний портфель має найменшу схильність до критичного функціонального провалу, прийнятні витрати, допустимі побічні наслідки та можливість адаптивного коригування.

Обґрунтування робастних управлінських рішень для міських територій – це послідовний процес переходу від функціональної діагностики до сценарного стрес-тестування портфелів заходів. Центральним елементом є визначення критичних функцій, причинного «вузького місця», умов провалу альтернатив і правил переходу до наступного етапу.

Апробація методики на прикладі Саду імені Тараса Шевченка показує її придатність для аналізу комбінованого сценарію, у якому хвиля спеки та посуха взаємодіють із попередньо сформованою вразливістю ґрунту внаслідок рекреаційного ущільнення.

Її головною перевагою є коректне розмежування гострого кліматичного шоку, тривалого стресора та хронічного антропогенного тиску, що запобігає механічному об'єднанню різних причин деградації. Це дає змогу побудувати причинний ланцюг «ущільнення – зниження пористості та інфільтрації – дефіцит доступної кореням вологи – водний стрес рослинності – ослаблення евапотранспіраційного охолодження» і пов'язати кожен його ланку з вимірюваними показниками. Важливою перевагою є орієнтація не на загальний стан парку, а на критичні функції, в т.ч. підтримання водного режиму, життєздатності деревної рослинності, терморегуляції, стабільності ґрунтового покриву та рекреаційної придатності.

Функціонально-сценарний профіль також є методично сильнішим за єдиний інтегральний індекс, оскільки не допускає компенсації критичної втрати однієї функції високими значеннями інших. Додатковою перевагою є можливість безпосередньо пов'язати виявлене «вузьке місце» з портфелем робастних заходів, у т.ч. захистом кореневих зон, адресним поливом, регулюванням рекреаційних потоків, локальним відновленням інфільтрації та адаптивним моніторингом. Поєднання польових вимірювань, дистанційного зондування, просторових аналогів і сценарного аналізу робить методику застосовною навіть за неповних даних, але лише за умови чіткого позначення статусу кожної оцінки.

Разом із тим наведений парковий кейс є концептуальною апробацією, а не завершеною емпіричною валідацією методики. Найсуттєвіше обмеження пов'язане з відсутністю тривалих часових рядів вологості ґрунту, інфільтрації, фізіологічного стану дерев, температури поверхні та фактичного поливу до, під час і після шоку. Без таких спостережень неможливо надійно визначити вихідний рівень функціональності, фактичний мінімум під час події та тривалість відновлення, тому оцінки опірності залишаються сценарними. Запропоновані пороги вологості, інфільтрації, температури та втрати рослинного покриву мають робочий характер і повинні калібруватися за локальними референтними ділянками, видами рослинності та сезонними умовами. Методика також поки що не досить формалізує економічну здійсненність, експлуатаційні витрати, доступність поливної води, інституційну відповідальність і можливість реалізації заходів за воєнних та енергетичних обмежень.

Отже, парковий кейс підтверджує логічну цілісність і практичну спрямованість функціонально-сценарного підходу, але його кількісна достовірність залежатиме від сезонного моніторингу, локального калібрування порогів і перевірки того, чи справді запропонований портфель заходів зменшує втрати критичних функцій за різних сценаріїв спеки, посухи та рекреаційного навантаження.

ВИСНОВКИ

У дослідженні обґрунтовано доцільність розгляду міських ґрунтово-ландшафтних систем як відкритих, просторово неоднорідних і багаторівневих соціо-еколого-технологічних підсистем міста.

Запропоновано визначати потенціал екологічної резильєнтності міської ГЛС через її опірність, відновлюваність та адаптивність щодо збереження конкретних критичних функцій за заданих сценаріїв впливу.

Розроблено причинно-функціональний підхід, який пов'язує вихідний стан системи, хронічні тиски і стресори, характеристики шоку,

функціональні втрати, каскадні наслідки, відновлення та управлінську відповідь.

Удосконалено типологію комбінованих шоків шляхом їх розмежування за походженням і механізмом взаємодії на одночасні, послідовні, попередньо зумовлені, каскадні та просторово поєднані впливи.

Визначено, що вибір показників резильєнтності має здійснюватися за принципом «функція – механізм порушення – індикатор», а результати оцінювання доцільно подавати як функціонально-сценарний профіль без необґрунтованого зведення до єдиного інтегрального індексу.

Запропоновано обґрунтовувати робастні управлінські рішення через сценарне стрес-тестування портфелів природоорієнтованих, ґрунтовідновлювальних, інженерних та організаційних заходів із визначеними порогами, тригерами й резервними діями.

Досліджено можливості практичного застосування методики на прикладі Саду імені Тараса Шевченка та встановлено, що ключовим функціональним обмеженням може бути недостатня доступність води для активних кореневих зон унаслідок ущільнення, запечатування та нерівномірного водопостачання.

Визначено, що подальша кількісна валідація методики потребує сезонного моніторингу, локального калібрування референтних і порогових значень, оцінювання витрат та перевірки результативності заходів за реальних кліматичних, воєнних, енергетичних і ресурсних обмежень.

АНОТАЦІЯ

У статті досліджено проблему оцінювання потенціалу екологічної резильєнтності міських ґрунтово-ландшафтних систем до комбінованих кліматичних, урбанізаційно-техногенних, воєнно зумовлених і каскадних шоків. Актуальність дослідження визначається необхідністю переходу від статичного оцінювання екологічного стану території до аналізу здатності системи зберігати, відновлювати та адаптувати критичні функції за умов невизначеності. Запропоновано розглядати міські ґрунтово-ландшафтні системи як відкриті, просторово неоднорідні та багаторівневі соціо-еколого-технологічні підсистеми міста. Розроблено причинно-функціональний методичний підхід, що пов'язує вихідний стан системи, хронічні тиски і стресори, параметри шоку, функціональні втрати, каскадні наслідки, відновлення та управлінську відповідь. Удосконалено типологію комбінованих шоків за походженням чинників і механізмами їх одночасної, послідовної, попередньо зумовленої, каскадної або просторово пов'язаної дії. Запропоновано оцінювати потенціал резильєнтності через опірність, відновлюваність та адаптивність критичних функцій,

а результати подавати у формі функціонально-сценарного профілю, що враховує референтні стани, порогові значення та невизначеність оцінок. Обґрунтовано процедуру формування робастних управлінських рішень на основі сценарного стрес-тестування портфелів природоорієнтованих, ґрунтовідновлювальних, інженерних та організаційних заходів із визначеними тригерами їх перегляду. Практичну придатність підходу проаналізовано на прикладі Саду імені Тараса Шевченка у Харкові, для якого визначено критичні функції, функціональні зони, сценарії спеки й посухи, основні «вузькі місця» та адаптивний портфель заходів. Встановлено, що кількісна валідація методики потребує сезонного моніторингу, локального калібрування порогів та перевірки результативності запропонованих рішень за реальних кліматичних, воєнних, енергетичних і ресурсних обмежень.

Література

1. McPhearson T., Cook E. M., Berbés-Blázquez M. et al. A social-ecological-technological systems framework for urban ecosystem services. *One Earth*. 2022. Vol. 5, No. 5. P. 505–518. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.04.007>.
2. Pickett S. T. A., Cadenasso M. L., Grove J. M., Nilon C. H., Pouyat R. V., Zipperer W. C., Costanza R. Urban ecological systems: Linking terrestrial ecological, physical, and socioeconomic components of metropolitan areas. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 2001. Vol. 32. P. 127–157. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.32.081501.114012>.
3. Zscheischler J., Westra S., van den Hurk B. J. J. M. et al. Future climate risk from compound events. *Nature Climate Change*. 2018. Vol. 8. P. 469–477. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0156-3>.
4. Тітенко Г. В., Баскакова Л. В. Критерії та параметри для розробки моделі урболандшафту. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2013. № 1070, вип. 9. С. 91–95. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKhNU_2013_1070_9_15 (дата звернення: 30.07.2026).
5. Meerow S., Newell J. P., Stults M. Defining urban resilience: A review. *Landscape and Urban Planning*. 2016. Vol. 147. P. 38–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.11.011>.
6. Lempert R. J. Robust Decision Making (RDM). Decision Making under Deep Uncertainty: From Theory to Practice / eds. V. A. W. J. Marchau, W. E. Walker, P. J. T. M. Bloemen, S. W. Popper. Cham : Springer, 2019. P. 23–51. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-05252-2_2.

7. Hall J. W., Lempert R. J., Keller K. et al. Robust climate policies under uncertainty: A comparison of Robust Decision Making and Info-Gap methods. *Risk Analysis*. 2012. Vol. 32, No. 10. P. 1657–1672. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2012.01802.x>.
8. Zhang C., Wu J., Grimm N. B., McHale M., Buyantuyev A. A hierarchical patch mosaic ecosystem model for urban landscapes: Model development and evaluation. *Ecological Modelling*. 2013. Vol. 250. P. 81–100. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.09.020>.
9. Pickett S. T. A., Cadenasso M. L., Rosi-Marshall E. J. et al. Dynamic heterogeneity: A framework to promote ecological integration and hypothesis generation in urban systems. *Urban Ecosystems*. 2017. Vol. 20. P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11252-016-0574-9>.
10. Fan K., Chu H., Eldridge D. J. et al. Soil biodiversity supports the delivery of multiple ecosystem functions in urban greenspaces. *Nature Ecology & Evolution*. 2023. Vol. 7. P. 113–126. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41559-022-01935-4>.
11. Li F., Liu X., Zhang X., Zhao D., Liu H., Zhou C., Wang R. Urban ecological infrastructure: An integrated network for ecosystem services and sustainable urban systems. *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 163, Suppl. P. S12–S18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.079>.
12. Childers D. L., Bois P., Hartnett H. E. et al. Urban Ecological Infrastructure: An inclusive concept for the non-built urban environment. *Elementa: Science of the Anthropocene*. 2019. Vol. 7. Article 46. DOI: <https://doi.org/10.1525/elementa.385>.
13. Pouyat R. V., Day S. D., Brown S. et al. Urban soils. Forest and Rangeland Soils of the United States Under Changing Conditions / eds. R. V. Pouyat, D. S. Page-Dumroese, T. Patel-Weynand, L. H. Geiser. Cham : Springer, 2020. P. 127–144. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-45216-2_7.
14. Shankar M., Ng M., Rogers M. et al. Unearthing the role of soils in urban climate resilience planning. *Nature Sustainability*. 2024. Vol. 7. P. 1374–1376. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-024-01436-1>.
15. O’Riordan R., Davies J., Stevens C., Quinton J. N., Boyko C. The ecosystem services of urban soils: A review. *Geoderma*. 2021. Vol. 395. Article 115076. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115076>.
16. Frene J. P., Pandey B. K., Castrillo G. Under pressure: Elucidating soil compaction and its effect on soil functions. *Plant and Soil*. 2024. Vol. 502. P. 267–278. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06573-2>.
17. Ribeiro P. J. G., Pena Jardim Gonçalves L. A. Urban resilience: A conceptual framework. *Sustainable Cities and Society*. 2019. Vol. 50. Article 101625. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101625>.

18. Cariolet J.-M., Vuillet M., Diab Y. Mapping urban resilience to disasters – A review. *Sustainable Cities and Society*. 2019. Vol. 51. Article 101746. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101746>.

19. Solokha M., Demyanyuk O., Symochko L. et al. Soil degradation and contamination due to armed conflict in Ukraine. *Land*. 2024. Vol. 13, No. 10. Article 1614. DOI: <https://doi.org/10.3390/land13101614>.

20. Bonchkovskiy O., Ostapenko P., Bonchkovskiy A., Shvaiko V. War-induced soil disturbances in north-eastern Ukraine (Kharkiv region): Physical disturbances, soil contamination and land use change. *Science of the Total Environment*. 2025. Vol. 964. Article 178594. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178594>.

21. Casal-Campos A., Sadr S. M. K., Fu G., Butler D. Reliable, resilient and sustainable urban drainage systems: An analysis of robustness under deep uncertainty. *Environmental Science & Technology*. 2018. Vol. 52, No. 16. P. 9008–9021. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01193>.

22. Urich C., Rauch W. Exploring critical pathways for urban water management to identify robust strategies under deep uncertainties. *Water Research*. 2014. Vol. 66. P. 374–389. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.08.020>.

23. Yin D., Zhang X., Cheng Y., Jia H., Jia Q., Yang Y. Can flood resilience of green-grey-blue system cope with future uncertainty? *Water Research*. 2023. Vol. 242. Article 120315. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120315>.

24. Kharkiv Development & Investment. Реконструкція Саду імені Тараса Шевченка. URL: <https://inkharkiv.com/projects/rekonstruktsiia-sadu-imeni-tarasa-shevchenka/> (дата звернення: 30.07.2026).

25. Харківська міська рада. Новий каскад, озеро і зони відпочинку – у Харкові реконструюють сад Шевченка. 11.05.2018. URL: <https://city.kharkiv.ua/news/misto/noviy-kaskad-ozero-i-zoni-vidpochinku---u-kharkovi-rekonstruyuyut-sad-shevchenka-> (дата звернення: 30.07.2026).

26. Харківська обласна державна адміністрація. Перелік територій та об'єктів природно-заповідного фонду Харківської області станом на 01.10.2021 року. URL: https://kharkivoda.gov.ua/content/documents/1127/112691/Attaches/perelik_pzf_na_sayt_hoda.pdf (дата звернення: 30.07.2026).

27. Tams L., Paton E., Kluge B. Urban tree drought stress: Sap flow measurements, model validation, and water management simulations. *Science of the Total Environment*. 2024. Vol. 957. Article 177221. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177221>.

28. Stumpe B., Bechtel B., Heil J. et al. Soil texture mediates the surface cooling effect of urban and peri-urban green spaces during a drought period in

the city area of Hamburg (Germany). *Science of the Total Environment*. 2023. Vol. 897. Article 165228. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165228>.

29. Haasnoot M., Kwakkel J. H., Walker W. E., ter Maat J. Dynamic adaptive policy pathways: A method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world. *Global Environmental Change*. 2013. Vol. 23, No. 2. P. 485–498. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.12.006>.

30. Gregory J. H., Dukes M. D., Jones P. H., Miller G. L. Effect of urban soil compaction on infiltration rate. *Journal of Soil and Water Conservation*. 2006. Vol. 61, No. 3. P. 117–124. DOI: <https://doi.org/10.1080/00224561.2006.12435870>.

31. Xie C., Cai S., Yu B., Yan L., Liang A., Che S. The effects of tree root density on water infiltration in urban soil based on a Ground Penetrating Radar in Shanghai, China. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2020. Vol. 50. Article 126648. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126648>.

32. Hölscher K., Frantzeskaki N., Collier M. J. et al. Strategies for mainstreaming nature-based solutions in urban governance capacities in ten European cities. *npj Urban Sustainability*. 2023. Vol. 3. Article 54. DOI: <https://doi.org/10.1038/s42949-023-00134-9>.

33. Davies C., Sheikholeslami D., Laforteza R. Nature-based policy as a pathway to urban sustainability transitions. *Urban Sustainability*. 2026. DOI: <https://doi.org/10.1038/s42949-026-00430-0>.

Information about the author:

Titenko Ganna,

Candidate of Sciences in Geography,
Director of the Karazin Institute of Environmental Sciences,
Green Energy and Sustainable Development,
Associate Professor at the Department of Ecology
and Environmental Management
V. N. Karazin Kharkiv National University
4, Svobody Square, Kharkiv, Ukraine