

ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ОХОЛОДЖУВАЛЬНИХ ЕКОСИСТЕМНИХ ПОСЛУГ ЗЕЛЕНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ З УРАХУВАННЯМ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ В УМОВАХ УПРАВЛІННЯ МІСЬКИМИ ЗЕМЛЯМИ

В.В. СТРАШОК,

старший науковий співробітник

E-mail: vitaly_sv@ukr.net

ORCID: 0009-0003-9789-3596

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Л.А. РАЙЧУК,

завідувач відділу

E-mail: edelvice@ukr.net

ORCID: 0000-0002-2552-4578

Інститут агроекології і природокористування НААН

Анотація. Урбанізація і кліматичні зміни знижують ефективність охолоджувальних регулюючих екосистемних послуг міської зеленої інфраструктури, проте їх еколого-економічна оцінка з урахуванням функціональної стійкості – особливо для приміських урбоекосистем в умовах збройного конфлікту – залишається недостатньо розробленою. Метою дослідження є еколого-економічна оцінка міської зеленої інфраструктури як кліматорегулюючого природного капіталу та розроблення підходу до оцінки охолоджувальних регулюючих екосистемних послуг з урахуванням функціональної стійкості на прикладі м. Ірпінь у 2015–2024 рр. Аналіз ґрунтувався на літніх медіанних композитах Landsat 8/9, кліматичних даних ERA5-Land і піксельному регресійному аналізі в Google Earth Engine із застосуванням NDVI, LST, NDBI, індексу ефективності охолодження (CEI) та аналізу динаміки теплових «гарячих точок». Встановлено стабільний охолоджувальний ефект рослинності впродовж досліджуваного періоду (коефіцієнти регресії NDVI–LST від –13,27 до –18,96) за вираженого теплового впливу забудови (NDBI–LST від +44,08 до +64,24). Незважаючи на відносно стабільні значення NDVI (0,260–0,300), після 2020 р. площі теплових «гарячих точок» різко зросли, досягнувши 25,63 % території у 2024 р., а CEI зафіксував максимальне зниження ефективності охолодження. Науковою новизною є авторський Індекс функціональної стійкості (FRI), що інтегрує охолоджувальну продуктивність рослинності, рівень озеленення, ефективність охолодження та просторову теплову вразливість. Критичне

зниження FRI від 1,72 у 2015 р. до 0,11 у 2024 р. емпірично доводить, що кількісні показники рослинності не є достатнім індикатором функціональної стійкості РЕП. Запропонований підхід з поправкою на резильєнтність забезпечує більш диференційовану еколого-економічну оцінку природного капіталу міської зеленої інфраструктури порівняно з класичним методом уникнутих витрат і може слугувати інструментальною основою для управлінських рішень у сфері кліматичної адаптації та міського землекористування.

Ключові слова: міський тепловий острів, метод уникнутих витрат, регулюючі екосистемні послуги, охолоджувальна ефективність.

Актуальність

Глобальні зміни клімату та урбанізаційне навантаження посилюють прояви міського теплового острова, зокрема зростання температури поверхні, збільшення енергоспоживання та погіршення умов проживання [13, 14, 15, 20]; найгостріше — у містах із високою щільністю забудови, значною часткою водонепроникних поверхонь і фрагментованою структурою зелених насаджень [6, 31]. Особливої гостроти проблема набуває для приміських урботериторій, що зазнають урбанізаційного тиску, кліматичних змін і — у випадку України — збройного конфлікту, який трансформує структуру міського середовища та його теплові характеристики [5, 10]. Еколого-економічна ефективність і функціональна стійкість регулюючих екосистемних послуг міської зеленої інфраструктури в таких умовах залишаються недостатньо оціненими, що обмежує науково обґрунтоване управління міськими землями в контексті кліматичної адаптації [25],

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Просторовий розподіл зелених насаджень є одним із ключових чин-

ників формування міського теплового острова [24, 26, 29], однак навіть за відносно стабільних показників рослинного покриву ефективність охолодження є варіабельною та залежить від просторової структури забудови, кліматичного навантаження і рівня теплової вразливості [2, 27, 30]. Просторову нерівномірність теплового навантаження та її зв'язок із землекористуванням підтверджено методами дистанційного зондування для різних типів урбоекосистем [12, 17]. Еколого-економічна оцінка охолоджувальних регулюючих екосистемних послуг традиційно базується на методі уникнутих витрат [3, 7, 21], однак цей підхід не враховує функціональну надійність регулюючих екосистемних послуг в умовах зростаючого теплового та урбанізаційного навантаження. Концептуальні засади оцінки стійкості екосистем [4, 16] та кількісні методи просторового аналізу міського теплового острова [1, 11, 23] формують теоретичну основу інтегративних підходів, що поєднують функціональну та економічну складові оцінки міської зеленої інфраструктури. Разом з тим, комплексні методи оцінки функціональної стійкості охолоджувальних регулюючих екосистемних послуг з еколого-економічною інтерпретацією залишаються нерозробленими, що визначає

наукову прогалину цього дослідження.

Метою дослідження є еколого-економічна оцінка міської зеленої інфраструктури як кліматорегулюючого природного капіталу та розроблення підходу до оцінки охолоджувальних регулюючих екосистемних послуг з урахуванням їхньої функціональної стійкості в умовах управління міськими землями на прикладі м. Ірпінь у 2015–2024 роках. Для досягнення мети вирішувалися такі завдання:

1) проаналізувати просторово-часову динаміку NDVI, LST і NDBI за даними Landsat;

2) оцінити охолоджувальний ефект рослинності та тепловий вплив забудови піксельним регресійним аналізом;

3) визначити динаміку теплових «гарячих точок» як показника просторової теплової вразливості урботериторії;

4) розробити та апробувати Індекс функціональної стійкості (FRI) охолоджувальних регулюючих екосистемних послуг ;

5) здійснити еколого-економічну оцінку охолоджувальних регулюючих екосистемних послуг методом resilience-adjusted valuation як основу для управлінських рішень у сфері міського землекористування.

Матеріали і методи дослідження

Територія дослідження

Об'єктом дослідження є м. Ірпінь, розташоване у північно-західній частині Київської агломерації. Адміністративні межі міста використовували у вигляді векторного shapefile, імпортованого до середовища Google Earth Engine. Місто належить до при-

міських урбанізованих територій і характеризується інтенсивною житловою забудовою, трансформацією структури землекористування та значною динамікою змін міського середовища, що особливо посилилася після 2022 року. Поєднання житлової забудови різної щільності, транспортної інфраструктури, фрагментованих зелених насаджень і природних лісових масивів формує складну просторову структуру урбосередовища та визначає характер процесів накопичення тепла й функціонування регулюючих екосистемних послуг. Динамічна трансформація структури землекористування м. Ірпінь – від переважно рекреаційних і сільськогосподарських угідь до інтенсивної житлової забудови – формує специфічні виклики для управління міськими землями в контексті збереження кліматорегулюючих функцій зеленої інфраструктури.

Супутникові та метеорологічні дані

Для аналізу показників рослинності та температури поверхні використовували супутникові дані Landsat Collection 2 Level-2 (Landsat 8 OLI/TIRS та Landsat 9 OLI/TIRS), отримані через платформу Google Earth Engine [8]. Метеорологічні умови оцінювали за даними ERA5-Land Monthly Aggregated Data (Copernicus Climate Data Store), що містять середньомісячні значення температури повітря. Аналіз проводили для літнього сезону (червень–серпень), який відповідає максимальному прояву теплового стресу в урбосередовищі [20].

Сформовано літні медіанні композиції за 2015, 2018 та 2020–2024 роки. Вибір зазначених років зумовлений двома чинниками: необхідністю

оцінки міжрічної динаміки теплового навантаження в різних кліматичних умовах та наявністю достатньої кількості знімків Landsat із низьким рівнем хмарності для формування репрезентативних композитів. Хмарність і тіні маскували на основі QA_PIXEL band Landsat Collection 2 Level-2; до аналізу включали лише знімки з мінімальним атмосферним впливом.

Розрахунок спектральних індексів

Для кожного річного літнього композиту обчислювали три спектральні показники: індекс рослинності NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), індекс забудови NDBI (Normalized Difference Built-up Index) та температуру поверхні LST (Land Surface Temperature).

NDVI використовували для оцінки стану і щільності рослинного покриву за формулою [19, 22]:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red}), \quad (1)$$

де NIR – ближній інфрачервоний канал; Red – червоний канал.

Інтенсивність забудови оцінювали за індексом NDBI [29]:

$$\text{NDBI} = (\text{SWIR} - \text{NIR}) / (\text{SWIR} + \text{NIR}), \quad (2)$$

де SWIR – короткохвильовий інфрачервоний канал; NIR – ближній інфрачервоний канал.

LST розраховували на основі теплового інфрачервоного каналу ST_B10 відповідно формули [28]:

$$\text{LST} = \text{ST_B10} \times 0,00341802 + 149,0 - 273,15, \quad (3)$$

де LST – температура поверхні землі, °C; ST_B10 – тепловий інфрачервоний канал Landsat.

Отримані значення індексів використовували для аналізу взаємозв'язків між рослинністю, інтенсивністю забудови та тепловим навантаженням у межах досліджуваної території.

Аналіз взаємозв'язків між індексами

Охолоджувальний ефект рослинності оцінювали методом піксельного регресійного аналізу між NDVI та LST за моделлю [24]:

$$\text{LST} = a + b\text{NDVI} \times \text{NDVI}, \quad (4)$$

де a – вільний член; bNDVI – коефіцієнт охолоджувального впливу рослинності. Негативні значення bNDVI інтерпретували як зниження температури поверхні зі збільшенням рівня озеленення.

Аналогічно оцінювали вплив урбанізованих поверхонь на накопичення тепла через регресію NDBI–LST – підхід, широко застосовуваний у дослідженнях міського теплового острова [26, 28]:

$$\text{LST} = a + b\text{NDBI} \times \text{NDBI}, \quad (5)$$

де bNDBI – коефіцієнт теплового впливу забудови. Позитивні значення bNDBI відображають зростання теплового навантаження зі збільшенням площ водонепроникних і урбанізованих поверхонь.

Аналіз теплових «гарячих точок» (hotspot-зон)

На території дослідного об'єкта було виділено ділянки з температурою поверхні понад 38 °C у літній період («гарячі точки») для оцінки просторової теплової вразливості. Площу hotspot-зон визначали як частку території дослідження та використовували як показник теплового навантаження.

Індекс ефективності охолодження

Взаємозв'язок між температурою поверхні та станом рослинності широко використовується у дослідженнях пом'якшення міського теплового навантаження та охолоджувальних екосистемних послуг [24, 30]. Функціональну ефективність охолоджувальних регулюючих екосистемних послуг

оцінювали за індексом ефективності охолодження (Cooling Efficiency Index, CEI), який запропоновано на базі вищезгаданої концепції:

$$CEI = LST / NDVI \quad (6)$$

Підвищення значень CEI інтерпретували як зниження ефективності охолодження в умовах зростаючого теплового навантаження на урбоекосистему.

Еколого-економічна оцінка охолоджувальних регулюючих екосистемних послуг

Еколого-економічну оцінку проводили на основі методу уникнутих витрат (avoided-cost approach), відповідно до якого охолоджувальний вплив рослинності дозволяє скоротити потенційні витрати, пов'язані з тепловим стресом та кондиціонуванням урбосередовища. Номінальну економічну оцінку охолоджувальних регулюючих екосистемних послуг визначали за формулою:

$$E = \Delta T \times \beta \times C_e, \quad (7)$$

де E – умовна економічна оцінка охолодження; ΔT – температурне пом'якшення, °C; β – коефіцієнт чутливості енергоспоживання до температури; C_e – тариф на електроенергію.

У розрахунках використовували стандартизований тариф $C_e \approx 0,07$ EUR/kWh, що відповідає середньому тарифу для населення України у 2023–2024 роках. Коефіцієнт β визначали відповідно до Santamouris (2015), згідно з яким зростання температури на 1 °C може збільшувати витрати на охолодження на 0,5–8,5 % залежно від кліматичних та урбаністичних умов.

Розробка Індексу функціональної стійкості (FRI) та оцінка функціональної стійкості екосистемних послуг

Для комплексної оцінки функціональної стійкості охолоджувальних

регулюючих екосистемних послуг запропоновано Functional Resilience Index (FRI), що інтегрує охолоджувальну продуктивність рослинності, рівень її просторового забезпечення, ефективність охолодження та просторову теплову вразливість. Методологічна схема формування FRI із зазначенням математичних виразів та еколого-економічної інтерпретації кожного компонента наведена у табл. 1.

Індекс FRI ми розраховували за формулою:

$$FRI = (|b_NDVI| \times NDVI) / (CEI \times H), \quad (8)$$

де $|b_NDVI|$ – абсолютне значення коефіцієнта охолоджувального впливу рослинності; $NDVI$ – середній рівень озеленення території; CEI – індекс неефективності охолодження; H – частка hotspot-зон як десятковий дріб (0–1). Вищі значення FRI відповідають вищій функціональній стійкості регулюючих екосистемних послуг і більшій стабільності кліматорегулюючих функцій міської зеленої інфраструктури. З метою уніфікації оцінювання нами запропоновано авторську класифікацію рівнів стійкості (табл. 2).

Концептуальні причинно-наслідкові зв'язки між вхідними чинниками, компонентами індексу та еколого-економічними наслідками зниження функціональної стійкості регулюючих екосистемних послуг представлені на рис. 1.

Схема відображає, як кліматичне навантаження, урбанізаційний тиск, воєнна дестабілізація та забезпеченість рослинністю формують через проміжні показники (охолоджувальна продуктивність, неефективність охолодження, тепла вразливість) інтегральний індекс функціональної стійкості регулюючих екосистемних послуг та

1. Методологічна схема формування Functional Resilience Index (FRI)

Етап	Компонент	Математичний вираз	Еколого-економічна інтерпретація
I	Індекс рослинності NDVI	NDVI	Запас природного капіталу
II	Охолоджувальна продуктивність	$ b_NDVI $	Охолоджувальний потенціал рослинності
III	Індекс ефективності охолодження CEI	LST/NDVI	Неефективність охолодження
IV	Теплова вразливість	H	Просторова теплова вразливість
V	Індекс функціональної стійкості	$(b_NDVI \times NDVI) / (CEI \times H)$	Функціональна стійкість регулюючих екосистемних послуг
VI	Скоригована економічна оцінка	Avoided Cost \times FRI	Скоригована еколого-економічна оцінка

Джерело: авторська розробка Страшка В.В.

2. Класифікація рівнів функціональної стійкості кліматорегулюючого природного капіталу за індексом FRI

Значення індексу FRI	Рівень функціональної стійкості
$\leq 0,2$	Критичний
0,2-1,0	Вразливий
$\geq 1,0$	Стабільний

Джерело: авторська розробка Страшка В.В.

визначають рівень термoeкономічної вразливості урботериторії.

З метою врахування функціональної стійкості в еколого-економічній оцінці запропоновано підхід оцінювання з поправкою на резильєнтність:

$$\text{Adjusted Cooling Value} = \text{Avoided Cost} \times \text{FRI} \quad (9)$$

Цей підхід дозволяє відобразити не лише номінальну економічну цінність охолоджувальних регулюючих еко-

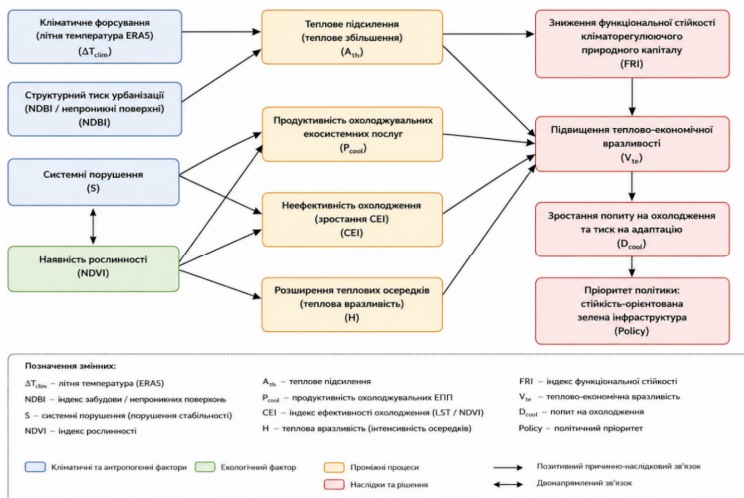


Рис. 1. Концептуальна схема формування Індексу функціональної стійкості (FRI) охолоджувальних регулюючих екосистемних послуг міської зеленої інфраструктури та його еколого-економічні наслідки

Джерело: розробка авторів.

3. Просторово-часова динаміка показників рослинності, теплового режиму, ефективності охолодження та функціональної стійкості регулюючих екосистемних послуг у м. Ірпінь (2015–2024)

Рік	NDVI ± SD	LST ± SD, °C	b_NDVI	b_NDBI	CEI ± SD	Hotspot, %	FRI	Уникнені витрати, €
2015	0,260 ± 0,083	32,51 ± 2,65	-13,27	+44,08	141,09 ± 67,96	1,42	1,72	-137,00
2018	0,283 ± 0,090	32,22 ± 3,02	-14,53	+49,13	134,05 ± 75,79	2,38	1,29	-164,26
2020	0,277 ± 0,096	33,93 ± 3,51	-15,30	+58,44	143,36 ± 83,74	14,76	0,20	0,00
2021	0,300 ± 0,097	35,11 ± 3,54	-18,96	+61,77	137,41 ± 80,12	23,89	0,17	+113,71
2022	0,295 ± 0,103	33,41 ± 3,53	-16,55	+64,24	137,47 ± 82,44	12,28	0,29	+50,34
2023	0,292 ± 0,098	32,41 ± 3,34	-17,78	+55,32	129,51 ± 78,10	3,48	1,15	-145,87
2024	0,279 ± 0,094	35,76 ± 2,74	-15,41	+59,08	151,74 ± 85,33	25,63	0,11	+176,60

Примітка:

уникнені витрати розраховані відносно базового 2020 р.;

від'ємні значення відображають нижчий рівень теплового навантаження порівняно з базовим роком, а не економічні збитки.

Джерело: авторська розробка Страшка В.В.

4. Коефіцієнти регресії між індексами NDVI, NDBI та LST (м. Ірпінь)

Рік	bNDVI	bNDBI
2015	-13,27	+44,08
2018	-14,53	+49,13
2020	-15,30	+58,44
2021	-18,96	+61,77
2022	-16,55	+64,24
2023	-17,78	+55,32
2024	-15,41	+59,08

Джерело: авторська розробка Страшка В.В.

системних послуг, а й їхню функціональну надійність в умовах теплового та урбанізаційного навантаження.

Результати та їх обговорення

Зведені результати просторово-часового аналізу всіх розрахованих показників наведено у табл. 3. Детальна інтерпретація кожної групи показників здійснюється у відповідних підрозділах.

Просторово-часова динаміка рослинності та температури поверхні

Аналіз літніх супутникових композитів Landsat за 2015–2024 рр. виявив суттєву просторову неоднорідність розподілу рослинності та температури поверхні в межах м. Ірпінь. Найвищі значення NDVI характерні для територій із деревною рослинністю та лісовими масивами, найнижчі – для щільної забудови, транспортної інфраструктури та водонепроникних поверхонь. Упродовж досліджуваного періоду середні значення NDVI залишалися відносно стабільними (0,260–0,300), що свідчить про загальне збереження рослинного покриву попри активну урбанізацію.

Температурні характеристики демонстрували значно вищу міжрічну варіабельність. Після 2020 року зафіксовано різке зростання площ із підвищеними значеннями LST, що збігається з інтенсифікацією забудови та, з 2022 року, – з просторовою трансформацією урбосередовища

внаслідок воєнних руйнувань. Подібні закономірності описано у Weng et al. (2004), Yuan & Bauer (2007) та Zhou et al. (2011).

Отримані результати підтверджують, що оцінка лише кількості рослинності не дозволяє повною мірою охарактеризувати функціональний стан охолоджувальних регулюючих екосистемних послуг у міському середовищі.

Взаємозв'язок між рослинністю та температурою поверхні

Піксельний регресійний аналіз між NDVI, NDBI та LST підтвердив протилежний вплив рослинності та урбанізованих поверхонь на тепловий режим міського середовища (табл. 4).

Коефіцієнти регресії NDVI–LST були стабільно негативними впродовж усього досліджуваного періоду, що відображає методологічно очікуваний охолоджувальний ефект рослинності: зростання NDVI на одиницю супроводжується зниженням LST на величину $|b_NDVI|$. Коефіцієнти NDBI–LST були стабільно позитивними, що підтверджує посилення накопичення тепла на урбанізованих поверхнях.

Найсильніший охолоджувальний ефект зафіксовано у 2021 р. ($b_NDVI = -18,96$), найбільший тепловий вплив забудови – у 2022 р. ($b_NDBI = +64,24$). Підвищення абсолютних значень b_NDVI після 2020 р. свідчить про зростання термального контрасту між озеленими та урбанізованими ділянками в умовах посиленого теплового навантаження. Помітне зниження b_NDBI у 2023–2024 рр. порівняно з 2022 р. може частково відображати скорочення активних будівельних поверхонь у період воєнних подій та подальшого віднов-

лення, що вплинуло на просторову структуру урбанізованих поверхонь і характер їхнього теплового впливу, що узгоджується з результатами досліджень інших вчених [24, 26, 31].

Після 2020 р. спостерігається одночасне посилення теплового впливу забудови, зростання площ hotspot-зон і зниження функціональної стійкості охолоджувальних регулюючих екосистемних послуг, що свідчить про те, що навіть за відносно стабільних значень NDVI урбанізаційне навантаження може істотно обмежувати кліматорегулюючі функції міської зеленої інфраструктури.

Динаміка теплових «гарячих точок» та просторова тепла вразливість

Аналіз теплових «гарячих точок» демонструє різке зростання площ із підвищеним тепловим навантаженням після 2020 р. (табл. 3). Найбільше поширення hotspot-зон зафіксовано у 2024 р. – 25,63 % площі дослідження, тоді як у 2015 р. цей показник становив лише 1,42 %. Теплові «гарячі точки» формувалися переважно в межах щільної забудови, транспортної інфраструктури та ділянок із низьким рівнем озеленення.

Динаміка hotspot-зон після 2020 року має виражений нелінійний характер: різке зростання у 2021 р. (23,89 %) змінилося помітним скороченням у 2022–2023 рр. (12,28 % та 3,48 % відповідно) з подальшим досягненням максимуму у 2024 р. (25,63 %). Скорочення у 2022–2023 рр. може пояснюватися кількома взаємопов'язаними чинниками: зупинкою активного будівництва в умовах воєнних дій, зменшенням інтенсивності землекористування на окремих ділянках, а також частковою зміною просторової структури

забудови внаслідок руйнувань [9, 18]. Водночас відновлення будівельної активності після 2023 р. і подальша просторова трансформація урбосередовища знову посилили теплову вразливість території, що відобразилось у максимальному значенні hotspot-зон у 2024 р.

Показово, що у 2021 та 2024 рр. різке зростання hotspot-зон відбувалося на тлі збереження сильного негативного зв'язку між NDVI та LST. Це підтверджує висновки Chakraborty et al. (2020) щодо нерівномірного просторового розподілу теплового навантаження та свідчить про те, що просторова тепла вразливість урботериторій визначається не нестачею рослинності як такою, а взаємодією між структурою забудови, фрагментацією зелених територій і кліматичним навантаженням.

Ефективність охолоджувальних регулюючих екосистемних послуг

Розрахунки індексу CEI демонструють суттєву міжрічну варіабельність із загальною тенденцією до зниження ефективності охолодження в умовах зростаючого теплового навантаження (табл. 3). Найвищі значення CEI (найнижча ефективність охолодження) зафіксовано у 2024 р. (151,74), що збігається з максимальним поширенням hotspot-зон. Найнижчі значення CEI – у 2023 р. (129,51) – відповідають мінімальному тепловому навантаженню того самого року.

Результати наших досліджень свідчать, що зниження ефективності охолоджувальних регулюючих екосистемних послуг в умовах посиленого теплового навантаження відбулося у 2024 році, коли зафіксовані найвищі значення CEI.

Отримані результати підтверджують, що за умов збереження

рослинного покриву функціональна ефективність охолодження може знижуватися під впливом зовнішнього теплового навантаження. Це узгоджується з положеннями теорії стійкості екосистем, згідно з якими структура системи може залишатися відносно стабільною, тоді як її функціональна ефективність поступово зменшується [4], і обґрунтовує необхідність переходу від статичної оцінки кількості зелених насаджень до аналізу функціональної ефективності кліматорегулюючих регулюючих екосистемних послуг.

Еколого-економічна оцінка функціональної стійкості охолоджувальних екосистемних послуг

На основі результатів дослідження запропоновано Functional Resilience Index (FRI), що інтегрує охолоджувальну продуктивність рослинності, рівень озеленення, ефективність охолодження та просторову теплову вразливість (табл. 3). Найнижчі значення FRI зафіксовано у 2024 р. (0,11) та 2021 р. (0,17), що відображає критичне зниження функціональної стійкості охолоджувальних регулюючих екосистемних послуг в умовах максимального теплового навантаження. Показово, що у 2021 р., незважаючи на найвищий охолоджувальний ефект рослинності ($|b_NDVI| = 18,96$), значення FRI залишалось низьким через значне поширення hotspot-зон (23,89%), що безпосередньо підтверджує основну гіпотезу дослідження: кількість рослинності не є достатнім показником функціональної стійкості кліматорегулюючих регулюючих екосистемних послуг.

Скоригована еколого-економічна оцінка (resilience-adjusted valuation) розраховувалась як добуток уникнутих витрат та FRI. Від'ємні значення

уникнутих витрат у 2015, 2018, 2022 та 2023 роках відображають нижчий рівень теплового навантаження порівняно з базовим 2020 роком, а не реальні економічні збитки – тобто є розрахунковим артефактом обраної бази порівняння. Найвище значення скоригованої оцінки у 2024 р. (176,60 €) зумовлене максимальним тепловим навантаженням, однак низьке значення FRI (0,11) водночас сигналізує про критично знижену функціональну надійність регулюючих екосистемних послуг у цей рік.

Таким чином, навіть за відносно стабільного рослинного покриву функціональна ефективність та надійність охолоджувальних регулюючих екосистемних послуг можуть істотно знижуватися під впливом теплового навантаження, урбанізаційного тиску та просторової фрагментації урбосередовища. Динамічна трансформація структури землекористування м. Ірпінь – від переважно рекреаційних і сільськогосподарських угідь до інтенсивної житлової забудови – формує специфічні виклики для управління міськими землями в контексті збереження кліматорегулюючих функцій зеленої інфраструктури.

Висновки і перспективи подальших досліджень

Встановлено, що міська зелена інфраструктура м. Ірпінь забезпечує стабільний охолоджувальний ефект упродовж 2015–2024 років (b_NDVI від $-13,27$ до $-18,96$), однак її функціональна ефективність визначається не лише рівнем озеленення, а й взаємодією між охолоджувальною здатністю рослинності, інтенсивністю забудови та просторовою тепловою вразливістю території.

Показано, що незважаючи на відносну стабільність середніх значень NDVI (0,260–0,300), після 2020 року зафіксовано різке зростання площ теплових «гарячих точок» (з 1,42 % у 2015 р. до 25,63 % у 2024 р.) та підвищення індексу CEI до максимального значення 151,74 у 2024 р., що свідчить про прогресуюче зниження функціональної ефективності охолоджувальних регулюючих екосистемних послуг в умовах зростаючого теплового й урбанізаційного навантаження. Тимчасове скорочення hotspot-зон у 2022–2023 рр. пов'язується з просторовою трансформацією урбосередовища внаслідок воєнних подій.

Запропоновано Functional Resilience Index (FRI), що інтегрує охолоджувальну продуктивність рослинності, рівень озеленення, ефективність охолодження та просторову теплову вразливість. Емпірично підтверджено, що критичне зниження FRI у 2021 р. (0,17) та 2024 р. (0,11) за одночасно високих значень $|b_NDVI|$ свідчить про недостатність кількості рослинності як індикатора функціональної стійкості охолоджувальних регулюючих екосистемних послуг.

Обґрунтовано підхід resilience-adjusted valuation – еколого-економічної оцінки, скоригованої на FRI, – що дозволяє врахувати функціональну надійність регулюючих екосистемних послуг в умовах теплового навантаження та отримати більш диференційовану оцінку природного капіталу міської зеленої інфраструктури порівняно з класичним методом уникнутих витрат.

Доведено необхідність переходу в системі міського планування від статичних показників площі озеленення до динамічної оцінки функціональної

стійкості регулюючих екосистемних послуг із урахуванням просторової структури зелених насаджень, інтенсивності забудови та рівня теплової вразливості території, що є необхідною умовою науково обґрунтованого управління міськими землями в контексті кліматичної адаптації та сталого розвитку урботериторій.

Запропонований методологічний підхід може слугувати інструментальною основою для підтримки управлінських рішень у сфері кліматичної адаптації, просторового планування та еколого-економічної оцінки природного капіталу приміських урбоекосистем, зокрема тих, що зазнають одночасного впливу урбанізаційного тиску, кліматичних змін і постконфліктної просторової трансформації.

Список використаної літератури

1. Bowler D. E., Buyung-Ali L., Knight T. M., Pullin A. S. Urban greening to cool towns and cities: a systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*. 2010. Vol. 97, No. 3. P. 147–155. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006> (дата звернення: 24.04.2026)
2. Chakraborty T., Hsu A., Manya D., Sheriff G. Disproportionately higher exposure to urban heat in lower-income neighborhoods. *Environmental Research Letters*. 2020. Vol. 15, No. 9. P. 094017. DOI:10.1088/1748-9326/ab3b99 (дата звернення: 07.05.2026)
3. Costanza R., d'Arge R., de Groot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R. V., Paruelo J., Raskin R. G., Sutton P., van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*. 1997. Vol. 387. P. 253–260. DOI: <https://doi.org/10.1038/387253a0> (дата звернення: 21.04.2026)
4. Folke C., Carpenter S. R., Walker B., Scheffer M., Chapin T., Rockström J. Resilience thinking: integrating resilience, adaptability and transformability. *Ecology and Society*. 2010. Vol. 15, No. 4. P. 20. DOI: <https://doi.org/10.5751/ES-03610-150420> (дата звернення: 01.05.2026)
5. Ghanghermeh A., Roshan G., Asadi K., Attia S. Spatiotemporal analysis of urban heat islands and vegetation cover using Emerging Hotspot Analysis in a humid subtropical climate. *Atmosphere*. 2024. Vol. 15, No. 2. P. 161. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos15020161> (дата звернення: 03.05.2026)
6. Gill S. E., Handley J. F., Ennos A. R., Pauleit S. Adapting cities for climate change: the role of green infrastructure. *Built Environment*. 2007. Vol. 33, No. 1. P. 115–133. DOI: <https://doi.org/10.2148/benv.33.1.115> (дата звернення: 27.04.2026)
7. Gómez-Baggethun E., Barton D. N. Classifying and valuing ecosystem services for urban planning. *Ecological Economics*. 2013. Vol. 86. P. 235–245. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.08.019> (дата звернення: 25.04.2026)
8. Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*. 2017. Vol. 202. P. 18–27. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031> (дата звернення: 01.05.2026)
9. Gupta P., Shukla D. P. Implications of Russia-Ukraine war on land surface temperature and air quality: long-term and short-term analysis. *Environmental Science and Pollution Research International*. 2024. Vol. 31, No. 34. P. 46357–46375. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32800-5> (дата звернення: 05.05.2026)
10. Gupta A., De B. the city-level thermal environment through the strategic integra-

- tion of green infrastructure. *International Journal of Biometeorology*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00484-024-02733-2> (дата звернення: 07.05.2026)
11. Haase D., Larondelle N., Andersson E., Artmann M., Borgström S., Breuste J., Gomez-Baggethun E., Gren Å., Hamstead Z., Hansen R., Kabisch N., Kremer P., Lange-meyer J., Rall E. L., McPhearson T., Pauleit S., Qureshi S., Schwarz N., Voigt A., Wurster D., Elmqvist T. A quantitative review of urban ecosystem service assessments: concepts, models, and implementation. *Ambio*. 2014. Vol. 43, No. 4. P. 413–433. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13280-014-0504-0> (дата звернення: 06.05.2026)
 12. Hamoodi M. N. Investigating the effects of armed and political conflicts on the land use/cover change and surface urban heat islands: a case study of Baghdad, Iraq. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 2021. Vol. 49. P. 1493–1506. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12524-021-01330-9> (дата звернення: 17.04.2026)
 13. Hanna, E., Bruno, D. & Comín, F.A. (2024). The ecosystem services supplied by urban green infrastructure depend on their naturalness, functionality and imperviousness. *Urban Ecosystem*, 27, 187–202. <https://doi.org/10.1007/s11252-023-01442-9> (accessed: 20 May 2026) (дата звернення: 20.05.2026)
 14. IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Geneva : Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/> (дата звернення: 19.04.2026)
 15. Lin, H., & Li, X. (2025). The Role of Urban Green Spaces in Mitigating the Urban Heat Island Effect: A Systematic Review from the Perspective of Types and Mechanisms. *Sustainability*, 17(13), 6132. <https://doi.org/10.3390/su17136132> (дата звернення: 20.05.2026)
 16. 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> (дата звернення: 15.04.2026)
 17. Rao P., Tassinari P., Torreggiani D. Exploring the land-use urban heat island nexus under climate change conditions using machine learning approach: a spatio-temporal analysis of remotely sensed data. *Heliyon*. 2023. Vol. 9, No. 8. P. e18423. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18423> (дата звернення: 03.05.2026)
 18. Roshan G., Ghanghermeh A., Sarli R., Grab S. W. Environmental impacts of shifts in surface urban heat island, emissions, and nighttime light during the Russia-Ukraine war in Ukrainian cities. *Environmental Science and Pollution Research International*. 2024. Vol. 31, No. 32. P. 45246–45263. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34050-x> (дата звернення: 26.04.2026)
 19. Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. NASA Special Publication. 1974. Vol. 351. P. 309–317. (дата звернення: 01.05.2026)
 20. Santamouris M. Regulating the damaged thermostat of the cities: status, impacts and mitigation challenges. *Energy and Buildings*. 2015. Vol. 91. P. 43–56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.01.027> (дата звернення: 06.05.2026)
 21. TEEB. (2010). The economics of ecosystems and biodiversity: Mainstreaming the economics of nature. London, UK: Earthscan.
 22. Tucker C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*. 1979. Vol. 8, No. 2. P. 127–150. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0) (дата звернення: 28.04.2026)
 23. Voogt J. A., Oke T. R. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*. 2003. Vol. 86, No. 3. P. 370–

384. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8) (дата звернення: 22.04.2026)
24. Weng Q., Lu D., Schubring J. Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*. 2004. Vol. 89, No. 4. P. 467–483. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.005> (дата звернення: 23.04.2026)
25. Yao, Y., Zheng, H., Ouyang, Z., Gong, C., Zhang, J., Ying, L., & Wen, Z. (2025). Impact of urban green infrastructure on ecosystem services: A systematic review. *Ecological Indicators*, 178, 113885. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113885> (дата звернення: 20.05.2026)
26. Yuan F., Bauer M. E. Comparison of impervious surface area and NDVI as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*. 2007. Vol. 106, No. 3. P. 375–386. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.09.003> (дата звернення: 03.05.2026)
27. Yuan, T. (2024). The role of green infrastructure in mitigating the urban heat island effect. *Open Journal of Applied Sciences*, 14(11), 3155–3164. <https://doi.org/10.4236/ojapps.2024.1411207> (дата звернення: 20.05.2026)
28. Zanter, K. (2024). Landsat Surface Temperature Product Guide (LSDS-1330 Version 2.0). U.S. Geological Survey. <https://www.usgs.gov/landsat-missions> (дата звернення: 20.05.2026)
29. Zha Y., Gao J., Ni S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 2003. Vol. 24, No. 3. P. 583–594. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160304987> (дата звернення: 24.04.2026)
30. Zhou W., Huang G., Cadenasso M. L. Does spatial configuration matter? Understanding the effects of land cover pattern on land surface temperature in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*. 2011. Vol. 102, No. 1. P. 54–63. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.03.009> (дата звернення: 01.05.2026)
31. Ziter C. D., Pedersen E. J., Kucharik C. J., Turner M. G. Scale-dependent interactions between tree canopy cover and impervious surfaces reduce daytime urban heat during summer. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2019. Vol. 116, No. 15. P. 7575–7580. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1817561116> (дата звернення: 29.04.2026)

References

1. Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., & Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97(3), 147–155. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006> (accessed: 24 April 2026)
2. Chakraborty, T., Hsu, A., Manya, D., & Sheriff, G. (2020). Disproportionately higher exposure to urban heat in lower-income neighborhoods. *Environmental Research Letters*, 15(9), 094017. DOI:10.1088/1748-9326/ab3b99 (accessed: 7 May 2026)
3. Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R. V., Paruelo, J., Raskin, R. G., Sutton, P., & van den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387, 253–260. <https://doi.org/10.1038/387253a0> (accessed: 21 April 2026)
4. Folke, C., Carpenter, S. R., Walker, B., Schaffer, M., Chapin, T., & Rockström, J. (2010). Resilience thinking: Integrating resilience, adaptability and transformability. *Ecology and Society*, 15(4), 20. <https://doi.org/10.5751/ES-03610-150420> (accessed: 1 May 2026)
5. Ghanghermeh, A., Roshan, G., Asadi, K., & Attia, S. (2024). Spatiotemporal analy-

- sis of urban heat islands and vegetation cover using Emerging Hotspot Analysis in a humid subtropical climate. *Atmosphere*, 15(2), 161. <https://doi.org/10.3390/atmos15020161> (accessed: 3 May 2026)
6. Gill, S. E., Handley, J. F., Ennos, A. R., & Pauleit, S. (2007). Adapting cities for climate change: The role of green infrastructure. *Built Environment*, 33(1), 115–133. <https://doi.org/10.2148/benv.33.1.115> (accessed: 27 April 2026)
 7. Gómez-Baggethun, E., & Barton, D. N. (2013). Classifying and valuing ecosystem services for urban planning. *Ecological Economics*, 86, 235–245. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.08.019> (accessed: 25 April 2026)
 8. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031> (accessed: 1 May 2026)
 9. Gupta, P., & Shukla, D. P. (2024). Implications of Russia-Ukraine war on land surface temperature and air quality: Long-term and short-term analysis. *Environmental Science and Pollution Research International*, 31(34), 46357–46375. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32800-5> (accessed: 5 May 2026)
 10. Gupta, A., & De, B. (2024). Enhancing the city-level thermal environment through the strategic integration of green infrastructure. *International Journal of Biometeorology*. <https://doi.org/10.1007/s00484-024-02733-2> (accessed: 7 May 2026)
 11. Haase, D., Larondelle, N., Andersson, E., Artmann, M., Borgström, S., Breuste, J., Gomez-Baggethun, E., Gren, Å., Hamstead, Z., Hansen, R., Kabisch, N., Kremer, P., Langemeyer, J., Rall, E. L., McPhearson, T., Pauleit, S., Qureshi, S., Schwarz, N., Voigt, A., ... Elmqvist, T. (2014). A quantitative review of urban ecosystem service assessments: Concepts, models, and implementation. *Ambio*, 43(4), 413–433. <https://doi.org/10.1007/s13280-014-0504-0> (accessed: 6 May 2026)
 12. Hamoodi, M. N. (2021). Investigating the effects of armed and political conflicts on the land use/cover change and surface urban heat islands: A case study of Baghdad, Iraq. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 49, 1493–1506. <https://doi.org/10.1007/s12524-021-01330-9> (accessed: 17 April 2026)
 13. Hanna, E., Bruno, D. & Comín, F.A. (2024). The ecosystem services supplied by urban green infrastructure depend on their naturalness, functionality and imperviousness. *Urban Ecosystem*, 27, 187–202. <https://doi.org/10.1007/s11252-023-01442-9> (accessed: 20 May 2026)
 14. IPCC. (2023). Climate change 2023: Synthesis report. Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/> (accessed: 19 April 2026)
 15. Lin, H., & Li, X. (2025). The Role of Urban Green Spaces in Mitigating the Urban Heat Island Effect: A Systematic Review from the Perspective of Types and Mechanisms. *Sustainability*, 17(13), 6132. <https://doi.org/10.3390/su17136132> (accessed: 20 May 2026)
 16. Meerow, S., Newell, J. P., & Stults, M. (2016). Defining urban resilience: A review. *Landscape and Urban Planning*, 147, 38–49. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.11.011> (accessed: 15 April 2026)
 17. Rao, P., Tassinari, P., & Torreggiani, D. (2023). Exploring the land-use urban heat island nexus under climate change conditions using machine learning approach: A spatio-temporal analysis of remotely sensed data. *Heliyon*, 9(8), e18423. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18423> (accessed: 3 May 2026)
 18. Roshan, G., Ghanghermeh, A., Sarli, R., & Grab, S. W. (2024). Environmental impacts of shifts in surface urban heat island,

- emissions, and nighttime light during the Russia-Ukraine war in Ukrainian cities. *Environmental Science and Pollution Research International*, 31(32), 45246–45263. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34050-x> (accessed: 26 April 2026)
19. Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. NASA Special Publication, 351, 309–317. (accessed: 1 May 2026)
 20. Santamouris, M. (2015). Regulating the damaged thermostat of the cities: Status, impacts and mitigation challenges. *Energy and Buildings*, 91, 43–56. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.01.027> (accessed: 6 May 2026)
 21. TEEB. (2010). The economics of ecosystems and biodiversity: Mainstreaming the economics of nature. London, UK: Earthscan.
 22. Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127–150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0) (accessed: 28 April 2026)
 23. Voogt, J. A., & Oke, T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 370–384. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8) (accessed: 22 April 2026)
 24. Weng, Q., Lu, D., & Schubring, J. (2004). Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, 89(4), 467–483. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.005> (accessed: 23 April 2026)
 25. Yao, Y., Zheng, H., Ouyang, Z., Gong, C., Zhang, J., Ying, L., & Wen, Z. (2025). Impact of urban green infrastructure on ecosystem services: A systematic review. *Ecological Indicators*, 178, 113885. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113885> (accessed: 20 May 2026)
 26. Yuan, F., & Bauer, M. E. (2007). Comparison of impervious surface area and NDVI as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 106(3), 375–386. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.09.003> (accessed: 3 May 2026)
 27. Yuan, T. (2024). The role of green infrastructure in mitigating the urban heat island effect. *Open Journal of Applied Sciences*, 14(11), 3155–3164. <https://doi.org/10.4236/ojapps.2024.1411207> (accessed: 20 May 2026)
 28. Zanter, K. (2024). Landsat Surface Temperature Product Guide (LSDS-1330 Version 2.0). U.S. Geological Survey. <https://www.usgs.gov/landsat-missions> (accessed: 20 May 2026)
 29. Zha, Y., Gao, J., & Ni, S. (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24(3), 583–594. <https://doi.org/10.1080/01431160304987> (accessed: 24 April 2026)
 30. Zhou, W., Huang, G., & Cadenasso, M. L. (2011). Does spatial configuration matter? Understanding the effects of land cover pattern on land surface temperature in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 102(1), 54–63. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.03.009> (accessed: 1 May 2026)
 31. Ziter, C. D., Pedersen, E. J., Kucharik, C. J., & Turner, M. G. (2019). Scale-dependent interactions between tree canopy cover and impervious surfaces reduce daytime urban heat during summer. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(15), 7575–7580. <https://doi.org/10.1073/pnas.1817561116> (accessed: 29 April 2026)

Strashok V., Raichuk L.

ECOLOGICAL AND ECONOMIC ASSESSMENT OF THE COOLING ECOSYSTEM SERVICES OF GREEN INFRASTRUCTURE CONSIDERING FUNCTIONAL RESILIENCE IN URBAN LAND MANAGEMENT

LAND MANAGEMENT, CADASTRE AND LAND MONITORING 2'26: 163-178.

<http://dx.doi.org/10.31548/zemleustriy2026.02.11>

Abstract. *Urbanization and climate change reduce the effectiveness of the cooling regulating ecosystem services (RES) of urban green infrastructure; however, their ecological and economic assessment considering functional resilience—especially for suburban urban ecosystems under conditions of armed conflict—remains insufficiently developed. The aim of this study is to provide an ecological and economic assessment of urban green infrastructure as climate-regulating natural capital and to develop an approach for assessing cooling RES considering functional resilience using the case of Irpin during 2015–2024. The analysis was based on summer median Landsat 8/9 composites, ERA5-Land climate data, and pixel-based regression analysis in Google Earth Engine using NDVI, LST, NDBI, the Cooling Efficiency Index (CEI), and thermal hotspot dynamics analysis. A stable cooling effect of vegetation throughout the study period was identified (NDVI–LST regression coefficients ranging from –13.27 to –18.96), alongside a pronounced thermal impact of built-up areas (NDBI–LST ranging from +44.08 to +64.24). Despite relatively stable NDVI values (0.260–0.300), the area of thermal hotspots increased sharply after 2020, reaching 25.63% of the territory in 2024, while CEI indicated the maximum decline in cooling efficiency. The scientific novelty of the study is the proposed Functional Resilience Index (FRI), which integrates vegetation cooling performance, greenness level, cooling efficiency, and spatial thermal vulnerability. The critical decline of FRI from 1.72 in 2015 to 0.11 in 2024 empirically demonstrates that quantitative vegetation indicators alone are insufficient for assessing the functional resilience of RES. The proposed resilience-adjusted approach provides a more differentiated ecological and economic assessment of the natural capital of urban green infrastructure compared to the classical avoided cost method and may serve as an instrumental basis for decision-making in climate adaptation and urban land management.*

Key words: *urban heat island, avoided cost method, regulating ecosystem services, cooling efficiency.*
