

УДК 504.064:712

<https://doi.org/10.31713/vs4202515>

Прищепя А. М. [1; ORCID ID: 0000-0001-5096-9088],

д.с.-г.н., професор,

Самчук В. М. [1; ORCID ID: 0009-0000-6227-6203],

аспірант

¹Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

АКТУАЛЬНІ СВІТОВІ ПІДХОДИ ДО МОНІТОРИНГУ МІСЬКИХ ЗЕЛЕНИХ НАСАДЖЕНЬ

Статтю присвячено аналізу та узагальненню актуальних світових підходів до моніторингу міських зелених насаджень в умовах зростаючої урбанізації та посилення антропогенного навантаження на міське середовище. Міські зелені насадження розглядаються як важливий елемент урбанізованих екосистем, що виконує екологічні, соціальні та рекреаційні функції, впливаючи на якість життя населення, мікроклімат та стійкість міських територій. У сучасних умовах зростання кліматичних ризиків і трансформації міського простору під впливом кризових чинників зростає потреба у застосуванні науково обґрунтованих і технологічно ефективних методів оцінювання стану зелених зон. Метою дослідження є узагальнення та систематизація сучасних світових підходів до моніторингу міських зелених насаджень на основі аналізу наукових публікацій останніх років з метою обґрунтування доцільності їх застосування у практиці дослідження міського зеленого середовища. У роботі проаналізовано основні методичні підходи до моніторингу зелених насаджень, зокрема супутникове дистанційне зондування Землі, використання геоінформаційних систем, аерофотознімання з безпілотних літальних апаратів, аналіз індексів рослинності та застосування методів штучного інтелекту і машинного навчання. Показано, що кожен із зазначених підходів має власні переваги й обмеження, зумовлені масштабом дослідження, точністю даних та умовами їх застосування. Обґрунтовано, що найбільш ефективними в сучасній світовій практиці є інтегровані підходи, які поєднують можливості різних геопросторових методів і забезпечують комплексну оцінку стану, структури та динаміки міських зелених насаджень. Окрему увагу приділено доцільності впровадження розглянутих підходів у практику моніторингу міських зелених насаджень в Україні, зокрема в умовах воєнних та післявоєнних трансформацій міського середовища. Зазначено, що системний моніторинг зелених зон є важливим інструментом екологічної оцінки, планування відновлення урбанізованих територій і забезпечення сталого розвитку міст. Результати

дослідження можуть бути використані у наукових дослідженнях, практиці міського планування та розробленні стратегій відновлення і розвитку міських територій.

Ключові слова: міські зелені насадження; моніторинг; дистанційне зондування Землі; геоінформаційні системи; індекси рослинності; безпілотні літальні апарати; штучний інтелект.

Постановка проблеми. Інтенсивна урбанізація, зростання щільності забудови та трансформація просторової структури сучасних міст істотно впливають на стан міських екосистем і зумовлюють підвищене навантаження на зелені насадження. У межах урбанізованого середовища зелені зони виконують системоутворювальну роль, забезпечуючи регуляцію мікроклімату, зниження рівня забруднення атмосферного повітря, підтримання біорізноманіття та формування сприятливих умов для життєдіяльності населення. Водночас скорочення площ зелених насаджень, їх фрагментація та погіршення якісного стану в умовах щільної забудови призводять до порушення екологічної рівноваги міського простору та зниження його адаптивної здатності до зовнішніх впливів.

Особливої актуальності проблема збереження та раціонального управління міськими зеленими насадженнями набуває в умовах посилення кліматичних змін, зростання частоти екстремальних погодних явищ і підвищення соціально-екологічних ризиків для населення великих міст. Недостатня увага до стану зелених зон може мати довгострокові негативні наслідки, пов'язані з погіршенням якості життя, зростанням теплового навантаження та зниженням екологічної безпеки урбанізованих територій. У цьому контексті усвідомлення значущості міських зелених насаджень як стратегічного ресурсу розвитку міст потребує поглибленого наукового осмислення сучасних підходів до їх збереження та управління, що зумовлює актуальність досліджень, спрямованих на вивчення проблематики міської зелені.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних наукових дослідженнях моніторинг міських зелених насаджень розглядається передусім у контексті застосування методів дистанційного зондування Землі, що дозволяють оцінювати просторовий розподіл та динаміку зелених зон у міському середовищі, про що свідчать результати досліджень І. Л. М. Захіра [1]. Подальший розвиток цього напрямку пов'язаний із використанням супутникових даних для аналізу змін зелених насаджень у взаємозв'язку з кліматичною

стійкістю міст, що відображено у працях, присвячених комплексному моніторингу урбанізованих територій [2]. Значну увагу сучасні дослідники приділяють інтеграції геоінформаційних систем та методів штучного інтелекту, що дозволяє автоматизувати процеси обробки даних і підвищити точність оцінювання стану міських зелених насаджень [3]. У роботах S. Pouya, M. R. Delavar, M. R. Malek, A. Sadeghi-Niagaki обґрунтовано можливості використання поєднання дистанційного зондування та ГІС-аналізу для кількісної оцінки забезпеченості міського простору зеленими зонами [4]. Окремий напрям досліджень представлений роботами С. Liu, Т.-Y. Wang, Т. Yuizono, у яких моніторинг зелених насаджень доповнюється аналізом їх просторово-візуальних характеристик, що розширює традиційні підходи оцінювання стану міських зелених просторів [5]. Подальше вдосконалення методів моніторингу пов'язане з використанням індексів рослинності, отриманих із супутникових зображень, що продемонстровано у дослідженнях I. L. M. Zahir, M. H. F. Nuskiya, V. P. Sangasumana, A. L. Iyob, M. L. F. Ameer [6]. Водночас сучасні світові підходи дедалі частіше ґрунтуються на застосуванні алгоритмів глибинного навчання для автоматизованого картографування та оцінювання міського деревного покриву, що підтверджено результатами досліджень J. Guo, Q. Xu, Y. Zeng, Z. Liu, X. X. Zhu [7]. Узагальнення та систематизація зазначених підходів світової практики створює наукове підґрунтя для подальшого аналізу сучасних методів моніторингу міських зелених насаджень.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є узагальнення та систематизація сучасних світових підходів до моніторингу міських зелених насаджень на основі аналізу наукових публікацій останніх років з метою обґрунтування доцільності їх застосування у практиці дослідження міського зеленого середовища. Завдання дослідження полягає в аналізі та узагальненні методичних підходів до моніторингу міських зелених насаджень, представлених у сучасній світовій науковій практиці.

Виклад основного матеріалу дослідження. В наукових дослідженнях моніторинг розглядається як систематичний процес збору, аналізу та інтерпретації даних, спрямований на відстеження стану, структури та динаміки об'єктів у просторі й часі. Міські зелені насадження в умовах урбанізованого середовища виступають складною просторово-екологічною системою, що включає парки,

сквери, вуличні насадження, захисні зелені зони та інші елементи озеленення, які характеризуються різною функціональною роллю, щільністю та морфологічними особливостями. Моніторинг таких об'єктів потребує застосування різних методичних підходів, здатних забезпечити як просторову узгодженість даних, так і комплексність оцінювання біофізичних характеристик зелених зон.

В таблиці представлено інтегровані підходи до моніторингу міських зелених насаджень у світовій практиці.

Супутникове дистанційне зондування Землі є одним із найбільш поширених і методично обґрунтованих підходів до моніторингу міських зелених насаджень у світовій практиці, що зумовлено його здатністю забезпечувати регулярне та масштабне охоплення урбанізованих територій. Аналіз мультиспектральних супутникових даних дозволяє отримувати узгоджену інформацію про просторовий розподіл зелених зон, їхню площу та зміну у часовому вимірі, що є критично важливим для дослідження динаміки міського зеленого покриву [1]. Перевагою цього підходу є висока повторюваність спостережень, що дає змогу формувати часові ряди та виявляти довгострокові тенденції трансформації зелених насаджень, зокрема в умовах інтенсивної урбанізації [2]. Водночас застосування супутникових даних має певні обмеження, пов'язані з просторовою роздільною здатністю знімків і впливом атмосферних чинників, що ускладнює детальний аналіз структури насаджень на локальному рівні. У зв'язку з цим супутникове дистанційне зондування доцільно розглядати як базовий рівень моніторингу, який забезпечує загальну картину стану та динаміки міських зелених насаджень [1; 2].

Таблиця

Інтегровані підходи до моніторингу міських зелених насаджень у світовій практиці

Категорія підходу	Основні методи	Наукова характеристика
Супутникове дистанційне зондування (RS)	Аналіз мультиспектральних супутникових даних, індекси рослинності (NDVI, EVI тощо)	Забезпечує регулярний багатопараметричний моніторинг просторово-часової динаміки зелених насаджень на значних за площею територіях

продовження таблиці

Геоінформаційні системи (ГІС) та просторовий аналіз	ГІС-бази даних, просторове моделювання, картографування	Дозволяє інтегрувати різномірні дані та підтримувати обґрунтовані управлінські рішення у міському плануванні
Аерофотознімання та UAV-моніторинг	Зйомка з БПЛА, ортофотоплани, високодетальні зображення	Забезпечує детальну оцінку структури та стану зелених насаджень на локальному рівні
Індекси рослинності та часові ряди	NDVI, GNDVI, NDWI, EVI, аналіз часових рядів	Дає змогу виявляти сезонні та багаторічні зміни стану міських зелених зон
Методи штучного інтелекту та машинного навчання	Класифікація зображень, глибоке навчання	Підвищує точність і автоматизує моніторинг зелених насаджень при обробці великих масивів даних

Джерело: складено автором на основі [1–4; 6; 7]

Значний методичний потенціал у дослідженнях моніторингу міських зелених насаджень має використання геоінформаційних систем як інструменту просторової інтеграції та аналітичного узагальнення даних. ГІС-технології забезпечують можливість поєднання результатів дистанційного зондування з іншими інформаційними шарами, зокрема даними про функціональне зонування території, щільність населення та особливості міської забудови, що дозволяє здійснювати багатовимірний аналіз зелених насаджень у межах урбанізованого простору. Застосування просторового моделювання та картографічних методів у середовищі ГІС створює передумови для виявлення територіальних диспропорцій у розміщенні зелених зон і оцінювання їхньої доступності для населення, що має важливе значення для міського планування. Водночас використання геоінформаційних систем висуває підвищені вимоги до якості вихідних даних, їхньої актуальності та узгодженості, а також до рівня методичної підготовки дослідників, оскільки помилки на етапі формування бази даних можуть суттєво впливати на результати аналізу. У дослідженнях S. Pouya та співавторів доведено, що інтеграція супутникових даних у ГІС-середовище є ефективною для

кількісної оцінки забезпеченості міського населення зеленими насадженнями та аналізу просторової нерівномірності їх розподілу [4].

У дослідженнях I. L. M. Zahir, M. H. F. Nuskiya, V. P. Sangasumana, A. L. Iyoob, M. L. F. Ameer аерофотознімання з використанням безпілотних літальних апаратів розглядається як ефективний інструмент деталізованого моніторингу міських зелених насаджень, що дозволяє перейти від узагальнених оцінок до аналізу просторової структури рослинності на локальному рівні [6]. Автори доводять, що UAV-знімання разом з ортофотопланами дає змогу детально ідентифікувати елементи зеленого покриву, зокрема деревні насадження та особливості їх розміщення, що значно ускладнено при використанні супутникових знімків середньої роздільної здатності. Такий підхід особливо доцільний для дослідження міських територій зі складною забудовою, де просторові особливості зелених зон суттєво впливають на екологічний стан і функціональну роль озеленення.

Разом із тим результати наведених досліджень свідчать, що UAV-моніторинг не може розглядатися як самостійна універсальна методика через обмежене просторове охоплення та залежність від технічних і регуляторних умов використання безпілотних апаратів у межах міста [6]. У цьому контексті аерофотознімання доцільно застосовувати як елемент інтегрованої системи моніторингу, де воно виконує функцію уточнення та деталізації результатів супутникового аналізу. Така комбінація методів дозволяє поєднати високу просторову точність локальних досліджень із можливістю загальноміського охоплення, що підвищує надійність оцінювання стану та динаміки міських зелених насаджень.

Використання індексів рослинності та аналіз часових рядів у сучасній світовій практиці є одним із найбільш інформативних підходів до оцінювання стану та динаміки міських зелених насаджень, оскільки базується на кількісній інтерпретації спектральних характеристик рослинного покриву. Індекси NDVI, GNDVI, NDWI, EVI та споріднені показники дозволяють відображати біофізичний стан рослинності, рівень фотосинтетичної активності, вологозабезпечення та щільність зеленого покриву, що є ключовими параметрами при моніторингу урбанізованих територій [1; 6]. Аналіз часових рядів індексів рослинності дає змогу виявляти сезонні коливання та багаторічні зміни стану зелених зон, а також відрізнити природні фенологічні зміни від довгострокових тенденцій деградації або

відновлення зелених насаджень [2]. Такий підхід є особливо цінним для дослідження впливу урбанізаційних процесів і кліматичних чинників на міську рослинність, оскільки дозволяє простежувати динаміку змін у просторі та часі на основі стандартизованих показників. Водночас застосування індексів рослинності потребує врахування особливостей міського середовища, зокрема впливу забудови, тіней та змішаних пікселів, що може знижувати точність інтерпретації результатів без використання додаткових аналітичних методів. У зв'язку з цим індексний аналіз доцільно розглядати як складову інтегрованого підходу до моніторингу міських зелених насаджень, який поєднує супутникові дані з іншими геопросторовими інструментами для підвищення достовірності оцінювання.

Методи штучного інтелекту та машинного навчання у сучасних дослідженнях міських зелених насаджень розглядаються як інструмент суттєвого підвищення точності та автоматизації процесів моніторингу за умов обробки великих масивів просторових даних. Застосування алгоритмів класифікації зображень і глибинного навчання дозволяє здійснювати автоматизоване розпізнавання та картографування зеленого покриву на основі супутникових і аерофотознімків високої роздільної здатності, мінімізуючи вплив суб'єктивних чинників, притаманних ручній інтерпретації [3]. Особливе значення такі підходи мають у межах урбанізованих територій зі складною просторовою структурою, де традиційні методи аналізу часто ускладнені через мозаїчність забудови та наявність змішаних пікселів. Використання моделей машинного навчання забезпечує можливість виявлення прихованих просторових закономірностей і підвищує стабільність результатів при повторному аналізі даних у часовому вимірі. Водночас ефективність алгоритмів штучного інтелекту значною мірою залежить від якості навчальних вибірок і коректності налаштування моделей, що потребує поєднання автоматизованих методів із експертною оцінкою результатів. У цьому контексті застосування штучного інтелекту доцільно розглядати як складову інтегрованих систем моніторингу міських зелених насаджень, які поєднують можливості автоматизованого аналізу з іншими геопросторовими підходами для забезпечення достовірності та відтворюваності результатів [7].

В умовах повномасштабної війни питання збереження та раціонального управління міськими зеленими насадженнями в Україні набуває особливої наукової та прикладної значущості. Активні

бойові дії, руйнування міської інфраструктури, пошкодження ґрунтового покриву, забруднення повітря та порушення гідрологічних режимів призводять до деградації зелених зон, які традиційно виконують стабілізуючу екологічну функцію в урбанізованому середовищі. За таких умов застосування сучасних підходів до моніторингу міських зелених насаджень дозволяє забезпечити об'єктивну оцінку їхнього стану навіть за обмеженого доступу до окремих територій, що є характерним для прифронтових та деокупованих міст. Інтегровані методи, засновані на дистанційному зондуванні, геоінформаційних системах і автоматизованому аналізі даних, створюють можливість оперативного виявлення зон екологічних порушень, визначення масштабів втрат зеленого покриву та формування науково обґрунтованих пріоритетів для післявоєнного відновлення міського середовища.

Окрім екологічного виміру, міські зелені насадження в умовах воєнного часу відіграють важливу соціальну та психоемоційну роль, особливо для населення великих урбанізованих центрів, що зазнали тривалого стресового навантаження. Збереження та відновлення зелених зон сприяє підвищенню якості міського простору, формуванню безпечного та комфортного середовища проживання, а також підтримці фізичного і психологічного здоров'я населення. У цьому контексті впровадження сучасних світових підходів до моніторингу зелених насаджень в Україні є доцільним не лише з позицій екологічної доцільності, а й як складова стратегічного планування сталого розвитку міст у післявоєнний період. Системний моніторинг дозволяє поєднати оцінювання екологічного стану міських територій із завданнями відновлення інфраструктури, що робить зелені насадження важливим елементом комплексної політики реконструкції та підвищення життєстійкості українських міст.

Висновки. В результаті проведеного аналізу сучасних наукових публікацій узагальнено та систематизовано основні світові підходи до моніторингу міських зелених насаджень, що базуються на використанні дистанційного зондування Землі, геоінформаційних систем, аерофотознімання, індексів рослинності та методів штучного інтелекту. Доведено, що найбільш ефективними в сучасній практиці є інтегровані підходи, які поєднують масштабність супутникових спостережень із детальністю локального аналізу та можливостями автоматизованої обробки великих масивів даних. Застосування таких підходів забезпечує комплексну оцінку стану, структури та динаміки

міських зелених насаджень і створює науково обґрунтоване підґрунтя для прийняття управлінських рішень у сфері розвитку урбанізованих територій. В умовах сучасних викликів, зокрема для українських міст у період воєнних і післявоєнних трансформацій, впровадження розглянутих методів моніторингу є доцільним як інструмент екологічної оцінки, планування відновлення та забезпечення сталого розвитку міського середовища.

1. Zahir I. L. M. Monitoring Urban Green Space Using Remote Sensing. *Procedia Computer Science*. 2024. Vol. 234. P. 391–398. **2.** Carlos A. Escobar, David Restrepo Alvarez. Estimation of global ocean surface winds blending reanalysis, satellite and buoy datasets. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2023. Vol. 32. Article 101012. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352938523000867> (дата звернення: 10.10.2025). **3.** Special Issue: Artificial Intelligence Methods Applied to Urban Remote Sensing and GIS. *Remote Sensing*. 2022–2023. MDPI. URL: https://www.mdpi.com/journal/remotesensing/special_issues/AI_urban_remote_sensing (дата звернення: 10.10.2025). **4.** Pouya S., Delavar M. R., Malek M. R., Sadeghi-Niaraki A. Evaluation of urban green space per capita with new remote sensing and GIS methods. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2022. Vol. 194, No. 10. Article 758. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-022-10298-z> (дата звернення: 10.10.2025). **5.** Liu C., Wang T.-Y., Yuizono T. Assessing the landscape visual quality of urban green spaces with multidimensional visual indicators. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2025. Vol. 106. Article 128727. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2025.128727> **6.** Zahir I. L. M., Nuskiya M. H. F., Sangasumana V. P., Iyob A. L., Ameer M. L. F. Monitoring Urban Green Space Using Remote Sensing Derived-Vegetation Indices in Colombo District, Sri Lanka. *Procedia Computer Science*. 2024. Vol. 236. P. 248–256. **7.** Guo J., Xu Q., Zeng Y., Liu Z., Zhu X. X. Nationwide urban tree canopy mapping and coverage assessment in Brazil from high-resolution remote sensing images using deep learning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2023. Vol. 198. P. 1–15.

REFERENCES:

1. Zahir I. L. M. Monitoring Urban Green Space Using Remote Sensing. *Procedia Computer Science*. 2024. Vol. 234. P. 391–398. **2.** Carlos A. Escobar, David Restrepo Alvarez. Estimation of global ocean surface winds blending reanalysis, satellite and buoy datasets. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2023. Vol. 32. Article 101012. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352938523000867> (data zvernennia: 10.10.2025). **3.** Special Issue: Artificial Intelligence Methods Applied to Urban Remote Sensing and GIS. *Remote Sensing*. 2022–2023. MDPI. URL: https://www.mdpi.com/journal/remotesensing/special_issues/AI_urban_remote_sensing (data zvernennia: 10.10.2025). **4.** Pouya S., Delavar M. R., Malek M. R., Sadeghi-Niaraki A. Evaluation of urban green space per capita with new remote sensing and GIS methods. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2022. Vol. 194, No. 10. Article 758. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-022-10298-z> (data zvernennia:

10.10.2025). 5. Liu C., Wang T.-Y., Yuizono T. Assessing the landscape visual quality of urban green spaces with multidimensional visual indicators. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2025. Vol. 106. Article 128727. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2025.128727> 6. Zahir I. L. M., Nuskiya M. H. F., Sangasumana V. P., Iyob A. L., Ameer M. L. F. Monitoring Urban Green Space Using Remote Sensing Derived-Vegetation Indices in Colombo District, Sri Lanka. *Procedia Computer Science*. 2024. Vol. 236. P. 248–256. 7. Guo J., Xu Q., Zeng Y., Liu Z., Zhu X. X. Nationwide urban tree canopy mapping and coverage assessment in Brazil from high-resolution remote sensing images using deep learning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2023. Vol. 198. P. 1–15.

Pryshchepa A. M. ^[1; ORCID ID: 0000-0001-5096-9088],
Doctor of Agricultural Sciences, Professor,
Samchuk V. M. ^[1; ORCID ID: 0009-0000-6227-6203],
Post-graduate Student

¹*National University of Water and Environmental Engineering, Rivne*

CURRENT GLOBAL APPROACHES TO MONITORING URBAN GREEN SPACES

The article is devoted to the analysis and synthesis of current global approaches to monitoring urban green spaces under conditions of increasing urbanization and growing anthropogenic pressure on the urban environment. Urban green spaces are considered an important component of urbanized ecosystems, performing ecological, social, and recreational functions and influencing quality of life, microclimate regulation, and the resilience of urban areas. In the context of rising climate risks and the transformation of urban space under the influence of crisis factors, there is an increasing need for scientifically grounded and technologically efficient methods for assessing the condition of green zones. The aim of the study is to generalize and systematize contemporary global approaches to monitoring urban green spaces based on the analysis of recent scientific publications in order to substantiate the feasibility of their application in urban green environment research.

The paper analyzes the main methodological approaches to monitoring green spaces, including satellite-based remote sensing, the use of geographic information systems, aerial surveys using unmanned aerial vehicles, vegetation index analysis, and the application of artificial intelligence and machine learning methods. It is demonstrated that each of these approaches has specific advantages and limitations determined by the scale of the study,

data accuracy, and application conditions. The study substantiates that integrated approaches combining various geospatial methods are the most effective in current global practice, as they provide a comprehensive assessment of the condition, structure, and dynamics of urban green spaces. Particular attention is paid to the feasibility of implementing these approaches in the practice of monitoring urban green spaces in Ukraine, especially in the context of wartime and post-war transformations of the urban environment. It is noted that systematic monitoring of green zones is an important tool for environmental assessment, urban recovery planning, and ensuring the sustainable development of cities. The results of the study can be used in scientific research, urban planning practice, and the development of strategies for the restoration and development of urban areas.

Keywords: urban green spaces; monitoring; remote sensing; geographic information systems; vegetation indices; unmanned aerial vehicles; artificial intelligence.

Отримано: 12 листопада 2025 року
Прорецензовано: 18 листопада 2025 року
Прийнято до друку: 28 листопада 2025 року