

UDC 712.4(477.51-25):004.65:911.6

DOI: 10.58407/bht.2.26.4



Copyright (c) 2026 Oleksandr Yakovenko, Vitaliy Morskyi

Ця робота ліцензується відповідно до [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) / This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Олександр Яковенко, Віталій Морський
КАРТУВАННЯ РОСЛИННОГО ПОКРИВУ
ЗЕЛЕНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ М. ЧЕРНІГОВА ЗАСОБАМИ ГІС



Oleksandr Yakovenko, Vitaliy Morskyi
GIS-BASED MAPPING OF VEGETATION COVER
IN CHERNIHIV'S GREEN INFRASTRUCTURE

АНОТАЦІЯ

Мета роботи. Картування рослинного покриву структурних елементів мережі зеленої інфраструктури (ЗІ) м. Чернігова засобами геоінформаційних систем із синтаксономічною характеристикою виявлених угруповань.

Методологія. Базується на інтеграції трьох компонентів: автоматизованої класифікації земного покриву методом Random Forest у хмарній платформі Google Earth Engine на основі медіанних композитів Sentinel-2 (літо і весна 2020, 2024 рр.), вегетаційних індексів NDVI, EVI, LAI та параметрів рельєфу SRTM; польових геоботанічних описів за методом Браун-Бланке на ключових ділянках мережі; експертної синтаксономічної інтерпретації картографічних контурів у середовищі QGIS. Точність базової класифікації оцінено на незалежній валідаційній вибірці ($n = 578$).

Наукова новизна. Полягає в тому, що вперше для міста України здійснено інтеграцію GIS-картування засобами дистанційного зондування з синтаксономічною атрибуцією рослинності на рівні класів і асоціацій за Браун-Бланке в межах цілісної мережевої моделі ЗІ (ядра першого і другого порядків, сполучні коридори); встановлено, що просторова конфігурація синтаксонів жорстко детермінована геоморфологічною структурою міста, а цифрова модель рельєфу виявилася найважливішою прогностичною ознакою класифікаційної моделі, випереджаючи спектральні канали й вегетаційні індекси.

Висновки. Класифікація земного покриву досягла точності Overall Accuracy 95,85 % ($Kappa = 0,942$). Мережа ЗІ Чернігова охоплює 12 структурних елементів (п'ять ядер першого порядку, три ядра другого порядку, три сполучні коридори та один спеціалізований техногенно-меморіальний вузол – кладовище «Яцево») загальною площею 1397,1 га, у межах яких виявлено вісім типів рослинності. Найбільш цілісними є борові (Подусівський ліс, Ялівщина) і заплавні (Кордівка) ядра, які разом становлять майже 78 % площі мережі, тоді як сполучні коридори та кладовище «Яцево» демонструють найвищий рівень фрагментації і найнижчі значення вегетаційних індексів (густина країв до 1192 м/га, NDVI до 0,527) і потребують пріоритетних заходів з екологічної оптимізації.

Ключові слова: зелена інфраструктура, дистанційне зондування, Random Forest, синтаксономія, Чернігів

ABSTRACT

Purpose of the work. To map the vegetation cover of the structural elements of Chernihiv city's green infrastructure (GI) network using geographic information systems, with a syntaxonomic characterization of the identified plant communities.

Methodology. Is based on the integration of three components: automated land-cover classification using the Random Forest algorithm in the Google Earth Engine cloud platform, based on median Sentinel-2 composites (summer and spring, 2020 and 2024), NDVI/EVI/LAI vegetation indices and SRTM terrain parameters; field geobotanical relevés using the Braun-Blanquet method at key network sites; and expert syntaxonomic interpretation of the mapped polygons in QGIS. Classification accuracy was assessed on an independent validation sample ($n = 578$).

Scientific novelty. Lies in the fact that, for the first time for a Ukrainian city, remote-sensing-based GIS mapping was integrated with syntaxonomic attribution of vegetation at the class and association level (Braun-Blanquet approach) within a coherent GI network model (first- and second-order cores, connecting corridors); it was established that the spatial configuration of syntaxa is strongly determined by the city's geomorphological structure, and that the digital elevation model proved to be the most important predictive feature of the classification model, outranking spectral bands and vegetation indices.

Conclusions. The land-cover classification achieved an Overall Accuracy of 95.85 % (Kappa = 0.942). The Chernihiv GI network comprises 12 structural elements (five first-order cores, three second-order cores, three connecting corridors, and one specialized techno-memorial node – the "Yatsevo" necropolis) with a total area of 1397.1 ha, within which eight vegetation types were identified. The pine-forest (Podusivskyi forest, Yalivshchyna) and floodplain (Kordivka) cores are the most intact, together accounting for almost 78 % of the network area, whereas connecting corridors and the "Yatsevo" necropolis show the highest degree of fragmentation and the lowest vegetation index values (edge density up to 1192 m/ha, NDVI as low as 0.527) and require priority ecological optimization measures.

Key words: green infrastructure, remote sensing, Random Forest, syntaxonomy, Chernihiv

Вступ

Сучасний етап розвитку міст вимагає переходу від фрагментарного озеленення до створення цілісних мереж зеленої інфраструктури (ЗІ) – стратегічно спланованих систем природних і напівприродних територій, що надають широкий спектр екосистемних послуг: регулювання мікроклімату, управління зливовими стоками, підвищення біорізноманіття та забезпечення рекреаційних функцій (EUR-Lex, n.d.; Laforteza et al., 2018). В Україні правові та організаційні засади озеленення населених пунктів визначені на законодавчому рівні (Верховна Рада України, 2025). Головним провайдером переважної більшості цих послуг є рослинний покрив: склад і структура фітоценозів безпосередньо визначають здатність окремих ділянок виконувати функції ядер, коридорів або буферних зон мережі (Capotorti et al., 2019; Hansen & Pauleit, 2014). Зокрема, деревний ярус міських лісів забезпечує значну частину охолоджувального ефекту в умовах теплових островів (Bowler et al., 2010), а заплавна і прибережна рослинність виконує функцію природних гідрологічних регуляторів, критично важливих в умовах зростаючої посушливості клімату.

Геоінформаційні системи (GIS) та методи дистанційного зондування стали ключовим інструментарієм для вирішення цього завдання в умовах складної мозаїчної структури міських ландшафтів. Поєднання мультиспектральних супутникових знімків – зокрема, місії Sentinel-2 Європейського космічного агентства з просторовою роздільною здатністю 10 м – із польовими фітоценотичними описами дозволяє охопити весь просторовий континуум рослинних угруповань і суттєво підвищити репрезентативність картографічних моделей (Neuns & Canters, 2022). Вегетаційні індекси – NDVI, EVI та LAI – дають змогу кількісно

диференціювати структурні типи покриву та виявляти ділянки деградації ценозів (Huete et al., 2002; Rouse et al., 1974; Gitelson et al., 2005). Особливу наукову цінність має поєднання GIS-підходу із синтаксономічною класифікацією рослинності за методом Браун-Бланке (Mucina et al., 2016). Проте, незважаючи на активний розвиток цих методів, більшість публікацій обмежується функціональною класифікацією покриву, не виходячи на рівень синтаксонів, а для міст України такі комплексні дослідження фактично відсутні (Morar et al., 2022; Neuns & Canters, 2022; Dobrinic et al., 2025).

Місто Чернігів є репрезентативним і водночас унікальним об'єктом для дослідження міської ЗІ. Розташоване на правому березі р. Десни в межах Поліської природної зони, місто характеризується складним рельєфом: контрастне чергування борових терас, лесових останців, глибоких ерозійних ярів і заплавних комплексів формує систему геоморфологічно детермінованих ніш, до яких приурочені природні лісові масиви (Морський та ін., 2026). Саме ця морфологічна різноманітність зумовлює унікальне поєднання синтаксонів у межах одного міста: від субконтинентальних соснових борів на піщаних терасах (Ялівщина, Подусівський ліс) до реліктових термофільних дібров на інсольованих південних схилах ярів (Болдині гори, Маліїв яр) і гігроморфних тополево-вербових угруповань у заплаві Десни (урочище Кордівка). Гідрологічна мережа – річки Стрижень і Десна – виконує роль екологічних коридорів, що просторово зв'язують лісові ядра (Морський та ін., 2026).

Особливої наукової актуальності дослідженню надає виразна кліматична трансформація регіону. За даними системи MERRA-2 (GMAO, n.d.) та регіональних метеоспостережень, з 1991 р. середньорічна температура у Чернігові зросла приблизно на 2,8 °C, а гідротермічний коефіцієнт

Селянінова (ГТК) знизився з 1,4–1,5 (1961–1990 рр.) до 0,7–0,8 (2021–2023 рр.), що відповідає переходу від поліського до лісостепового режиму зволоження (Адаменко, 2014; Морський та ін., 2026). Це спричиняє фізіологічний стрес домінантів корінних ценозів і посилює ерозію схилів ярів, водночас підвищуючи значення заплавних екосистем як природних «губок», що підтримують рівень ґрунтових вод усього міста (Морський та ін., 2026).

Таким чином, Чернігів є містом, у якому природні умови – геоморфологічна різноманітність, розгалужена гідромережа та кліматична аридизація – у взаємодії формують складну і вразливу мережу ЗІ з високим синтаксономічним різноманіттям рослинного покриву. Метою роботи є картування рослинного покриву складових мережі зеленої інфраструктури м. Чернігова засобами GIS із синтаксономічною характеристикою виявлених угруповань.

Матеріали та методи дослідження

Польові дослідження виконано у 2023–2024 рр. на ключових ділянках мережі ЗІ м. Чернігова. У Подусівському лісі закладено 30 повних фітоценотичних описів за стандартною методикою Браун-Бланке із застосуванням семибальної шкали рясності-покриття (Braun-Blanquet, 1964). Описи охоплювали всі яруси рослинності – деревний, чагарниковий, трав'яно-чагарничковий та моховий – на пробних площах 100–400 м² залежно від типу угруповання. Синтаксономічна приналежність угруповань визначена за Mucina et al. (2016), номенклатура судинних рослин наведена за Plants of the World Online (POWO, 2024).

Синтаксономічну характеристику рослинності окремих елементів мережі ЗІ здійснено також на основі опублікованих фітоценотичних матеріалів. Рослинність урочища Ялівщина охарактеризована за матеріалами Lukash et al. (2020), де описано трансформовані соснові та березові ліси з ознаками класів *Vaccinio-Piceetea* Br.-Bl. in Br.-Bl. et al. 1939 і *Robinietea* Jurko ex Hadač et Sofron 1980, а на схилах борової тераси – фрагменти узлісних угруповань союзу *Trifolion medii* T.Müller 1962 класу *Trifolio-Geranietea sanguinei* T.Müller 1962. Рослинність Болдиних гір і Маліївого яру висвітлена у монографічному описі

термофільної діброви з *Prunus mahaleb* L. (Lukash, 2021): деревний ярус сформований *Quercus robur* L. віком 200–400 років, трав'яний – характеризується поєднанням ксероморфних, узлісних і рудеральних видів під значним антропогенним тиском. Для газонних фітоценозів сполучних коридорів використано результати п'ятирічного моніторингу придорожніх газонів Чернігова (Lukash, Hutnyk & Morskyi, 2023): встановлено приналежність культур-фітоценозів до класу *Molinio-Arrhenatheretea* Tx. 1937 та задокументовано чотири-стадійний ряд антропоидигресивних сукцесій. Для характеристики рослинності кладовища «Яцево» використано результати спеціального геоботанічного дослідження цього об'єкта (Lukash et al., 2026). На території кладовища виконано 17 геоботанічних описів на пробних площах 100 м², що охопили ділянки з різним ступенем антропогенної трансформації. Встановлено високу синантропізацію рослинного покриву: із 412 видів судинних рослин 59,2 % становлять адвентивні види. Найбільш вираженим проявом трансформації є поширення *Solidago canadensis* L., проективне покриття якої в окремих угрупованнях досягає 95–98 %, що супроводжується витісненням аборигенних видів та формуванням рудералізованих угруповань.

Просторовий аналіз земного покриву мережі ЗІ виконано у хмарній платформі Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017) з подальшим опрацюванням результатів у настільній ГІС QGIS 3.x (QGIS Development Team, 2024). Використано мульти-спектральні знімки Sentinel-2 рівня Level-2A (колекція COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED; 13 каналів, просторова роздільна здатність 10–20 м, часова – 5 діб). Хмари, тіні від хмар і сніг маскувалися комбінацією класів шару Scene Classification Layer (SCL) і бітових прапорців каналу QA60. Для кожного вегетаційного сезону побудовано піксельний медіанний композит окремо для двох періодів і двох років: літо (червень–серпень, хмарність < 40 %) і весна (15 лютого–15 квітня, хмарність < 50 %) 2020 і 2024 рр. Весняний безлистяний композит використано для розрізнення хвойних і листяних порід за станом крони.

На основі літніх композитів обчислено три вегетаційних індекси: NDVI (Rouse et al., 1974), EVI (Liu & Huete, 1995; Huete et al., 2002) та наближення LAI через хлорофіловий індекс червоного краю ($CI_{red} = NIR/RedEdge - 1$, канали B8 і B5 Sentinel-2; Gitelson et al., 2005). Для 2020 і 2024 рр. розраховано описову статистику індексів (середнє, стандартне відхилення, мінімум, максимум) у межах кожної з ключових ділянок мережі ЗІ з метою виявлення міжрічної динаміки та ознак деградації ценозів.

Для класифікації сформовано 18-вимірний вектор прогностичних ознак: шість спектральних каналів (B2, B3, B4, B8, B11, B12) літнього і шість – весняного композиту, три вегетаційних індекси (NDVI, EVI, LAI), індекс середньої яскравості (Brightness) та три параметри рельєфу – цифрова модель рельєфу (DEM), крутизна схилів і індекс топографічного положення (TPI), розраховані за даними SRTM (просторова роздільна здатність 30 м; Farr et al., 2007).

Класифікацію земного покриву виконано методом Random Forest (Breiman, 2001; реалізація smileRandomForest платформи Google Earth Engine, 500 дерев) із чотирма базовими класами рослинності: трав'яна рослинність, чагарники, листяний ліс, хвойний ліс. Навчальну вибірку (64 полігони: 18 – трава, 14 – чагарники, 16 – листяний ліс, 16 – хвойний ліс) оцифровано безпосередньо в середовищі Google Earth Engine на основі композитів Sentinel-2 та ортофотопланів Google Satellite / Esri World Imagery з польовою верифікацією. Додатково виокремлено технічний навчальний клас «тінь», спектральна сигнатура якого частково перекривається з хвойним лісом; цей клас використано лише для навчання моделі й видалено з фінальної карти після класифікації. Вибірку розділено у співвідношенні 70/30 на навчальну і незалежну валідаційну підвибірку (seed = 42). Постобробка класифікованого растра включала мажоритарний фільтр (вікно 3×3) для усунення точкового шуму та маскування ділянок з досить низьким відбиттям у ближньому інфрачервоному каналі.

Точність класифікації оцінено на незалежній валідаційній вибірці (n = 578,

30 % полігонів, не залучених до навчання) через матрицю помилок з розрахунком загальної точності (Overall Accuracy), коефіцієнта Каппи, а також точності виробника (Producer's Accuracy) і точності користувача (User's Accuracy) для кожного класу окремо.

Ландшафтну структуру рослинного покриву охарактеризовано шляхом векторизації класифікованого растра в полігоніпатчі (суміжні ділянки одного класу, восьмизв'язна топологія) з подальшим розрахунком – як по кожному класу, так і по кожному з 12 структурних елементів мережі ЗІ (5 ядер 1-го порядку, 3 ядра 2-го порядку, 3 сполучні коридори, 1 спеціалізований вузол) – таких ландшафтних метрик: кількість патчів (Number of Patches), площа найбільшого патча та його частка в загальній площі класу (Largest Patch Index, %), середній розмір патча (Mean Patch Size, га) і густина країв (Edge Density, м/га).

Результуючі растрові й векторні шари (класифікована карта, вегетаційні індекси, DEM, площі та ландшафтні метрики) завантажено у форматах GeoTIFF, ESRI Shapefile і CSV (EPSG:32636, WGS 84 / UTM зона 36N) для подальшого опрацювання у настільній ГІС QGIS. У середовищі QGIS на основі растрової карти класифікації, вегетаційних індексів та ортофотопланів методом ручного оцифрування уточнено синтаксономічну приналежність контурів у межах кожного з чотирьох базових класів RF-карти, оскільки алгоритм Random Forest не розрізняє породний і флористичний склад на рівні синтаксону.

Результати дослідження та обговорення

Класифікацію земного покриву мережі ЗІ м. Чернігова виконано методом Random Forest на основі 18-вимірного вектора прогностичних ознак. Оцінка точності на незалежній валідаційній вибірці (n = 578) продемонструвала високий рівень узгодженості: загальна точність (Overall Accuracy) становила 95,85 %, коефіцієнт Каппи – 0,942, що відповідає «майже досконалий» відповідності класифікатора з польовими даними. Найвища точність виробника (Producer's Accuracy) отримана для трав'яної рослинності (97,9 %) і хвойного лісу (97,2 %), дещо нижча – для

чагарників (94,5 %) через перехідний характер межі «трава – чагарники» на роздільній здатності 10 м (рис. 1).

Несподіваним результатом аналізу важливості прогностичних ознак моделі виявилось те, що найвпливовішою окремою змінною став не спектральний канал чи вегетаційний індекс, а цифрова модель рельєфу (DEM): її внесок у класифікацію перевищив внесок усіх інших 17 ознак, включно з каналами короткохвильового інфрачервоного діапазону (B11, B12) (рис. 2). Другою за важливістю ознакою став ближній інфрачервоний канал весняного знімка (B8), що підтверджує цінність міжсезонного порівняння композитів для розрізнення структури крони. Цей

результат емпірично підтверджує тезу про геоморфологічну детермінованість рослинного покриву мережі ЗІ Чернігова (Морський та ін., 2026): типи рослинності настільки чітко прив'язані до елементів рельєфу, що сама лише топографічна позиція пікселя є кращим предиктором його рослинного покриву, ніж миттєвий спектральний відгук. Просторовий розподіл рельєфу, крутизни схилів та індексу топографічного положення показано на рис. 3.

Векторизація класифікованого растра по всій території міста показала таку структуру рослинного покриву мережі ЗІ (табл. 1); просторовий розподіл класів наведено на рис. 4, а їхнє співвідношення за площею – на рис. 5.

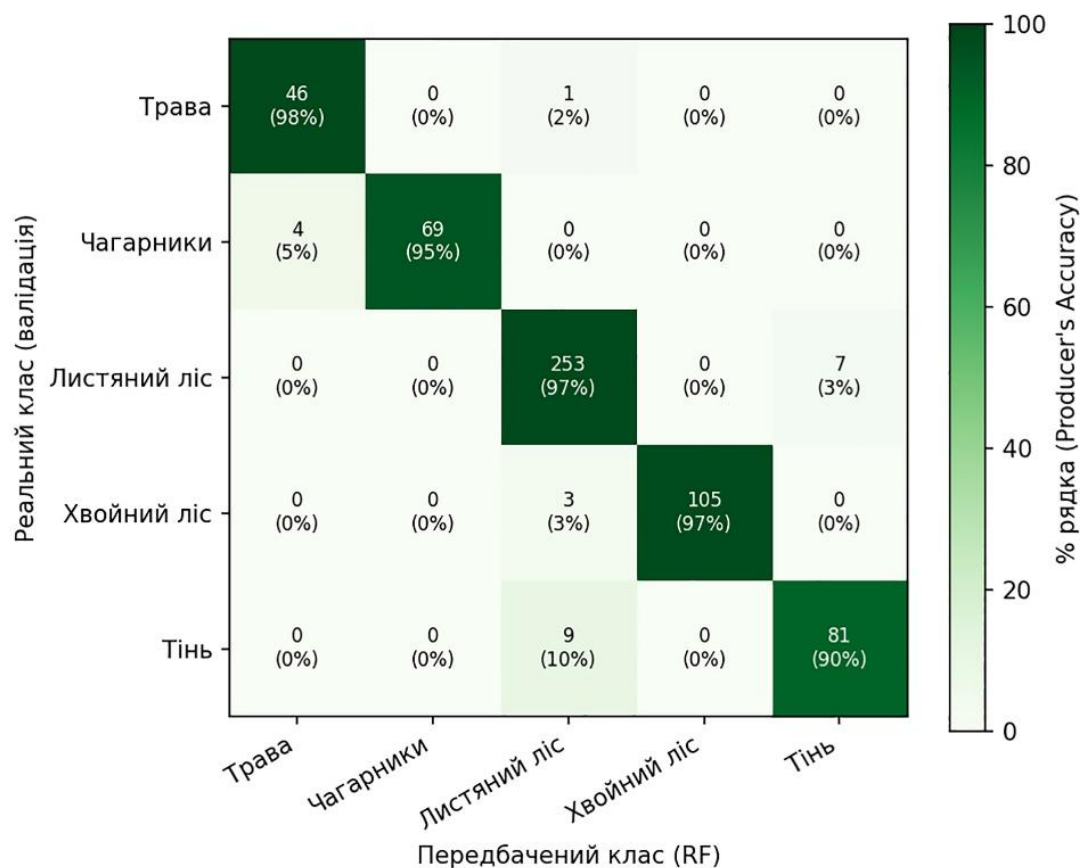


Рис. 1. Матриця помилок класифікації земного покриву (валідаційна вибірка, n = 578)

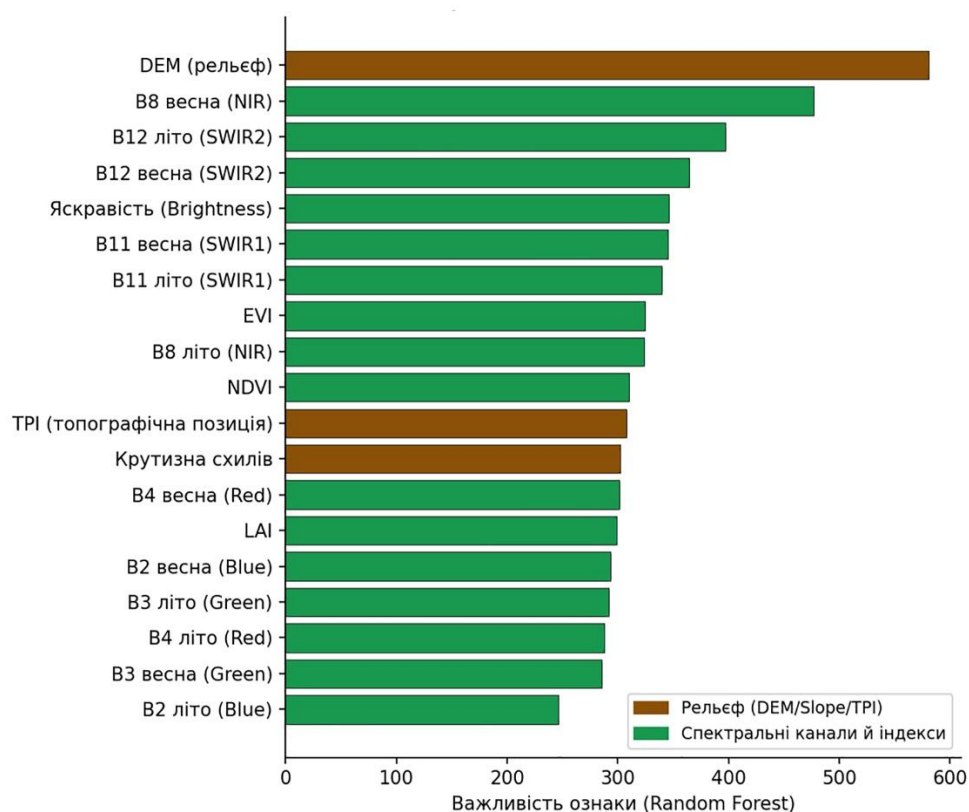


Рис. 2. Важливість прогностичних ознак моделі Random Forest

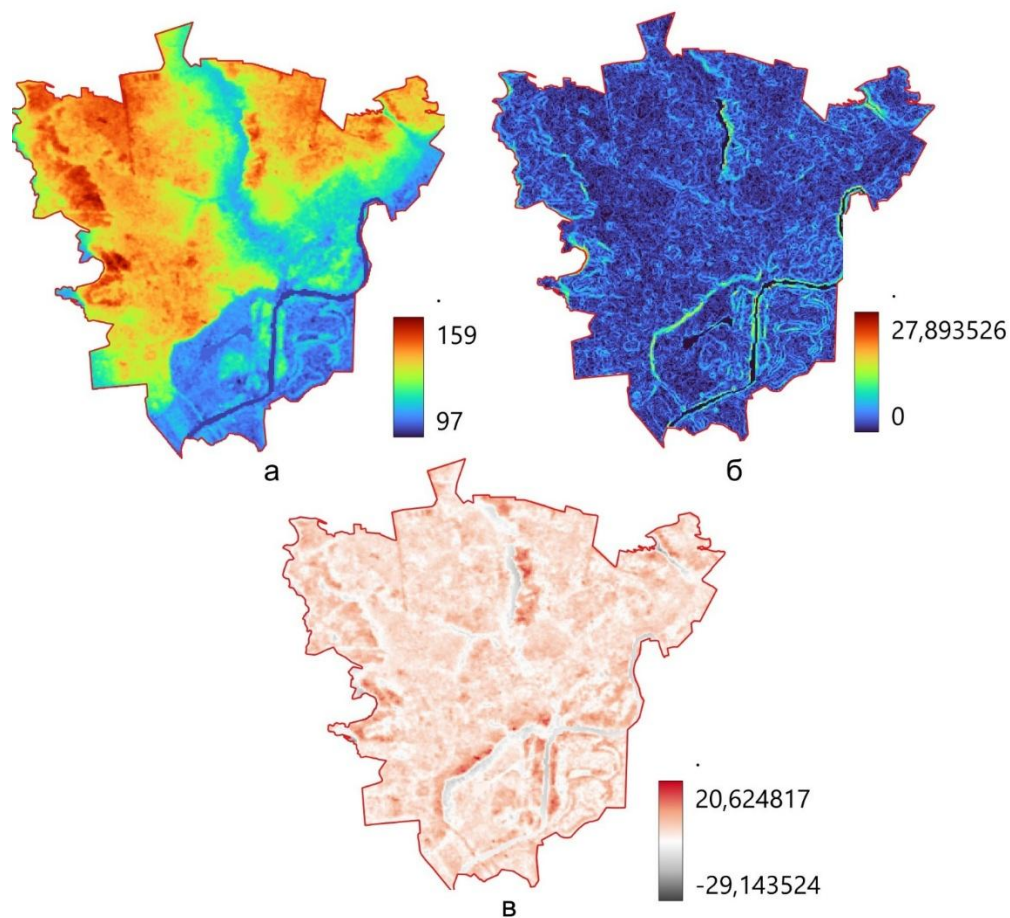


Рис. 3. Геоморфологічні параметри мережі ЗІ м. Чернігова (SRTM): А – цифрова модель рельєфу (DEM); Б – крутизна схилів (Slope); В – індекс топографічного положення (TPI)

Таблиця 1

Площі класів рослинного покриття мережі 3І м. Чернігова (2024 р.)

Клас рослинності	Площа, га	% площі	К-ть патчів	LPI, %
Трава	2779,4	38,4	4037	15,9
Чагарники	1211,0	16,7	488	42,1
Листяний ліс	2702,4	37,3	2961	8,0
Хвойний ліс	542,8	7,5	168	34,5
Разом	7235,6	100	7654	–

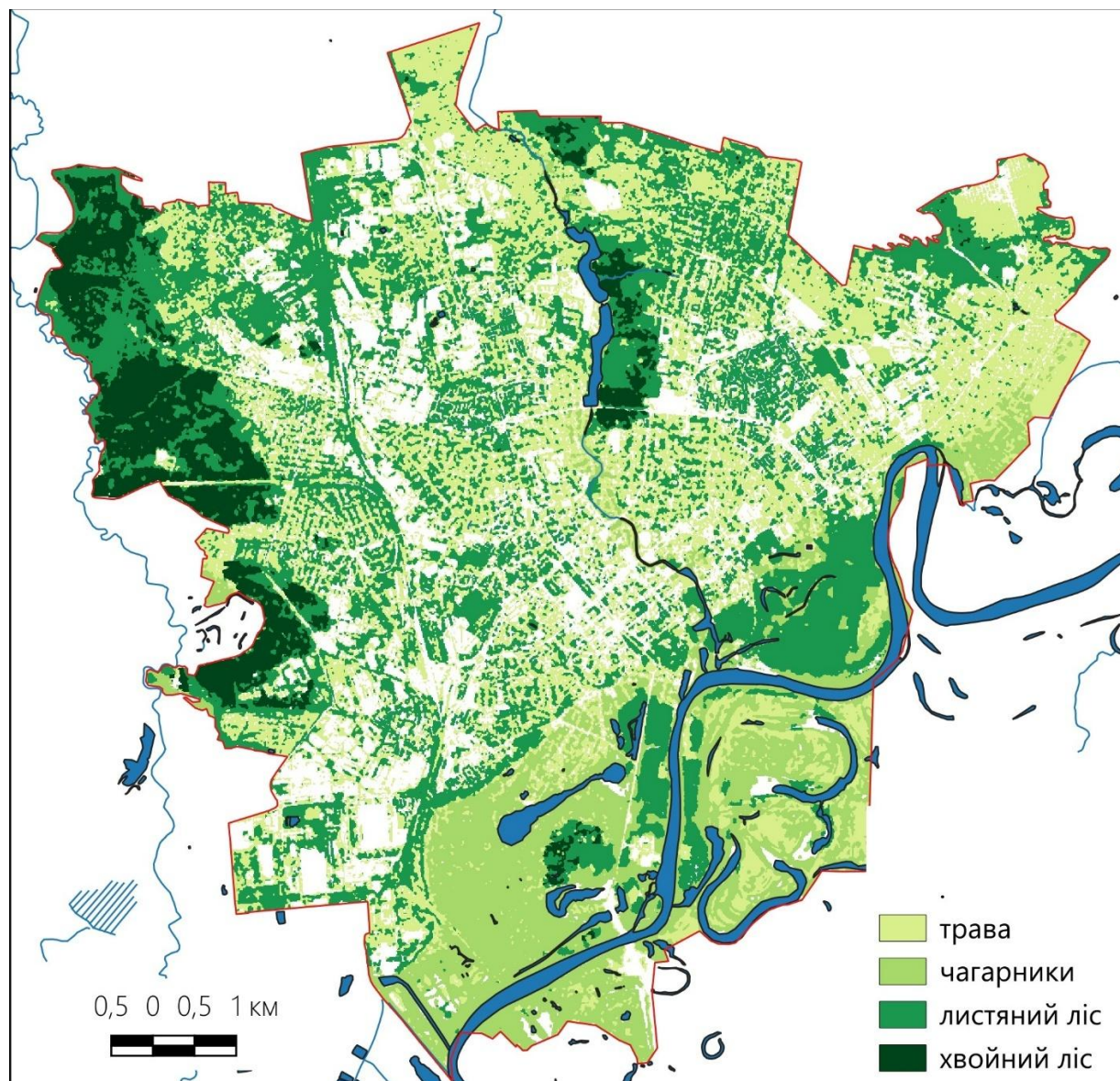


Рис. 4. Карта класифікації рослинного покриття мережі 3І м. Чернігова (Random Forest, 2024 р.): трава, чагарники, листяний ліс, хвойний ліс

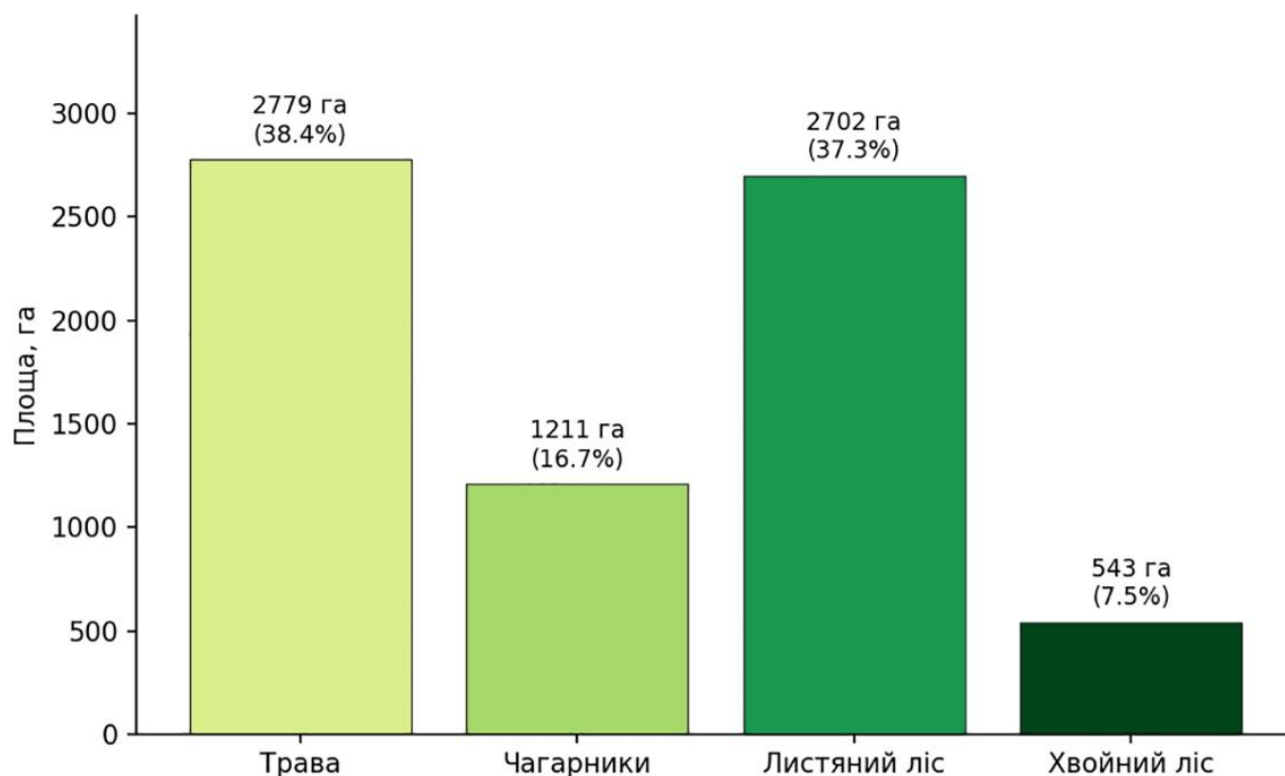


Рис. 5. Площі класів рослинного покриття м. Чернігова

На основі аналізу вегетаційних індексів, класифікованої RF-карти, ортофотопланів та польової верифікації здійснено оцифрування меж рослинних угруповань і виявлено структуру мережі ЗІ м. Чернігова (табл. 2, рис. 6). Просторова конфігурація мережі жорстко визначається геоморфологічним каркасом: ядра першого порядку приурочені до борових терас (Ялівщина, Подусівський ліс), ерозійних форм (Болдині гори, Маліїв яр, Єлецькі гори) та заплавних комплексів (Кордівка), що узгоджується із закономірностями, встановленими для міст з розчленованим рельєфом (Liu et al., 2022). Центральною віссю мережі є р. Стрижень, що утворює безперервний коридор довжиною понад 10 км і з'єднує всі ядра від Ялівщини до Кордівки. Особливе місце в мережі займає кладовище «Яцево» – спеціалізований техногенно-меморіальний, що межує з

природним лісовим масивом з півдня і південного заходу та виконує функцію екологічного конектора між забудованою частиною міста й приміськими лісами (Lukash et al., 2026). За даними цього дослідження, флора кладовища нараховує 412 видів судинних рослин, 59 % з яких є адвентивними, а домінантом трав'яного ярусу виступає інвазійний *Solidago canadensis* L. з проективним покриттям до 98 %. Дані дистанційного зондування незалежно підтверджують цю картину: Яцево демонструє найнижче серед усіх 12 обстежених елементів мережі значення NDVI (0,527) і помірний рівень фрагментації (22 патчі, LPI = 96,3 %, густина країв 237,2 м/га) – проміжний між суцільними лісовими ядрами і сильно фрагментованими вуличними коридорами. Територія розташована на пласкій терасі (137,6 м, схил лише 2,5°) (Lukash et al., 2026).

Таблиця 2

Площі структурних елементів мережі зеленої інфраструктури м. Чернігова

Елемент мережі ЗІ	Назва об'єкта	Площа, га	% від ЗІ
Ядро 1-го порядку	Подусівський ліс	698,41	49,99
Ядро 1-го порядку	Кордівка	273,82	19,60
Ядро 1-го порядку	Ялівщина	121,86	8,72
Спеціалізований вузол	Кладовище «Яцево»	94,95	6,80
Сполучний коридор	Вуличне озеленення (магістралі)	48,59	3,48
Ядро 1-го порядку	Урочище Святе	44,83	3,21
Сполучний коридор	Долина р. Стрижень	42,73	3,06
Сполучний коридор	Центральний парковий антракт	40,89	2,93
Ядро 1-го порядку	Болдині гори / Маліїв яр	14,80	1,06
Ядро 2-го порядку	Березовий гай	9,23	0,66
Ядро 2-го порядку	Мар'їн гай	4,10	0,29
Ядро 2-го порядку	Єлецькі гори	2,92	0,21
Разом		1397,12	100

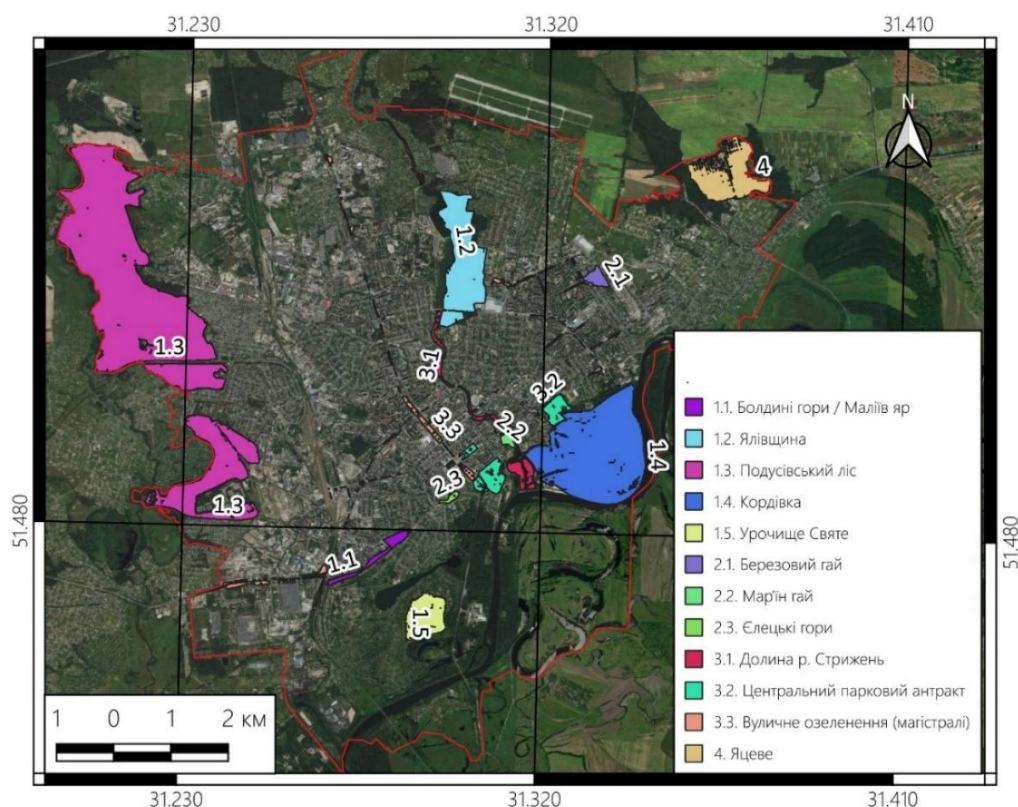


Рис. 6. Картосхема структурних елементів мережі зеленої інфраструктури м. Чернігова (ядра 1-го порядку (1.1. - 1.5.), ядра 2-го порядку (2.1. - 2.3.), сполучні коридори (3.1. - 3.3.), спеціалізований вузол (4.))

Картування рослинного покриву мережі ЗІ виявило шість синтаксономічних типів, що охоплюють шість класів рослинності за Браун-Бланке та два типи угруповань, не класифікованих до рівня класу (табл. 3, рис. 7); розподіл структури покриву в межах кожного ядра відображено на рис. 8. Площі синтаксонів

отримано шляхом атрибуції базових класів автоматизованої RF-карти до конкретних ділянок мережі на основі польової верифікації, оскільки алгоритм класифікації розрізняє лише функціональні типи покриву, а не флористичний склад на рівні синтаксону.

Таблиця 3

Рослинний покрив мережі ЗІ м. Чернігова

Рослинність	Де переважно трапляється	Площа, га	%
<i>Vaccinio-Piceetea</i> Br.-Bl. in Br.-Bl. et al. 1939	Подусівський ліс, Ялівщина, Урочище Святе	502,5	37,2
<i>Robinietaea</i> Jurko ex Hadač et Sofron 1980	По всій мережі ЗІ	405,7	30,0
<i>Salicetea purpureae</i> Moor 1958 + <i>Alnetea glutinosae</i> Br.-Bl. et R.Tx. 1946	Кордівка, заплава Десни	198,6	14,7
<i>Trifolio-Geranietaea sanguinei</i> T.Müller 1962 (+ перехідні чагарники)	Ялівщина (схили), інші ядра	82,8	6,1
Синантропна рудерально-декоративна рослинність кладовища (<i>Solidago canadensis</i> + інтродуковані <i>Thuja occidentalis</i> , <i>Juniperus</i> spp.)	Кладовище «Яцево»	81,8	6,1
<i>Molinio-Arrhenatheretea</i> Tx. 1937	Сполучні коридори, вуличне озеленення	67,6	5,0
<i>Quercetea pubescentis</i> Doing-Kraft ex Scamoni et Passarge 1959	Болдині гори, Маліїв яр	13,2	1,0
Синантропні чагарникові угруповання	Єлецькі гори	0,2	0,01
Разом		1352,4	100

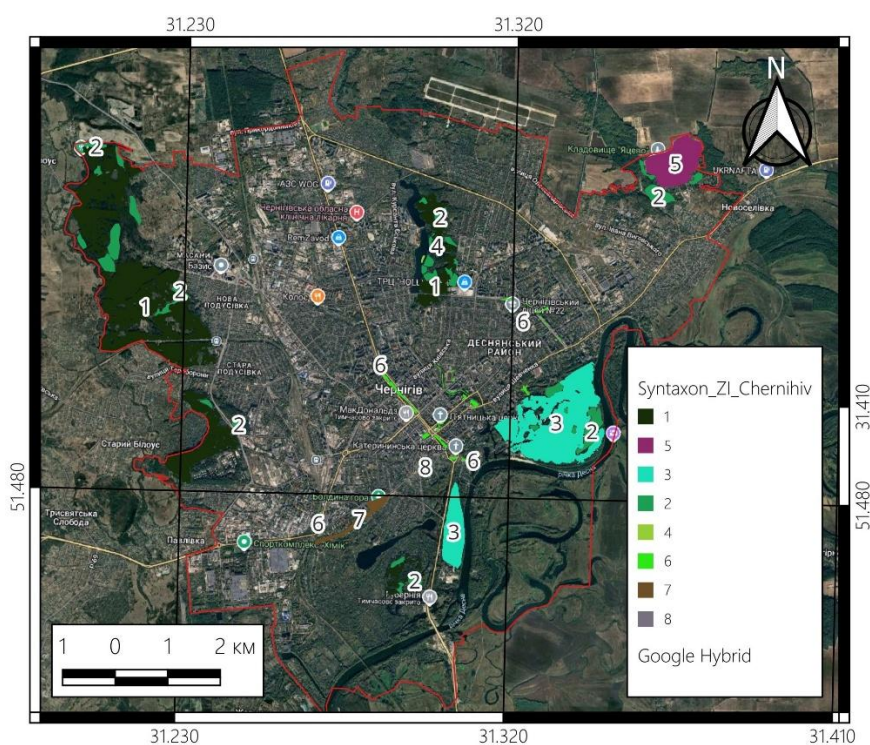


Рис. 7. Картосхема поширення рослинності в межах ядер мережі ЗІ м. Чернігова (1 - *Vaccinio-Piceetea*, 2 – *Robinietaea*, 3 – *S. purpureae* + *Al. glutinosae*, 4 - *Trifolio-Geranietaea sanguinei*, 5 – синантропна рудерально-декоративна рослинність, 6 - *Molinio-Arrhenatheretea*, 7 - *Quercetea pubescentis*, 8 – синантропні чагарникові угруповання)

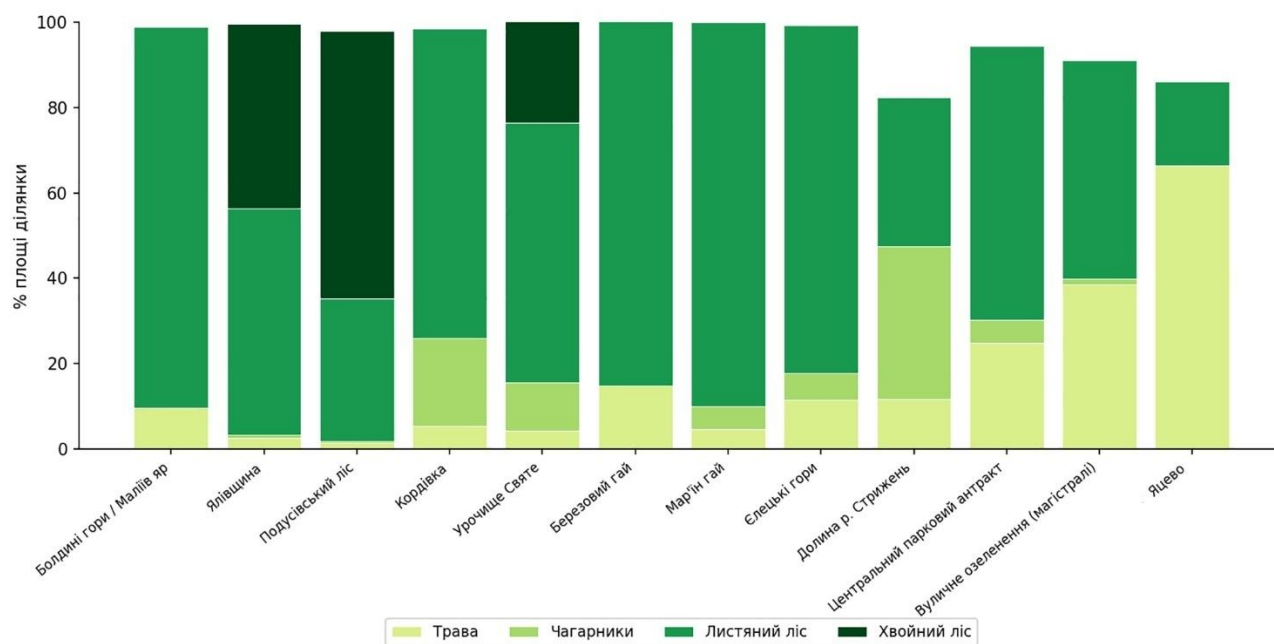


Рис. 8. Структура рослинного покриття за елементами мережі 3І

Найбільші за площею ділянки рослинного покриття мережі 3І представлені антропогенно трансформованими борами класу *Vaccinio-Piceetea* Br.-Bl. in Br.-Bl. et al. 1939, переважно асоціації *Peucedano-Pinetum* W.Matuszkiewicz (1962) 1973, поширеними у Подусівському лісі, урочищі Ялівщина та частково в урочищі Святому (502,5 га, 37,2 % площі мережі – найбільший за площею синтаксон, передусім за рахунок уточненої межі Подусівського лісу). За даними Lukash et al. (2020), у парку домінують трансформовані соснові бори та березові ліси, у яких трапляються як характерні види класу *Vaccinio-Piceetea*, так і види класу *Robinietaea*, а в підліску й трав'яному ярусі цих лісових угруповань часті синантропні види. Унаслідок тривалого рекреаційного навантаження трав'яний ярус подекуди деградований, що узгоджується з найнижчими в межах цього синтаксону значеннями NDVI, зафіксованими на периферії Подусівського лісу (середнє NDVI 0,802, мінімальне – значно нижче).

По всій мережі 3І – у Подусівці, Ялівщині, на Болдиних горах, уздовж коридорів і навіть у межах заплавної Кордівки – розповсюджені угруповання класу *Robinietaea* Jurko ex Hadač et Sofron 1980, сформовані *Robinia pseudoacacia* L. (405,7 га, 30,0 % площі мережі – другий за площею

синтаксон після *Vaccinio-Piceetea*). Це узгоджується з результатами Sádlo et al. (2019), які показали, що заміна корінних лісів плантаціями *Robinia pseudoacacia* спричиняє гомогенізацію лісової рослинності Центральної Європи. Dubińska et al. (2025) зазначають, що дослідження впливу цього виду на угруповання підліску на рівні синтаксонів у міських екосистемах залишаються рідкісними, а Varricchione et al. (2024) показали, що вид активно поширюється навіть у найбільш урбанізованих і фрагментованих ділянках – аналогічну закономірність ми спостерігаємо і в Чернігові: *Robinietaea* домінує саме в межах фрагментованих коридорних елементів мережі, тоді як корінні класи зберігаються переважно в геоморфологічно захищених ядрах 1-го порядку.

Унікальним і найбільш природоохоронно цінним елементом мережі 3І є термофільна діброва Болдиних гір і Малієвого яру, угруповання якої тяжіють до класу *Quercetea pubescentis* Doing-Kraft ex Scamoni et Passarge 1959 (13,2 га, 1,0 % площі мережі). За даними польового обстеження (Lukash, 2021), деревний ярус (зімкнутість крон 50 %) сформований переважно (30–40 %) *Quercus robur* L. віком 200–400 років; у чагарниковому ярусі домінує раритетний *Prunus mahaleb* L. Трав'яний ярус

вирізняється участю ксероморфних видів (*Stipa capillata* L., *Euphorbia cyparissias* L., *Campanula bononiensis* L.) на тлі співдомінування *Elytrigia intermedia* (Host) Nevski та *E. repens* (L.) Nevski. Активне поширення *Robinia pseudoacacia* в чагарниковому ярусі є прямою загрозою збереженню цього реліктового ценозу (Goncharenko et al., 2020). Флористично ценози Болдиних гір суттєво відрізняються від типових центральноєвропейських угруповань класу (Hegedúsová et al., 2021) і термофільних дібров Українського Полісся (Онищенко, 2006). За рельєфом ця ділянка характеризується найбільшою крутизною схилів ($10,1^\circ$) і найвищим позитивним індексом топографічного положення ($TPI = +4,34$) серед усіх обстежених ядер, що прямо відповідає опису яружно-балкового рельєфу.

На схилах борової тераси Ялівщини зафіксовано невеликі плями угруповань порядку *Origanetalia vulgaris* T.Müller 1962 союзу *Trifolion medii* T.Müller 1962 класу *Trifolio-Geraniea sanguinei* T.Müller 1962, зокрема асоціацій *Vicio cassubicae-Trifolietum alpestris* (R.Tx. 1962) Passarge 1979 та *Trifolio-Agrimonetum* T.Müller 1961 (Lukash et al., 2020). Разом з іншими перехідними чагарниковими угрупованнями мережі вони сумарно становлять 82,8 га (6,1 %) і диференціюються від суміжних борових ценозів як перехідні смуги між лісовими масивами і відкритими схилами.

Урочище Кордівка та заплавна частина р. Десни є структурно найцілісніший елемент мережі ЗІ, що підтверджується найвищими значеннями вегетаційних індексів ($NDVI = 0,832$, $EVI = 0,572$, $LAI = 3,55$) та найнижчою густиною країв ландшафту (51,7 м/га за єдиного суцільного патча, $LPI = 100$ %). Тополево-вербові угруповання класів *Salicetea purpureae* Moog 1958 та *Alnetea glutinosae* Br.-Bl. et R.Tx. ex Westhoff et al. 1946 (198,6 га, 14,7 % площі мережі) утворюють гідроморфне ядро мережі. Застосований нами підхід до моніторингу цієї ділянки методично відповідає підходу Hislop et al. (2025): виділення заплавної зони за пороговим $NDVI$ з подальшим аналізом часових рядів; спільне методичне застереження обох досліджень – просторова роздільна здатність Sentinel-2 (10 м) є обмеженням при роботі з вузькими

прибережними смугами. Pace et al. (2022) підтверджують ефективність мультитемпоральних вегетаційних індексів для встановлення змін у прибережних зонах унаслідок гідрологічних процесів.

Газонні культурфітоценози сполучних коридорів представлені класом *Molinio-Arrhenatheretea* Tx. 1937 (асоціації *Lolium perennis-Cynosuretum cristati* Tx. 1937 та *Lolietum perennis* Gams 1927 (Lukash et al., 2023)). За площею цей синтаксон займає 67,6 га (5,0 % мережі), проте є одним із найбільш вразливих її елементів: вуличне озеленення демонструє одне з найнижчих середніх значень $NDVI$ серед усіх 12 обстежених ділянок (0,632, поступаючись лише кладовищу «Яцево») і водночас екстремальний рівень фрагментації (197 патчів, LPI лише 9,6 %, густина країв 1191,8 м/га). Ці цифри є прямим кількісним підтвердженням чотиристадійного ряду антропоїдигресивних сукцесій під впливом витоптування й посушливих умов (Lukash et al., 2023).

Єлецькі гори у центральній частині міста мають відносно високе значення $NDVI$ (0,786) як для ділянки, офіційно описаної як синантропне чагарникове угруповання (*Caragana arborescens* Lam., *Cotinus coggygria* Scop., *Lycium barbarum* L.). Це уявне протиріччя пояснюється двоярусною структурою рослинності: описані чагарники здебільшого ростуть під зімкнутим наметом високих листяних дерев. Супутниковий знімок Sentinel-2 фіксує відбиття переважно від верхнього ярусу, тому класифікація відносить більшість площі ділянки до класу «листяний ліс», не «бачачи» синантропного підліску, – це принципове обмеження оптичного дистанційного зондування для багоярусної рослинності. Відкриті куртини без деревного намету займають лише 0,2 га ділянки. За рельєфом Єлецькі гори характеризуються другою за величиною крутизною схилів ($8,8^\circ$) і від'ємним TPI ($-0,87$), що узгоджується з описом ерозійного рельєфу в центрі міста; ці угруповання виконують едафозахисну функцію в умовах зростаючої частоти злив (Морський та ін., 2026).

Порівняльна характеристика вегетаційних індексів по кожному елементу мережі наведена в табл. 4 і на рис. 9, а їхній просторовий розподіл – на рис. 10.

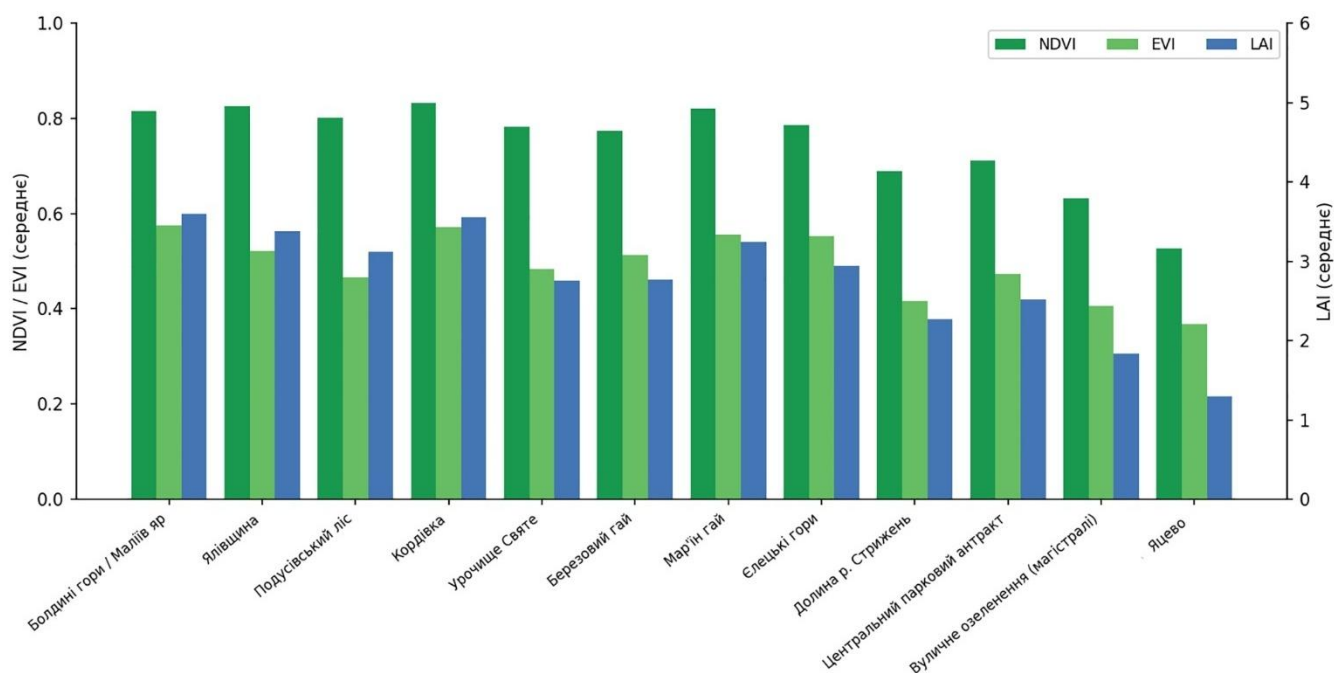


Рис. 9. Середні значення NDVI, EVI, LAI за елементами мережі ЗІ (2024 р.)

Таблиця 4

Значення вегетаційних індексів за елементами мережі ЗІ м. Чернігова (2024 р.)

Елемент мережі ЗІ	NDVI	EVI	LAI
Кордівка	0,832	0,572	3,55
Ялівщина	0,826	0,522	3,38
Болдині гори / Маліїв яр	0,815	0,576	3,59
Мар'їн гай	0,820	0,557	3,24
Подусівський ліс	0,802	0,466	3,12
Єлецькі гори	0,786	0,552	2,94
Урочище Святе	0,783	0,483	2,76
Березовий гай	0,774	0,513	2,77
Центральний парковий антракт	0,712	0,473	2,51
Долина р. Стрижень	0,689	0,416	2,27
Вуличне озеленення	0,632	0,407	1,84
Кладовище "Яцево"	0,527	0,367	1,30

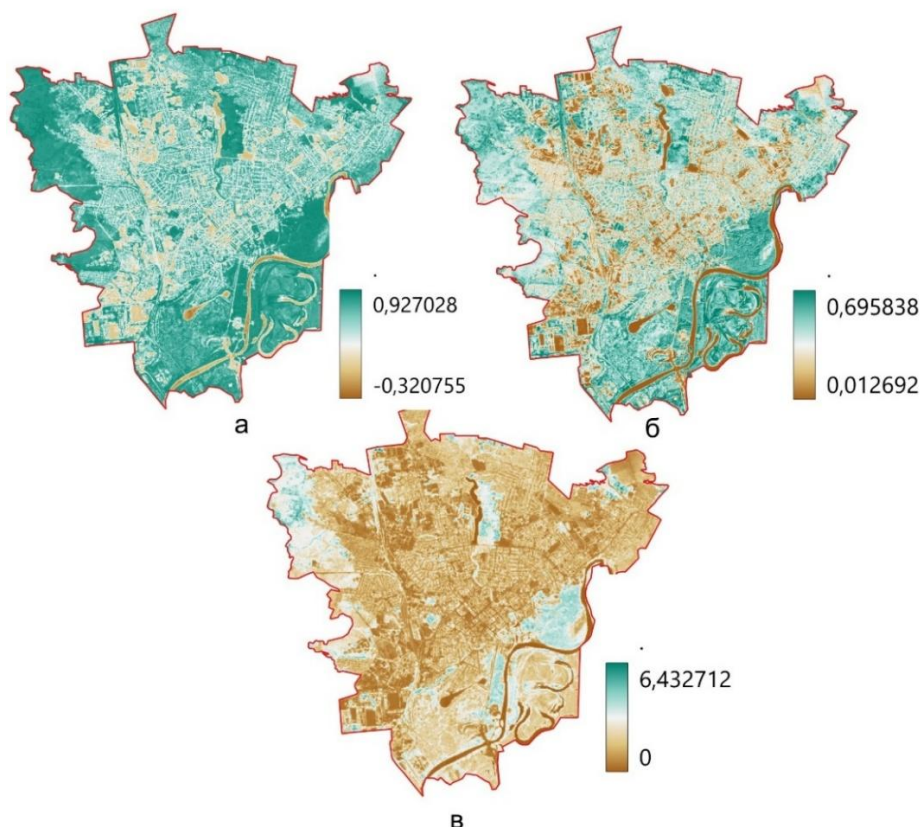


Рис. 10. Растрові карти вегетаційних індексів мережі ЗІ м. Чернігова (літній композит Sentinel-2, 2024 р.): А – NDVI; Б – EVI; В – LAI

Кладовище «Яцево» демонструє найнижчі значення всіх трьох індексів серед 12 обстежених елементів мережі, що кількісно підтверджує його статус найбільш трансформованої ділянки – наслідок як довготривалої синантропізації (домінування *Solidago canadensis*, за Lukash et al., 2026), так і бойових пошкоджень 2022 р.

Порівняння медіанних композитів NDVI 2020 і 2024 рр. для лісових ядер бореального типу (Ялівщина, Подусівський ліс) виявило ознаки посухового стресу, що

узгоджується з даними про прогресуючу аридизацію клімату Чернігова (Адаменко, 2014; Морський та ін., 2026).

Ландшафтні метрики фрагментації, розраховані по кожному з 12 елементів мережі (табл. 5, рис. 11), є найбільш об'єктивним кількісним індикатором ступеня антропогенної трансформації, оскільки на відміну від NDVI не залежать від методичного обмеження, пов'язаного з багатоярусністю рослинності.

Таблиця 5

Ландшафтні метрики фрагментації рослинного покриву за елементами мережі ЗІ

Елемент мережі ЗІ	Edge Density, м/га	К-ть патчів	LPI, %
1	2	3	4
Кордівка	51,7	1	100
Подусівський ліс	61,1	6	73,4
Ялівщина	72,7	1	100
Урочище Святе	83,8	1	100
Березовий гай	194,4	1	100
Кладовище "Яцево"	237,2	22	96,3

Продовження таблиці 5

1	2	3	4
Мар'їн гай	263,7	1	100
Центральний парковий антракт	287,7	5	52,5
Болдині гори / Маліїв яр	362,1	1	100
Єлецькі гори	434,5	1	100
Долина р. Стрижень	598,5	14	39,5
Вуличне озеленення	1191,8	197	9,6

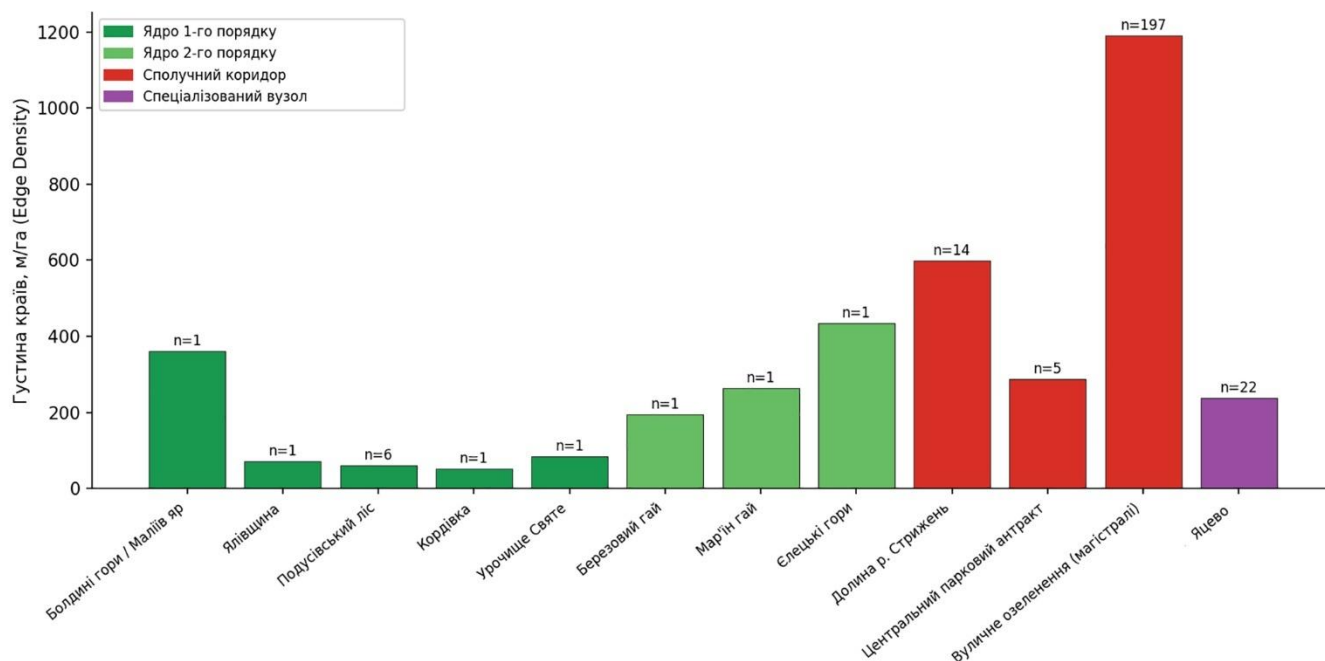


Рис. 11. Густина країв і кількість патчів рослинного покриття за елементами мережі ЗІ

Результати чітко відтворюють очікуваний градієнт трансформації мережі: ядра першого порядку є переважно суцільними масивами (LPI = 100 %), кладовище «Яцево» посідає проміжне положення (22 патчі, LPI = 96,3 %) – помітно фрагментованіший за природні ядра, але значно цілісніший за вуличні коридори, оскільки є єдиним масивом, а не розірваною лінійною смугою. Максимум фрагментації демонструє вуличне озеленення (197 патчів, LPI лише 9,6 %). Це узгоджується з висновком Liu et al. (2022) про те, що ділянки-джерела в горбистих районах мають кращу екологічну основу і вищу зв'язність, тоді як ділянки на рівнинних територіях сильно фрагментовані.

Запропонована модель мережі ЗІ Чернігова відповідає загальноприйнятій концепції, у якій ядра виступають

основними джерелами екосистемних послуг, а коридори забезпечують їх зв'язність (Huang et al., 2024). Систематичний огляд Li, L., & Carter, J. (2025) підтверджує, що зв'язність ЗІ через природні ландшафтні мережі є найефективнішим механізмом реалізації множинних екосистемних функцій. Водночас наш підхід суттєво відрізняється від більшості аналогічних міських досліджень тим, що просторова конфігурація мережі детермінована геоморфологічно, а не виводиться методами оптимізації чи MSPA-аналізу (Wang et al., 2024). Включення до мережі спеціалізованого техногенно-меморіального вузла «Яцево» розширює наявні уявлення про структуру міської ЗІ: як показано у дослідженні Lukash et al. (2026), навіть об'єкти ритуального призначення функціонують як повноцінні (хоч і сильно

трансформовані) вузли екологічної зв'язності між урбанізованими територіями і приміськими лісами, що узгоджується з міжнародною літературою про кладовища як «мовчазні» вузли зеленої інфраструктури (Sallay et al., 2023; Itescu & Jeschke, 2024).

Огляд Neyns & Canters (2022) констатує, що більшість досліджень міської рослинності методами дистанційного зондування обмежуються функціональними типами покриву, не виходячи на нижчі таксономічні рівні; аналогічний висновок робить і ширший огляд Dobrinić et al. (2025). Спроба поєднання фітосоціологічного підходу Браун-Бланке з проектуванням елементів ЗІ (Catalano et al., 2021) відома лише для зелених покривів. Наше дослідження є спробою поєднати повний цикл – від польових геоботанічних описів і синтаксономічної класифікації за Mucina et al. (2016) до автоматизованого картування засобами Google Earth Engine – у межах атрибутивно насиченої картосхеми мережі ЗІ українського міста. Відомий аналог GIS-моніторингу зелених зон в Україні – дослідження Харкова (Morar et al., 2022) – не включає флористичного чи синтаксономічного аналізу (пор. також Cegielska et al., 2022).

Дослідження має методичні обмеження. По-перше, просторова роздільна здатність Sentinel-2 (10 м) обмежує точність картування вузьких лінійних елементів і дрібноконтурних екотонів. По-друге, оптичне дистанційне зондування за визначенням не розрізняє яруси багаторусної рослинності, що продемонстровано на прикладі Єлецьких гір. По-третє, супутниковий шар ґрунтового покриву (роздільна здатність 250 м) виявився малоінформативним для диференціації між дрібними ядрами мережі і потребує заміни точнішими даними великомасштабного ґрунтового обстеження в подальших дослідженнях.

Висновки

Розроблено та апробовано методику автоматизованого GIS- картування рослинного покриву мережі зеленої інфраструктури міста засобами Random Forest у хмарній платформі Google Earth Engine з подальшою синтаксономічною атрибуцією контурів. Точність базової класифікації земного покриву на незалежній валідаційній вибірці

($n = 578$) становила Overall Accuracy 95,85 % при коефіцієнті Каппи 0,942.

Мережа зеленої інфраструктури м. Чернігова охоплює 12 структурних елементів загальною площею 1397,1 га: п'ять ядер першого порядку, три ядра другого порядку, три сполучні коридори та один спеціалізований техногенно-меморіальний вузол – кладовище «Яцево». Просторова конфігурація мережі жорстко детермінована геоморфологічним каркасом міста. Подусівський ліс – найбільший елемент мережі (50 % площі); разом з Кордівкою вони формують майже 70 % площі всієї мережі ЗІ.

У межах мережі виявлено вісім типів рослинності, що охоплюють шість класів за Браун-Бланке та два типи синантропних угруповань, не класифікованих до рівня класу. Найбільшу площу займають соснові бори класу *Vaccinio-Piceetea* (37,2 %, передусім за рахунок Подусівського лісу), другими за площею є трансформовані ліси класу *Robinietea* (30,0 %) і гідроморфні угруповання Кордівки класів *Salicetea purpureae* + *Alnetea glutinosae* (14,7 %); найменшу – реліктова діброва Болдиних гір класу *Quercetea pubescentis* (1,0 %).

Аналіз важливості прогностичних ознак класифікаційної моделі показав, що цифрова модель рельєфу (DEM) є найвпливовішою окремою змінною, випереджаючи всі спектральні канали й вегетаційні індекси, що емпірично підтверджує провідну роль геоморфологічної структури міста у формуванні просторового патерну рослинного покриву.

Ландшафтні метрики фрагментації виявилися найоб'єктивнішим кількісним індикатором трансформації елементів мережі: ядра першого порядку переважно є суцільними масивами (LPI = 100 %), кладовище «Яцево» демонструє помірну фрагментацію (22 патчі, LPI = 96,3 %), тоді як вуличне озеленення – екстремальну (197 патчів, LPI = 9,6 %, густина країв 1191,8 м/га).

Виявлено методичне обмеження оптичного дистанційного зондування для багаторусної рослинності: на прикладі Єлецьких гір показано, що класифікатор коректно розпізнає верхній деревний ярус, але не «бачить» синантропного чагарникового підліску під зімкнутим наметом.

До мережевої моделі ЗІ Чернігова інтегровано спеціалізований техногенно-меморіальний вузол – кладовище «Яцево» (94,95 га). Дані дистанційного зондування незалежно підтверджують висновки польового дослідження (Lukash et al., 2026) щодо високого ступеня синантропізації цієї ділянки: найнижчі серед усіх 12 елементів мережі значення NDVI (0,527), EVI (0,367) і LAI (1,30) відображають домінування інвазійного *Solidago canadensis* L. і наслідки бойових пошкоджень 2022 р.

Порівняльний аналіз часових рядів NDVI (2020–2024 рр.) виявив ознаки

посухового стресу лісових ядер бореального типу, що узгоджується з задокументованою прогресуючою аридизацією клімату регіону.

Отримані результати створюють кількісну основу для розробки пріоритетних заходів з екологічної оптимізації мережі ЗІ Чернігова, насамперед щодо підвищення зв'язності найбільш фрагментованих сполучних коридорів, контролю поширення інвазійної *Robinia pseudoacacia* в межах природоохоронно цінних ядер першого порядку та впровадження ресурсощадних стратегій відновлення техногенно-меморіальних вузлів мережі.

Фінансування / Funding

Дослідження виконано без залучення зовнішнього фінансування / The research was carried out without external funding.

Заява про доступність даних / Data Availability Statement

Первинні дані дослідження (скрипти Google Earth Engine, растрові й векторні шари класифікації, таблиці статистики) автори нададуть на запит зацікавлених осіб / The primary research data (Google Earth Engine scripts, raster and vector classification layers, statistical tables) will be provided by the authors upon reasonable request.

Заява інституційної ревізійної ради / Institutional Review Board Statement

Не застосовується, оскільки дослідження не передбачало роботи з людьми або лабораторними тваринами. / Not applicable, as the study did not involve human participants or laboratory animals.

Заява про інформовану згоду / Informed Consent Statement

Не застосовується / Not applicable.

Конфлікт інтересів / Conflict of interest

Автор Олександр Яковенко є членом редакційної колегії Biota. Human. Technology. Він не брав участі в процесі прийняття редакційних рішень, рецензування чи прийняття цього рукопису. Автори не мають інших конфліктів інтересів, про які слід зазначити / Author Oleksandr Yakovenko is the member of the editorial board of Biota. Human. Technology. He was not involved in the editorial decision-making, peer review, or acceptance process for this manuscript. The authors have no other conflicts of interest to note.

Декларація про генеративний штучний інтелект і технології на основі штучного інтелекту в процесі написання / Declaration on Generative Artificial Intelligence and AI-enabled Technologies in the Writing Process

Під час підготовки цього рукопису автори використовували інструмент на основі великої мовної моделі (Claude, Anthropic) для написання й налагодження скриптів обробки супутникових даних у середовищі Google Earth Engine та статистичного опрацювання результатів класифікації. Автори ретельно переглянули та відредагували весь згенерований вміст і несуть повну відповідальність за остаточну опубліковану версію статті / During the preparation of this manuscript, the authors used a large language model-based tool (Claude, Anthropic) for writing and debugging Google Earth Engine data-processing scripts and statistical analysis of classification results. The authors have thoroughly reviewed and edited all generated content and take full responsibility for the final published version of the article.

References

Adamenko, T. I. (2014). Agroclimatic zoning of the territory of Ukraine taking into account climate change (in Ukrainian). Cherkasy: RIA BLITs. (in Ukrainian)

Адаменко Т. І. Агрокліматичне зонування території України з урахуванням зміни клімату / за ред. А. М. Цветкової. Черкаси: «РІА» БЛІЦ, 2014.

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>

Braun-Blanquet, J. (1964). Pflanzensoziologie: Grundzüge der Vegetationskunde (3rd ed.). Springer-Verlag.

Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>

Capotorti, G., Alós Ortí, M. M., Copiz, R., Fusaro, L., Mollo, B., Salvatori, E., & Zavattero, L. (2019). Biodiversity and ecosystem services in urban green infrastructure planning. *Urban Forestry & Urban Greening*, 37, 87–96. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.12.014>

Catalano, C., Pasta, S., & Guarino, R. (2021). A plant sociological procedure for the ecological design and enhancement of urban green infrastructure. In C. Catalano, M. B. Andreucci, R. Guarino, F. Bretzel, M. Leone, & S. Pasta (Eds.), *Urban services to ecosystems* (Future City, Vol. 17, pp. 31–60). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75929-2_3

Cegielska, K., Piotrowski, P., & Kukulska-Kozieł, A. (2022). Urban green spaces: how geospatial information can help identify diversity. A case study from eastern Lesser Poland. *Bulletin of Geography. Socio-economic Series*, 58, 7–29. <https://doi.org/10.12775/bgss-2022-0031>

Dobrińić, D., Miler, M., & Medak, D. (2025). Mapping the green urban: a comprehensive review of materials and learning methods for green infrastructure mapping. *Sensors*, 25(2), 464. <https://doi.org/10.3390/s25020464>

Dubińska, A. M., Dyderski, M. K., & Niemczyk, M. (2025). How does non-native Robinia pseudoacacia L. affect urban forest biodiversity? *Urban Forestry & Urban Greening*, 113, Article 129079. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2025.129079>

EUR-Lex. (n.d.). Document 52013DC0249. Green Infrastructure (GI) – Enhancing Europe's Natural Capital. European Union. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52013DC0249>

Farr, T. G., P. A. Rosen, E. Caro, R. Crippen, R. Duren, S. Hensley, M. Kobrick, et al. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2), RG2004.. <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>

Gitelson, A. A., Viña, A., Ciganda, V., Rundquist, D. C., & Arkebauer, T. J. (2005). Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. *Geophysical Research Letters*, 32(8), L08403. <https://doi.org/10.1029/2005GL022688>

GMAO. (n.d.). MERRA-2: Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2. NASA GMAO. <https://gmao.gsfc.nasa.gov/gmao-products/merra-2/>

- Goncharenko, I., Semenishchenkov, Yu., Tsakalos, J., & Mucina, L. (2020). Thermophilous oak forests of the steppe and forest-steppe zones of Ukraine and Western Russia. *Biologia*, 75, 337-353. <https://doi.org/10.2478/s11756-019-00413-w>
- 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>
- Hansen, R., & Pauleit, S. (2014). From Multifunctionality to Multiple Ecosystem Services? A Conceptual Framework for Multifunctionality in Green Infrastructure Planning for Urban Areas. *AMBIO*, 43, 516–529. <https://doi.org/10.1007/s13280-014-0510-2>
- Hegedúšová, K., Žarnovičan, H., Kanka, R., Šuvada, R., Kollár, J., Galváněk, D., & Roleček, J. (2021). Thermophilous oak forests in Slovakia: Vegetation classification and an expert system. *Preslia*, 93(2), 89–123. <https://doi.org/10.23855/preslia.2021.089>
- Hislop, S., Soto-Berelov, M., Jellinek, S., Chee, Y.E. and Jones, S (2025). Monitoring riparian vegetation in urban areas with Sentinel-2 satellite imagery. *Ecological Management & Restoration*, 26, e12624. <https://doi.org/10.1111/emr.12624>
- Huang, H., Fu, D., Ding, G., Yan, C., Xie, X., Gao, Y., & Liu, Q. (2024). Construction and optimization of Green Infrastructure Network in mountainous cities: A case study of Fuzhou, China. *Scientific Reports*, 14, Article 11936. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-57567-0>
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1–2), 195–213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- Itescu, Y., & Jeschke, J. M., 2024, Assessing the conservation value of cemeteries to urban biota around the world. *Conservation Biology*, 38, e14322. <https://doi.org/10.1111/cobi.14322>
- Lafortezza, R., Chen, J., van den Bosch, C. K., & Randrup, T. B. (2018). Nature-based solutions for resilient landscapes and cities. *Environmental Research*, 165, 431–441. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.11.038>
- Liu, H. Q., & Huete, A. (1995). A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(2), 457–465. <https://doi.org/10.1109/36.377946>
- Liu, Y., Huang, T. T., & Zheng, X. (2022). A method of linking functional and structural connectivity analysis in urban green infrastructure network construction. *Urban Ecosystems*, 25(3), 909–925. <https://doi.org/10.1007/s11252-022-01201-2>
- Li, L., & Carter, J. (2025). Exploring the relationship between urban green infrastructure connectivity, size and multifunctionality: a systematic review. *Landscape Ecology*, 40(3), 61. <https://doi.org/10.1007/s10980-025-02069-1>
- Lukash, O., Karpenko, Yu., Sverdlov, V., & Yakovenko, O. (2020). Parki krajobrazowe regionu czernihowskiego (Ukraina Północna). In M. Kunz (Ed.), *Rola i funkcjonowanie parków krajobrazowych w rezerwatach biosfery* (pp. 365–378). Wydawnictwo Naukowe UMK. (in Polish)

Lukash, O. V. (2021). Steppe oak forest with *Prunus mahaleb* L. in the city of Chernihiv. In Modern phytosozological research in Ukraine (Iss. 4, pp. 48–52). Talkom. (in Ukrainian)

Лукаш О. В. Остепнена діброва з *Prunus mahaleb* L. у місті Чернігові // Сучасні фітосозологічні дослідження в Україні: зб. наук. праць. Вип. 4. Київ: Талком, 2021. С. 48–52.

Lukash, O., Hutnyk, Ye., & Morskyi, V. (2023). Succession of vegetation of roadside lawns in the city of Chernihiv. *Biota, Human, Technology*, (3), 41–56. <https://doi.org/10.58407/bht.3.23.5> (in Ukrainian)

Лукаш О., Гутник Є., Морський В. Сукцесії рослинності придорожніх газонів міста Чернігова у зв'язку антропогенним тиском та змінами погодно-кліматичних умов. *Biota, Human, Technology*. 2023. №3. С. 41–56. <https://doi.org/10.58407/bht.3.23.5>

Lukash, O., Morskyi, V., & Strilets, S. (2026). Cemeteries as nodes of urban green infrastructure: assessing ecological risks in war-affected areas of "Yatsevo" necropolis, Chernihiv, Ukraine. *Ecological Questions*, 37(3). <https://doi.org/10.12775/EQ.2026.039>

Morar, C., Lukić, T., Valjarević, A., Niemets, L., Kostrikov, S., Sehida, K., Telebienieva, I., Kliuchko, L., Kobylin, P., & Kravchenko, K. (2022). Spatiotemporal analysis of urban green areas using change detection: A case study of Kharkiv, Ukraine. *Frontiers in Environmental Science*, 10, Article 823129. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.823129>

Morskyi, V., Aravin, M., Morska, I., & Lukash, O. (2026). Geomorphological and climatic factors of formation and optimization of the green infrastructure network of Chernihiv city. In Biogeosphere and Socium: International Scientific Conference (pp. 426–429). (in Ukrainian)

Морський В., Аравін М., Морська І., Лукаш О. Геоморфологічні та кліматичні чинники формування та оптимізації мережі зеленої інфраструктури міста Чернігова. *Biogeosphere and Socium: International Scientific Conference* (25–27 березня 2026 р., Берегове, Україна). С. 426–429.

Mucina, L., Bültmann, H., Dierßen, K., Theurillat, J.-P., Raus, T., Čarni, A., Šumberová, K., Willner, W., Dengler, J., García, R. G., Chytrý, M., Hájek, M., Di Pietro, R., Iakushenko, D., Pallas, J., Daniëls, F. J. A., Bergmeier, E., Guerra, A. S., Ermakov, N., Valachovič, M., Schaminée, J. H. J., Lysenko, T., Didukh, Y. P., Pignatti, S., Rodwell, J. S., Capelo, J., Weber, H. E., Solomeshch, A., Dimopoulos, P., Aguiar, C., Hennekens, S. M., & Tichý, L. (2016). Vegetation of Europe: hierarchical floristic classification system of vascular plant, bryophyte, lichen, and algal communities. *Applied Vegetation Science*, 19(S1): 3–264. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/avsc.12257>

Neyns, R., & Canters, F. (2022). Mapping of Urban Vegetation with High-Resolution Remote Sensing: A Review. *Remote Sensing*, 14(4), 1031. <https://doi.org/10.3390/rs14041031>

Onyshchenko, V. A. (2006). Vegetation classification. In T. L. Andriyenko (Ed.), *Phytodiversity of Ukrainian Polissya and its conservation*. Fitosotsiotsentr. (in Ukrainian; full details to be confirmed)

Онищенко В. А. Класифікація рослинності // Фіторізноманіття Українського Полісся та його охорона / за ред. Т. Л. Андрієнко. Київ: Фітосоціоцентр, 2006.

POWO. (2024). Plants of the World Online. Royal Botanic Gardens, Kew. <http://www.plantsoftheworldonline.org/>

QGIS Development Team. (2024). QGIS Geographic Information System (Version 3.x) [Computer software]. QGIS Association. <https://www.qgis.org>

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium (Vol. 1, pp. 309–317). NASA SP-351. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614>

Sallay, Á., Tar, I. G., Mikházi, Z., Takács, K., Furlan, C., & Krippner, U., 2023, The role of urban cemeteries in ecosystem services and habitat protection. *Plants*, 12(6): 1269. <https://doi.org/10.3390/plants12061269>

Varricchione, M., Laura Carranza, M., D'Angeli, C., Carla de Francesco, M., Innangi, M., Santoianni, L. A., & Stanisci, A. (2024). Exploring the distribution pattern of native and alien forests and their woody species diversity in a small Mediterranean city. *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with All Aspects of Plant Biology*, 158(6), 1335–1346. <https://doi.org/10.1080/11263504.2024.2415613>

Verkhovna Rada of Ukraine. (2025). Law of Ukraine "On the Improvement of Settlements" (Document 2807-IV). (in Ukrainian)

Верховна Рада України. Закон України «Про благоустрій населених пунктів» (документ 2807-IV, чинна редакція від 30.08.2025). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2807-15#Text>

Wang, D., Xu, P., An, B. and Guo, Q. (2024) Urban Green Infrastructure: Bridging Biodiversity Conservation and Sustainable Urban Development through Adaptive Management Approach. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 12, 1440477. <https://doi.org/10.3389/fevo.2024.1440477>

Received: 16.07.2026. **Accepted:** 23.08.2026. **Published:** 07.09.2026.

Ви можете цитувати цю статтю так:

Яковенко О., Морський В. Картування рослинного покриву зеленої інфраструктури м. Чернігова засобами ГІС. *Biota. Human. Technology*. 2026. № 2. С. 44-64. DOI: <https://doi.org/10.58407/bht.2.26.4>

Cite this article in APA style as:

Yakovenko O., & Morskyi V. (2026). Kartuvannia roslynnoho pokryvu zelenoi infrastruktury m. Chernihova zasobamy HIS [GIS-based mapping of vegetation cover in Chernihiv's green infrastructure]. *Biota. Human. Technology*, (2), 44-64. <https://doi.org/10.58407/bht.2.26.4> (in Ukrainian)

Information about the authors:

Yakovenko O. [in Ukrainian: **Яковенко О.**] ¹, Cand. Sc. (Biol.), email: ajakov2@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1417-6042

Department of Ecology, Geography and Nature Management, T.H. Shevchenko National University "Chernihiv Colehium"
53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine

Morskyi V. [in Ukrainian: **Морський В.**] ², Postgraduate student, email: zelenbudkp@gmail.com
ORCID: 0009-0000-2465-6731

Department of Ecology, Geography and Nature Management, T.H. Shevchenko National University "Chernihiv Colehium"
53 Hetmana Polubotka Street, Chernihiv, 14013, Ukraine

¹ Data Curation; Conceptualization; Methodology; Software; Formal analysis; Investigation; Writing – Original Draft; Visualization.

² Investigation; Software, Writing – Review & Editing; Field data validation.