УДК 37:004:504.064:712.25

Наталія Непошивайленко
Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, Україна
ORCID ID 0000-0003-0759-2451
nna2013@ukr.net

Олександр Губа
Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, Україна
ORCID ID 0009-0004-2794-0550
gubacom03@ukr.net

Софія Михалевич
Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, Україна
ORCID ID 0009-0006-6606-8878
sofia.mikhalevich@gmail.com

МОБІЛЬНІ ІКТ ТА ГЕОІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ У ПРОЦЕСІ ІНВЕНТАРИЗАЦІЇ ЗЕЛЕНИХ НАСАДЖЕНЬ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ПРОФЕСІЙНИХ КОМПЕТЕНТНОСТЕЙ МАЙБУТНІХ ФАХІВЦІВ-ЕКОЛОГІВ

Анотація. У статті досліджено проблему модернізації підготовки майбутніх екологів шляхом імплементації мобільних інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) у практичну діяльність із інвентаризації міських зелених насаджень. Обґрунтовано, що використання спеціалізованого програмного забезпечення дало змогу вирішити ключове завдання з автоматизації збору польових даних, сприяло підвищенню точності таксономічної ідентифікації та формуванню верифікованих геопросторових баз даних деревної рослинності.

У межах проведеного емпіричного дослідження (м. Кам'янське) визначено конкретний зміст діяльності здобувачів освіти, що передбачав фотофіксацію морфологічних ознак дерев, їх автоматизоване розпізнавання за допомогою нейромережевих алгоритмів застосунку Pl@ntNet, точну геофіксацію координат через інструменти Trees: Forest Monitoring Tools та складання цифрових карт об'єктів інвентаризації. Особливу увагу приділено впровадженню алгоритму багаторівневої верифікації (алгоритмічної, платформної, експертної та таксономічної), що дало змогу здобувачам освіти критично оцінювати результати роботи штучного інтелекту та мінімізувати похибки ідентифікації.

Методологія дослідження базується на комплексному підході, що поєднує методи відкритої науки та математико-статистичне опрацювання результатів. Доведено статистичну значущість зростання професійних компетентностей здобувачів (за Т-критерієм Вілкоксона, $p < 0,01$).

Результати апробації підтвердили, що використання мобільних ГІС забезпечує точність ідентифікації на рівні 94,3 % та підвищує мотивацію здобувачів до професійної діяльності до рівня 85 %. Практична значущість роботи полягає в розробці методики, яка інтегрує технічні рішення з освітніми завданнями, формуючи готовність майбутніх фахівців до роботи в умовах цифрової трансформації екологічного моніторингу.

Ключові слова: інвентаризація зелених насаджень; штучний інтелект; нейромережі; ГІС-технології; хмарні сервіси; верифікація даних.

1. ВСТУП

Постановка проблеми.

Сучасний етап розвитку екологічного моніторингу та урбаністики характеризується стрімкою цифровізацією та впровадженням концепцій «розумного міста», як зазначають дослідники в межах Інтернету речей (IoT) [1]. Особливе місце в цьому процесі посідає інвентаризація зелених насаджень, яка є основою для ухвалення управлінських рішень щодо сталого розвитку міських екосистем. Цифровізація процесів

© Наталія Непошивайленко, Олександр Губа, Софія Михалевич, 2026.

керування зеленими насадженнями міст розглядається не лише як технічне завдання, а як основа для розбудови «розумних міст» та забезпечення кліматичної стійкості, яка дасть змогу трансформувати статичні реєстри в динамічні цифрові бази даних міських екосистем, що є критично важливим для адаптації міст до глобальних екологічних викликів.

Зелені насадження в населених пунктах виконують ключову роль у формуванні здорового середовища. Вони знижують температуру повітря на 2-5 °С, поглинають до 24 % забруднювальних речовин, зменшують шумове навантаження на 5-10 дБ та поліпшують життя мешканців [2], [3]. В умовах зростання урбанізаційних процесів та змін клімату ефективне управління зеленим господарством міст стає пріоритетним завданням сьогодення.

Основним інструментом моніторингу ступеня та якості озеленення населених пунктів є інвентаризація зелених насаджень [4], [5]. Чинні вітчизняні підходи не враховують необхідності інтеграції сучасних інструментальних методів діагностики внутрішнього стану дерев (таких як резистографія та імпульсна томографія), що дозволяють виявляти приховані стовбурові гнилі та точно оцінювати аварійність насаджень на ранніх етапах. Крім того, традиційні підходи та методи, що базуються на візуальних вимірах під час збору інформації та збереженні даних на паперових носіях за традиційними методами, є морально застарілими, характеризуються низькою якістю результатів та сповільнюють надання результатів замовнику-балансоутримувачу об’єктів озеленення. За даними Міністерства захисту довкілля [6], лише 35 % українських міст мають актуальні цифрові реєстри дерев, що обмежує можливості планування населених пунктів. До ключових проблем, пов’язаних з цифровізацією системи озеленення у містах, належить висока трудомісткість процесу технічної інвентаризації з наступним оцифруванням даних, відсутність оперативного оновлення даних, відсутність або обмеженість можливості просторового аналізу накопиченої інформації, і, зрештою, відсутність підготовлених фахівців, готових швидко оволодіти технічною складовою цифровізації системи міського озеленення.

У цьому контексті інтеграція мобільних інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) у професійну діяльність та освітній процес майбутніх екологів стає не лише технічною потребою, а й важливою складовою формування їхньої цифрової компетентності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

У науковій та практичній площині, як свідчить світовий досвід, спостерігається чітка тенденція до цифровізації процесів інвентаризації зелених насаджень із активним впровадженням інноваційних технологій та домінуванням комплексних рішень, таких як платформа i-Tree (США) або проєкт MIT Senseable City Lab, що базуються на поєднанні дистанційного зондування та алгоритмів машинного навчання. Ефективність поєднання безпілотних літальних апаратів й алгоритмів глибокого навчання продемонстровано в дослідженні Лі (Li) та співавторів (2024), де вдалося досягти точності класифікації дерев у міських умовах на рівні 89-92 % [7]. Проєкт MIT Treepedia (2022), який застосовує комп’ютерний зір для автоматизованого аналізу зеленого покриву на основі панорам Google Street View, сприяє ефективному оцінюванню наявності зелених насаджень у міському середовищі [8].

Паралельно з дистанційними методами моніторингу зелених насаджень стрімко розвиваються мобільні технології, що стають важливим інструментом як для науковців, так і для широкої громадськості в ідентифікації біологічних об’єктів на основі штучного інтелекту. Так колектив авторів [9] довів доцільність використання платформи Pl@ntNet у навчальному процесі для ідентифікації рослин вручну чи аналізі фотографій та оцінки умов зростання рослин, а також для підвищення точності таксономічних описів

ідентифікованих рослин. Дослідження підтверджують високу точність мобільного застосунку Pl@ntNet у розпізнаванні понад 15 000 видів рослин – показник точності сягнув 96,1 % [10].

Паралельні розробки цифрових технологій дадуть змогу створити великі та структуровані спільноти спостерігачів [11], які беруть участь у моніторингу біорізноманіття та надають дані онлайн-платформам громадянської науки, таким як eBird, iNaturalist та Pl@ntNet. Ці платформи трансформують екологічний моніторинг у колаборативний процес, що забезпечує швидкий обмін інформацією між учасниками, даючи їм змогу надсилати та керувати своїми спостереженнями за допомогою глобально доступних баз даних, що підтверджується останніми світовими мета-аналізами, технологій автоматизованої ідентифікації видів. Наприклад, у Швеції були проведені експерименти з використанням мобільних ГІС-додатків у контексті громадської науки. Результати показали, що час, необхідний для інвентаризації зелених насаджень, скоротився на 65 % порівняно з традиційними підходами, що свідчить про реальну ефективність цифрових рішень у польових умовах [12].

Сучасний етап розвитку цифрової екології та ботаніки характеризується переходом до концепції FAIR data, ключовими принципами якої є пошукоздатність, доступність, сумісність та повторне використання даних. У цьому контексті особливої ваги набуває дослідження Вайля (Weil) та співавторів (2023), які представили платформу PLANTdataHUB. Автори доводять, що безперервний обмін даними та використання колаборативних платформ є важливими для сучасної рослинницької науки [13]. Застосований у нашому дослідженні підхід щодо використання мобільних ІКТ (Pl@ntNet, QField) для інвентаризації зелених насаджень м. Кам'янського повністю відповідає цій глобальній тенденції, оскільки забезпечує цифрову фіксацію та можливість подальшої інтеграції локальних екологічних даних у ширші моніторингові мережі. Крім того, на відміну від цих автоматизованих моделей, які часто мають високу похибку на видовому рівні, запропонована методика з використанням мобільних ГІС-застосунків забезпечує вищу точність ідентифікації та верифікації кожного об'єкта безпосередньо в польових умовах, що є оптимальним для умов України.

В українському контексті ситуація залишається складнішою, зокрема через застарілі нормативні документи. Чинна Інструкція з інвентаризації зелених насаджень [4] не передбачає використання GPS-навігації, штучного інтелекту або мобільних додатків, що суттєво обмежує модернізацію методів збору даних [2] та формування цифрового реєстру зелених насаджень населених пунктів, територіальних громад та країни загалом [6]. Основною причиною такого відставання є нестача технологічної інфраструктури, відсутність підготовлених фахівців у сфері екологічного моніторингу та геоінформаційних технологій інвентаризації зелених насаджень.

В Україні існують спроби систематизувати дані про зелені насадження на рівні окремих одиниць. Протягом 2018–2020 рр. щонайменше в дев'яти українських містах було запущено інтерактивні мапи інвентаризації зелених насаджень, що перебувають у відкритому доступі. Наразі виникають нові форми співробітництва у сфері інвентаризаційних послуг, такі як публічно-приватні партнерства, ініціативи активних громадян та громадських організацій, міжнародна фінансова та технічна допомога [14]. Прикладом цифровізації системи міського озеленення є проєкт Одеського геопорталу (2020) [15]. Незважаючи на сучасні підходи, запропоновані авторами порталу, він має низку обмежень. Зокрема функціонує лише на основі статичних карт і не має інтерактивних компонентів, що обмежує його потенціал як інструменту для сталого екологічного моніторингу та управління.

Міжнародна практика демонструє активне впровадження систем, що поєднують можливості штучного інтелекту та IoT для моніторингу стану дерев у режимі реального

часу на основі сенсорного обладнання. Ще одним з перспективних напрямів є автоматичне оцінювання екосистемних послуг зелених насаджень, що, згідно з дослідженнями Г. Гальярді (G. Gagliardi) та ін. [16], дає змогу трансформувати дані з датчиків на кількісні показники життєздатності міських екосистем. Особливу роль у залученні сучасних інструментів до процесу технічної інвентаризації відіграють освітні інновації. Зокрема результати впровадження мобільних ГІС у навчальний процес, описані П. Голловеєм (P. Holloway) та ін. [17], підтверджують, що використання смартфонів для польового збору даних значно підвищує технологічну компетентність майбутніх фахівців та їхню залученість до активного екологічного моніторингу. Це доводить важливість інтеграції технічних рішень в освітні інструменти при підготовці нового покоління екологів.

Питання проєктування та використання хмарно орієнтованих навчальних середовищ для формування професійних навичок фахівців ґрунтовно досліджено С. Г. Литвиновою, В. Ю. Биковим та О. М. Спіріним [18], [19]. Зокрема у фахових виданнях підкреслюється, що модернізація географічної та екологічної освіти у закладах вищої освіти потребує впровадження інноваційних моделей геоінформаційної підготовки [20].

Використання цифрових інструментів сприяє не лише збору даних, а й значному підвищенню якості екологічної освіти через залучення студентів до практичної діяльності. Сучасні тенденції, висвітлені у роботі Ся (Xia) (2024), вказують на те, що цифрові інструменти не лише спрощують збір даних, а й суттєво допомагають студентам узгоджувати свої академічні заняття з особистими прагненнями, прищеплюють навички, які сприяють майбутньому кар'єрному успіху, підвищують залученість здобувачів освіти до вирішення реальних екологічних проблем [21]. Це узгоджується з нашою гіпотезою про те, що використання мобільних ІКТ під час інвентаризації зелених насаджень у м. Кам'янському сприяє трансформації пасивного спостереження в активну дослідницьку практику.

Попри активний розвиток у світі цифрових підходів екологічного моніторингу, перед Україною стоять суттєві виклики. Однією з головних проблем є відсутність єдиних стандартів цифрової інвентаризації, зокрема, зелених насаджень, які б регулювали використання сучасних інформаційних технологій для екологічного моніторингу та муніципального управління. Крім того, більшість існуючих моделей штучного інтелекту не адаптовані до національного флористичного контексту, що ускладнює їхнє ефективне застосування в процесі інвентаризації об'єктів озеленення. Ще одним бар'єром є недостатня інтеграція потенціалу громадської науки в системи збору та аналізу екологічної інформації – громадяни часто залишаються пасивними спостерігачами, хоча мають доступ до мобільних технологій і можуть долучатися до збору даних.

Отже, на тлі світових тенденцій переходу до високоточних, автоматизованих й освітньо орієнтованих рішень, українська практика цифровізації зелених насаджень та екологічного моніторингу значною мірою залишається фрагментованою. Попри наявність широкого спектру цифрових інструментів залишається недостатньо розробленою методика їх комплексного поєднання в єдиний технологічний ланцюг «ідентифікація-геофіксація-верифікація» у професійній підготовці екологів. Існує потреба в обґрунтуванні практичного алгоритму використання мобільних ІКТ під час проведення інвентаризації в умовах промислових міст (зокрема м. Кам'янського), де стан зелених насаджень потребує постійного та точного моніторингу. Ключовим викликом сьогодення є не просто впровадження окремих цифрових інструментів, а формування комплексної системи, що поєднує технічну ефективність, нормативну підтримку, освітню взаємодію та залучення громадськості. Саме такі рішення можуть стати основою для сталого та інноваційного управління зеленими зонами в українських містах.

Мета дослідження полягає в теоретичному обґрунтуванні та практичній апробації методики інтеграції мобільних ІКТ (на прикладі застосунків Pl@ntNet та QField) та геоінформаційних систем у процес інвентаризації зелених насаджень для підвищення ефективності збирання екологічних даних та формування професійних компетентностей майбутніх фахівців-екологів.

Наукова новизна полягає в обґрунтуванні методичних засад використання мобільних ГІС-інструментів у підготовці екологів, що базуються на створенні інтегрованих підходів набуття освітніх компетентностей, що поєднує технології автоматичної ідентифікації видів рослин, машинного навчання оцінки стану та біометричних показників рослин, формування цифрових баз даних зелених насаджень та розробки електронної карти об'єкту інвентаризації з використанням GPS-навігації та ГІС-технологій, що забезпечує безперервність циклу «спостереження-фіксація-аналіз». Під час апробації технологічного ланцюга було встановлено, що використання застосунку Pl@ntNet дало змогу скоротити час на польову ідентифікацію видів на 40 % порівняно з використанням традиційних атласів-визначників на паперових носіях. Середній показник впевненості алгоритму при розпізнаванні листкових пластин становив 92-96 %, що підтверджує високу надійність використання роботи штучного інтелекту в екологічній освіті та практиці.

Практична цінність проведеного дослідження полягає в підготовці фахівців з екологічного моніторингу, які не лише будуть володіти навичками реалізації технічної складової завдання, а й опанують компетентності сучасного геоінформаційного аналізу системи міського озеленення, спираючись на GIS-інструменти.

2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Для досягнення поставленої мети використано комплекс взаємопов'язаних методів теоретичного, емпіричного, статистичного та інструментального аналізу:

- аналіз науково-педагогічної та спеціальної літератури з питань цифровізації екологічного моніторингу; систематизація та порівняння функціональних можливостей мобільних ГІС-застосунків та платформ Citizen Science; вивчення нормативно-правової бази щодо інвентаризації зелених насаджень в Україні;
- польові дослідження стану зелених насаджень на модельних ділянках м. Кам'янського (проспект Гімназичний); проведення експериментальної інвентаризації з використанням мобільних ІКТ; педагогічне спостереження за процесом формування професійних навичок збору польових даних;
- методи математичної статистики для оцінки точності ідентифікації видів штучним інтелектом; картографічний метод для візуалізації отриманих даних у середовищі ГІС.

2.1. Дизайн емпіричного дослідження

З метою об'єктивної верифікації ефективності впровадження мобільних ІКТ у підготовку майбутніх екологів розроблений дизайн емпіричного дослідження, що базується на інтеграції технологічних інструментів у практикоорієнтоване навчання.

Гіпотеза дослідження ґрунтується на припущенні, що системна інтеграція мобільних ГІС у практику польових досліджень сприяє суттєвому підвищенню рівня фахових компетентностей здобувачів (зокрема цифрових та інструментальних) порівняно з традиційними методами збирання та аналізу екологічної інформації завдяки неперервності циклу «фіксація-верифікація-аналіз».

Принципи відбору контенту для експериментального навчання визначались відповідно до специфіки професійної діяльності:

- принцип наочності та автентичності, що забезпечує використання реальних природних об'єктів дендрофлори м. Кам'янського та їх трансформування в абстрактні теоретичні знання та наочні цифрові моделі;
- принцип професійної спрямованості, тобто змістовна наповненість завдань з інвентаризації зелених насаджень з використанням мобільних ІКТ, відповідає вимогам Стандарту вищої освіти України зі спеціальності 101-Екологія (2018р.), фокусується на фахових компетентностях з моніторингу та використання сучасних інформаційних ресурсів для екологічних досліджень (К20, К23) [22];
- принцип доцільності виконання досліджень, що полягає в залученні здобувачів до картографування міських екосистем та сприяє їх внутрішній мотивації через усвідомлення суспільної значущості результатів власної праці для місцевої громади, що також відповідає загальним компетентностям К12, К13 Стандарту [22].

Методологічною основою навчання стали метод проєктного навчання та концепція «навчання через дію». Проєктний метод забезпечив структурування діяльності від етапу декомпозиції завдання (розподілу ділянок інвентаризації за кожним здобувачем) до презентації кінцевого продукту – представлення цифрової карти інвентаризації зелених насаджень до департаменту екології та природних ресурсів Кам'янської міської ради. Підхід «навчання через дію» реалізувався через безпосереднє застосування мобільних застосунків, де когнітивні навички ідентифікації видів та технічні навички геофіксації синергетично формувались у реальних польових умовах.

Форми взаємодії суб'єктів навчання були трансформовані в площину суб'єкт-суб'єктних відносин. У цьому контексті викладач відходить від ролі ретранслятора знань, проте спрямовує процес навчання на засадах фасилітатора та модератора технічних процесів, який супроводжує пошукову діяльність. Здобувач освіти натомість набуває статусу автономного дослідника, який самостійно ухвалює рішення щодо верифікації об'єктів у полі, несе відповідальність за точність внесених даних та здійснює первинний аналіз результатів у хмарному середовищі. Така зміна ролей сприяє формуванню професійної суб'єктності та готовності до розв'язання складних завдань у майбутній діяльності.

Для кількісної та якісної оцінки результатів емпіричного дослідження розроблена система показників (метрик) на основі компетентностей Стандарту вищої освіти України [22]. Оцінювання здійснювалось за 100-бальною шкалою через експертну оцінку виконаних проєктів (викладачем-фасилітатором) та через анкетування (самооцінку) здобувачів до і після реалізації проєкту.

Для оцінювання результативності інтеграції мобільних ІКТ у навчальний процес розроблено авторський опитувальник «Сприйняття мобільних технологій в інвентаризації зелених насаджень», побудований на основі адаптованої моделі прийняття технологій. Опитувальник містив 12 тверджень, розподілених за трьома шкалами: «Точність ідентифікації», «Технологічна грамотність» та «Професійна мотивація». Оцінювання проводилось за 100-бальною шкалою від «повністю не згоден» до «повністю згоден».

Психометрична перевірка інструментарію передбачала оцінку фахівців у галузі екологічної освіти та ІКТ змістової наповненості та внутрішньої узгодженості запропонованого опитувальнику. Розрахований коефіцієнт альфа Кронбаха для всього опитувальника склав 0,84, що свідчить про високий рівень надійності та однорідності розробленого інструментарію.

Статистичне опрацювання результатів дослідження здійснювалось за допомогою пакетів прикладних програм Microsoft Excel та інструментарію аналізу даних з перевіркою нормальності розподілу отриманих даних. Оскільки розподіл відхилявся від нормального, для порівняння результатів здобувачів до та після впровадження мобільних ІКТ використаний непараметричний Т-критерій Вілкоксона для зв'язаних вибірок. Рівень статистичної значущості встановлений на позначці $p<0,05$. Для оцінки взаємозв'язку між рівнем технологічної грамотності та точністю інвентаризації розраховувався коефіцієнт рангової кореляції Спірмена (ρ). Кількісні результати оцінювання та самооцінки здобувачів подано у вигляді M±SD, де M – середнє арифметичне значення вибірки, а SD – стандартне відхилення, що характеризує міру розсіювання даних.

2.2. Методологія інвентаризації зелених насаджень з використанням мобільних ІКТ

Реалізація методології комплексного підходу до інвентаризації зелених насаджень з використанням мобільних ІКТ відбувалась за попереднього навчання студентів, які брали участь у дослідженні, та реалізована у вигляді технологічного алгоритму, що має п'ять основних етапів:

Етап 1. Цифрова ідентифікація та верифікація таксонів (застосунки Pl@ntNet та iNaturalist) [23]. На цьому етапі здійснюється фотофіксація морфологічних ознак об'єкта (листя, квіти, кора).

Для мінімізації похибок автоматизованої ідентифікації та забезпечення достовірності даних у випадках неоднозначного розпізнавання об'єктів нейромережею у дослідженні застосовано чотирирівневу систему верифікації:

1) Алгоритмічний рівень, що дає змогу здійснювати критичний аналіз показника впевненості нейромережі застосунку Pl@ntNet. За низького значення впевненості здійснюється повторна фотофіксація різних морфологічних ознак для отримання перехресного підтвердження від алгоритму.

2) Крос-платформна перевірка через iNaturalist. Дані завантажуються до глобальної мережі, де їх перевіряє алгоритм Computer Vision іншої архітектури та, за потреби, верифікує міжнародна експертна спільнота.

3) Експертно-візуальний рівень, під час якого викладач-фасилітатор здійснює камеральну перевірку завантажених у хмару фотографій. Це сприяє виявленню помилки ідентифікації, спричиненої поганою якістю зображення або схожістю декоративних форм рослин.

4) На таксономічно-географічному рівні здійснюється перевірка ідентифікованого виду на відповідність флористичному складу регіону та умовам конкретної локації. Наприклад, якщо нейромережа пропонує екзотичний вид, що не притаманний нашому клімату, дані відхиляються або призначається додатковий польовий огляд.

Етап 2. Моніторинг та оцінка параметрів (застосунок Forest Monitoring Tools та MobileNetV3). Для поглибленого аналізу лісопаркових зон використовується спеціалізований інструментарій Forest Monitoring Tools (Trees) [24]. Він дає змогу автоматизувати розрахунки біометричних показників із використанням тригонометричних методів з похибкою вимірювань, що не перевищує ±0,3 метра, та оцінювати динаміку змін стану насаджень, що є важливим для промислових зон міста Кам'янського. Візуальна оцінка якісного стану кожного об'єкту озеленення за трибальною шкалою (добрий, задовільний, незадовільний) відповідно до чинної Інструкції [4] та Правил утримання зелених насаджень [5], розпізнавання патологій та

хвороб зелених насаджень за допомогою MobileNetV3 [25], які фіксувались шляхом фотографування.

Етап 3. Геопросторова прив'язка та збір атрибутивних даних (застосунок QField та Tracklia). Після ідентифікації виду дані інтегруються в мобільну ГІС QField [26]. На цьому етапі фіксуються географічні координати об'єкта з точністю GPS-позиціювання об'єктів (±1,5 метра в площині), а також заповнюється цифрова форма інвентаризації: оцінка життєвого стану рослини, діаметр стовбура, висота, наявність пошкоджень. Використання синхронізації з хмарним середовищем дає змогу декільком учасникам одночасно працювати над однією картою в режимі реального часу.

Для створення в польових умовах електронної карти місць зростання зелених насаджень використано базовий мобільний застосунок Tracklia [27], який дає змогу визначати координати кожного дерева окремо за допомогою GPS-навігації та маркувати їх відповідними номерами, додаючи похідну інформацію про кожен об'єкт інвентаризації. Щоб створити точку на карті, необхідно натиснути «+», далі «Створити маршрутну точку». Потім необхідно ввести характеристику об'єкту озеленення – рід та вид рослини, висота та діаметр стовбура дерева, оцінка життєвого стану рослини, примітки щодо санітарного стану та особливостей зростання. Отже, накопичується цифрова інформація про об'єкт зеленого господарства. Зібрана інформація про кожен об'єкт інвентаризації імпортувалась у вигляді KML-файла, який містив точну прив'язку до місцевості об'єктів та таблицю у форматі Excel з характеристиками.

Етап 4. Камеральне опрацювання та візуалізація. Завершальною ланкою ланцюга є передача даних з мобільних пристроїв до настільної ГІС для створення фінальних інвентаризаційних карт та інтерактивних баз даних для довгострокового збереження результатів та їх використання органами місцевого самоврядування. За допомогою програмного забезпечення ArcGIS [28] сформовано електронну карту зелених насаджень, що зростають у межах об'єкту інвентаризації. З електронними картами, розробленими в середовищі ArcGIS, відкривається можливість редагування шарів та атрибутивних даних, проведення просторового аналізу, створення тематичних карт. У ході інвентаризації зелених насаджень використали настільне програмне забезпечення ArcMap для побудови електронної карти, коригування атрибутивних даних кожного об'єкту озеленення, визначення меж об'єкту зеленого господарства, а також для опрацювання просторових даних щодо ступеня та якості озеленення об'єкту інвентаризації. Інструментарій настільного програмного забезпечення ArcMap дозволив візуалізувати розташування зелених насаджень та провести їх кількісний та якісний просторовий аналіз з метою надання рекомендацій з утримання об'єкту озеленення.

Етап 5. На фінальному етапі здійснено просторовий та статистичний аналіз якості озеленення проспекту Гімназичного, надано рекомендації з удосконалення стану об'єкту озеленення та зроблено висновки щодо отриманих результатів та методології виконання роботи з інвентаризації зелених насаджень з використанням мобільних ІКТ.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1. Аналіз результатів проведення інвентаризації зелених насаджень з використанням ІКТ-методики

Проспект Гімназичний у м. Кам'янському обраний як модельний об'єкт дослідження через високу концентрацію пішохідного, промислового та автотранспортного навантаження, внаслідок чого забруднення середовища зваженими та хімічними речовинами, важкими металами позначається на якісному стані зелених насаджень даної території. Зазначена проблема є типовою для промислових населених

пунктів до якої додається відсутність системного догляду за рослинами. З іншого боку, у складі зеленого господарства просп. Гімназичного наявні різновікові деревні насадження, які сформовано переважно одним родом деревних рослин – гіркокаштан звичайний, що загострює проблему якісного та ефективного озеленення цього об'єкта з урахуванням стійкості рослини до шкідників, короткого часу вегетації, екологічних та естетичних властивостей.

Загальна площа об'єкта благоустрою зеленого господарства, на якому проведено інвентаризацію зелених насаджень, складає 9,8 га (з урахуванням площі проєкцій крон дерев, проїжджої та тротуарної частини просп. Гімназичного).

Реалізація запропонованого технологічного алгоритму сприяє автоматизації процесу збирання та систематизації даних про оцінку життєвого стану зелених насаджень. Під час польових робіт (перший – третій етап) сформували цифровий реєстр, фрагмент якого представлено в Таблиці 1.

Таблиця 1

Фрагмент реєстру цифрової інвентаризації зелених насаджень (просп. Гімназичний, м. Кам'янське)

ID об'єкта	Вид рослини (лат.)	Координати (WGS84)	Висота, м	Діаметр, см	Оцінка життєвого стану рослини	Засіб ідентифікації, точність оцінки
001	*Aesculus hippocastanum* L.	48.5234, 34.6122	6	36	Задовільний	Pl@ntNet (98%)
002	*Acer platanoides* L.	48.5235, 34.6125	10	40	Хороший	Pl@ntNet (95%)
003	*Robinia pseudoacacia* L.	48.5231, 34.6128	8	25	Незадовільний	iNaturalist (експерт)
004	*Ulmus laevis* Pall.	48.5240, 34.6130	9	20	Задовільний	Pl@ntNet (91%)

Структура атрибутивних даних у Таблиці 1 розроблена з урахуванням принципів FAIR data, що корелює з концепцією платформи PLANTdataHUB, описаною в роботі Вайля (Weil) та ін. (2023) [13]. Інтеграція цих даних у застосунку QField дала змогу сформувати цілісний реєстр об'єктів інвентаризації, кожен з яких отримав унікальний ідентифікатор та прив'язку до глобальної системи координат, що було б неможливо реалізувати за аналогічний проміжок часу при використанні традиційних методів інвентаризації. На відміну від традиційних паперових відомостей, такий підхід забезпечує інтероперабельність даних та можливість їхньої подальшої інтеграції в загальноміські системи екологічного моніторингу.

Узагальнені результати польового етапу інвентаризації наведено в таблиці 2.

Аналіз результатів польового етапу дослідження (див. табл. 2) показав, що об'єкт інвентаризації характеризується відносно низьким рівнем біорізноманіття при домінуванні однієї породи – гіркокаштана звичайного (69 %). Загалом за допомогою мобільних ІКТ ідентифікували та нанесли на цифрову карту 341 одиницю деревних насаджень, що належать до 10 родів.

Важливо зазначити, що використання застосунку Pl@ntNet продемонструвало найвищу ефективність під час роботи з домінуючими видами (точність до 97 %), тоді як

для малопоширених порід потребувалась додаткова верифікація через платформу iNaturalist або залучення фахових атласів.

Отримані результати точності автоматизованої ідентифікації (середній показник 94,3 %) корелюють з даними попередніх досліджень. Зокрема дослідниками Білик (Bilyk) та ін. [9] експериментально підтверджено, що застосунок Pl@ntNet демонструє високу ефективність у використанні спеціалізованих нейронних мереж для розпізнавання ботанічних об'єктів порівняно з універсальними рішеннями, випереджаючи інструменти типу Google Lens завдяки використанню вузькоспеціалізованих алгоритмів та верифікації спільнотою. Застосування багаторівневої верифікації дало змогу виявити та виправити помилкові ідентифікації у 5 % випадків, що переважно стосувались молодих саджанців або старих пошкоджених та аварійних дерев.

Таблиця 2

Видовий склад та результати цифрової ідентифікації насаджень (n=341)

Вид рослини (українською та латиною)	**Кількість, од.**	**Частка, %**	**Метод верифікації**	**Точність AI (середня)**
Гіркокаштан звичайний (*Aesculus hippocastanum* L.)	235	69,0	Pl@ntNet + Експерт	97%
Клен звичайний (*Acer platanoides* L.)	33	9,7	Pl@ntNet + QField	94%
В'яз гладкий (*Ulmus laevis* Pall.)	31	9,1	Pl@ntNet + iNaturalist	91%
Робінія звичайна (*Robinia pseudoacacia* L.)	29	8,5	Pl@ntNet + Експерт	95%
Інші (6 родів, зокрема Липа, Береза та ін.)	13	3,7	Мануальна ідентифікація	–
УСЬОГО (10 родів)	341	100	–	сер. 94,3%

Отже, висока валідність автоматизованої ідентифікації, що підтверджує висновки Веласкес-Камачо (Velasquez-Camacho) та ін. (2021) про те, що цифрова характеристика дерев є ключовою у процесі управління міськими екосистемами, хоча вона вимагає точних наземних даних для верифікації дистанційних методів [29], обґрунтовує вибір цього інструментарію як базового для проведення інвентаризації в умовах антропогенно змінених ландшафтів міста Кам'янського.

Під час камерального опрацювання даних (четвертий етап технологічного алгоритму) розроблено паспорт об'єкта інвентаризації зеленого господарства. У паспорті наведено аналітичну оцінку результатів інвентаризації зелених насаджень, що зростають у межах об'єкту, а саме: породного, біометричного (висота, діаметр) та якісного стану дерев.

Як зазначалось вище, повний реєстр інвентаризації охоплює 341 об'єкт (10 родів), з яких найпоширеніші роди деревних рослин, як наведено на рис. 1, є: гіркокаштан звичайний – 69 %; клен звичайний – 9,7 %; в'яз гладкий – 9,1 %; робінія звичайна – 8,5 %. Інші роди дерев у межах об'єкта дослідження представлено в кількості 4 % від загальної кількості деревних рослин.

Кожен об'єкт інвентаризації інтегровано в ГІС-середовище. Детальні відомості про кожне дерево містяться в цифровій базі даних з фіксацією їх GPS позиціонування, що гарантує прозорість та верифікованість дослідження. Отже, кінцевим результатом дослідження є формування інтерактивної карти-схеми зелених насаджень проспекту Гімназичного (м. Кам'янське) у середовищі ArcGIS, фрагмент якої наведено на Рис. 1. Кожен об'єкт на карті містить повний набір атрибутивних даних (вид, вік, стан, фотофіксація), що створює підґрунтя для побудови міської системи екологічного моніторингу.

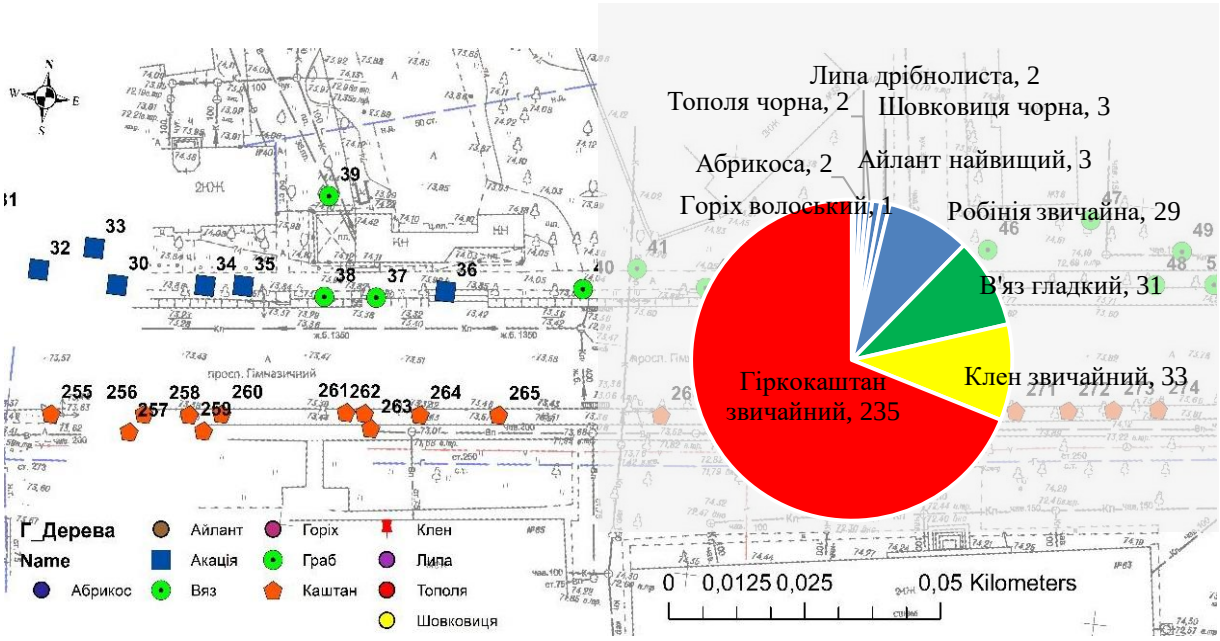


Рис. 1. Статистичний (А) та територіальний (Б) розподіл деревних рослин за родами в межах об'єкту інвентаризації просп. Гімназичного.

Відповідно до наведеної інвентаризаційної карти-схеми (див Рис. 1), переважно вздовж проїжджої частини просп. Гімназичного рядовою посадкою зростає гіркокаштан звичайний. У східній частини просп. Гімназичного з непарного боку вздовж площі 250-річчя міста виявлено клени звичайні в кількості 33 одиниць. З парного боку в західній частині просп. Гімназичного (від вул. Героїв Рятувальників до вул. Спортивної) зафіксовано в'язи гладкі в кількості 31 одиниці, а далі до мостового переходу – 29 дерев робінії звичайної. Західна частина об'єкту інвентаризації, що примикає до мостового переходу через р. Дніпро, характеризується насадженнями гіркокаштану звичайного в кількості 21 одиниця. Наявність інших родів деревних рослин є хаотичним; вони з'явилися внаслідок самосіву (тополя чорна, айлант найвищий) або через висаджування місцевими жителями таких плодових дерев, як шовковиця чорна та абрикоса, що спостерігається в межах мостового переходу та поблизу окремих прибудинкових ділянок.

Загальна кількість дерев відповідно до розподілу їх за висотою стовбурів, наведена на Рис. 2 (А). Встановлено, що переважна кількість рослин деревних форм – 43 % – мають висоту стовбура від 4 до 6 м, 27 % – від 6 до 8 м. Цими рослинами є гіркокаштан звичайний, що зростає з обох боків східної та західної сторони проспекту, як зазначено на Рис. 2 (Б). Ці дерева висаджені одночасно та мають подібні морфометричні параметри, що свідчить про однотипність умов їхнього розвитку.

Кількість дерев з висотою стовбурів до 4 м та понад 8 м наведено на Рис. 2 (А). У кожному класі знаходиться в межах 20 одиниць, що складає від 3 до 7 %. Найвищими рослинами деревних форм (16-19 м) є робінія звичайна, тополя чорна, клен звичайний та в'яз гладкий, що зростають з парного боку проспекту у наближенні до двоповерхової комунальної забудови (див. Рис. 2 (Б)).

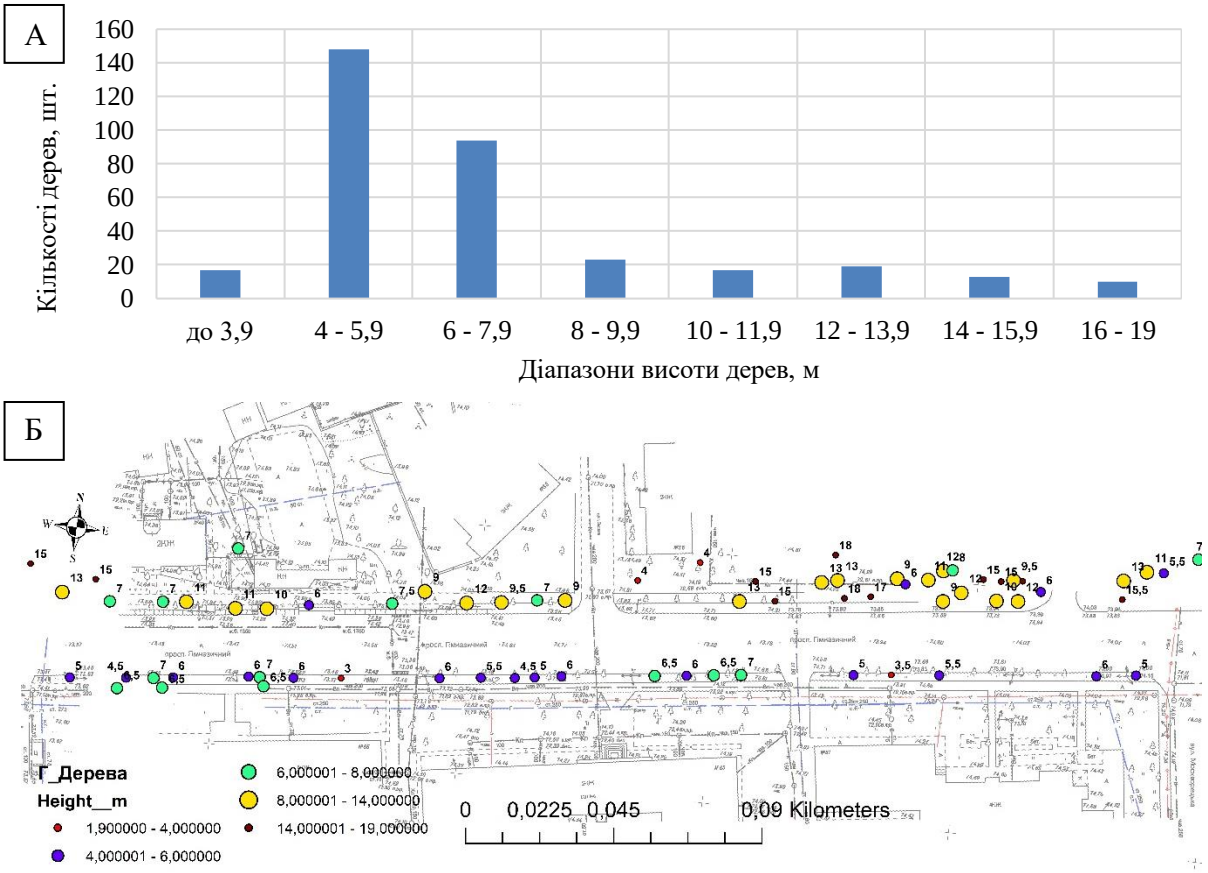


Рис. 2. Статистичний (А) та територіальний (Б) розподіл деревних рослин за висотою стовбура в межах об'єкту інвентаризації просп. Гімназичного.

Відповідно до діаметра стовбурів дерев, найпоширенішими є рослини з діаметром стовбура 22-46 см як наведено на Рис. 3 (А). До цієї групи належать гіркокаштан звичайний (див. Рис. 3 (Б)). Група рослин деревних форм з діаметром стовбура понад 50 см (50-84 см) складає понад 10 % від загальної кількості; серед них – робінія звичайна, в'яз гладкий, клен звичайний, гіркокаштан звичайний та тополя чорна. Отже, відповідно до територіального аналізу встановлено, що останні роди деревних рослин є більш віковими та розвиненими, висаджені раніше, і на їхній розвиток суттєво не впливають місцеві антропогенні умови.

За допомогою інструментарію Forest Monitoring Tools проведена оцінка життєздатності насаджень. За якісним станом дерев, що зростають на об'єкті інвентаризації (див. рис. 4), переважна кількість рослин мають добрий (45 %) та задовільний (33 %) якісний стан. З'ясовано, що 22 % обстежених дерев знаходяться в незадовільному стані, що потребує негайного втручання міських служб. Використання мобільної ГІС дасть змогу оперативно передавати координати таких об'єктів озеленення до бази даних комунальних підприємств. Незадовільним якісним станом відрізняються дерева переважно таких родів, як гіркокаштан звичайний (50 шт.), робінія звичайна (11 шт.), в'яз гладкий (13 шт.), абрикоса (1 шт.). Такі рослини поодиноко трапляються вздовж усієї проїжджої частини парної сторони просп. Гімназичного, що підтверджує мінімальний вплив місцевих антропогенних умов на зелені насадження незалежно від їхньої родової належності.

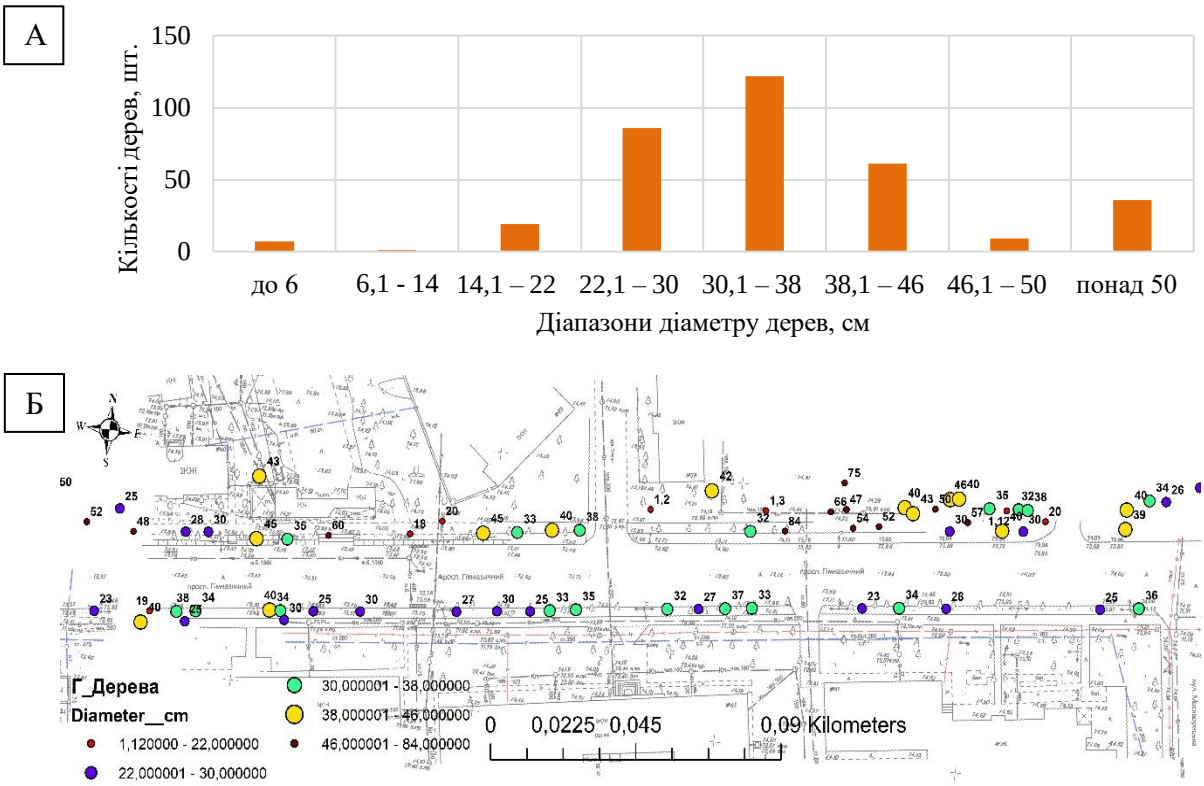


Рис. 3. Статистичний (А) та територіальний (Б) розподіл деревних рослин за діаметром стовбура в межах об'єкту інвентаризації просп. Гімназичного.

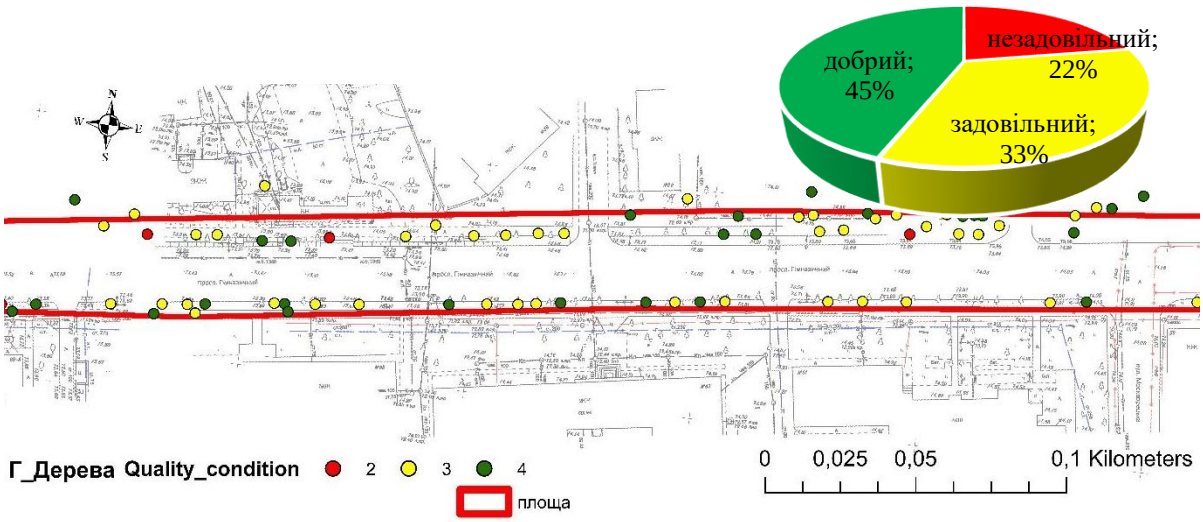


Рис. 4. Кількісний та територіальний розподіл деревних рослин відповідно до їх якісного стану в межах об'єкту інвентаризації просп. Гімназичного.

Проведений територіальній аналіз зелених насаджень об'єкту інвентаризації із застосуванням інструментів настільного програмного забезпечення ArcMap дозволив визначити з високою точністю площу озеленення шляхом розрахунку буфера навколо кожної деревної рослини в залежності від діаметра стовбуру з урахуванням висоти та якісного стану рослин. Результати окреслення розрахованих площ під деревними рослинами наведено на Рисунку 5.

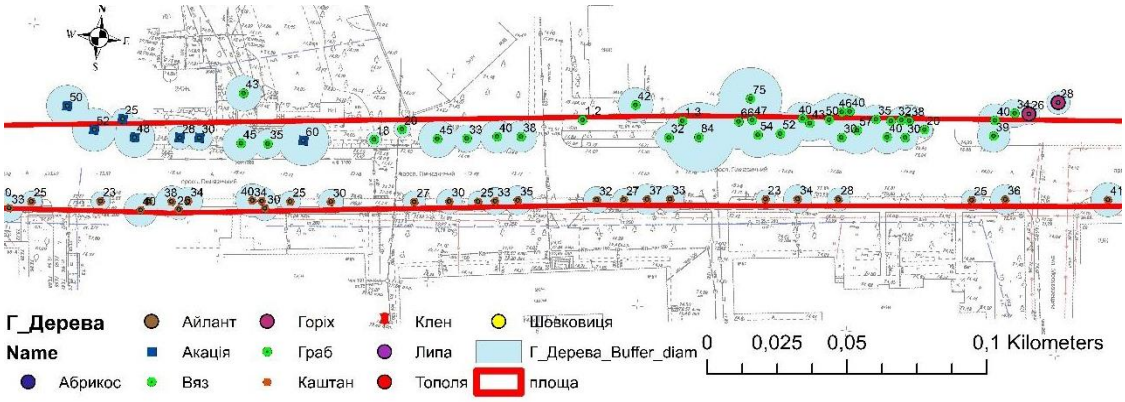


Рис. 5. Представлення площ проєкцій крон деревних рослин в межах об'єкту інвентаризації просп. Гімназичного.

Відповідно до змодельованих площ проєкцій крон кожного об'єкта інвентаризації визначена площа під зеленими насадженнями усього об'єкта озеленення – 1,14 га, що становить близько 12 % від його загальної площі, у тому числі під деревами 0,45 га (5 %). Зазначена операція сприяє чіткому встановленню кордонів об'єкта інвентаризації та подальшому відтворенні в паспорті об'єкта рослин, що розташовані в його межах. Це в подальшому дозволить балансоутримувачу зелених насаджень забезпечувати належний догляд за ними, нести відповідальність за наявні рослини та планувати необхідне додаткове озеленення в межах об'єкту зеленого господарства. Згідно з ДБН Б.2.2-12:2019, питома вага озеленених територій різного призначення в межах міст повинна становити не менше 40 % від загальної площі території забудови. Для проспектів та вулиць ДБН не встановлює єдиного відсотка озеленення для всієї вулиці, проте регламентує ширину рослинних смуг в межах червоних ліній, які відокремлюють проїжджу частину від тротуарів та забудов. Ці параметри залежать від категорії вулиці (магістральна, районна, житлова) та шумового навантаження; рекомендована ширина від 2 до 6 метрів, для забезпечення шумозахисного та екологічного ефектів. Для проспекту Гімназичного така ширина в переважній більшості наявна (див. Рис. 5), проте виявлено ділянки, де зелена смуга з деревних рослин відсутня, що потребує термінової корекції з боку балансоутримувача.

3.2. Ефективність ІКТ-методики

Оцінка ефективності впровадженої методики проводилась за критеріями часових витрат та достовірності даних. Ефективність запропонованої ІКТ-методики виявилась значно вищою порівняно з традиційними підходами до інвентаризації зелених насаджень. Використання мобільних технологій, автоматизованих інструментів розпізнавання видів, цифрових форм збору даних та геоінформаційних систем сприяє суттєвому зменшенню витрати часу на обстеження одного дерева, підвищенню точності ідентифікації рослин, зниженню кількості помилок під час вимірювань та дає змогу значно збільшити площу, яку можливо охопити за один день роботи.

Впровадження методики на основі застосунків Pl@ntNet та QField сприяло оптимізації польового етапу досліджень. Середній показник точності ідентифікації 94,3% є порівнянним із результатами, отриманими міжнародними дослідницькими групами при використанні застосунку Pl@ntNet в умовах урбанізованих ландшафтів Європи. Зокрема великий збіг результатів спостерігається у випадках розпізнавання дерев за морфологічними ознаками листя у вегетаційний період, що робить дану

методику надійним інструментом для швидкої оцінки біорізноманіття міських територій. Порівняно з відомими результатами, наше дослідження підтверджує, що спеціалізовані мобільні застосунки забезпечують вищу оперативність порівняно з універсальними сервісами [10]. Зокрема використання мобільних ГІС-застосунків (на кшталт QField) сприяє скороченню етапу камерального опрацювання даних на 50-60 % завдяки вилученню стадії ручного перенесення записів із польових щоденників. Крім того, згідно з оглядом Веласкес-Камачо (Velasquez-Camacho) та ін. (2021), поєднання наземних цифрових вимірювань із ГІС-платформами є найефективнішим способом створення актуальних дендрологічних планів у складних урбанізованих умовах, оскільки дає змогу деталізувати дані, які недоступні для аерокосмічного моніторингу [29].

Усе це свідчить про технологічну ефективність та економічну доцільність впровадження ІКТ у процес інвентаризації зелених насаджень в умовах міського середовища.

Проте під час виконання дослідження нами зафіксовано низку технологічних та методичних труднощів. Однією з основних проблем стала нестабільність інтернет-з'єднання в окремих зонах об'єкта дослідження, що обмежувало використання онлайн-функцій застосунків Pl@ntNet та iNaturalist. Ця проблема була вирішена шляхом застосування гібридного підходу: фотофіксація об'єктів здійснювалась безпосередньо на об'єкті, а ідентифікація та синхронізація з хмарним сховищем проводилися після відновлення доступу до мережі. Водночас застосунок QField продемонстрував стабільну роботу в офлайн-режимі завдяки попередньо завантаженим кешованим картам.

Іншим викликом стали помилки алгоритмів роботи штучного інтелекту, які фіксувались у 5,7 % випадків, переважно при розпізнаванні споріднених видів роду *Acer* або за умови пошкодження листкової пластини шкідниками. Для мінімізації похибок запроваджено багаторівневу верифікацію: у сумнівних випадках (менше 80 %) результати AI перевірялись через платформу iNaturalist із залученням експертної спільноти та порівняння з морфологічними описами в класичних визначниках або верифікувались фахівцями-ботаніками.

Процес навчання студентів виявив початкові труднощі в опануванні інтерфейсу мобільних ГІС, зокрема в частині управління шарами та редагування атрибутивних таблиць. Однак ці труднощі мали короткостроковий характер завдяки інтуїтивно зрозумілій ергономіці сучасних мобільних інтерфейсів.

3.3. Результати емпіричного дослідження та оцінка набутих компетентностей від запровадження ІКТ-методики до освітнього процесу

Процес інвентаризації зелених насаджень справив вагомий освітній ефект. Важливою складовою проєкту стало поєднання навчального процесу з практичною екологічною діяльністю у форматі емпіричного дослідження. Реалізація завдань виконувалась із залученням здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 101-Екологія (n=12) Дніпровського державного технічного університету (м. Кам'янське), які мали можливість поглибити свої теоретичні знання та застосувати їх під час розв'язання прикладних задач у межах дисципліни «Основи геоінформаційних систем».

Метою емпіричного дослідження було не лише виконання технічного завдання з інвентаризації зелених насаджень окремої ділянки у м. Кам'янському, а, передусім, перевірка гіпотези щодо ефективності мобільних ГІС-технологій як дієвого інструменту формування фахових компетентностей у межах підходу «навчання через дію».

Емпіричне дослідження складалось з трьох етапів: діагностичного (оцінка вхідного рівня знань), формувального (безпосередня польова робота з використанням застосунків

QField та Pl@ntNet) та підсумкового (аналіз результатів та рефлексія). Впровадження методики базувалось на зміні парадигми навчання від пасивного спостереження до активного дослідження, де здобувач освіти виступає суб'єктом наукового пошуку.

Результати оцінювання емпіричного дослідження відповідно до компетентностей Стандарту [22] та відповідних їм критеріїв самооцінки (анкетування здобувачів на початковому та завершальному етапах реалізації проєкту), проведеного за 100-бальною шкалою, наведено у Таблиці 3.

Таблиця 3

Показники набуття компетентностей здобувачами освіти (n=12, p< 0,05)

Компетентність (згідно зі стандартом ВО України)	**Показники набуття (індикатори практичної діяльності)**	**Показники самооцінки (індикатори опитувальника)**	**Самооцінка до проєкту, бали (M±SD)**	**Самооцінка після проєкту, бали (M±SD)**	**Експертна оцінка, бали (M±SD)**
К09. Здатність працювати в команді	Координація дій при декомпозиції об'єктів дослідження за ділянками	Професійна мотивація	68±5,1	92±4,2	95±5,8
К11. Здатність оцінювати та забезпечувати якість виконуваних робіт	Точність видової ідентифікації	Точність ідентифікації	56±8,4	94±3,2	94±6,1
К20. Здатність проводити екологічний моніторинг	Швидкість розв'язання прикладних завдань інвентаризації в полі	Технологічна грамотність	52±6,3	85±3,1	88±9,1
К23. Здатність до використання сучасних інформаційних ресурсів для екологічних досліджень	Навички створення цифрових шарів, атрибутивного опису об'єктів та картографування зелених насаджень. Навички верифікації даних через нейромережеві моделі	Технологічна грамотність	54±7,1	88±4,9	92±4,9

Аналіз даних таблиці свідчить про суттєву позитивну динаміку за всіма показниками. Найбільший приріст (на 69 %) спостерігається за компетентністю К23, що пояснюється переходом від теоретичного вивчення ГІС-інструментів у аудиторії до їх безпосереднього операційного використання в складних польових умовах. До початку дослідження здобувачі оцінювали свої навички роботи з геоданими як низькі, проте реальна потреба у фіксації координат кожного дерева та заповненні цифрових паспортів сформувала стійку інструментальну навичку.

Показники набуття за компетентностями К11 та К20 збільшились в середньому до 65 %, що вказує на те, що використання мобільного застосунку Pl@ntNet на базі моделі MobileNet V3 дало змогу студентам відчути себе впевненими дослідниками навіть при ідентифікації складних видів. Це вирішує ключову проблему традиційної освіти – страх

помилки при визначенні видової належності рослин. Технологія підкріплює знання з дендрології миттєвою візуальною верифікацією, що відповідає світовим стандартам «Citizen Science» [23].

Апробація методики в навчальному процесі отримала емпіричне підтвердження її ефективності. Аналіз результатів анкетування після завершення практичного етапу показав позитивну динаміку сприйняття цифрових інструментів, при цьому продемонстрував статистично значуще зростання рівня професійних компетентностей здобувачів. Зокрема зростання показника «Професійна мотивація» склало 35 % та показника «Технологічна грамотність» в середньому на 66 % (позитивні відповіді «згоден» та «повністю згоден»). Розраховане значення Т-критерію Вілкоксона ($T_{emp} = 14$ при $T_{crit} = 21$ для $n = 12$) підтверджує значущість змін на рівні $p < 0,01$.

Кореляційний аналіз виявив прямий кореляційний зв'язок між частотою використання функцій верифікації нейромережі та кінцевою точністю визначення видів ($\rho = 0,78$; $p < 0,01$). Це математично обґрунтовує, що запропонований алгоритм багаторівневої перевірки безпосередньо впливає на якість отриманих екологічних даних, а запропонована методика спрощує технічний процес інвентаризації та сприяє формуванню стійкого інтересу до використання ІКТ у майбутній фаховій діяльності. Висока кореляція між показниками «Точність ідентифікації» та фактичною точністю збору даних ($r = 0,72$) додатково підкреслює ефективність обраних мобільних додатків.

У процесі виконання роботи здобувачі освіти опанували практичні навички використання геоінформаційних систем, зокрема роботи в середовищі настільного програмного забезпечення ArcMap, засвоїли принципи використання мобільних застосунків для збору польових даних, удосконалили навички ідентифікувати види дерев і проводити оцінку їхнього стану. Такий формат навчання дозволив закріпити теоретичні знання у процесі безпосередньої практичної діяльності, що значно підвищило зацікавленість до предмету та рівень залучення до виконання практичних завдань. Порівняння отриманих результатів зі світовим досвідом дали змогу стверджувати, що запропонована методика відповідає глобальним трендам «Digital Forestry». Зокрема досвід впровадження платформи i-Tree та аналогічних проєктів у країнах ЄС свідчить про те, що залучення студентів до цифрового картографування підвищує рівень їх екологічної свідомості та готовності до ринку праці. Проте на відміну від згаданих моделей, де акцент часто зміщується на автоматизований аналіз супутникових знімків, запропонований підхід із фокусом на мобільну верифікацію безпосередньо в полі забезпечує глибше занурення здобувачів у морфологічні особливості екосистем.

Зокрема порівняно з дослідженнями Ся (Xia) (2024), де наголошується на важливості цифрових інструментів для теоретичного навчання [21], наші емпіричні дослідження демонструють перевагу саме прикладного застосування мобільних ІКТ. Отримані результати корелюють із висновками дослідників щодо використання планшетних ГІС у лісовому господарстві, де зазначається, що «цифровізація польових робіт скорочує час на камеральне опрацювання даних на 40–60 %». У нашому випадку здобувачі відзначили, що автоматична синхронізація польових даних із хмарним сховищем дала змогу уникнути рутинного переписування польових щоденників, звільнивши час для аналітичної інтерпретації результатів.

Важливим результатом проведеного емпіричного дослідження стало формування суб'єктності здобувача. Згідно з результатами анкетування, 92 % студентів вказали на те, що робота з реальними об'єктами змінила їхнє ставлення до професії еколога. Це підтверджує, що мобільні ІКТ у навчанні виконують роль не просто технічного засобу, а потужного мотиваційного інструменту, що забезпечує «занурення» у професійне середовище ще на етапі навчання та забезпечує формування високого рівня інформаційно-цифрової компетентності, що є важливим для майбутньої професійної

діяльності в умовах цифровізації галузі. Це надає можливість формувати фахівців, здатних працювати в динамічному цифровому середовищі, що є критично важливим для майбутнього відновлення довкілля України та впровадження стандартів сталого розвитку.

Окрім навчальної мети проєкт мав соціально-екологічну спрямованість. Багато хто зі здобувачів освіти висловив готовність брати участь у подібних ініціативах у майбутньому та долучатися до громадських ініціатив, пов'язаних із доглядом за міськими насадженнями, зокрема до оздоровлення зелених зон, висаджування нових дерев, а також створення електронної карти існуючих зелених насаджень за допомогою сучасних цифрових інструментів.

Такий результат підтверджує ефективність підходу service-learning, який поєднує навчання з практичною користю для громади. Завдяки цьому методу студенти не лише здобувають знання, а й відчувають свою причетність до реальних екологічних змін, що сприяє формуванню активної громадянської позиції та екологічної відповідальності. Отриманий досвід сприяв формуванню екологічної свідомості, навичок командної роботи та розуміння важливості екологічного менеджменту в умовах урбанізованого середовища.

4. ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

У результаті проведеного дослідження теоретично обґрунтовано та практично реалізовано методику інтеграції мобільних ІКТ у процес підготовки майбутніх фахівців-екологів шляхом поєднання інструментів штучного інтелекту, геоінформаційних систем та принципів відкритої науки, яка базується на створенні наскрізного цифрового єдиного інформаційного потоку від нейромережевої ідентифікації об'єктів (Pl@ntNet) до їхньої геопросторової фіксації у середовищі мобільної ГІС (QField) з наступним формуванням електронної бази даних та карт у середовищі настільної ГІС (ArcGIS). Отримані результати дозволяють сформулювати такі основні висновки:

1. Розроблена та апробована модель інвентаризації зелених насаджень, що має етапи автоматизованої ідентифікації (Pl@ntNet), точної геофіксації (Trees: Forest Monitoring Tools) та багаторівневої верифікації даних, підтвердила високу ефективність. Встановлено, що використання нейромережевих алгоритмів у поєднанні з експертним контролем сприяє досягненню точності ідентифікації деревних видів на рівні 94,3 %. Це підтверджує гіпотезу про те, що мобільні ІКТ спроможні замінити громіздкі традиційні методи польової інвентаризації, при цьому підвищуючи швидкість збору даних та мінімізацію похибок, пов'язаних із людським фактором.

2. Отримані результати емпіричного дослідження підтвердили суттєве зростання рівня фахових компетентностей здобувачів вищої освіти. У процесі реалізації проєкту студенти опанували комплекс стандартних фахових компетентностей та таких, що виходять за межі нормативної освітньої програми, а саме:

- набули досвіду роботи з професійним мобільним софтом, хмарними сервісами та інструментами точного позиціонування, що є важливим для сучасного еколога в умовах цифровізації галузі;
- навчились критично оцінювати результати роботи штучного інтелекту через впровадження системи багаторівневої верифікації (алгоритмічної, платформної та експертної), що сприяло розвитку наукового мислення та відповідальності за достовірність отриманих даних;

– закріпили таксономічні знання та навички оцінки життєздатності деревних насаджень у реальних антропогенно навантажених умовах під час безпосередньої участі в польовому етапі інвентаризації.

3. Наукова достовірність результатів емпіричного дослідження підтверджена методами математичної статистики. Аналіз результатів початкового та підсумкового контролю із застосуванням Т-критерію Вілкоксона виявив статистично значуще зростання рівня фахової підготовки ($p < 0,01$). Середній бал за технологічною грамотністю зріс із $52 \pm 6,3$ до $88 \pm 4,9$ бала. Високий коефіцієнт внутрішньої узгодженості опитувальника та позитивна динаміка мотивації (85 % респондентів) свідчать про те, що запропонована методика відповідає освітнім запитам сучасної молоді та сприяє формуванню стійкого інтересу до майбутньої професії.

4. Реалізований підхід продемонстрував можливості відкритої науки в підготовці екологів. Завантаження верифікованих даних до глобальних репозиторіїв (iNaturalist, Pl@ntNet) дало змогу студентам відчути себе частиною світової наукової спільноти, що значно підвищило їхню соціальну відповідальність. Практичним результатом дослідження став створений реєстр зелених насаджень окремої ділянки міста, який може бути використаний органами місцевого самоврядування для планування заходів з озеленення та догляду за деревами. Результати дослідження дозволяють рекомендувати інтеграцію мобільних ГІС-інструментів у навчальні плани підготовки екологів як обов'язковий елемент формування професійних компетентностей, а також пропонувати їх як бюджетну та високоефективну альтернативу дорогим пропрієтарним системам для муніципальних служб благоустрою малих та середніх міст.

Перспективи подальших досліджень полягають в автоматизації процесів прогностичного аналізу стану насаджень на основі накопичених у цифровому реєстрі даних. Подальший розвиток методики передбачає інтеграцію алгоритмів машинного навчання для моніторингу динаміки розвитку зелених зон в умовах високого антропогенного навантаження, що дозволить створити комплексну цифрову модель міського середовища для прогнозування екосистемних послуг.

ДЕКЛАРАЦІЯ ГЕНЕРАТИВНОГО ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ТА ТЕХНОЛОГІЙ НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ПРОЦЕСІ НАПИСАННЯ СТАТТІ

Під час підготовки цього рукопису автори використовували Gemini (Google, версія 1.5 Pro) з метою мовного редагування, стилістичного шліфування тексту, уточнення наукової термінології, а також для покращення ясності викладу пояснень до статистичних похибок у таблицях. Автори повністю переглянули, критично оцінили та відредагували отримані результати й несуть повну відповідальність за остаточний зміст цієї публікації.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів щодо підготовки, подання та публікації цієї статті.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] F. Ullah et al., "A scoping review of green Internet of Things in construction and smart cities: current applications, adoption strategies and future directions", *Smart Sustain. Built Environ.,* vol. 15, no. 1, pp. 294–318, 2024. doi: 10.1108/SASBE-11-2023-0349.

[2] World Health Organization, "Urban green space interventions and health: a review of impacts and effectiveness", WHO Regional Office for Europe, 2017. [Електронний ресурс]. Доступно: https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/9c952dde-1249-4a94-ae39-4e594c76e2bf/content.

[3] *Стратегія біорізноманіття ЄС до 2030 року: Повернення природи у наше життя*, пер. з англ. О. Осипенко, ред. А. Куземко та ін. Чернівці: Друк Арт, 2020. [Електронний ресурс]. Доступно: https://uncg.org.ua/wp-content/uploads/2020/10/Stratehiia.pdf.

[4] *Інструкція з інвентаризації зелених насаджень у населених пунктах України*, Наказ Держбуду України № 226 від 24 груд. 2001. [Електронний ресурс]. Доступно: http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/z0182-02.

[5] *Методичні рекомендації щодо обліку зелених насаджень у населених пунктах України*, Наказ Мінбуду України № 386 від 22 листоп. 2006. [Електронний ресурс]. Доступно: https://ips.ligazakon.net/document/fin24601.

[6] Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України, *Звіт про стан виконання у 2024 році Національного плану дій з охорони навколишнього природного середовища на період до 2025 року*. Київ, 2024. [Електронний ресурс]. Доступно: https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2025/03/Zvit-po-vykonannyu-NPD-za-2024.pdf.

[7] X. Li, L. Wang, H. Guan et al., "Urban Tree Species Classification Using UAV-Based Multispectral Images and LiDAR Point Clouds", *J. Geovis. Spat. Anal.*, vol. 8, no. 5, 2024. doi: 10.1007/s41651-023-00167-9.

[8] MIT Senseable City Lab, "Treepedia Project", 2022. [Електронний ресурс]. Доступно: https://senseable.mit.edu/treepedia/.

[9] Z. Bilyk et al., "Features of Using Mobile Applications to Identify Plants and Google Lens During the Learning Process", in *Proc. 2nd M. I. Zhaldak Symp. Adv. Educ. Technol. (AET 2021)*, vol. 1, 2021, pp. 688–705. doi: 10.5220/0012067000003431.

[10] Y. Sun, Y. Liu, G. Wang, and H. Zhang, "Deep Learning for Plant Identification in Natural Environment", *Comput. Intell. Neurosci.*, vol. 2017, art. no. 7361042, 2017. doi: 10.1155/2017/7361042.

[11] M. X. A. Truong and R. Van der Wal, "Exploring the landscape of automated species identification apps: Development, promise, and user appraisal", *BioScience*, vol. 74, no. 9, pp. 601–613, Sep. 2024. doi: 10.1093/biosci/biae077.

[12] M. M. Nowak, K. Dziób, Ł. Ludwisiak, and J. Chmiel, "Mobile GIS applications for environmental field surveys: A state of the art", *Glob. Ecol. Conserv.*, vol. 23, 2020. doi: 10.1016/j.gecco.2020.e01089.

[13] H. L. Weil et al., "PLANTdataHUB: a collaborative platform for continuous FAIR data sharing in plant research", *Plant J.*, vol. 116, no. 3, pp. 974–988, 2023. doi: 10.1111/tpj.16474.

[14] *Зелені зони міст на варті прохолоди: інвентаризація зелених насаджень як важлива передумова стійкості міста до екстремальної спеки в Україні. Аналітичний огляд*. Київ: ГО "Зелена Хвиля", 2021. [Електронний ресурс]. Доступно: https://ecoclubua.com/wp-content/uploads/Zeleni-zony-na-varti-prohlody-2021.pdf.

[15] *Моніторинг зелених насаджень міста Одеса*, 2020. [Електронний ресурс]. Доступно: https://greencity.omr.gov.ua/.

[16] G. Gagliardi et al., "IoT Monitoring of Urban Tree Ecosystem Services: Possibilities and Challenges", *Forests*, vol. 11, no. 7, art. no. 775, 2020. doi: 10.3390/f11070775.

[17] P. Holloway et al., "Smartphone GIS: exploring technological competency in active learning across geography", *J. Geogr. High. Educ.*, vol. 49, no. 3, pp. 376–397, 2025. doi: 10.1080/03098265.2024.2443908.

[18] S. G. Lytvynova, "Concepts and characteristics of cloud oriented learning environment of school", *Inf. Technol. Learn. Tools*, vol. 40, no. 2, pp. 26–41, 2014. doi: 10.33407/itlt.v40i2.970.

[19] V. Y. Bykov and M. P. Shyshkina, "The conceptual basis of the university cloud-based learning and research environment formation and development in view of the open science priorities", *Inf. Technol. Learn. Tools*, vol. 68, no. 6, pp. 1–19, 2018. doi: 10.33407/itlt.v68i6.2609.

[20] О. М. Топузов, Л. П. Вішнікіна, В. М. Самойленко та Т. С. Япринець, "Модернізація географічної освіти у вищій школі: геоінформаційні навчальні моделі", *Інформаційні технології і засоби навчання*, т. 73, № 5, с. 174–184, 2019. doi: 10.33407/itlt.v73i5.3190.

[21] X. Xia, "Enhancing Environmental Education through Digital Tools", *Int. J. New Dev. Educ.*, vol. 6, no. 9, pp. 212–216, 2024. doi: 10.25236/IJNDE.2024.060932.
[22] *Стандарт вищої освіти України: перший (бакалаврський) рівень, спеціальність 101 – Екологія*, Наказ МОН України № 1076 від 04 жовт. 2018. [Електронний ресурс]. Доступно: https://ecology.kntu.kr.ua/file/content/19817/standart-vyshchoi-osvity-za-spetsialnistyu-ekolohiia.pdf.
[23] *Pl@ntNet: Citizen Science Project*, 2024. [Online]. Available: https://identify.plantnet.org/uk.
[24] *Trees: Forest Monitoring Tools*, 2024. [Електронний ресурс]. Доступно: https://sites.google.com/view/forestmonitoringtools/home.
[25] "Searching for MobileNetV3", *PyTorch Documentation*. [Електронний ресурс]. Доступно: https://docs.pytorch.org/vision/main/models/mobilenetv3.html.
[26] *QField for QGIS*, 2024. [Online]. Available: https://qfield.org/.
[27] *Tracklia: Professional GPS Mapping for Android*, 2024. [Електронний ресурс]. Доступно: https://tracklia.app/.
[28] *ArcGIS Online*, ESRI, 2024. [Електронний ресурс]. Доступно: https://www.arcgis.com/.
[29] L. Velasquez-Camacho et al., "Remotely Sensed Tree Characterization in Urban Areas: A Review", *Remote Sens.*, vol. 13, no. 23, art. no. 4889, 2021. doi: 10.3390/rs13234889.

Матеріал надійшов до редакції 09.02.2026 р.

MOBILE ICT AND GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS IN THE PROCESS OF GREEN SPACE INVENTORY FOR DEVELOPING PROFESSIONAL COMPETENCIES OF FUTURE ENVIRONMENTAL SPECIALISTS

Natalia Neposhyvailenko
Dniprovsky State Technical University, Kamianske, Ukraine
ORCID ID 0000-0003-0759-2451
nna2013@ukr.net

Oleksandr Huba
Dniprovsky State Technical University, Kamianske, Ukraine
ORCID 0009-0004-2794-0550
gubacom03@ukr.net

Sofiia Mykhalevych
Dniprovsky State Technical University, Kamianske, Ukraine
ORCID ID 0009-0006-6606-8878
sofia.mikhalevich@gmail.com

Abstract. This article examines the issue of modernising the training of future ecologists through the implementation of mobile information and communication technologies (ICT) in the practical work of surveying urban green spaces. It is demonstrated that the use of specialised software enables the key task of automating field data collection to be resolved, contributes to improving the accuracy of taxonomic identification, and facilitates the creation of verified geospatial databases of tree vegetation.

As part of the pedagogical experiment conducted (in Kamyanske), the specific content of the students' activities was defined, which included photographing the morphological characteristics of trees, their automated recognition using the neural network algorithms of the Pl@ntNet application, precise georeferencing of coordinates via the Trees: Forest Monitoring Tools, and the compilation of digital maps of inventory objects. Particular attention was paid to the implementation of a multi-level verification algorithm (algorithmic, platform-based, expert and taxonomic), which enabled students to critically evaluate the results of artificial intelligence and minimise identification errors. The research methodology is based on a comprehensive approach combining open science methods and mathematical-statistical processing of results. The statistical significance of the growth in students' professional competencies has been demonstrated (according to Wilcoxon's T-test, $p < 0,01$).

The results of the pilot study confirmed that the use of mobile GIS ensures an identification accuracy of 94,3 % and increases students' motivation for professional activity to 85 %. The practical significance of this work lies in the development of a methodology that integrates technical solutions

with educational objectives, preparing future specialists to work in the context of the digital transformation of environmental monitoring.

Keywords: inventory of green spaces; artificial intelligence; neural networks; GIS technologies; cloud services; data verification.

REFERENCES (TRANSLATED AND TRANSLITERATED)

[1] F. Ullah et al., "A scoping review of green Internet of Things in construction and smart cities: current applications, adoption strategies and future directions", *Smart Sustain. Built Environ.*, vol. 15, no. 1, pp. 294–318, 2024. doi: 10.1108/SASBE-11-2023-0349. (in English)

[2] World Health Organization, "Urban green space interventions and health: a review of impacts and effectiveness", WHO Regional Office for Europe, 2017. [Online]. Available: https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/9c952dde-1249-4a94-ae39-4e594c76e2bf/content. (in English)

[3] *EU Biodiversity Strategy for 2030: Bringing nature back into our lives*, O. Osypenko, Trans., A. Kuzemko et al., Eds. Chernivtsi, Ukraine: Druk Art, 2020. [Online]. Available: https://uncg.org.ua/wp-content/uploads/2020/10/Stratehiia.pdf. (in Ukrainian)

[4] *Instructions for the inventory of green spaces in settlements of Ukraine*, Order of the State Construction Committee of Ukraine No. 226, Dec. 24, 2001. [Online]. Available: http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/z0182-02. (in Ukrainian)

[5] *Methodological recommendations for the accounting of green spaces in settlements of Ukraine*, Order of the Ministry of Construction of Ukraine No. 386, Nov. 22, 2006. [Online]. Available: https://ips.ligazakon.net/document/fin24601. (in Ukrainian)

[6] Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine, *Report on the status of implementation in 2024 of the National Environmental Action Plan for the period up to 2025*. Kyiv, Ukraine, 2024. [Online]. Available: https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2025/03/Zvit-po-vykonannyu-NPD-za-2024.pdf. (in Ukrainian)

[7] X. Li, L. Wang, H. Guan et al., "Urban Tree Species Classification Using UAV-Based Multispectral Images and LiDAR Point Clouds", *J. Geovis. Spat. Anal.*, vol. 8, no. 5, 2024. doi: 10.1007/s41651-023-00167-9. (in English)

[8] MIT Senseable City Lab, "Treepedia Project", 2022. [Online]. Available: https://senseable.mit.edu/treepedia/. (in English)

[9] Z. Bilyk et al., "Features of Using Mobile Applications to Identify Plants and Google Lens During the Learning Process", in *Proc. 2nd M. I. Zhaldak Symp. Adv. Educ. Technol. (AET 2021)*, vol. 1, 2021, pp. 688–705. doi: 10.5220/0012067000003431. (in English)

[10] Y. Sun, Y. Liu, G. Wang, and H. Zhang, "Deep Learning for Plant Identification in Natural Environment", *Comput. Intell. Neurosci.*, vol. 2017, art. no. 7361042, 2017. doi: 10.1155/2017/7361042. (in English)

[11] M. X. A. Truong and R. Van der Wal, "Exploring the landscape of automated species identification apps: Development, promise, and user appraisal", *BioScience*, vol. 74, no. 9, pp. 601–613, Sep. 2024. doi: 10.1093/biosci/biae077. (in English)

[12] M. M. Nowak, K. Dziób, Ł. Ludwisiak, and J. Chmiel, "Mobile GIS applications for environmental field surveys: A state of the art", *Glob. Ecol. Conserv.*, vol. 23, 2020. doi: 10.1016/j.gecco.2020.e01089. (in English)

[13] H. L. Weil et al., "PLANTdataHUB: a collaborative platform for continuous FAIR data sharing in plant research", *Plant J.*, vol. 116, no. 3, pp. 974–988, 2023. doi: 10.1111/tpj.16474. (in English)

[14] *Urban green zones guarding the coolness: inventory of green spaces as an important prerequisite for city resilience to extreme heat in Ukraine*. Kyiv, Ukraine: NGO "Zelena Khvylia", 2021. [Online]. Available: https://ecoclubua.com/wp-content/uploads/Zeleni-zony-na-varti-prohlody-2021.pdf. (in Ukrainian)

[15] *Monitoring of green spaces in the city of Odesa*, 2020. [Online]. Available: https://greencity.omr.gov.ua/. (in Ukrainian)

[16] G. Gagliardi et al., "IoT Monitoring of Urban Tree Ecosystem Services: Possibilities and Challenges", *Forests*, vol. 11, no. 7, art. no. 775, 2020. doi: 10.3390/f11070775. (in English)

[17] P. Holloway et al., "Smartphone GIS: exploring technological competency in active learning across geography", *J. Geogr. High. Educ.*, vol. 49, no. 3, pp. 376–397, 2025. doi: 10.1080/03098265.2024.2443908. (in English)

[18] S. G. Lytvynova, “Concepts and characteristics of cloud oriented learning environment of school”, *Inf. Technol. Learn. Tools*, vol. 40, no. 2, pp. 26–41, 2014. doi: 10.33407/itlt.v40i2.970. (in English)
[19] V. Y. Bykov and M. P. Shyshkina, “The conceptual basis of the university cloud-based learning and research environment formation and development in view of the open science priorities”, *Inf. Technol. Learn. Tools*, vol. 68, no. 6, pp. 1–19, 2018. doi: 10.33407/itlt.v68i6.2609. (in English)
[20] O. M. Topuzov, L. P. Vishnikina, V. M. Samoilenko, and T. S. Yaprynets, Modernization of geography education in higher school: geoinformation learning models, *Inf. Technol. Learn. Tools*, vol. 73, no. 5, pp. 174–184, 2019. doi: 10.33407/itlt.v73i5.3190. (in Ukrainian)
[21] X. Xia, “Enhancing Environmental Education through Digital Tools”, *Int. J. New Dev. Educ.*, vol. 6, no. 9, pp. 212–216, 2024. doi: 10.25236/IJNDE.2024.060932. (in English)
[22] *Higher Education Standard of Ukraine: first (Bachelor's) level, specialty 101 – Ecology*, Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine No. 1076, Oct. 04, 2018. [Online]. Available: https://ecology.kntu.kr.ua/file/content/19817/standart-vyshchoi-osvity-za-spetsialnistyu-ekolohiia.pdf. (in Ukrainian)
[23] *Pl@ntNet: Citizen Science Project*, 2024. [Online]. Available: https://identify.plantnet.org/uk. (in English)
[24] *Trees: Forest Monitoring Tools*, 2024. [Online]. Available: https://sites.google.com/view/forestmonitoringtools/home. (in English)
[25] “Searching for MobileNetV3”, *PyTorch Documentation*. [Online]. Available: https://docs.pytorch.org/vision/main/models/mobilenetv3.html. (in English)
[26] *QField for QGIS*, 2024. [Online]. Available: https://qfield.org/. (in English)
[27] *Tracklia: Professional GPS Mapping for Android*, 2024. [Online]. Available: https://tracklia.app/. (in English)
[28] *ArcGIS Online*, ESRI, 2024. [Online]. Available: https://www.arcgis.com/. (in English)
[29] L. Velasquez-Camacho et al., “Remotely Sensed Tree Characterization in Urban Areas: A Review”, *Remote Sens.*, vol. 13, no. 23, art. no. 4889, 2021. doi: 10.3390/rs13234889. (in English)

(cc) BY-NC-SA

This work is licensed under Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License.