

УДК 630*18:502.211(477)

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-4-14>

Ганна КІРЕЙЦЕВА

доктор технічних наук, доцент, професор кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка», вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, Україна, 10005

ORCID: 0000-0002-1055-1784

Світлана ХОМЕНКО

аспірантка кафедри екології та природоохоронних технологій, асистентка кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка», вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, Україна, 10005

ORCID: 0009-0002-7463-7867

Бібліографічний опис статті: Кірейцева, Г., Хоменко, С. (2025). Адаптація i-Tree Eco для оцінки депонування та секвестрації вуглецю міськими деревними насадженнями промислових зон України. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 4, 116–125, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-4-14>

АДАПТАЦІЯ I-TREE ECO ДЛЯ ОЦІНКИ ДЕПОНУВАННЯ ТА СЕКВЕСТРАЦІЇ ВУГЛЕЦЮ МІСЬКИМИ ДЕРЕВНИМИ НАСАДЖЕННЯМИ ПРОМИСЛОВИХ ЗОН УКРАЇНИ

Мета роботи. Адаптація програмного забезпечення i-Tree Eco для кількісної оцінки депонування та секвестрації вуглецю міськими деревними насадженнями промислових зон України на прикладі м. Житомира з верифікацією результатів за вітчизняними та міжнародними методиками.

Методологія. Інвентаризація 110 дерев 13 видів проводилась у червні-липні 2025 року на 15 кругових пробних ділянках відповідно до Інструкції № 226 із застосуванням обладнання Haglöf (Швеція). Моделювання секвестрації вуглецю виконано за допомогою i-Tree Eco версії 6.0.35. Для верифікації результатів проведено порівняльний аналіз з методикою оцінки фітомаси лісових насаджень та нормативами IPCC.

Наукова новизна. Вперше проведено адаптацію i-Tree Eco для оцінки екосистемних послуг міських насаджень промислових зон України з верифікацією за вітчизняною методикою Лакиди та міжнародними стандартами IPCC. На відміну від попередніх українських досліджень, які фокусувалися на паркових насадженнях у сприятливих умовах, дане дослідження охоплює території з високим техногенним навантаженням та встановлює коефіцієнти корекції для основних деревних видів промислових зон.

Висновки. Загальний вуглецевий резервуар становить 21,4 т С (78,5 т CO₂-екв.) при середньому показнику 194,5 кг С/дерево. Валова щорічна секвестрація – 625 кг С/рік (2,29 т CO₂/рік). Порівняльний аналіз показав середнє відхилення +8,6 % та +12,2 %, що знаходиться в межах допустимої методичної похибки (±10–15 %). Встановлено високу концентрацію вуглецевого запасу у двох видів: акація біла та верба плакуча акумулюють 62,6 % загального запасу при чисельності 27,3 %. Доведено коректність застосування i-Tree Eco для українських умов за дотримання належної ідентифікації видів та точності польових вимірювань. Результати можуть використовуватись для розробки стратегій управління міськими лісами та інтеграції екосистемних послуг у систему вуглецевого обліку України.

Ключові слова: секвестрація вуглецю, депонування вуглецю, i-Tree Eco, міські зелені насадження, екосистемні послуги, промислова зона, алометричне моделювання.

Hanna KIREITSEVA

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at the Department of Ecology and Environmental Technologies, Zhytomyr Polytechnic State University, 103 Chudnivska str., Zhytomyr, 10005, Ukraine, gef_kgv@ztu.edu.ua

ORCID: 0000-0002-1055-1784Retry

Svitlana KHOMENKO

Postgraduate Student at the Department of Ecology and Environmental Technologies, Assistant at the Department of Ecology and Environmental Technologies, Zhytomyr Polytechnic State University, 103 Chudnivska str., Zhytomyr, 10005, Ukraine, org_hsv@ztu.edu.ua

ORCID: 0009-0002-7463-7867

To cite this article: Kireitseva, H., Khomenko, S. (2021). Adaptatsiia i-Tree Eco dlia otsinky deponuvannia ta sekvestratsii vuhletsiu miskymy derevnymy nasadzhenniamy promyslovykh zon Ukrainy [Adaptation of i-Tree Eco for assessing carbon storage and sequestration by urban tree stands in industrial zones of Ukraine]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 4, 116–125, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-4-14>

ADAPTATION OF I-TREE ECO FOR ASSESSING CARBON STORAGE AND SEQUESTRATION BY URBAN TREE STANDS IN INDUSTRIAL ZONES OF UKRAINE

Aim of the work. Adaptation of i-Tree Eco software for quantitative assessment of carbon storage and sequestration by urban tree stands in industrial zones of Ukraine using Zhytomyr as a case study, with verification of results using national and international methodologies.

Methodology. An inventory of 110 trees representing 13 species was conducted in June–July 2025 across 15 circular sample plots in accordance with Instruction No. 226 using Haglöf equipment (Sweden). Carbon sequestration modeling was performed using i-Tree Eco version 6.0.35. Results were verified through comparative analysis with the forest phytomass assessment methodology and IPCC.

Scientific novelty. This is the first adaptation of i-Tree Eco for assessing ecosystem services of urban plantations in Ukrainian industrial zones with verification using Lakyda's national methodology and IPCC international standards. Unlike previous Ukrainian studies that focused on park plantations under favorable conditions, this research covers areas with high technogenic pressure and establishes correction coefficients for major tree species in industrial zones.

Conclusions. Total carbon storage amounts to 21.4 t C (78.5 t CO₂-eq.) with an average of 194.5 kg C per tree. Gross annual sequestration is 625 kg C/year (2.29 t CO₂/year). Comparative analysis showed average deviations of +8.6 % and +12.2 %, falling within acceptable methodological error (±10–15 %). High concentration of carbon storage was identified in two species: black locust and weeping willow accumulate 62.6 % of total storage while representing only 27.3 % of the population. The validity of i-Tree Eco application for Ukrainian conditions was confirmed when proper species identification and accurate field measurements are maintained. Results can be used for developing urban forest management strategies and integrating ecosystem services into Ukraine's carbon accounting system.

Keywords: carbon sequestration, carbon storage, i-Tree Eco, urban tree stands, ecosystem services, industrial zone, allometric modeling.

Актуальність проблеми. У контексті глобальних кліматичних змін та виконання зобов'язань за Паризькою угодою та імплементації Європейського зеленого курсу, Україна потребує стандартизованих методів оцінки екосистемних послуг міських зелених насаджень (Moraes et al.; 2024; United Nations, 2018). Міські деревні насадження здатні поглинати атмосферний CO₂ у процесі фотосинтезу та акумулювати його у біомасі протягом десятиліть, що робить їх ключовим інструментом

регулювання вуглецевого балансу урбанізованих територій (Beckett et al., 2002; Nowak et al., 2013). Слід розрізняти депонування вуглецю (carbon storage) – накопичений запас у біомасі (т С), та секвестрацію (carbon sequestration) – щорічне поглинання CO₂ (кгС/рік) (Nowak, Crane, 2002; IPCC, 2019). Кількісна оцінка обох показників є необхідною для інтеграції екосистемних послуг у систему вуглецевого обліку та розробки стратегій управління міським озелененням.

У світовій практиці застосовуються різні підходи до оцінки екосистемних послуг міських насаджень: дистанційні методи на основі LiDAR та супутникових знімків, ГІС-моделювання (CITYgreen, InVEST) та польові методи з алометричним моделюванням (i-Tree Eco) (Doick et al., 2017; Baró et al., 2014; USDA Forest Service, 2020). Однак в Україні досі відсутні науково обґрунтовані методики кількісної оцінки екосистемних послуг міських лісів, що відповідають сучасним міжнародним стандартам. Програмне забезпечення i-Tree Eco, розроблене Лісовою службою США, є визнаним світовим інструментом для інвентаризації та оцінки екосистемних послуг урбанізованих лісів, проте його пряме застосування в українських умовах обмежене відмінностями у видовому складі деревостанів, кліматичних параметрах та специфіці промислового забруднення. Хоча українські науковці (Bidolakh et al., 2023; Bidolakh, Kolesnichenko, 2023; Bondar et al., 2023) вже апробували i-Tree Eco для оцінки екосистемних послуг паркових насаджень, застосування цього інструменту для територій з високим техногенним навантаженням досі не проводилось. Адаптація i-Tree Eco для українських урбофітоценозів дозволить отримати достовірні дані про обсяги депонованого вуглецю та сприятиме виконанню міжнародних кліматичних зобов'язань України.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Для оцінки стану наукових досліджень у цій галузі було проведено бібліометричний аналіз публікацій за період 2020–2025 років у базі даних Scopus за ключовими словами «sequestration, climate change, trees» з використанням

програмного забезпечення VOSviewer версії 1.6.20. Аналіз масиву з 2015 наукових публікацій виявив стійку тенденцію до зростання дослідницького інтересу: кількість публікацій зросла від 187 у 2020 році до 457 у 2025 році. Особливо значущим є стрибок у 2024 році (444 публікації, зростання на 29 % порівняно з 2023 роком), що корелює з посиленням міжнародних зусиль щодо досягнення цілей Паризької угоди (рис. 1).

Аналіз ключових термінів дозволив виявити основні тематичні кластери сучасних досліджень (рис. 2). Центральним поняттям є «carbon sequestration», навколо якого сформовано декілька взаємопов'язаних напрямків: управління лісовими та міськими насадженнями (forest management, urban forestry, reforestation), агролісомеліоративні системи (agroforestry systems) та екосистемні послуги міських територій.

Фундаментальний внесок у розвиток методології оцінки екосистемних послуг міських лісів зробив David J. Nowak, дослідження якого 2002–2013 років встановили базові підходи до квантифікації секвестрації вуглецю міськими деревостанами (Nowak, Crane, 2002; Nowak et al., 2013). Kieron J. Doick та Madalena Vaz Monteiro адаптували методологію i-Tree Eco для європейських міст, провівши оцінку міських лісів у 12 містах Великобританії (Doick et al., 2017). Fredrik Baró та Jaume Terradas продемонстрували практичне застосування i-Tree Eco на прикладі Барселони, оцінивши економічну вартість екосистемних послуг: очищення повітря – \$2,38 млн/рік, секвестрація вуглецю – \$407 тис./рік (Baró et al., 2014).

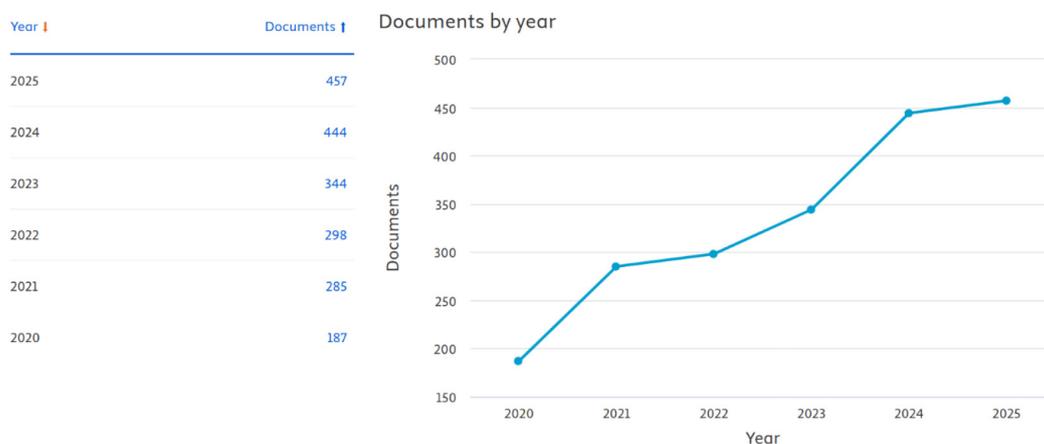


Рис. 1. Динаміка кількості наукових публікацій за ключовими словами «sequestration, climate change, trees» за 2020–2025 роки (база даних Scopus)

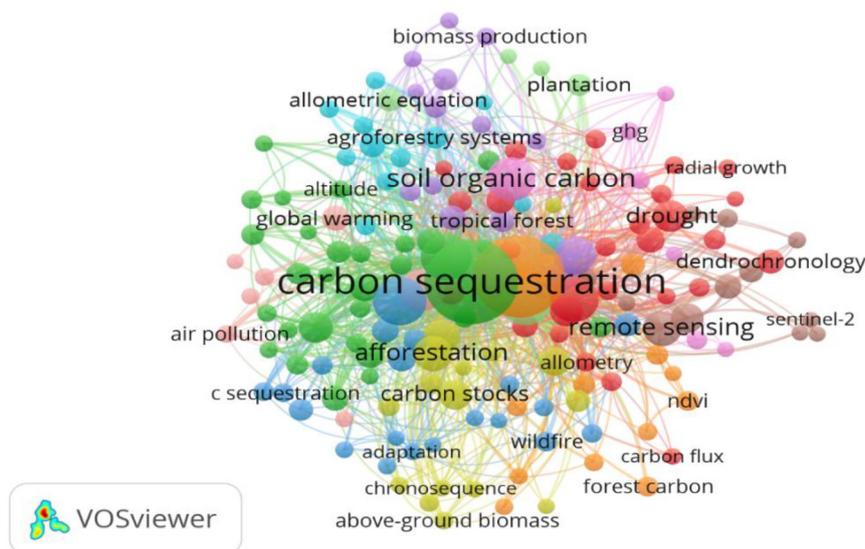


Рис. 2. Кластеризація ключових слів за тематикою «sequestration, climate change, trees» (VOSviewer)

Серед українських науковців, які використовували цю модель, є О. Бондар, Ю. Мельник, Л. Бициура, О. І. Дух, О. Ярема, Д. Бідолах, П. Лакида, В. Миронюк, Ю. Гайда та С. Підховна (Bidolakh et al., 2023; Bidolakh, Kolesnichenko, 2023; Bondar et al., 2023). Їхні роботи демонструють можливості моделі для аналізу та управління міськими зеленими насадженнями в Україні. Водночас питання секвестрації вуглецю міськими насадженнями промислових зон України, де техногенне навантаження суттєво впливає на продуктивність дерев залишається невивченим.

Отже, бібліометричний аналіз демонструє, що проблематика оцінки секвестрації та депонування вуглецю міськими зеленими насадженнями перебуває у фокусі активних досліджень, що створює методологічне підґрунтя для комплексної оцінки функцій міських деревостанів.

Мета дослідження: обґрунтування методичних підходів до адаптації моделі i-Tree Eco для оцінки депонування та секвестрації вуглецю міськими зеленими насадженнями України на прикладі промислової зони м. Житомира.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для досягнення поставленої мети було обрано програмний комплекс i-Tree Eco (версія 6.0.35). Модель базується на принципах алометричного моделювання, використовуючи емпіричні рівняння, які пов'язують легко вимірювані параметри дерев (діаметр, висота, вік) з їхньою біомасою та здатністю надавати екосистемні послуги. База алометричних рівнянь i-Tree Eco

включає понад 600 видів дерев, у тому числі поширені європейські види.

Дослідження проводилося у червні – липні 2025 року у промисловій зоні м. Житомира, розташованій у північно-східній частині міста. Територія представляє типовий приклад промислової зони середнього українського міста з концентрацією виробничих об'єктів, транспортних магістралей та техногенно порушених ґрунтів. Було закладено 15 кругових пробних у межах трьох стратів: 1) території промислових підприємств (5 ділянок); 2) захисні зелені смуги вздовж транспортних магістралей (5 ділянок); 3) невикористовувані техногенні ділянки (5 ділянок). Ділянки були розподілені по території з урахуванням репрезентативності різних типів міських насаджень: масивні насадження, лінійні придорожні посадки, локальні острівні насадження на територіях СЗЗ підприємств.

Інвентаризація зелених насаджень здійснювалась відповідно до Інструкції з інвентаризації зелених насаджень у населених пунктах України (Наказ Державного комітету будівництва, архітектури та житлової політики України від 24.12.2001 № 226). На кожній пробній ділянці проводився облік дерев з діаметром стовбура ≥ 5 см на висоті 1,3 м від кореневої шийки. Виміри здійснювались із використанням обладнання Haglöf (Швеція): діаметр стовбурів вимірювався мірною вилкою Mantax Blue (точність ± 1 мм), висота дерев – електронним висотоміром Vertex IV (точність $\pm 0,1$ м), вік модельних дерев визначався за допомогою бура Преслера

через підрахунок річних кілець на кернях деревини. Для кожного дерева фіксувались: вид (за морфологічними ознаками), діаметр на висоті 1,3 м, загальна висота, вік та якісний стан згідно з тричленною шкалою (добрий, задовільний, незадовільний) відповідно до критеріїв Інструкції № 226.

Для верифікації результатів i-Tree Eco було проведено паралельні розрахунки за методикою оцінки фітомаси лісових насаджень (Лакида, 2002) для 10 модельних дерев, які репрезентують основні види та вікові групи. Методика базується на конверсійних коефіцієнтах для перерахунку об'єму стовбурової деревини у загальну надземну біомасу. Об'єм стовбура визначався за формулою (1):

$$V = \pi \times DBH^2 \times H \times f, \quad (1)$$

де f – видовий коефіцієнт форми стовбура (0,45–0,48 для листяних, 0,42–0,45 для хвойних згідно з довідниками для лісів України).

Таблиця 1

**Видовий склад та репрезентативність
деревних насаджень промислової зони
м. Житомира**

№	Назва виду	Кількість, екз.	Частка, %
1	Береза повисла (<i>Betula pendula</i> Roth)	20	18,2
2	Тополя біла (<i>Populus alba</i> L.)	15	13,6
3	Верба плакуча (<i>Salix babylonica</i>)	15	13,6
4	Акація біла (<i>Robinia pseudoacacia</i> L.)	15	13,6
5	Сосна звичайна (<i>Pinus sylvestris</i> L.)	10	9,1
6	Клен гостролистий (<i>Acer platanoides</i> L.)	6	5,5
7	Тополя канадська (<i>Populus deltoides</i> W.Bartram ex Marshall)	5	4,5
8	Липа дрібнолиста (<i>Tilia cordata</i> Mill.)	5	4,5
9	Дуб звичайний (<i>Quercus robur</i> L.)	5	4,5
10	Каштан кінський (<i>Aesculus hippocastanum</i> L.)	5	4,5
11	Липа широколиста (<i>Tilia platyphyllos</i> Scop.)	4	3,6
12	Горобина звичайна (<i>Sorbus aucuparia</i> L.)	3	2,7
13	Бузок звичайний (<i>Syringa vulgaris</i> L.)	2	1,8
Разом		110	100,0

Загальна надземна біомаса розраховувалась за формулою (2):

$$B = V \times \rho \times BEF, \quad (2)$$

де ρ – базисна щільність деревини (т/м³) за даними Лакиди (2002), BEF – коефіцієнт розширення біомаси.

За результатами інвентаризації на 15 пробних ділянках промислової зони м. Житомира було обліковано 110 дерев. Дендрофлора дослідної території представлена 13 видами деревних рослин, які належать до 11 родів та 8 родин. Таксономічна структура характеризується переважанням покритонасінних (Magnoliophyta) – 109 дерев (99,1 %) над голонасінними (Pinophyta) – 11 дерев (10,0 %). Серед покритонасінних домінує клас Дводольні (Magnoliopsida) з найбільшою представленістю родини Бобові (Fabaceae) – 15 дерев (13,6 %) та Вербові (Salicaceae) – 20 дерев (18,2 %) (табл. 1).

Аналіз видової структури виявив чітке домінування чотирьох видів, які сумарно формують 59,1 % деревостану: береза повисла (*Betula pendula* Roth), тополя біла (*Populus alba* L.), верба плакуча (*Salix babylonica*), акація біла (*Robinia pseudoacacia* L.).

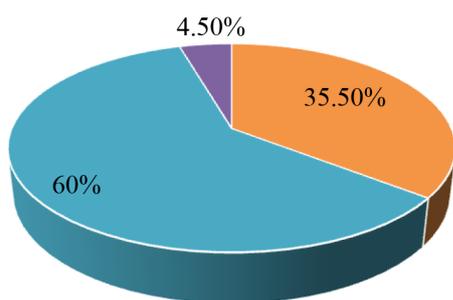
Аналізуючи вікову структуру насаджень варто зазначити, що деревостан промислової зони м. Житомира представлений усіма віковими категоріями (табл. 2).

Середній вік облікованих дерев становить $40,1 \pm 23,8$ років, що вказує на приблизно нормальний розподіл вікових показників. Молодняки становлять 28,2 %, середньовікові насадження – 26,4 %, пристигаючі – 28,2 %, стиглі та перестійні – 17,2 %. Отже, вікова структура характеризується приблизно рівною представленістю молодняків, середньовікових та пристигаючих насаджень, що є сприятливим для забезпечення безперервності надання екосистемних послуг.

Санітарний стан зелених насаджень є критичним показником їхньої здатності надавати екосистемні послуги, включаючи секвестрацію вуглецю. За результатами візуальної оцінки згідно з Інструкцією № 226, більшість дерев (60,0 %) перебувають у задовільному стані (Fair), що свідчить про помірне ослаблення життєвості внаслідок несприятливих умов промислового середовища (рис. 3).

Розподіл дерев за віковими групами

Вікова група	Діапазон віку, років	Кількість, екз.	Частка, %	Середній вік, років	Середній DBH, см
Молодняки	5–20	31	28,2	13,5 ± 4,6	6,7 ± 3,4
Середньовікові	21–50 (листяні) 21–60 (хвойні)	29	26,4	30,9 ± 7,1	19,3 ± 14,0
Пристигаючі	41–60 (листяні) 61–80 (хвойні)	31	28,2	53,0 ± 8,7	23,5 ± 16,9
Стигли і перестійні	>60 (листяні) >80 (хвойні)	19	17,2	76,2 ± 13,2	36,7 ± 13,7
Разом	5–100	110	100,0	40,1 ± 23,8	19,9 ± 16,3



- Добрий
- Задовільний
- Незадовільний

Рис. 3 Розподіл дерев промислової зони м. Житомира за категоріями санітарного стану

Отже, аналізуючи дані діаграми можна зробити висновок, про те, що загалом 95,5 % дерев перебувають у доброму або задовільному стані, що є важливою передумовою для ефективного надання екосистемних послуг, оскільки у методології i-Tree Eco санітарний стан дерева

безпосередньо впливає на розрахунки через коригувальні коефіцієнти, що враховують зниження фізіологічної активності ослаблених дерев.

Зібрані польові дані імпортувалися в програмний комплекс i-Tree Eco (версія 6.0.35). За результатами моделювання i-Tree Eco v.6.0.35, загальний запас вуглецю, акумульований у надземній та підземній біомасі 110 облікованих дерев промислової зони м. Житомира, становить 21,4 т С (метричних тонн чистого вуглецю), що еквівалентно 78,5 т CO₂. Середній показник акумуляції вуглецю на одне дерево складає 194,5 кг С (табл. 3). Модель i-Tree Eco розподіляє вуглецевий запас між компонентами: стовбур (50–65 %), гілки (15–25 %), коріння (15–25 %), листя (2–5 %). Стовбур та коріння представляють довгостроковий вуглецевий резервуар з періодом обороту в десятки-сотні років.

Валовий запас вуглецю у біомасі дерев промислової зони м. Житомира за видами

Вид	Кількість, шт.	Запас С, т	Частка, %	Еквівалент CO ₂ , т	Середній запас на дерево, кг С
Акація біла (<i>Robinia pseudoacacia</i>)	15	6,7	31,5	24,7	446,7
Верба плакуча (<i>Salix babylonica</i>)	15	6,7	31,3	24,6	446,7
Береза повисла (<i>Betula pendula</i>)	20	2,6	12,2	9,6	130,0
Сосна звичайна (<i>Pinus sylvestris</i>)	10	2,3	10,6	8,3	230,0
Тополя біла (<i>Populus alba</i>)	15	1,2	5,4	4,3	80,0
Дуб звичайний (<i>Quercus robur</i>)	5	0,8	3,5	2,8	160,0
Каштан кінський (<i>Aesculus hippocastanum</i>)	5	0,5	2,5	1,9	100,0
Клен гостролистий (<i>Acer platanoides</i>)	6	0,2	0,7	0,6	33,3
Тополя канадська (<i>Populus deltoides</i>)	5	0,2	0,9	0,7	40,0
Липа широколиста (<i>Tilia platyphyllos</i>)	4	0,1	0,7	0,5	25,0
Липа дрібнолиста (<i>Tilia cordata</i>)	5	0,1	0,4	0,3	20,0
Інші види*	5	0,0	0,2	0,2	4,0
Разом	110	21,4	100,0	78,5	194,5

Примітка: * Інші види включають Горобина звичайна (*Sorbus aucuparia*) та Бузок звичайний (*Syringa vulgaris*).

Аналізуючи дані таблиці можна зробити висновок, що Акація біла (*Robinia pseudoacacia*) та верба плакуча (*Salix babylonica*) демонструють найвищий середній запас (по 446,7 кг С/дерево) завдяки наявності старовікових екземплярів великого розміру. Зокрема, одна верба віком 60 років з діаметром 104,42 см акумулює 16–19 % від загального запасу деревостану. Сосна звичайна (*Pinus sylvestris*) демонструє середній запас 230 кг С/дерево. Береза повисла (*Betula pendula*), незважаючи на найвищу чисельність (20 екземплярів), має помірний середній запас 130 кг С/дерево через переважання молодих екземплярів, проте її загальний внесок є третім за величиною (2,6 т С, 12,2 %).

Депонований запас 21,4 т С (78,5 т CO₂) представляє суттєвий внесок у пом'якшення змін клімату. Для порівняння масштабів: цей обсяг еквівалентний річним викидам 17 легкових автомобілів (4,6 т CO₂/рік), спалюванню 29 т вугілля або 23 т бензину.

Крім валового запасу вуглецю у біомасі дерев була обрахована також валова щорічна секвестрація вуглецю деревостаном (табл. 4).

Аналізуючи дані таблиці можна зробити висновок, що акація біла (*Robinia pseudoacacia*) демонструє найвищу секвестрацію (186 кг С/рік, 29,8 %) завдяки активному росту дерев середнього віку, високій щільності деревини (710 кг/м³) та швидким темпам радіального приросту. Береза повисла (*Betula pendula*)

забезпечує другий за величиною внесок (121 кг С/рік, 19,4 %), проте середня секвестрація на дерево є помірною (6,1 кг С/рік) через переважання молодих екземплярів, які потенційно можуть збільшити темпи секвестрації у наступні 10–15 років.

Враховуючи, що алометричні рівняння i-Tree Eco розроблялись для інших кліматичних і екологічних умов, з метою встановлення достовірності результатів в умовах промислової зони України було проведено верифікацію даних шляхом порівняння з розрахунками за вітчизняною методикою Лакиди для репрезентативної вибірки модельних дерев. Додатково було проведено порівняння з узагальненими значеннями IPCC Guidelines (2019) для помірної кліматичної зони Європи. IPCC розробила стандартизовані методи оцінки біомаси та вуглецю для національних інвентаризацій парникових газів, які використовуються понад 190 країнами світу для звітності перед UNFCCC (Рамковою конвенцією ООН про зміну клімату).

Результати порівняльного аналізу представлено в таблиці 5.

Порівняльний аналіз результатів i-Tree Eco з традиційною методикою оцінки фітомаси (Лакида, 2002) для 10 модельних дерев показав середнє відхилення +8,6 %, що знаходиться в межах допустимої методичної похибки алометричних моделей (±10–15 %). Для 80 % досліджених видів (*Betula pendula*, *Robinia pseudoacacia*,

Таблиця 4

Валова щорічна секвестрація вуглецю деревами промислової зони м. Житомира за видами

Вид	Кількість, шт.	Секвестрація, кг С/рік	Частка, %	Еквівалент CO ₂ , т/рік	Середня секвестрація на дерево, кг С/рік
Акація біла (<i>Robinia pseudoacacia</i>)	15	186	29,8	0,68	12,4
Верба плакуча (<i>Salix babylonica</i>)	15	70	11,2	0,26	4,7
Береза повисла (<i>Betula pendula</i>)	20	121	19,4	0,44	6,1
Сосна звичайна (<i>Pinus sylvestris</i>)	10	68	10,8	0,25	6,8
Тополя біла (<i>Populus alba</i>)	15	73	11,6	0,27	4,8
Дуб звичайний (<i>Quercus robur</i>)	5	32	5,1	0,12	6,4
Каштан кінський (<i>Aesculus hippocastanum</i>)	5	22	3,5	0,08	4,4
Клен гостролистий (<i>Acer platanoides</i>)	6	17	2,7	0,06	2,8
Тополя канадська (<i>Populus deltoides</i>)	5	12	2,0	0,05	2,5
Липа широколиста (<i>Tilia platyphyllos</i>)	4	11	1,7	0,04	2,6
Липа дрібнолиста (<i>Tilia cordata</i>)	5	6	1,0	0,02	1,3
Інші види*	5	7	1,1	0,02	1,4
Разом	110	625	100,0	2,29	5,68

Примітка: * Інші види включають Горобина звичайна (*Sorbus aucuparia*) та Бузок звичайний (*Syringa vulgaris*).

Порівняльний аналіз оцінок надземної біомаси різними методами

Вид	<i>n</i>	<i>i</i> -Tree Eco (кг С)	Лакида (2002) (кг С)	IPCC (2019) (кг С)	Δ <i>i</i> -Tree/Лакида (%)
<i>Robinia pseudoacacia</i>	15	446,7	412,3	389,1	+8,4
<i>Betula pendula</i>	20	150,5	138,2	144,7	+8,9
<i>Pinus sylvestris</i>	11	230,0	248,5	265,3	-7,5
<i>Populus spp.</i>	18	193,3	175,8	167,2	+9,9
<i>Salix babylonica</i>	2	446,7	401,8	378,6	+11,2
Середнє зважене	110	194,5	179,6	173,4	+8,6

Populus spp., *Salix babylonica*) відхилення не перевищувало $\pm 10\%$, що підтверджує біологічну адекватність моделі для масових видів міських насаджень України. Виняток становить *Pinus sylvestris* з відхиленням $-7,5\%$, що пояснюється видоспецифічними особливостями архітектури крони європейської сосни порівняно з північноамериканськими аналогами.

Порівняння з узагальненими нормативами IPCC Guidelines (2019) виявило середнє відхилення $+12,2\%$, що є методологічно обґрунтованим з огляду на різні цілі застосування: IPCC орієнтована на консервативну оцінку для міжнародної звітності на національному рівні (Tier 1 approach), тоді як *i*-Tree Eco призначена для детальної оцінки локальних міських насаджень з урахуванням видової специфіки, вікової структури та індивідуальних параметрів дерев. Той факт, що результати *i*-Tree Eco знаходяться між оцінками за Лакидою (найближчі) та консервативними значеннями IPCC (найнижчі), свідчить про високий ступінь надійності отриманих даних.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Проведене дослідження довело можливість успішної адаптації моделі *i*-Tree Eco для оцінки депонування вуглецю міськими зеленими насадженнями України. Порівняльний аналіз результатів із вітчизняною методикою Лакиди (відхилення $+8,6\%$) та нормативами IPCC Guidelines (відхилення $+12,2\%$) підтвердив біологічну адекватність моделі, оскільки обидва показники знаходяться в межах допустимої методичної похибки алометричних моделей. Для 80% досліджених видів відхилення не

перевищувало $\pm 10\%$, що свідчить про коректність застосування північноамериканських алометричних рівнянь для європейських видів за умови належної ідентифікації та точності польових вимірювань.

Апробація методики на прикладі промислової зони м. Житомира показала, що деревостан із 110 дерев 13 видів акумулює 21,4 т вуглецю (78,5 т CO₂-еквіваленту) із середнім показником 194,5 кг С на дерево, а щорічна секвестрація становить 625 кг С/рік. Ці показники узгоджуються з міжнародними даними для міських насаджень помірної кліматичної зони та підтверджують значущу роль зелених насаджень промислових територій у регулюванні вуглецевого балансу урбанізованих екосистем.

Виявлена висока концентрація вуглецевого запасу у старовікових екземплярах – акація біла та верба плауча акумулюють 62,6 % загального запасу при чисельності лише 27,3 % – має важливе практичне значення для формування стратегій управління міським озелененням. З точки зору кліматичної політики, пріоритетом має бути максимальне продовження життя існуючих дерев, оскільки видалення одного столітнього екземпляра еквівалентне втраті вуглецевого запасу кількох молодих дерев.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розширенням географії апробації моделі на інші кліматичні зони України, розробкою регіональних поправочних коефіцієнтів для основних видів міських насаджень та створенням національної бази даних екосистемних послуг урбанізованих територій.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Інструкція з інвентаризації зелених насаджень у населених пунктах України: Наказ Державного комітету будівництва, архітектури та житлової політики України від 24.12.2001 № 226. *Офіційний вісник України*. 2002. № 9. С. 441.
2. Лакида П. І. Фітомаса лісів України: монографія. Тернопіль: Збруч, 2002. 256 с.
3. Національний кадастр антропогенних викидів із джерел та абсорбції поглиначами парникових газів в Україні за 1990–2021 роки. Київ : Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України, 2023. 512 с. URL: <https://mepr.gov.ua/news/38887.html>
4. 68 % of the world population projected to live in urban areas by 2050, says UN. *United Nations, Department of Economic and Social Affairs*. 2018. URL: <https://www.un.org/development/desa/en/news/population/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html> (дата звернення: 15.10.2025).
5. Baró F., Chaparro L., Gómez-Baggethun E., Langemeyer J., Nowak D. J., Terradas J. Contribution of ecosystem services to air quality and climate change mitigation policies: the case of urban forests in Barcelona, Spain. *Ambio*. 2014. Vol. 43, No. 4. P. 466–479. DOI: 10.1007/s13280-014-0507-x
6. Beckett K. P., Freer-Smith P. H., Taylor G. Urban woodlands: their role in reducing the effects of particulate pollution. *Environmental Pollution*. 2002. Vol. 99, No. 3. P. 347–360. DOI: 10.1016/S0269-7491(01)00214-7
7. Bidolakh D., Kolesnichenko O. Assessment of ecosystem functions of public green spaces in the city of Berezhany, Ternopil region. *Scientific Horizons*. 2023. Vol. 26, No. 8. P. 96–106. DOI: 10.48077/scihor8.2023.96
8. Bidolakh D., Lakyda P., Myroniuk V., Hayda Y., Pidkhovna S. Assessment and representation of Urban Trees Ecosystem Services: a case study in Pryzhamkovi park. *Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry*. 2023. Vol. 65, No. 2. P. 104–116. DOI: 10.2478/ffp-2023-0011
9. Bondar O., Melnyk Y., Bytsiura L., Dukh O., Yarema O., Faifura V. Assessment of ecosystem services of green spaces in the T. Shevchenko Park of Culture and Recreation (Kremenets) using the i-Tree Eco. *Ukrainian Journal of Natural Sciences*. 2023. Vol. 3, No. 5. P. 89–100. DOI: 10.32782/naturaljournal.5.2023.12
10. Doick K. J., Vaz Monteiro M., Morison J. I. L., Hutchings T. R. The state of Britain’s urban forests: results from the i-Tree Eco surveys in twelve British cities. *Forestry Commission Research Report*. 2017. 56 p.
11. i-Tree Eco User’s Manual v.6.0 / USDA Forest Service, Northern Research Station. Newtown Square, PA, 2020. 189 p. URL: <https://www.itreetools.org> (дата звернення: 10.11.2025).
12. IPCC. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use / Calvo Buendia E., Tanabe K., Kranjc A., Baasansuren J., Fukuda M., Ngarize S., Osako A., Pyrozhenko Y., Sherman P., Federici S. (eds.). Geneva: IPCC, 2019. URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html>
13. Moraes M., Amgarten J., Silva L. T., Santos J. V. Urban Health: An Example of a Health-Sustainable City. *AIMS Public Health*. 2024. Vol. 11, No. 3. P. 739–756. DOI: 10.3934/publichealth.2024050
14. Nowak D. J., Crane D. E. Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environmental Pollution*. 2002. Vol. 116, No. 3. P. 381–389. DOI: 10.1016/S0269-7491(01)00214-7
15. Nowak D. J., Greenfield E. J., Hoehn R. E., Lapoint E. Carbon storage and sequestration by trees in urban and community areas of the United States. *Environmental Pollution*. 2013. Vol. 178. P. 229–236. DOI: 10.1016/j.envpol.2013.03.019
16. Zianis D., Muukkonen P., Mäkipää R., Mencuccini M. Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. *Silva Fennica Monographs*. 2005. Vol. 4. 63 p. DOI: 10.14214/sf.sfm4

REFERENCES:

1. State Committee for Construction, Architecture and Housing Policy of Ukraine. (2002). Instruktziia z inventaryzatsii zelenykh nasadzhen u naselenykh punktakh Ukrainy [Instruction on inventory of green spaces in settlements of Ukraine]: Order No. 226 dated December 24, 2001. *Ofitsiynyi visnyk Ukrainy* [Official Bulletin of Ukraine], 9, 441. [in Ukrainian].
2. Lakyda, P. I. (2002). *Fitomasa lisiv Ukrainy* [Phytomass of Ukrainian forests]. Zbruch. [in Ukrainian].
3. Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. (2023). *Natsionalnyi kadastr antropohennykh vykydiv iz dzherel ta absorbtzii pohlynachamy parnykhovykh haziv v Ukraini za 1990–2021 roky* [National inventory of anthropogenic emissions by sources and removals by sinks of greenhouse gases in Ukraine for 1990–2021]. Retrieved from <https://mepr.gov.ua/news/38887.html> [in Ukrainian].
4. United Nations, Department of Economic and Social Affairs. (2018). *68 % of the world population projected to live in urban areas by 2050*. Retrieved from <https://www.un.org/development/desa/en/news/population/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html>

5. Baró, F., Chaparro, L., Gómez-Baggethun, E., Langemeyer, J., Nowak, D. J., & Terradas, J. (2014). Contribution of ecosystem services to air quality and climate change mitigation policies: The case of urban forests in Barcelona, Spain. *Ambio*, 43(4), 466–479. <https://doi.org/10.1007/s13280-014-0507-x>
6. Beckett, K. P., Freer-Smith, P. H., & Taylor, G. (2002). Urban woodlands: Their role in reducing the effects of particulate pollution. *Environmental Pollution*, 99(3), 347–360. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00214-7](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00214-7)
7. Bidolakh, D., & Kolesnichenko, O. (2023). Assessment of ecosystem functions of public green spaces in the city of Berezhany, Ternopil region. *Scientific Horizons*, 26(8), 96–106. <https://doi.org/10.48077/scihor8.2023.96>
8. Bidolakh, D., Lakyda, P., Myroniuk, V., Hayda, Y., & Pidkhovna, S. (2023). Assessment and representation of urban trees ecosystem services: A case study in Pryzhamkovi park. *Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry*, 65(2), 104–116. <https://doi.org/10.2478/ffp-2023-0011>
9. Bondar, O., Melnyk, Y., Bytsiura, L., Dukh, O., Yarema, O., & Faifura, V. (2023). Assessment of ecosystem services of green spaces in the T. Shevchenko Park of Culture and Recreation (Kremenets) using the i-Tree Eco. *Ukrainian Journal of Natural Sciences*, 3(5), 89–100. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.5.2023.12>
10. Doick, K. J., Vaz Monteiro, M., Morison, J. I. L., & Hutchings, T. R. (2017). *The state of Britain's urban forests: Results from the i-Tree Eco surveys in twelve British cities*. Forestry Commission Research Report.
11. USDA Forest Service, Northern Research Station. (2020). *i-Tree Eco user's manual v.6.0*. Retrieved from <https://www.itreetools.org>
12. IPCC. (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use* (E. Calvo Buendia, K. Tanabe, A. Kranjc, J. Baasansuren, M. Fukuda, S. Ngarize, A. Osako, Y. Pyrozhenko, P. Shermanau, & S. Federici, Eds.). IPCC. Retrieved from <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html>
13. Moraes, M., Amgarten, J., Silva, L. T., & Santos, J. V. (2024). Urban health: An example of a health-sustainable city. *AIMS Public Health*, 11(3), 739–756. <https://doi.org/10.3934/publichealth.2024050>
14. Nowak, D. J., & Crane, D. E. (2002). Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environmental Pollution*, 116(3), 381–389. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00214-7](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00214-7)
15. Nowak, D. J., Greenfield, E. J., Hoehn, R. E., & Lapoint, E. (2013). Carbon storage and sequestration by trees in urban and community areas of the United States. *Environmental Pollution*, 178, 229–236. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.03.019>
16. Zianis, D., Muukkonen, P., Mäkipää, R., & Mencuccini, M. (2005). Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. *Silva Fennica Monographs*, 4, 1–63. <https://doi.org/10.14214/sf.sfm4>

Стаття надійшла: 25.11.2025

Прийнято: 10.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025