

<https://doi.org/10.33220/1026-3365.146.2025.75>

ПІДХОДИ ДО ОРГАНІЗАЦІЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ НАКОПИЧЕННЯ ВУГЛЕЦЮ В ЛІСАХ НПП «КРЕМЕНЕЦЬКІ ГОРИ»

В. П. Пастернак^{1*}, Т. С. Пивовар², І. Ф. Букша³, Т. І. Букша⁴

Розглянуто методику визначення запасів вуглецю в лісових насадженнях для організації системи моніторингу накопичення вуглецю в насадженнях НПП «Кременецькі гори», яка є важливою для ефективного впровадження проєктів із поглинання вуглекислого газу лісовою рослинністю. На закладених кругових моніторингових ділянках із концентричними колами оцінювали всі живі та сухостійні дерева відповідних діаметрів. Вимірювання деревної ламані за класами щільності здійснювали на всій площі моніторингової ділянки. Поновлення та піднаметові лісові культури бука лісового оцінювали на облікових площадках. За результатами обліків основних компонентів лісових екосистем визначено обсяги біомаси та мортмаси, а також запаси вуглецю. Визначені показники запасів вуглецю є базовими, надалі повторні спостереження на закладеній мережі ділянок дадуть змогу оцінити динаміку й баланс вуглецю. Базові показники запасів вуглецю складуть основу для моделювання та оцінювання обсягів накопичення вуглецю, які можуть бути залучені до генерації лісових вуглецевих кредитів.

Ключові слова: фітомаса, мортмаса, конверсійні коефіцієнти, *Fagus sylvatica* L.

Вступ. Ліси є найбільшими наземними поглиначами вуглекислого газу (Pan *et al.*, 2011). Збільшення рівня лісистості, підвищення продуктивності лісів, впровадження сталого лісоуправління значно зменшують викиди парникових газів із лісових територій і сприяють збільшенню обсягів поглинання вуглекислого газу.

У Паризькій кліматичній угоді ліси визнано важливим інструментом у стримуванні зміни клімату завдяки їхній здатності поглинати вуглекислий газ. Для стимулювання додаткових заходів із підвищення лісового поглинання парникових газів функціонують міжнародні вуглецеві ринки (Grimault *et al.*, 2018; Neeff, 2021). Вони надають можливість країнам і компаніям фінансувати кліматично позитивні проєкти через механізм вуглецевих кредитів – сертифікованих одиниць скорочення або поглинання викидів парникових газів, які можна купувати і продавати.

Україна, маючи значний лісовий потенціал, може істотно посилити свій внесок до глобальних зусиль із пом'якшення зміни клімату шляхом удосконалення практик лісоуправління та створення нових природоохоронних територій (Hotsyk, 2022; Buksha *et al.*, 2024), зокрема завдяки залученню кліматичного фінансування. Такі заходи сприятимуть не лише збільшенню поглинання парникових газів, але й зміцненню екологічної та соціально-економічної стійкості лісового сектору, збереженню біорізноманіття та розвитку місцевих громад.

Для обґрунтування та впровадження таких лісогосподарських заходів необхідно забезпечити належну наукову й експертну підтримку, а також здійснювати систематичний моніторинг і верифікацію обсягів вуглецю, накопиченого внаслідок реалізації відповідних

¹ Пастернак Володимир Петрович, доктор сільськогосподарських наук, професор, Український науково-дослідний інститут лісового господарства та агролісомеліорації ім. Г. М. Висоцького, вул. Григорія Сковороди, 86, Харків, 61024, Україна. E-mail: pasternak65@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1346-1968>

² Пивовар Тетяна Сергіївна, кандидат сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник, Український науково-дослідний інститут лісового господарства та агролісомеліорації ім. Г. М. Висоцького, вул. Григорія Сковороди, 86, Харків, 61024, Україна. E-mail: pyvovartatiana@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7250-8549>

³ Букша Ігор Федорович, кандидат сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник, Український науково-дослідний інститут лісового господарства та агролісомеліорації ім. Г. М. Висоцького, вул. Григорія Сковороди, 86, Харків, 61024, Україна. E-mail: buksha@uriffm.org.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7198-6485>

⁴ Букша Тарас Ігорович, Український науково-дослідний інститут лісового господарства та агролісомеліорації ім. Г. М. Висоцького, вул. Григорія Сковороди, 86, Харків, 61024, Україна. E-mail: taras.simbaz@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9476-893X>

* Адреса для кореспонденції: pasternak65@ukr.net

проектів. Лісові проекти, спрямовані на збільшення обсягів поглинання вуглецю та його збереження, охоплюють:

- діяльність із лісорозведення та лісовідновлення;
- збереження наявних лісів;
- удосконалення лісоуправління в наявних лісах (Chiti *et al.*, 2024).

До проектів із покращення управління лісами застосовують методологію, що визначає кількісне скорочення або видалення викидів парникових газів (*Improved Forest Management in Temperate and Boreal Forests*, 2013). Разом із тим передбачено оцінювання запасів вуглецю в деревній фітомасі та мортмасі відмерлої деревини. Приріст біомаси визначають за існуючими регіональними моделями з уточненнями шляхом моніторингу (Lakyda, 2002; Myklush, 2011).

Надійна та достовірна методика визначення обсягів накопичення вуглецю в надземній та підземній фітомасі є основною передумовою формування системи моніторингу, яка є важливою для ефективного впровадження проектів із поглинання вуглецю лісовою рослинністю. Належна система моніторингу забезпечує точність, прозорість і підзвітність усього процесу реалізації проектів, що є необхідним для досягнення кліматичних цілей та залучення міжнародного фінансування. Важливе значення системи моніторингу полягає в забезпеченні точності та достовірності даних щодо обсягів поглинання вуглецю в лісах, підвищенні прозорості та довіри до результатів проекту з поглинання вуглецю лісами й створенні передумов для формування якісної звітності, необхідної для залучення інвесторів.

Сучасні підходи до оцінювання запасів вуглецю базуються на комбінації польових вимірювань, дистанційного зондування та математичного моделювання (Kim *et al.*, 2015; Pasternak *et al.*, 2020). Розроблення систем моніторингу накопичення вуглецю в лісах національних природних парків, які поєднують функції збереження біорізноманіття та накопичення вуглецю, потребує врахування специфіки природоохоронних територій, зокрема необхідності забезпечення довгострокового спостереження. Продemonстровано високий потенціал накопичення вуглецю в букових лісах в умовах Центральної Європи та Українських Карпат (Cienciala *et al.*, 2008; Tokar *et al.*, 2021). Дослідження в Київській області свідчать, що ліси природоохоронного, наукового, історико-культурного призначення мають вищу щільність накопиченого вуглецю, як порівняти з експлуатаційними лісами (Vasylyshyn *et al.*, 2021). Водночас системні дослідження запасів вуглецю в лісових насадженнях Національного природного парку (НПП) «Кременецькі гори» відсутні.

Мета досліджень – оцінювання обсягів поглинання вуглецю в деревній фітомасі та проведення базових розрахунків запасів вуглецю в насадженнях НПП «Кременецькі гори» для створення інформаційної основи довгострокового моніторингу та аналізу ефективності заходів з відновлення корінних лісових екосистем.

Матеріали й методи. Дослідження здійснювали у 2024 р. в НПП «Кременецькі гори», розташованому в Кременецькому районі Тернопільської області. НПП займає найвищі північно-західну та центральну частини Кременецького кряжу між долинами річок Іква та Вілія. За геоботанічним районуванням територія НПП знаходиться в межах Європейської широколистяно-лісової провінції Опільсько-Кременецького округу букових, грабово-дубових лісів, справжніх та остепнених лук і лучних степів (Shtogryn and Bairak, 2017). Корінні деревостани на значних площах змінилися на похідні грабові деревостани, які досягли віку стиглості та потребують переформування.

Для оцінювання запасів вуглецю закладали моніторингові ділянки, які в межах території НПП розміщували довільно. Для кожної ділянки визначали її розташування (географічні координати, квартал і виділ, природоохоронне відділення). На ділянках моніторингу визначали склад деревостану, тип лісорослинних умов, клас віку, панівний деревний вид, повноту та клас бонітету (Hrom, 2010). У деревостанах, у яких проведено заходи з відтворення корінних або близьких до них насаджень, закладали кругові ділянки моніторингу з радіусом 17,84 м (0,1 га). На великому колі оцінювали дерева з діаметром понад 14 см,

а на концентричному колі з радіусом 3,96 м – дерева з діаметром від 6 до 14 см (Pasternak *et al.*, 2020).

На моніторингових ділянках оцінювали всі живі та сухостійні дерева відповідних діаметрів. Для кожного дерева зазначали: деревний вид, діаметр на висоті 1,3 м, статус дерева – живе чи сухостій, пошкодження. Для модельних дерев (12–15 шт. на пробі) панівного деревного виду та 3 шт. супутніх деревних видів вимірювали висоти.

Об'єми стовбурів визначали за формулами (Myronyuk *et al.*, 2020). Біомасу дерев оцінювали із застосуванням конверсійних коефіцієнтів (Lakyda, 2002; Lakyda *et al.*, 2011; Kovalevskyi, 2014). Для цього використовували таку функцію залежності конверсійних коефіцієнтів R_v від параметрів деревостану: $R_v = f(A, П)$, де R_v – відповідні конверсійні коефіцієнти (деревина, кора, гілки); $f(A, П)$ – функції таксаційних ознак деревостану (A – вік і $П$ – відносна повнота). З метою вибору алометричної залежності використовували такі види рівнянь: $R_v = a_0 \cdot A^{a_1} \cdot П^{a_2}$; $R_v = a_0 \cdot A^{a_1}$.

Результати вимірювань на рівні окремих деревних видів перераховували на рівень насаджень ($т \cdot га^{-1}$) для отримання узагальнених досліджуваних показників. Середній запас надземної біомаси для виміряного полігону визначали шляхом перерахунку показників на рівні дерев (кг біомаси на дерево), підсумовуванням надземної біомаси всіх дерев у запас на рівні деревостану на пробній ділянці та на одиниці площі ($т \cdot га^{-1}$). Дані всіх ділянок у межах певного полігону усереднювали, щоб отримати середню оцінку надземної біомаси на рівні деревостану ($т \cdot га^{-1}$). Підземну фітомасу оцінювали шляхом множення надземної біомаси на співвідношення підземна/надземна фітомаса (R_i), і обидва показники підсумовували для визначення загальної живої біомаси на рівні насадження (Cairns, 1997; Lakyda, 2002).

Сухостій на ділянках моніторингу вимірювали за тими самими показниками, що й для живих дерев, додатково зазначали для сухостою наявність тонких і великих гілок або їхню відсутність. За виміряними показниками розраховували обсяги біомаси за допомогою відповідного алометричного рівняння з урахуванням наявності або відсутності гілок.

Масу сухостою на рівні дерева (кг маси на дерево) перераховували на площу ($т \cdot га^{-1}$), підсумовуючи загальну масу (надземну + підземну) усіх сухостійних дерев на ділянці (конвертуючи кг у т) і ділячи суму на площу ділянки в га. Показники всіх ділянок у межах певного полігону усереднювали, щоб отримати середню оцінку запасу сухостою на рівні насадження ($т \cdot га^{-1}$).

Вимірювання деревної ламані здійснювали на всій площі моніторингової ділянки. Для кожного з відрізків деревної ламані вимірювали діаметри на кінцях (починаючи з діаметра 5 см), а також зазначали деревний вид і клас щільності ламані: 1 – без ознак розкладання, 2 – середній ступінь розкладання, 3 – розкладена ламань (Harmon and Sexton, 1996). Об'єм і масу деревної ламані на одиницю площі розраховували для кожного класу щільності.

Масу деревної ламані розраховували як добуток об'єму за класами та щільності деревини для цього класу. Загальну масу деревної ламані для певного полігону розраховували як середнє значення для виміряних для цього полігону ділянок. Потім це значення використовували для розрахунків запасу вуглецю у відмерлій органічній речовині. Вуглець, що зберігається в резервуарах відмерлої деревини у виміряному полігоні, розраховували як суму вуглецю, що зберігається в деревній ламані та сухості.

З метою відновлення корінних деревостанів у розладнаних стиглих і перестійних похідних деревостанах із переважанням граба звичайного (*Carpinus betulus* L.) співробітниками НПП за підтримки ГО «Твій ліс» проведено заходи зі створення піднаметових культур бука лісового (*Fagus sylvatica* L.). Природне поновлення та піднаметові лісові культури оцінювали на чотирьох облікових площадках з радіусом 1,78 м ($10 м^2$), розташованих за сторонами світу на відстані 8 м від центру. На площадці обліковували кількість одиниць природного поновлення та піднаметових культур з діаметром до 6 см за класами висоти: 0–50 см, 51–130 см, а також на висоті понад 1,3 м для кожного виду, а також наводили характеристику життєвості та середній вік.

Результати. Сумарно на 7 моніторингових ділянках обміряно 302 дерева. На обстежених ділянках ростуть 11 видів дерев зі значним переважанням граба звичайного (215 живих дерев). Дуб звичайний (*Quercus robur* L.) також є доволі поширеним (41 дерево), а вільха чорна (*Alnus glutinosa* (L.) Gaerth.) (13 дерев) та клен гостролистий (*Acer platanoides* L.) (10 дерев) посідають середні позиції. Інші види, такі як береза повисла (*Betula pendula* Roth.), в'яз шорсткий (*Ulmus glabra* Huds.), липа дрібнолиста (*Tilia cordata* Mill.), явір (*Acer pseudoplatanus* L.) і ясен звичайний (*Fraxinus excelsior* L.), репрезентовані 1–3 екземплярами.

За результатами обмірів на ділянках моніторингу розраховано запаси деревостанів, які варіюють від 234 до 379 м³·га⁻¹ (табл. 1). Найменші показники запасів визначено на двох ділянках у 90-річних низькоповнотних грабових деревостанах III класу бонітету.

Таблиця 1

Таксаційні характеристики лісових насаджень на обстежених моніторингових ділянках

Table 1

Forest assessment characteristics of forest stands on the surveyed monitoring plots

№ діл. Plot No	Склад Species composition	ТЛЮ Forest site condi- tions	Клас бонітету Site class	Повнота Density of stocking	Вік, років Age, years	Середні Mean		Запас, м ³ ·га ⁻¹ Growing stock, m ³ ·ha ⁻¹
						D, см D, cm	H, м H, m	
4	6Гз2Дз1Влч1Сз+Бп	D ₃	II	0,75	70	25,4	22,7	362
5	8Гз1Влч1Бп	D ₃	I	0,75	70	27,3	21,0	379
6	5Гз4Дз1Влч+Яз	D ₂	I	0,65	70	24,9	21,7	310
7	9Гз1КЛг	D ₂	III	0,50	90	52,2	22,6	240
8	8Гз2КЛг	D ₂	III	0,50	90	45,6	24,7	234
10	6Дз3Гз1Взш+Лпд	D ₂	I	0,80	80	34,6	27,1	337
12	8Гз2Яв	D ₂	III	0,50	80	37,4	26,3	372

На ділянках визначено запаси відмерлої деревини за результатами обмірів деревної ламані та сухостійних дерев (табл. 2).

Таблиця 2

Запаси відмерлої деревини за результатами вимірювань на моніторингових ділянках

Table 2

Dead wood stocks based on measurements at monitoring plots

№ ділянки Plot No	Запас, м ³ ·га ⁻¹ Stock, m ³ ·ha ⁻¹		
	сухостою dead trees	деревної ламані dead logs	разом total
4	1,9	28,6	30,5
5	2,4	21,5	23,9
6	17,6	4,3	21,9
7	0	6,7	6,7
8	0,9	23,8	24,7
10	18,4	1,1	19,5
12	12,1	25,7	37,8
Середнє Mean	7,6	16,0	23,6
Стандартне відхилення Standard deviation	8,2	11,5	19,6

Запас відмерлої деревини на досліджених ділянках варіює від 6,7 до 37,8 м³·га⁻¹, а середній запас становить 23,6 м³·га⁻¹; найбільшу частку становить деревна ламань (67,8 %). Близько 61 % деревної ламані має середній клас щільності, а частка сильно розкладеної відмерлої деревини – 31,9 %. За результатами розрахунків визначено запаси вуглецю за основними компонентами лісових насаджень (табл. 3).

Таблиця 3

Запаси вуглецю за резервуарами, т·га⁻¹

Table 3

Carbon stocks by pools, t·ha⁻¹

№ ділянки Plot No	Деревостан Forest stand			Коріння Roots	Відмерла деревина Dead wood		
	стовбур stem	гілки branches	разом total		сухостій dead trees	деревна ламань woody debris	разом total
4	98,9	7,7	106,6	29,8	0,6	6,1	6,7
5	108,1	7,3	115,4	16,2	0,8	3,2	4,0
6	85,4	6,9	92,3	12,9	3,9	0,7	4,6
7	73,9	2,9	76,8	10,8	0,0	1,9	1,9
8	72,7	2,7	75,4	10,6	0,3	6,3	6,6
10	92,4	8,8	101,2	14,2	6,0	0,3	6,3
12	113,4	7,2	120,6	16,9	3,9	6,4	10,3
Середнє Mean	92,1	6,2	98,3	15,9	2,2	3,6	5,8
Стандартне відхилення Standard deviation	15,9	2,4	17,7	8,8	2,4	2,7	2,6

Середній запас вуглецю на досліджених моніторингових ділянках у резервуарі «деревостани» – 98,3 т·га⁻¹, у відмерлій деревині міститься лише 5,8 т·га⁻¹. Найбільшу частку в запасах вуглецю становлять стовбури дерев (у середньому 88,7 %).

Проаналізовано видовий склад, розмірну структуру поновлення та піднаметових лісових культур на облікових площадках моніторингових ділянок (табл. 4).

Таблиця 4

Характеристика поновлення на ділянках, де проводилися заходи з відновлення корінних насаджень

Table 4

Characteristics of regeneration in areas where native stand restoration measures were implemented

№ ділянки Plot No	Склад деревостану Species composition	Класи висот Height classes	Природне поновлення, шт. Natural regeneration, stems							Піднаметові культури Undercanopy forest planting
			Клг	Взш	Ялє	Дз	Яв	Яз	Гз	
4	6Гз2Дз1Влч1Сз+ Бп	до 50 см	11	1	–	–	1	2	–	2
		51–130 см	3	1	–	–	–	–	–	4
5	8Гз1Влч1Бп	до 50 см	11	–	–	–	18	2	–	3
		51–130 см	1	–	1	–	–	–	–	6
6	5Гз4Дз1Влч+Яз	до 50 см	7	1	–	1	10	2	–	2
		51–130 см	–	–	–	–	–	–	–	1
7	9Гз1Клг	до 50 см	2	–	–	–	1	–	–	4
		до 6 см*	9	1	–	–	1	–	–	–
8	8Гз2Клг	до 50 см	21	1	–	–	57	–	23	1
		до 6 см*	1	–	–	–	–	–	–	–
10	6Дз3Гз1Взш+Лпд	до 50 см	–	1	–	1	1	–	–	3
12	8Гз2Яв	до 50 см	66	2	–	–	5	2	1	2
		51–130 см	7	1	–	–	–	–	–	–

*Діаметр до 6 см на висоті > 1,3 м .

*Diameter less than 6 cm at the height >1.3 m.

Обстеження на моніторингових ділянках виявило природне поновлення та піднаметові культури бука лісового. Видовий склад природного поновлення є типовим для похідних деревостанів: значно переважає поновлення кленів – гостролистого та явора; граб звичайний присутній у поновленні лише на одній ділянці; решта видів – дуб звичайний, ялина європейська, ясен звичайний та в'яз шорсткий – трапляються лише поодинокі. Піднаметові

культури бука лісового на обстежених ділянках мають низьку густоту (менше ніж $1\,000\text{ шт.}\cdot\text{га}^{-1}$), що свідчить про необхідність інтенсифікації заходів з відновлення корінних насаджень. Найгіршою ситуація з природним поновленням є в деревостані з переважанням дуба звичайного (ділянка 10).

Обговорення. Визначений за результатами обстеження видовий склад деревостанів свідчить про переважання похідних грабових деревостанів, що відображає сукцесійні процеси в похідних деревостанах регіону. Аналогічні тенденції виявлено в інших лісових екосистемах Європи, де граб активно поширюється внаслідок зміни клімату та антропогенного впливу (Sokołowski *et al.*, 2024). З метою поступової заміни грабових деревостанів на природні букові необхідно планувати додаткові заходи для забезпечення відновлення корінних деревостанів в умовах НПП «Кременецькі гори», зокрема догляд за підростом і додаткове введення дуба звичайного у розривах намету.

Порівняння результатів досліджень свідчить, що середній запас вуглецю в деревостанах НПП «Кременецькі гори» ($98,3\text{ тС}\cdot\text{га}^{-1}$) є дещо вищим, ніж у твердолистяних лісових насадженнях Лівобережного Лісостепу ($94,1\text{ тС}\cdot\text{га}^{-1}$) (Pasternak *et al.*, 2020) та в грабових деревостанах Київщини ($85,1\text{ тС}\cdot\text{га}^{-1}$) (Vasylyshyn *et al.*, 2021), тоді як запаси вуглецю в мортмасі, навпаки, є нижчими ($5,8$ проти $8,8$ та $10,5\text{ тС}\cdot\text{га}^{-1}$ відповідно) (Pasternak *et al.*, 2020; Vasylyshyn *et al.*, 2021). Водночас співвідношення запасів вуглецю в живій біомасі та мортмасі в досліджених деревостанах відповідає тенденціям, зафіксованим у лісах помірної зони Європи, де частка мортмаси зазвичай коливається в межах $5\text{--}15\%$ від загального запасу вуглецю (Mund, 2004; Vasylyshyn *et al.*, 2021). Букові деревостани у НПП «Сколівські Бескиди» в Українських Карпатах мають значно вищі показники щільності запасів вуглецю у фітомасі – $244\text{ тС}\cdot\text{га}^{-1}$. Це пов'язане з вищою продуктивністю букових деревостанів, а також із тим, що в розрахунку вуглецю в НПП «Сколівські Бескиди» враховано листя, підріст, підлісок і живий надґрунтовий покрив (Tokar *et al.*, 2021).

Розроблена методика базується на поєднанні традиційних лісівничих підходів із сучасними алометричними рівняннями, що забезпечує високу точність оцінок. Використання концентричних кіл для різних діаметрів дерев оптимізує співвідношення точність – трудовитрати, що особливо важливо для довгострокового моніторингу. Застосування конверсійних коефіцієнтів за П. І. Лакидою (Lakyda, 2002) забезпечує сумісність результатів із національною системою обліку вуглецю України.

Основним обмеженням дослідження є порівняно короткий період спостережень і невелика кількість моніторингових ділянок. Для повноцінного аналізу динаміки запасів вуглецю необхідні багаторічні дослідження з повторними вимірюваннями через $5\text{--}10$ років. Подальший розвиток системи моніторингу має охоплювати інтеграцію з дистанційним зондуванням для масштабування результатів на всю територію НПП. Також доцільно розширити мережу моніторингових ділянок для охоплення всіх типів лісорослинних умов і долучити оцінювання запасів вуглецю у ґрунті. Визначення початкових значень запасів вуглецю на досліджених ділянках є важливим етапом для подальшого моніторингу та оцінювання впливу заходів із відтворення корінних насаджень на спроможність лісових екосистем поглинати вуглекислий газ.

Результати розрахунків запасів вуглецю за резервуарами, узагальнені за одиницями аналізу в контексті класів віку та панівних деревних видів, занесено до бази даних, що дало змогу створити інформаційну основу для моніторингу вуглецю в лісостанах. Розроблену методику можна адаптувати для інших національних природних парків України, сприяючи стандартизації підходів до моніторингу лісового вуглецю на національному рівні.

Висновки. Дослідження, проведені на типових ділянках в НПП «Кременецькі гори», де за сприяння ГО «Твій ліс» було здійснено заходи з відтворення корінних насаджень, дали можливість визначити базовий рівень обсягів вуглецю, накопиченого в насадженнях, враховуючи склад деревостанів та поновлення. Виявлено, що загальна кількість вуглецю, накопиченого на обстежених ділянках, становить $2,2$ тис. тон; у живій надземній фітомасі

міститься близько 83 % накопиченого вуглецю, у підземній фітомасі – близько 12 %, у мортмасі (сухостійних деревах та деревній ламані) – близько 5 %. Запропоновану методику та дані можна використовувати, зокрема, у кліматичних проєктах (наприклад, для моделювання стратегій вуглецевого кредитування).

Подяки. Автори вдячні Громадській організації «Твій ліс» (керівник – Делієв Д. О.), а також адміністрації НПП «Кременецькі гори» (директору Штогрину М. О. та заступнику директора Штогуну А. О.) за сприяння у проведенні досліджень.

Джерела фінансування. Статтю підготовлено авторами в межах виконання теми досліджень УкрНДЛГА (договір № 88), замовником якої була Громадська організація «Твій ліс» (керівник – Делієв Д. О.).

ПОСИЛАННЯ – REFERENCES

- Buksha, I.F., Pasternak, V.P. and Pyvovar, T.S. (2024) 'Development of carbon forestry in Ukraine: potential and tools for implementation', in *Proceedings of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference "Forestry, Wood Processing and Land Management: Achievements, Status and Prospects"*. Kharkiv: SBTU, pp. 18–20 (in Ukrainian).
- Cairns, M.A. (1997) 'Root biomass allocation in the world's upland forests', *Oecologia*, 111, pp. 1–11.
- Chiti, T., Rey, A., Abildtrup, J., Böttcher, H., Diaci, J., Frings, O., Lehtonen, A., Schindlbacher, A. and Zavala, M.A. (2024) 'Carbon farming in the European forestry sector', *From Science to Policy*, 17. European Forest Institute.
- Cienciala, E., Cerny, M., Apltauer, J. and Exnerova, Z. (2008) 'Biomass functions applicable to European beech', *Journal of Forest Science*, 54(4), pp. 147–154.
- Grimault, J., Bellassen, V. and Shishlov, I. (2018) 'Key elements and challenges in monitoring, certifying and financing forestry carbon projects', *Climate Brief N°58 I4CE*, November 2018. Paris.
- Harmon, M., and Sexton, J. (1996) Guidelines for measurements of woody detritus in forest ecosystems', *US LTER Publication No. 20*. Seattle, WA: US LTER Network Office, University of Washington.
- Hotsyk O. (2022) 'Bioproductivity of the forests of the Cheremsky Nature Reserve', *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*, 13 (3). pp. 32–40.
- Hrom, M.M. (2010) *Forest mensuration*. 3rd edn. Lviv: RVV NLTU (in Ukrainian).
- Improved Forest Management in Temperate and Boreal Forests (LtPF)* (2013). Approved VCS Methodology VM0012 Version 1.2. Sectoral Scope 14.
- Kim, H., Kim, Y.-H., Kim, R. and Park, H. (2015) 'Reviews of forest carbon dynamics models that use empirical yield curves: CBM-CFS3, CO2FIX, CASMOFOR, EFISCEN', *Forest Science and Technology*, 11(4), pp. 212–222. <https://doi.org/10.1080/21580103.2014.987325>
- Kovalevskyi, S.S. (2014) 'The development of multiple regression equations for the conversion coefficient of stands in the Dnieper upland Forest-Steppes', *Scientific Bulletin of UNFU*, 24(7), pp. 55–60. (in Ukrainian).
- Lakyda, P.I. (2002) *Phytomass of Ukrainian forests*. Ternopil: Zbruch (in Ukrainian).
- Lakyda, P., Vasylyshyn, R., Lashenko, A. and Terentiev, A. (2011) *Standards for evaluation the components of the above-ground phytomass of trees of the main forest-forming species of Ukraine*. Kyiv: EKO-Inform Publishing House (in Ukrainian).
- Neeff, T. (2021). What is the risk of overestimating emission reductions from forests – and what can be done about it? *Climatic Change*, 166, 26.
- Myklush, S.I. (2011). Lowland beech forests of Ukraine: productivity and organization of sustainable management: monograph. Lviv: ZUKC (in Ukrainian).
- Myronyuk, V.V., Bilous, A.M., Bidolakh, D.I. (2020) Scientific and methodological recommendations for the inventory of forest resources of Ukraine. Kyiv: NUBiPU. 48 p. (in Ukrainian).
- Mund, M. (2004). Carbon pools of European beech forests (*Fagus sylvatica*) under different silvicultural management. PhD thesis, Georg-August-University Göttingen.
- Pan, Y., Birdsey, R.A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P.E., Kurz, W.A., Phillips, O.L., Shvidenko, A., Lewis, S.L., Canadell, J.G., Ciais, P., Jackson, R.B., Pacala, S.W., McGuire, A.D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S. and Hayes, D. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333(6045), pp. 988–993.
- Pasternak, V., Pyvovar, T., Yarotsky, V. (2020). Forest carbon stock in Left-bank Forest-Steppe of Ukraine according to intensive forest monitoring data. *Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine*, 20, pp. 120–130. <https://doi.org/10.15421/412011>.
- Shtogryn, M.O. and Bairak M. O. (eds.) (2017) *National Nature Park "Kremenetski Gory": current state and prospects for the preservation, reproduction, and use of natural complexes and historical-cultural traditions*. Kyiv: TVO "VTO Typography from A to Z" (in Ukrainian).
- Sokołowski, K., Czerepko, J. and Gawryś, R. (2024) 'The effects of *Carpinus betulus* expansion on soil properties under changing climatic conditions', *Scientific Reports*, 14, 24662. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-73960-1>

- Tokar, O.Ye., Korol, M.M. and Gusti, M.I. (2021) 'Estimation of carbon stocks in phytomass of forest stands of protected areas in the Ukrainian Carpathians', *Scientific Bulletin of UNFU*, 31(5), pp. 42–46 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.36930/40310506>
- Vasylyshyn, R., Lakyda, I., Melnyk, O., Lakyda, M. and Rymarenko, Yu. (2021) 'Organic carbon in the plant biomass of forests in Kyiv region', *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*, 12(3), pp. 63–71. <https://doi.org/10.31548/forest2021.03.005>

APPROACHES TO ORGANISING A SYSTEM FOR MONITORING CARBON ACCUMULATION IN THE FORESTS OF NNP "KREMENETSKI HORY"

Pasternak V. P.^{1*}, Pyvovar T. S.², Buksha I. F.³, Buksha T. I.⁴

A methodology for assessing carbon stocks in forest stands for a monitoring system of carbon accumulation in the forests of the Kremenetski Hory National Natural Park was considered. This system is essential for the effective implementation of forest-based carbon dioxide sequestration projects. All living and dead trees above the relevant diameter thresholds were assessed within circular monitoring plots using concentric sampling areas. Tree density was measured by density classes across the full extent of each plot. Regeneration and understory forest crops of beech (*Fagus sylvatica* L.) were assessed within designated subplots. Based on the assessment of key forest ecosystem components, the volumes of biomass, dead organic matter, and carbon stocks were evaluated. These carbon stock values serve as baseline indicators. Future remeasurements within the established plot network will enable tracking of carbon dynamics and balance over time. The baseline carbon stock estimates provide a foundation for modelling and evaluating carbon storage potential and may support the development of forest carbon credit projects.

Key words: phytomass, mortmass, conversion factors, *Fagus sylvatica* L.

Одержано редколегією 18.04.2025

¹ Pasternak Volodymyr, Doctor habil. (Agricultural Sciences), Professor, Ukrainian Research Institute of Forestry and Forest Melioration named after G. M. Vysotsky, 86 Hryhoriia Skovorody Street, Kharkiv, 61024, Ukraine. E-mail: pasternak65@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1346-1968>

² Pyvovar Tetiana, PhD (Agricultural Sciences), Senior Researcher, Ukrainian Research Institute of Forestry and Forest Melioration named after G. M. Vysotsky, 86 Hryhoriia Skovorody Street, Kharkiv, 61024, Ukraine. E-mail: pyvovartatiana@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7250-8549>

³ Buksha Ihor, PhD (Agricultural Sciences), Senior Researcher, Ukrainian Research Institute of Forestry and Forest Melioration named after G. M. Vysotsky, 86 Hryhoriia Skovorody Street, Kharkiv, 61024, Ukraine. E-mail: buksha@uriffm.org.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1874-094X>

⁴ Buksha Taras, Ukrainian Research Institute of Forestry and Forest Melioration named after G. M. Vysotsky, 86 Hryhoriia Skovorody Street, Kharkiv, 61024, Ukraine. E-mail: taras.simbaz@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9476-893X>

* Correspondence: pasternak65@ukr.net