

ПРОГНОЗУВАННЯ ВУГЛЕЦЬДЕПОНУЮЧОЇ ЗДАТНОСТІ БУРОЗЕМІВ СТАРОВІКОВИХ ЛІСІВ УКРАЇНСЬКИХ КАРПАТ: РОЛЬ МІНЕРАЛЬНОЇ МАТРИЦІ

Для заповідних територій Українських Карпат найменший С–депонуєчий потенціал буроземів (0-15 см) властивий для букових пралісів віком 200-250 років – 25,1-29,9 і дубово-букового пралісу (150 – 200 р.) – 29,8 тС/га, тоді як для середньвікового буково-яворово-дубового лісу (40 – 50 р.) – 46,2 тС/га, що в 1,6 – 1,8 разів більше.

Букові праліси (*Fagus sylvatica* L.) є винятковим прикладом широколистяних лісів, які майже не зазнали впливу людської діяльності і є надзвичайно важливим джерелом історії розвитку європейських лісових екосистем. Праліси ефективніше, ніж інші ліси, пом'якшують клімат, очищують воду, утримують вуглець, надлишок якого в атмосфері, на думку багатьох дослідників, є причиною глобального потепління [4].

Особливо важливою, за сучасних глобальних кліматичних змін, є інформація про актуальний стан ґрунтів пралісових екосистем заповідників як еталонних територій для моніторингу їхнього стану у перспективі. В цьому контексті цінними будуть дані як про вуглецьсеквеструючу (актуальне зв'язування), так і вуглецьдепонуєчу (тривале зв'язування) спроможності таких лісових екосистем, зокрема, стан депонування вуглецю ґрунтами. Варто врахувати, що здатність ґрунтів зберігати органічний вуглець (ОВ) є ключовою функцією ґрунтів, яка є не тільки вирішальною для регулювання клімату, але й впливу на інші екологічні функції ґрунту [6]. Не випадково, ґрунт є найбільшим резервуаром ОВ у наземних екосистемах, приблизно в три-чотири рази більшим, ніж запас вуглецю у рослинності і в два-три рази, ніж його запас в атмосфері [8].

Проте, чіткого знання про механізми зв'язування ОВ у лісових ґрунтах, через складну взаємодію між кліматом, ґрунтом і типом лісу, що впливає на розмір і стабільність його пулу, немає досі [11]. У зв'язку з цим, особлива увага дослідників привернута до оцінки додаткового зв'язування ОВ реакційноздатними гранулометричними елементами мінеральної матриці ґрунту розмірами <20 μm (глина+дрібний пил) і <50 (63) μm (крупний пил+дрібний пил+глина) та оксидами й гідроксидами алюмінію і заліза [1-3, 6]. На сьогодні розроблені достатньо інформативні критерії оцінки С-секвеструючої і С-депонуєчої здатностей мінеральної частини ґрунтів [7, 9, 10], як вуглецьпротекторна здатність (Carbon Protective Capacity, CPC, гС/кг ґрунту), ступінь насичення вуглецем мінеральної матриці (Degree of Carbon Saturation, DCS, %) і вуглецьсеквеструючий потенціал (Carbon Sequestration Potential,

CSP, т/га). Відомо також, що ґрунти за вмісту фракцій пил+глина <40 %, як правило, насичені ОБ, а понад 60 % вона переважно накопичується у фракції пилу [5].

Мета досліджень полягала у встановленні актуальної вуглецьдепонуєної здатності буроземів різновікових лісів Українських Карпат для прогнозування можливостей додаткового зв'язування ОБ їх мінеральною матрицею.

Експериментальні дослідження виконані на території з найбільшим поширенням пралісів в Українських Карпатах, зокрема, модальну ділянку закладено в Угольсько-Широколужанському масиві Карпатського біосферного заповідника. На території масиву переважають буроземи (табл. 1) утворені на елювії-делювії флішу з переважанням глинистого сланцю (розріз 5), буроземи на елювії-делювії флішу з переважанням пісковика (розрізи 2, 3, 4).

Таблиця 1

Характеристика досліджуваних буроземів

№ розрізу	Екосистеми	Вік дерев, рік	Глибина відбору, см	Назва ґрунту	Щільність будови, кг·м ⁻³	Вміст мінеральних частинок<50μ
2 N48°16.069', EO23°37.208	Буковий праліс	200-250	5-14	Бурозем неглибокий середньосуглинковий	1,10	70,72
3 N48°15.076', EO23°38.194	Дубово-буковий праліс	150-200	5-12	Бурозем неглибокий важкосуглинковий	1,12	80,02
4 N48°15.554', EO23°37.218	Буковий праліс	200	4-11	Бурозем неглибокий важкосуглинковий	1,26	73,2
5 N48°15.412', EO23°38.337	Буково-яворово-дубовий ліс	40-50	5-11	Бурозем середньоглибокий легкоглинистий	1,41	94,76

Розрахунок вуглецьзахисної здатності ґрунту здійснили з використанням запропонованих Six et al. [9] рівнянь лінійної регресії найменших квадратів для лісових ґрунтів:

$$CPC (\text{гC} \cdot \text{кг}^{-1}) = 16,24 + 0,24 \cdot (\% < 50 \mu\text{м}), \quad (1)$$

а також з врахуванням типу вторинних мінералів (2 : 1) у мінеральній матриці ґрунту:

$$CPC (\text{гC} \cdot \text{кг}^{-1}) = 14,76 + 0,21 \cdot (\% < 50 \mu\text{м}), \quad (2)$$

Примітка: тип 2:1 – смектити: група монтморилоніту (монтморилоніт, нонтроніт, бейделіт, сапоніт, гекторит); група глауконіту (глауконіт, сколіт, селадоніт) та гідрослюди (іліт, вермикуліт); хлорит.

За даними Білоніжка і Матковського (2010) до складу ґрунтоутворювальних порід ґрунтів Українських Карпат входять нонтроніт, монтморилоніт, бейделіт. Це дає нам підстави у розрахунках CPC використовувати саме формулу 2 для мінералів типу 2:1.

Розрахунки CPC також виконані за рівняннями 3 і 4 запропонованим для ґрунтів помірного клімату[10] :

$$CPC (\text{гC} \cdot \text{кг}^{-1}) = 3,73 + 0,43 \cdot (\% < 50 \mu\text{м}) \quad (3)$$

$$CPC (\text{гС} \cdot \text{кг}^{-1}) = 20,6 + 0,232 \cdot \% < 50 \text{ мкм} \quad (4)$$

Вміст вуглецю стабільної частини органічної речовини ґрунту ($C_{\text{МАОМ}}$) можливо оцінити визначенням його кількості у фракції $<50 \text{ мкм}$ (пил+мул), отриманої шляхом диспергування ґрунту у розчині гексаметафосфату натрію з наступним просіюванням суспензії через сито з отворами 50 мкм . На ситі залишається лабільна фракція ОРГ: грубодисперсна ($2000\text{-}250 \text{ мкм}$ і дрібнодисперсна ($250\text{-}50 \text{ мкм}$), а в розчині – мінераласоційована ОР (МАОМ). Оцінка МАОМ також можлива за результатами фракційного складу органічної речовини, зокрема сумарним вмістом вуглецю фракцій фульвокислот (ФК-2+ФК-3), гумінових кислот (ГК-3) та гуміну. Саме такий методичний підхід нами використаний у цьому дослідженні.

Для ширшої оцінки С-секвестраційної спроможності досліджуваних буроземів, на підставі показників СРС, вмісту ОВ у стабільній органічній речовині ($C_{\text{МАОМ}}$) та щільності ґрунтів (BD), розраховані наступні її критерії:

- за різницею показників CPC і $C_{\text{МАОМ}}$ – дефіцит С–насичення (*Carbon Saturation Deficit, CSD*), гС/кг .

- за значеннями CSD і CPC – ступінь насичення ґрунту вуглецем органічних сполук (*Degree of Carbon Saturation, DCS*) і вуглецьсеквеструючий потенціал (*Carbon Sequestration Potential, CSP*) за формулами 5 і 6.

$$\text{Degree of Carbon Saturation (\%)} = (1 - (CSD/CPC)) \cdot 100 \quad (5)$$

$$\text{Carbon Sequestration Potential (т/га)} = CSD \cdot BD \cdot H \cdot 10, \quad (6)$$

де: CSD — *Carbon Saturation Deficit* (гС/кг), BD — щільність ґрунту, т/м^3 , H – товщина шару ґрунту, м.

Отримані дані опрацьовані методами статистичного аналізу з використанням програм Statistica 8.0 software (StatSoft, USA, 2012).

Вуглецьдепонуюча здатність досліджуваних буроземів (табл. 2) коливалася в межах $33,6$ до $40,2 \text{ гС/кг}$ ґрунту. Варто зауважити, що за умов експерименту, найбільшому показнику СРС бурозему легкоглинистого, властивому для середньовікового буково-яворово-дубового лісу ($40\text{-}50 \text{ р}$), відповідав найменший вміст $C_{\text{орг}}$ ($27,6 \text{ гС/кг}$).

Встановлено, що у важко- і середньосуглинкових ґрунтах під буковими пралісами Ужанського НПП і Угольсько-Широколужанського масиву КБЗ вміст МАОМ становив $19,8$ і $16,9 \text{ гС/кг}$ або $47,8$ і $42,6 \%$ від $C_{\text{орг}}$ ($41,4$ і $39,7 \text{ гС/кг}$). Раніше, нами із застосуванням експериментального визначення вмісту МАОМ у буроземах Сколівських Бескидів, показано, що вміст вуглецю у стабільній фракції ОВ ($C_{\text{МАОМ}}$) у ґрунті під лісом становив $11,1 \pm 0,8 \text{ гС/кг}$ або $45,7\%$ від сумарного вмісту органічного вуглецю [2]. Отже, відносний вміст стабільної фракції у буроземах Українських Карпат, отриманий розрахунковим шляхом, практично не відрізняється від експериментально визначеного.

Таблиця 2.

Вуглецьзахисна здатність ґрунту буроземів заповідних територій Українських Карпат залежно від типу лісу і його віку (CPC, гС/кг ґрунту)

Екосистеми	Вміст C _{орг}	Вуглецьзахисна здатність ґрунту (CPC, гС/кг ґрунту)					Δ (C _{орг} -CPC)
		CPC розраховані за рівняннями 1-4				CPC, ($\chi \pm SD$, n=4), гС/кг	
	гС/кг	1	2	3	4	гС/кг	гС/кг
Буковий праліс (200-250 р)	39,7	33,21	29,96	34,14	37,02	33,58 $\pm$ 1,45	6,12
Мішаний дубово-буковий праліс (150-200 р)	40,3	35,44	31,56	38,14	39,16	36,08 $\pm$ 1,69	4,22
Буковий праліс (200 р)	48,3	33,81	30,13	35,21	37,58	34,18 $\pm$ 1,56	14,12
Буково-яворово- дубовий ліс (40-50 р)	27,6	38,98	34,65	44,48	42,58	40,17 $\pm$ 2,16	-12,57

На підставі даних CPC і C_{МАОМ} розраховані інші параметри секвестраційної здатності досліджуваних буроземів (табл.3)

Таблиця 3.

Параметри С-секвестраційної спроможності досліджуваних буроземів

Екосистеми	BD	C _{орг}	C _{МАОМ} (розрах)	CPC	CSD	DCS	CSP (0,15 м)
	т/м ³	гС/кг				%	тС/га
Буковий праліс (200-250 р)	1,10	39,7	18,35	33,58	15,23	54,67	25,12
Мішаний дубово-буковий праліс (150-200 р)	1,12	40,3	18,35	36,08	17,73	49,14	29,78
Буковий праліс (200 р)	1,26	48,3	18,35	34,18	15,83	46,31	29,92
Буково-яворово- дубовий ліс (40-50 р)	1,41	27,6	18,35	40,17	21,82	54,32	46,15

Висновки. Для заповідних територій Українських Карпат найменший С-депонуючий потенціал (CSP) властивий буроземам букових пралісів (200-250 р.) – 25,1-29,9 і дубово-букового пралісу (150-200 р) – 29,8 тС/га, тоді як найбільший – для середньовікового буково-яворово-дубового лісу (40-50 р) – 46,2 тС/га. Спостерігається тенденція до зменшення спроможності депонування органічного вуглецю буроземами старовікових лісів, ймовірно, внаслідок насичення ним мінеральної матриці ґрунту і втрати С-депонуючої здатності.

Література

1. Гамкало З., Шпаківська І., Марискевич О., Партика Т.(2023). Оцінка С-захисної здатності ґрунтів Українських Карпат: теорія і практика //Сучасний стан збереження природного різноманіття та сталого використання ресурсів природно-заповідних територій. Мат. Міжн. наук.-практ. конф., присвя 25-річчю створення Яворівського НПП. Снт Івано-Франкове, 2023, 63–70.
2. Гамкало З., Партика Т., Шпаківська І., Марискевич О. (2024). Оцінка вмісту стабільної органічної речовини ґрунтів Українських Карпат як критерію депонування вуглецю. Ліси природно-заповідних територій в умовах

глобальних змін: мат. міжн. наук.-практ. Конф. з нагоди 25-ї річниці НПП «Сколівські Бескиди». Сколе, 2024, 37–41.

3. Гамкало Літогенний потенціал карбонізації педосфери: теоретико-методологічні, методичні та екосистемний підходи. Агрохімія і ґрунтознавство. Міжвід. тем. наук. збірник. 2021. Вип. 92. Харків: ННЦ “ІА ім. О.Н. Соколовського”. С 41–51. <https://doi.org/10.31073/acss92-05>

4. Дмитренко А. Букові праліси Карпат – об’єкт спадщини ЮНЕСКО. Юридичний підхід до екологічної проблеми. Юридичний вісник України. – 2019, (47-48), 20–21.

5. Carter M.R., Angers D.A., Gregorich E.G., Bolinder M.A. Characterizing organic matter retention for surface soils in eastern Canada using density and particle size fractions. Can. J. Soil Sci., 2003. 83. 11–23.

6. Guan, L., Sun, Y., Yuan, M., Li, J., Zhang, Y., Tang, J.Y. (2025). Forest Soil Organic Carbon Review. American Journal of Plant Sciences, 16, 155–169.

7. Hassink J., & Whitmore A. A. (1997). Model of the physical protection of organic matter in soils. Soil Science Society of America Journal, 61, 131–139.

8. Pang, D., & Xu, H. (2024). Carbon Sequestration and Stability and Soil Erosion in Forest Ecosystems. Forests, 15(11), 1961

9. Six, J., Conant R. T., Paul, E. A. & Paustian, K. (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C – saturation of soils. Plant and Soil 241: 155-176. doi: 10.1023/A:1016125726789.

10. Six, J., Feller, C., Denef, K., Ogle, S., Moraes, J., Albrecht, A. (2002a). Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils – Effects of no-tillage. Agronomie, 22, 755–775. DOI: 10.1051/agro:2002043

11. Zhang, Y., Guo, X., Chen, L., Kuzyakov, Y., Wang, R., Zhang, H., ... & Sun, O. J. (2024). Global pattern of organic carbon pools in forest soils. *Global Change Biology*, 30(6), e17386.

Hamkalo Z., Voitkiv P. Prediction of carbon-depositioning capacity of burozems of old-age forests of the Ukrainian Carpathian mountains: the role of the mineral matrix. *In the burozems of primeval forests of the protected areas of the Ukrainian Carpathians the lowest C-deposition potential (CSP) in the 0–15 cm layer is characteristic of soils of beech primeval forests aged 200–250 years – 25.1–29.9 and oak-beech primeval forest (150–200 years) – 29.8 tC/ha, while for middle-aged beech-sycamore-oak forest (40–50 years) – 46.2 tC/ha.*