



ОЦІНКА ВТРАТ ДЕПОНОВАНОГО ВУГЛЕЦЮ У НАДЗЕМНІЙ ФІТОМАСІ СОСНЯКІВ, ПОШКОДЖЕНИХ НИЗОВИМИ ПОЖЕЖАМИ, У ПОЛІССІ ТА ЛІВОБЕРЕЖНОМУ ЛІСОСТЕПУ

І. М. Коваль^{1*}, В. П. Ворон², С. Г. Сидоренко³, Є. Є. Мельник⁴, В. П. Пастернак⁵,
І. Л. Будзінський⁶

Наведено результати досліджень щодо втрат депонованого вуглецю в надземній фітомасі середньовікових соснових деревостанів унаслідок пошкодження їх низовими пожежами в Поліссі та Лівобережному Лісостепу. В умовах Полісся у насадженні з висотою нагару близько 1 м частка відпаду за кількістю дерев збільшувалася у міру погіршення їхнього санітарного стану. Через рік після пожежі всохло 14 % дерев, через три роки після пожежі – 58 % від загальної кількості дерев. Втрати депонованого вуглецю в надземній фітомасі становили через рік після пожежі 6 %, через три роки після пожежі – 61 %. В умовах Лівобережного Лісостепу через три роки після пожежі втрати депонованого вуглецю в надземній фітомасі середньовікових сосняків із середньою висотою нагару на стовбурах 0,61 м становили 3 %, у сосняках з висотою нагару на стовбурі 1,76 м – 8 %, а в найбільш пошкодженому насадженні із середньою висотою нагару на стовбурі 3,76 м – 30 %.

Ключові слова: соснові деревостани, відпад, динаміка стану, висота нагару на стовбурах дерев.

Вступ. Ліси є важливим компонентом наземного вуглецевого циклу. Лісова рослинність утримує близько 80 % вуглецю і є його головним резервуаром на планеті (Vilous *et al.*, 2017). Лісова рослинність вилучає вуглець із атмосфери завдяки фотосинтезу, в результаті чого вуглекислий газ перетворюється на органічну речовину, яка накопичується у лісовій біомасі. Таким чином, здатність рослинності депонувати вуглець у процесі фотосинтезу надає можливість лісовим екосистемам регулювати клімат шляхом поглинання вуглекислого газу (CO₂) та виділення кисню (O₂) (Buksha *et al.*, 2008; NGO “Forest Com”, 2023; Tkach *et al.*, 2023). Дослідженнями українських учених визначено запаси органічного вуглецю у фітомасі лісів у різних природних зонах (Shpakivska and Maryshevych, 2009; Lakyda, 2011; Buksha *et al.*, 2012; Pasternak and Yarotskiy, 2013).

На запаси вуглецю та його цикл впливають пожежі (Voron *et al.*, 2019). Основними причинами виникнення пожеж є антропогенні чинники – від 59 до 95 % випадків для різних регіонів (Sydorenko *et al.*, 2021). Масштаби таких пожеж залежать від природних чинників, зумовлених особливостями лісових насаджень, погодними умовами, спричиненими природно-кліматичними процесами планетарного масштабу, які мають коливальний характер і досі

¹ Коваль Ірина Михайлівна, доктор 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: koval_iryana@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6328-1418>.

² Ворон Володимир Пантелеймонович, доктор 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: 52corvus@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1059-3032>.

³ Сидоренко Сергій Григорович, кандидат сільськогосподарських наук, старший дослідник, Український науково-дослідний інститут лісового господарства та агролісомеліорації ім. Г. М. Висоцького, вул. Григорія Сковороди, 86, Харків, 61024, Україна. E-mail: serhii88sido@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5972-0067>.

⁴ Мельник Євген Євгенович, кандидат сільськогосподарських наук, старший дослідник, Український науково-дослідний інститут лісового господарства та агролісомеліорації ім. Г. М. Висоцького, вул. Григорія Сковороди, 86, Харків, 61024, Україна. E-mail: wudckij@bigmir.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9821-2751>.

⁵ 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: pasternak@uriffm.org.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1346-1968>.

⁶ Будзінський Ігор Леонідович, Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони, 15, Київ, 03041, Україна; Державне агентство лісових ресурсів України, вул. Шота Руставелі, 9-А, Київ, Україна. E-mail: igor_budzinskiy@meta.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0298-5494>.

* Адреса для кореспонденції: koval_iryana@ukr.net

залишаються недостатньо дослідженими та прогнозованими (Buksha *et al.*, 2008; Koval *et al.*, 2018; Kuzyk, 2019; Lakyda *et al.*, 2019; Siahhan *et al.*, 2020; Sydorenko *et al.*, 2021; Voron *et al.*, 2021).

Зважаючи на масштаби впливу на ліси військової агресії РФ проти України, які виявилися у тому, що близько 3 млн га лісів зазнали пошкоджень (що становить близько 30 % площі лісового фонду країни), значно збільшилася площа лісових пожеж на територіях бойових дій і зменшилася спроможність лісогосподарських підприємств щодо проведення заходів з охорони та захисту лісів в умовах військового стану. У цих умовах дослідження щодо втрати вуглецю в пошкоджених пожежами насадженнях є надзвичайно актуальними. Лісові пожежі завдають значної шкоди довкіллю: в атмосфері збільшується вміст окису та двоокису вуглецю, що сприяє подальшому потеплінню та виникненню парникового ефекту, руйнуються сформовані впродовж багатьох років екосистеми, на відновлених територіях зменшується біорізноманіття (Kuzyk, 2009). Найбільшим ризик виникнення пожеж є в соснових лісах, оскільки сосна містить чимало легкозаймистих смол і є світлолюбною рослиною, а відмирання скелетних гілок сосни не перешкоджає поширенню пожежі вітром (Voron *et al.*, 2021).

Однією з найважливіших функцій лісів є кліматорегульовальна. На міжнародному рівні визнано вкрай важливу роль лісу як головного наземного поглинача парникових газів і одного з найважливіших екосистемних чинників запобігання та адаптації до зміни клімату, і з цього погляду лісове господарство України має значний потенціал для зменшення ризиків зміни клімату, який все ще лишається недооціненим та не реалізованим. На 21-ій сесії Конференції Сторін Рамкової конвенції ООН про зміну клімату, яка відбулася в Парижі у 2015 р., у контексті сталого розвитку задекларовано перехід до моделі «низьковуглецевої економіки», яка здатна протистояти кліматичним змінам за умови використання потенціалу лісів щодо запобігання зміні клімату шляхом поглинання парникових газів (передусім – вуглекислого газу) та утримання вуглецю в лісових екосистемах (Tkach *et al.*, 2023; *Ways to strengthen the ecosystem services of forests*, 2023).

Мета досліджень – виявити вплив низових лісових пожеж різної інтенсивності на депонування вуглецю у фітомасі соснових деревостанів лісової та лісостепової природних зон.

Матеріали й методи. Дослідження проведено в соснових насадженнях, пошкоджених пожежами, які ростуть у Поліссі та Лівобережному Лісостепу (рис. 1).

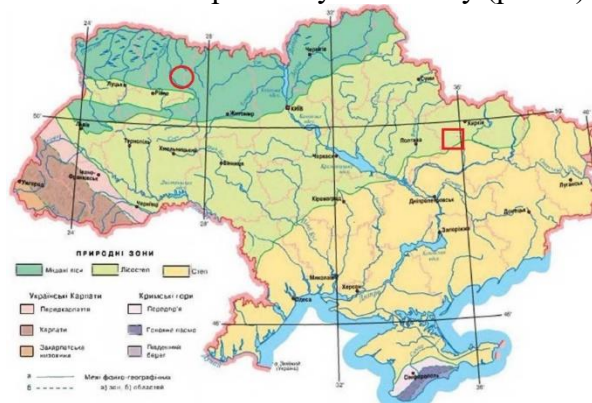


Рис. 1 – Досліджувані деревостани, пошкоджені низовими пожежами.

Червоним колом позначено сосняк, пошкоджений низовою пожежею 2012 р. (51°19'37" пн. ш., 26°37'59" сх. д.) у Поліссі, червоним квадратом – сосняк, пошкоджений низовою пожежею 2011 р. (50°11'10" пн. ш., 35°39'11" сх. д.) у Лівобережному Лісостепу України

Fig. 1 – Studied stands damaged by surface fires. The pine stand damaged by the surface fire in 2012 in Polissia (51°19'37" N 26°37'59" E) is indicated with a red circle. The pine stand damaged by the surface fire in 2011 in the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine (50°11'10" N. 35°39'11" E) is indicated with a red square

Закладено чотири постійні пробні площі (ППП) різного розміру (залежно від площі, пройденої пожежею) – від 0,10 до 0,15 га. У Поліссі – одну ділянку у філії «Сарненське лісове господарство (ЛГ)» державного спеціалізованого господарського підприємства (ДП) «Ліси

України», у Лівобережному Лісостепу – три ділянки у філії «Жовтневе ЛГ» ДП «Ліси України». Вік досліджених деревостанів становив від 55 до 60 років, тобто вони презентували середньовікові соснові деревостани, які є найпоширенішими в Україні (State Forest Resources Agency of Ukraine, 2024). У Поліссі пробні площі були розташовані в типі лісорослинних умов (ТЛУ) В₃, у Лівобережному Лісостепу – у В₂. Усі досліджувані насадження пошкоджено низовими пожежами. Як контролю використано таблиці ходу росту модальних соснових насаджень.

Інтенсивність пожеж оцінювали за середньою висотою нагару на стовбурах дерев (Voron *et al.*, 2019), значення якої становило від 0,61 до 3,76 м (табл. 1).

Таблиця 1

Таксаційна характеристика сосняків із різним рівнем пошкодження пожежами в Поліссі (філія «Сарненське ЛГ») та Лівобережному Лісостепу (філія «Жовтневе ЛГ»)

Table 1

Mensuration characteristics of pine stands with different degrees of fire damage in Polissia (Branch «Sarny Forestry») and in Left-Bank Forest-Steppe (Branch «Zhovtneve Forestry»)

№ ППП Permanent research plot number	Природ- на зона Natural zone	Рік, пора року пожежі Year, season of fire	Площа, га Area, ha	Середня висота нагару H , м Average scorch height, m	Вік, роки Age, years	H_c , м H_{av} , m	D_c , см D_{av} , cm	Клас боні- тету Site class	M , $m^3 \cdot га^{-1}$ M , $m^3 \cdot ha^{-1}$	Повно- та Density of stocking
1	Полісся Polissia	2012, весна	0,15	$1,0 \pm 0,03$	60	24,4	24,0	II	319	0,73
2	Лісостеп Forest- Steppe	2011, весна	0,10	$0,61 \pm 0,03$	60	20,5	19,2	I	344	0,83
3			0,10	$1,76 \pm 0,07$	55	18,4	18,9	I	336	0,93
4			0,10	$3,76 \pm 0,10$	55	18,8	17,5	I	342	0,89

Примітка. H_c – середня висота; D_c – середній діаметр; M – запас деревини.

Note. H_{av} – the average height; D_{av} – the average diameter; M – wood stock.

Для оцінювання післяпожежного розвитку деревостану на ділянках із певною періодичністю визначали санітарний стан за методикою «Санітарні правила в лісах України», відповідно до якої насадження за індексами стану характеризують так: 1,0–1,50 – здорові; 1,51–2,50 – ослаблені; 2,51–3,50 – дуже ослаблені; 3,51–4,50 – всихаючі; 4,51–6,00 – сухостійні (*Sanitary Forest Regulations in Ukraine*, 2016; Melnyk, 2019).

Для оцінювання запасу фітомаси після пожежі використано «Нормативи оцінки компонентів надземної фітомаси дерев головних лісоутворювальних порід України» (Lakyda, 2011). Розрахунки проводили в межах ступенів товщини. Обсяги депонованого вуглецю розраховували через два основні показники – надземну фітомасу насадження та частку вмісту вуглецю (або його обсяг) в одній тонні абсолютно сухої органічної речовини (Matthews, 1993). Фітомасу оцінювали з урахуванням запасу та базисної щільності деревини. Загальні обсяги вуглецю, депонованого в компонентах фітомаси, розраховано за середніми перехідними коефіцієнтами, які відбивають вміст вуглецю в деревині й корі в абсолютно сухому стані ($k = 0,50$) й фотосинтезувальних фракцій ($k = 0,45$) (Pasternak and Yarotskiy, 2013). Щільність депонованого вуглецю визначали як запас депонованого вуглецю на одиницю площі (га).

Втрати депонованого вуглецю в деревостанах оцінено як абсолютну та відносну різниці величин надземної фітомаси в рік пожежі та після неї.

Використано статистичні методи для оцінювання середньої висоти нагару на стовбурах дерев на різних ППП (Atramentova and Utevska, 2007) за допомогою пакету прикладних програм Microsoft Excel.

Результати. Післяпожежна динаміка санітарного стану насаджень. Дослідження динаміки санітарного стану дерев у насадженнях, пошкоджених пожежами, у Поліссі та Лівобережному Лісостепу показали, що навіть за меншої висоти нагару в Поліссі (ППП 1,

висота нагару – 1,0 м), як порівняти із сосняком в Лівобережному Лісостепу (ППП 3), де висота нагару була більшою (1,76 м), санітарний стан насадження погіршувався швидше. Середній індекс санітарного стану становив 3,7 через чотири місяці після пожежі, через 28 місяців після пожежі – 4,7, тобто деревостан змінився від всихаючого до сухостійного, а для живих дерев індекс санітарного стану збільшився від 2,8 до 3,4. Інша ситуація склалася на ППП 3 в Лівобережному Лісостепу, де санітарний стан через 31 місяць після пожежі дещо покращився. Водночас на ППП 2 із середньою висотою нагару на стовбурах 0,61 м стан деревостану практично не змінився, а на ППП 4, де середня висота нагару на стовбурах становила 3,76 м, стан деревостану погіршився. Найшвидше перехід дерев із V до VI категорії санітарного стану відбувся в сосняках Полісся на ППП 1 та Лівобережного Лісостепу на ППП 4 (табл. 2).

Таблиця 2

Динаміка санітарного стану сосняків, пошкоджених пожежами, у Поліссі та Лівобережному Лісостепу

Table 2

Dynamics of the health condition of pine forests damaged by fires in Polissia and Left-Bank Forest-Steppe

Природна зона/ номер постійної пробної площі Natural zone/ Permanent research plot number	Висота нагару, м Bark scorch height, m	Період після пожежі, місяців Period after the fire, months	Розподіл дерев за категоріями стану, % Distribution of trees by health condition categories, %						Індекс санітарного стану Health condition index*	
			I	II	III	IV	V	VI	1	2
Полісся / 1 Polissia / 1	1,00	4	0	20	36	5	29	10	2,75	3,73
		16	0	8	38	4	7	43	2,92	4,39
		28	0	0	27	21	4	48	3,44	4,73
Лісостеп, 2 Forest-Steppe, 2	0,61	3	0	7	85	7	1	0	3,00	3,02
		19	0	6	85	8	1	1	3,02	3,07
		31	0	6	83	4	0	0	2,98	2,98
Лісостеп, 3 Forest-Steppe, 3	1,76	3	0	39	44	14	3	0	2,74	2,81
		19	0	6	77	7	6	4	3,01	3,25
		31	5	21	53	0	0	1	2,61	2,65
Лісостеп / 4 Forest-Steppe / 4	3,76	3	0	10	50	3	37	0	2,89	3,67
		19	0	1	59	1	0	35	3,00	4,09
		31	1	28	21	1	0	0	–**	–**

* 1 – для живих дерев, 2 – для всіх дерев.

* 1 – for live trees, 2 – for all trees.

** На ППП № 4 у 2013 р. проведена санітарна рубка.

** In 2013, a sanitary felling was carried out at permanent research plot 4.

Втрати депонованого вуглецю в надземній фітомасі сосняків Немовицького лісництва філії «Сарненське лісове господарство» (Полісся). У міру погіршення санітарного стану насадження збільшувався відпад дерев. Через рік після пожежі (2013 р.) всохло 14 дерев (14 %), а через три роки після пожежі (2015 р.) – 42 дерева (58 %). Обсяг депонованого вуглецю в надземній фітомасі ППП 1 зменшився через рік після пожежі (2012 р.) на 734 кг (6 %), через три роки після пожежі (2015 р.) – на 4 595 кг (61 %). Щільність депонованого вуглецю теж зменшилася: від 80,42 т·га⁻¹ у 2012 р. до 49,49 т·га⁻¹ у 2015 р., тобто більш ніж у 1,5 разу (табл. 3).

Таблиця 3

Запас вуглецю в надземній фітомасі сосняку із середньою висотою нагару на стовбурах 1,0 м у Немовицькому лісництві філії «Сарненське лісове господарство» (Полісся) (ППП 1)

Table 3

Carbon stock in the aboveground biomass of the pine stand with an average scorch height of 1.0 m in the Nemovytskyi subunit in the Branch “Sarny Forestry” (Polissia) (PRP 1)

Ступінь товщини, см Thickness degree, cm	Кількість стовбурів Number of trunks			Запас вуглецю в надземній фітомасі на ППП, кг Carbon stock in aboveground biomass on PRP, kg			Щільність вуглецю на гектарі, т·га ⁻¹ Carbon density per hectare, t·ha ⁻¹		
	2012	2013	2015	2012	2013	2015	2012	2013	2015
4	1	–	–	1	–	–	0,01	–	–
6	9	6	6	32	21	21	0,21	0,14	0,14
8	4	2	1	100	50	25	0,67	0,33	0,17
10	6	5	4	84	70	56	0,56	0,47	0,37
12	3	1	–	69	23	–	0,46	0,15	0,00
14	4	2	2	130	65	65	0,87	0,43	0,43
16	3	3	3	132	132	132	0,88	0,88	0,88
18	3	2	2	177	118	118	1,18	0,79	0,79
20	10	9	5	755	680	378	5,03	4,53	2,52
22	10	10	9	970	970	873	6,47	6,47	5,82
24	2	2	–	230	230	–	1,53	1,53	0,00
26	9	9	5	1 350	1 350	750	9,00	9,00	5,00
28	9	9	4	1 530	1 530	680	10,20	10,20	4,53
30	7	7	2	1 400	1 400	400	9,33	9,33	2,67
32	5	5	3	1 150	1 150	690	7,67	7,67	4,60
34	3	3	2	780	780	520	5,20	5,20	3,47
36	2	2	2	610	610	610	4,07	4,07	4,07
38	3	3	3	87	87	87	0,58	0,58	0,58
42	3	2	1	1 238	825	825	8,25	5,50	5,50
54	3	3	3	1 238	1 238	1 238	8,25	8,25	8,25
Разом	99	85	57	12 063	11 329	7 468	80,42	75,52	49,49

Примітка. ППП – постійна пробна площа.

Note. PRP – the permanent research plot.

Втрати депонованого вуглецю в надземній фітомасі середньовікових сосняків унаслідок низових пожеж у Бабайвському лісництві філії «Жовтневе лісове господарство» (Лівобережний Лісостеп). Обчислено запаси депонованого вуглецю для 2011 р., коли сталася пожежа, та через три роки, у 2014 р. Всохли насамперед дерева 8 та 10 ступенів товщини. Водночас стрімко погіршувався стан дерев для всіх ступенів товщини. На ППП 2 через три роки після пожежі всохло 6 % дерев, тобто втрати вуглецю становили 211 кг (3 %). Щільність вуглецю зменшилася за цей період на 2,1 т·га⁻¹. На ППП 3 із середнім рівнем пошкодження (середня висота нагару становила 1,76 м) упродовж трьох років після пожежі всохло 27 дерев, тобто 19 %. Втрати депонованого вуглецю в надземній фітомасі ППП становили 637 кг. Щільність вуглецю на гектарі становила у 2011 р. 79,1 т·га⁻¹, у 2014 р. – 72,7 т·га⁻¹, тобто різниця в щільності депонованого вуглецю у надземній фітомасі дерев становила 6,4 т·га⁻¹ (8 %) (табл. 4).

Таблиця 4

Запас вуглецю в надземній фітомасі сосняку в умовах Лівобережного Лісостепу

Table 4

Carbon stock in the aboveground biomass of pine stands in Left-Bank Forest-Steppe

№ ППП Permanent research plot number	Ступінь товщини, см Thickness degree, cm	Кількість стовбурів Number of trunks		Запас вуглецю в надземній фітомасі на ППП, кг Carbon stock in above ground biomass on PRP, kg		Щільність вуглецю, т·га ⁻¹ Carbon density, t·ha ⁻¹	
		2011	2014	2011	2014	2011	2014
ППП 2; середня висота нагару на стовбурах дерев 0,61 м PRP 2; an average scorch height is 0.61 m	8	1	–	8	–	0,081	–
	10	1	–	14	–	0,14	–
	12	4	3	102	77	1,02	0,77
	14	16	15	448	420	4,48	4,20
	16	18	17	855	808	8,55	8,08
	18	27	27	1539	1 539	15,39	15,39
	20	15	13	660	572	6,60	5,72
	22	23	23	1 541	1 541	15,41	15,41
	24	11	11	1 232	1 232	12,32	12,32
	26	4	4	520	520	5,20	5,20
	28	5	5	440	440	4,40	4,40
Разом Total		125	118	7 359	7 149	3,59	71,48
ППП 3; середня висота нагару на стовбурах дерев 1,76 м PRP 3; an average scorch height is 1.76 m	8	2	–	18	–	0,18	–
	10	12	2	174	29	1,74	0,29
	12	14	5	291	104	2,91	1,04
	14	14	11	434	341	4,34	3,41
	16	26	25	1 092	1 050	10,92	10,50
	18	25	24	1 313	1 260	13,13	12,60
	20	15	15	1 043	1 043	10,43	10,43
	22	13	13	1 073	1 073	10,73	10,73
	24	14	13	1 393	1 294	13,93	12,94
	26	4	4	460	460	4,60	4,60
	28	2	2	260	260	2,60	2,60
	30	1	1	140	140	1,40	1,40
	36	1	1	220	220	2,20	2,20
Разом Total		143	116	7 911	7 274	79,11	72,74
ППП 4; середня висота нагару на стовбурах дерев 3,76 м PRP 4; an average scorch height is 3.76 m	6	1	–	5	–	0,12	–
	8	3	2	28	18	0,67	0,45
	10	6	–	72	–	1,76	–
	12	9	–	180	–	4,39	–
	14	6	1	204	37	4,98	0,91
	16	7	5	280	200	6,83	4,88
	18	5	3	295	177	7,20	4,32
	20	8	7	568	497	13,85	12,12
	22	8	6	672	504	16,39	12,29
	24	6	5	528	440	12,88	10,73
26	5	5	600	600	14,63	14,63	

Продовження табл. 4
 Table 4 (Continued)

№ ППП Permanent research plot number	Ступінь товщини, см Thickness degree, cm	Кількість стовбурів Number of trunks		Запас вуглецю в надземній фітомасі на ППП, кг Carbon stock in above ground biomass on PRP, kg		Щільність вуглецю, т·га ⁻¹ Carbon density, t·ha ⁻¹	
		2011	2014	2011	2014	2011	2014
ППП 4; середня висота нагару на стовбурах дерев 3,76 м PRP 4; an average scorch height is 3.76 m	28	1	1	140	140	3,41	3,41
	30	1	1	170	170	4,15	4,15
	36	1	–	240	–	5,85	–
	Разом Total	67	36	3 982	2 783	97,11	67,89

Примітка. ППП – постійна пробна площа.
 Note. PRP – the permanent research plot.

На ППП 4 із найвищим рівнем пошкодження, де висота нагару становила 3,76 м, було зрубано 96 дерев (59 %) і залишилося 67 дерев (41 %), які росли на площі 0,04 га, на відміну від ППП 1 та ППП 2, які займали площу 0,1 га. Різниця в щільності депонованого вуглецю в надземній фітомасі становила 29,2 т·га⁻¹. Обсяг депонованого вуглецю у фітомасі зменшилася через три роки після пожежі на 1 197,9 кг, тобто на 30 % (див. табл. 3).

Порівняння втрат вуглецю в надземній фітомасі в Поліссі на ППП із середньою висотою нагару 1,0 м та в Лівобережному Лісостепу на ППП із середньою висотою нагару 1,76 м (Vorop *et al.*, 2021) виявило, що через три роки після пожежі для Полісся ці втрати становили 38 %, а для Лівобережного Лісостепу – 19 %. Визначено, що втрати депонованого вуглецю після низової пожежі на найбільш пошкодженій ППП 3 становили 30 %, а на найменш пошкодженій ППП 1 – 3 % (рис. 2).

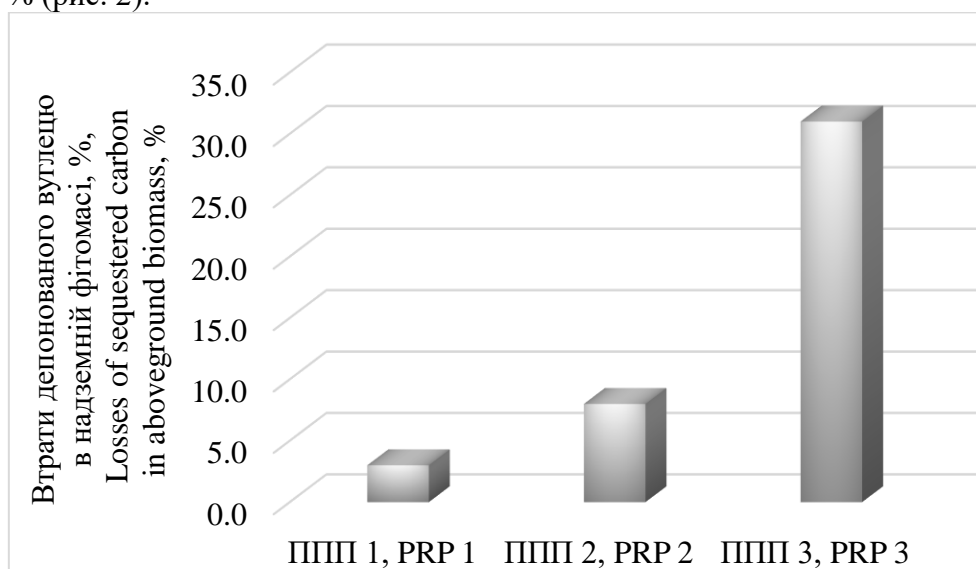


Рис. 2 – Втрати депонованого вуглецю в надземній фітомасі середньовікового сосняку Бабайського лісництва філії ДП «Жовтневе лісове господарство» на ППП із різним рівнем пошкодження низовою пожежею 2011 р., які зафіксовано у 2014 р. ППП 1 – висота нагару 0,61 м, ППП 2 – 1,76 м, ППП 3 – 3,76 м
 Fig. 2 – Losses of carbon stock in the aboveground biomass of the middle-aged pine stands in the Babai subunit of the Branch “Zhovtneve Forestry” on the permanent research plots (PRPs) with different degrees of damage from the surface fire in 2011, which were recorded in 2014.
 PRP 1– scorch height is 0.61, PRP 1 – 1.73 m, PRP – 3.76 m

Отже, втрати депонованого вуглецю в надземній фітомасі середньовікових сосняків, пошкоджених пожежею 2011 р., через три роки, у 2014 р., становили 3% ($2,1 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$) для ППП 1 (висота нагару на стовбурі – 0,61 м), 8 % ($6,4 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$) для ППП 2 (висота нагару на стовбурі 1,76 м), а для найбільш пошкодженого насадження на ППП 3 (висота нагару на стовбурі 3,76 м) – 30 % ($29,2 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$).

Обговорення. На запаси всіх резервуарів вуглецю впливає інтенсивність пожежі та тривалість періоду від моменту пошкодження насадження. Так, у середньому відмінності в запасах вуглецю, порівнюючи з непорушеними пожежею лісами, становлять -91,3 та +155,5 % у перший рік після пожежі для живої та мертвої деревини відповідно і збільшуються на 0,6 % для живої та зменшуються на 1,4 % для мертвої деревини з кожним роком після пожежі. Втрати депонованого вуглецю в лісах, пошкоджених пожежами, залежать від багатьох факторів, таких як тип лісу, ступінь пошкодження, час відновлення та інші. Частіше повідомляють про негативний вплив лісових пожеж на депонування вуглецю переважно через втрати надземної біомаси в екосистемі (Bond-Lamberty *et al.*, 2007), рідше – унаслідок вигорання органічної речовини ґрунту (Walker *et al.*, 2019).

Попередніми нашими дослідженнями (Koval *et al.*, 2018) виявлено особливості депонування вуглецю в молодому сосновому насадженні Лівобережного Лісостепу, пошкодженому низовою пожежею 2011 р. Проведене за аналогічною методикою дослідження показало, що втрати вуглецю для компонентів надземної фітомаси у пошкоджених пожежею насадженнях становили 22–30 % проти непорушених насаджень. Використано також дендрохронологічні методи (Prokopuk and Netsvetov, 2016; Koval *et al.*, 2018), які дали можливість кількісно оцінити динаміку депонування вуглецю в стовбуровій деревині *Pinus sylvestris* L. Дендрохронологічними методами виявлено (Voron *et al.*, 2021), що маса вуглецю в стовбурах дерев варіює протягом онтогенезу. Накопичення вуглецю в стовбуровій деревині суттєво не різнилося на контролі та в пошкодженому вогнем насадженні протягом допожежного періоду (2006–2010 рр.), але впродовж післяпожежного періоду (2011–2017 рр.) відбулося збільшення накопичення вуглецю в стовбуровій деревині сосни пошкодженого насадження на 20 % унаслідок покращення умов освітлення та живлення для дерев, що залишилися живими після інтенсивного відпаду ослаблених та пошкоджених дерев. Тобто в дерев, які залишилися живими, збільшується приріст, що свідчить про інтенсивніше накопичення вуглецю. Швидкість акумулювання вуглецю в стовбурах дерев коливалася впродовж онтогенезу, і водночас його маса збільшувався з віком дерев. Проте запаси вуглецю всохлих дерев не було враховано. Приріст маси депонованого вуглецю після пожежі став інтенсивнішим, ніж на контролі, однак не компенсував загальні втрати від пожежі (Koval *et al.*, 2018).

У наших дослідженнях втрати вуглецю в сосняках, пошкоджених пожежами різної інтенсивності, становили від 8 до 61 % з урахуванням того, що санітарними рубками із насаджень було вилучено як мертві, так і ослаблені дерева. В умовах В₂ у Лівобережному Лісостепу на ППП з вищою висотою нагару (1,76 м) втрати депонованого вуглецю в надземній фітомасі були меншими, ніж в умовах В₃ в Поліссі на ППП, де висота нагару була меншою (1,0 м).

Дослідження взаємозв'язків між втратою фітомаси внаслідок пожежі і часткою всихання дерев у насадженнях сосни жовтої (*Pinus ponderosa*) показало (Meigs *et al.*, 2009), що в разі згорання до 13 % доступної наземної біомаси відпад становив 22 %, у разі спалювання від 13 до 35 % біомаси відпад був 54 %, а понад 35 % – 98 %. Згодом, біомаса лісів відновлюється, як і запас вуглецю, який було втрачено під час пожежі. Цей процес залежить від інтенсивності пожежі й екологічних умов, що склалися в результаті (ґрунтових, гідрологічних, заростання світлолюбною рослинністю тощо).

Нашими дослідженнями в Поліссі виявлено, що щільність депонованого вуглецю в надземній фітомасі сосняку із середньою висотою нагару 1,0 м у рік пожежі (2012 р.) становила $80,4 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, через рік (2013 р.) – $75,5 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, через три (2015 р.) – $50 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. Тобто втрати

в щільності депонованого вуглецю станом на 2013 р. становили $4,87 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, а станом на 2015 р. – $30,4 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. Отже, втрати депонованого вуглецю в надземній фітомасі сосняку, пошкодженого весняною пожежею 2012 р. в Поліссі (із середньою висотою нагару на стовбурах дерев 1,0 м), через рік після пожежі становили 6,1 %, а вже через три роки, у 2015 р., – 38 % відносно базового рівня – запасу вуглецю у фітомасі деревостанів у 2012 р. (рис. 3), за всихання 14 та 42 % дерев відповідно.

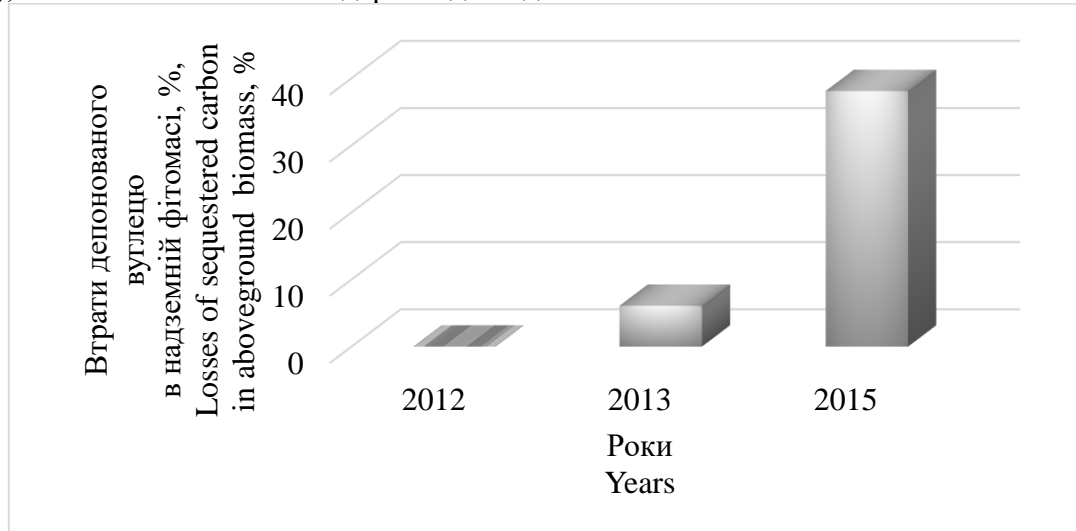


Рис. 3 – Втрати депонованого вуглецю в надземній фітомасі середньовікового сосняку Немовицького лісництва філії «Сарненське лісове господарство», пошкодженого низовою пожежею 2012 р.

Fig. 3 – Losses of carbon stock in the aboveground biomass of the middle-aged pine stand in Nemovytsky forestry in the Branch "Sarny Forestry", damaged by a surface fire in 2012

Погіршення санітарного стану і всихання дерев у сосняках, пошкоджених пожежами, у Поліссі відбувалося інтенсивніше, ніж у Лівобережному Лісостепу. Відповідно втрати депонованого вуглецю в сосняках були більшими в Поліссі.

Через три роки після низової пожежі втрати депонованого вуглецю в надземній фітомасі в Лівобережному Лісостепу на ППП з висотою нагару 0,61 м становили 3 %, на ППП з висотою нагару 1,76 м – 8 %, а на ППП з висотою нагару 3,76 м – 30 % (рис. 3)

Стрімке всихання сосни в Поліссі після пожеж, а отже, і зменшення депонованого вуглецю в надземній фітомасі, ймовірно, спричинене тим, що рівень ґрунтових вод підходить близько до поверхні землі, що зумовило формування кореневих лап, які мають тонку кору й швидко пошкоджуються вогнем, що перешкоджає надходженню водного розчину з поживними речовинами із ґрунту, на відміну від сосни, яка росте в Лісостепу, де корені дерев більш захищені від вогню, тому що через низький рівень ґрунтових вод в умовах Лісостепу кореневі лапи зазвичай відсутні (Voron *et al.*, 2021).

Виявлені нами закономірності підтверджують також дослідження втрат вуглецю в насадженнях, пошкоджених пожежами 2015 р., у південній частині острова Суматра (Siahaan *et al.*, 2020). Виявлено, що втрати вуглецю різняться для різних гіротопів. Найбільшою втрата вуглецю була у вторинних торф'яно-болотних лісах – $94,2 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, меншою – у лісових насадженнях, які ростуть у сухіших умовах, – $36,3 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. У дослідженні було визначено запаси вуглецю на кожній ділянці для трьох резервуарів вуглецю: надземної фітомаси, відмерлої деревини та підстилки. Отже, у насадженнях, які ростуть у вологіших умовах, втрати вуглецю після пожеж були більшими, що узгоджується з результатами наших досліджень.

Висновки. Післяпожежні втрати вуглецю в надземній фітомасі внаслідок відпаду дерев залежать насамперед від інтенсивності пожежі та типу пошкодження, тривалості періоду після пожежі, а також пожежостійкості насаджень (вогнестійкості на рівні дерев у насадженні).

Визначено особливості відпаду дерев і втрат депонованого вуглецю в надземній фітомасі сосняків, пошкоджених низовими пожежами, у Поліссі та Лівобережному Лісостепу. Так,

отримані попередні дані свідчать, що для Полісся для типу лісорослинних умов В₃ характерна більша інтенсивність всихання, ніж для Лівобережного Лісостепу для типу лісорослинних умов В₂ за меншої інтенсивності пожежі, оціненої за середньою висотою нагару. Відповідно найбільші втрати депонованого вуглецю виявлено в сосняках, пошкоджених пожежами, у вологіших умовах Полісся (В₃), порівнюючи із сосняками Лівобережного Лісостепу (В₂). Необхідні подальші дослідження динаміки депонованого вуглецю в насадженнях, пошкоджених пожежами, та більше просторове та типологічне охоплення.

Подяки. Автори висловлюють подяку анонімним рецензентам за цінні поради, корисні та конструктивні рекомендації та покращення тексту.

Джерела фінансування. Статтю підготовлено авторами в рамках плану досліджень УкрНДДЛГА (тема 7, № держреєстрації: 0120U101893), підтриманого Держлісагентством України.

ПОСИЛАННЯ – REFERENCES

- Atramentova, L.O. and Utevska, O.M. (2007) *Statistical methods in biology*. Kharkiv: KhNU named after V. N. Karazin (in Ukrainian).
- Bilous, A., Myroniuk, V., Holiaka, D., Bilous S., See, L. and Schepaschenko, D. (2017) 'Mapping growing stock volume and forest live biomass: a case study of the Polissya region of Ukraine', *Environmental Research Letters*, 12, e105001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa8352>
- Bond-Lamberty, B., Peckham, S. D., Ahl, D. E., & Gower, S. T. (2007). Fire as the dominant driver of central Canadian boreal forest carbon balance. *Nature*, 450(7166), 89-92.
- Buksha, I.F., Butrym, O.V. and Pasternak, V.P. (2008) *Inventory of greenhouse gases in the sector of land use and forestry*. Kharkiv: KhNAU. ISBN 978-966-1664-06-6 (in Ukrainian).
- Buksha, I.F., Raspopina, S.P. and Pasternak, V.P. (2012) 'Carbon stock in soil and litter in forest monitoring plots', *Forestry and Forest Melioration*, 120, pp. 106–112 (in Ukrainian).
- Koval, I.M., Voron, V.P. and Sydorenko, S.G. (2018) 'Carbon sequestration in the young pine stands damaged by fire within Left-bank forest-steppe', *Forestry and Forest Melioration*, 133, pp. 78–84 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.33220/1026-3365.133.2018.78>
- Kuzyk, A.D. (2009) 'Forest typological aspects of fire safety of woods', *Scientific Bulletin of UNFU*, 19(14), pp. 210–214 (in Ukrainian).
- Kuzyk, A.D. (2019) *Ecological and forestry basics of fire safety in the forests of Male Polissia*. Lviv: SPOLOM. ISBN 978-966-919-379-7 (in Ukrainian).
- Lakyda, P.I. (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).
- Lakyda, P., Shvidenko, A., Bilous, A., Myroniuk, V., Matsala, M., Zibtsev, S., Schepaschenko, D., Holiaka, D., Vasylyshyn, R., Lakyda, I., Diachuk, P. and Kraxner, F. (2019) 'Impact of disturbances on the carbon cycle of forest ecosystems in Ukrainian Polissya', *Forests*, 10, 337. <https://doi.org/10.3390/f10040337>
- Matthews, G.R. (1993) *The carbon content of trees*. Edinburgh: Forestry Communication. ISBN 0855383178, 9780855383176.
- Meigs, G.W., Donato, D.C., Campbell, J.L., Martin, J.G. and Law, B.E. (2009) 'Forest fire impacts on carbon uptake, storage, and emission: The role of burn severity in the Eastern Cascades, Oregon', *Ecosystems*, 12(8), pp. 1246–1267. <https://www.jstor.org/stable/25622882>
- Melnyk, V.V. (2019) 'Assessment of the sanitary condition of the scotch pine plantations in fresh pine forests of Ukrainian Polissia exclusion zone', *Scientific Bulletin of UNFU*, 29(3), pp. 39–43 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.15421/40290308>
- NGO "Forest Com" (2023) *Ways to strengthen the ecosystem services of forests to increase the amount of carbon dioxide absorption and mitigate the climate change effect*. Available at: <https://forestcom.org.ua/news-post/shlyahi-posilennya-ekosistemnih-poslug-lisiv-dlya-zbilshennya-obsyagiv-poglinannya-vuglekislogo-gazu> (Accessed: 18 March 2024).
- Pasternak, V.P. and Yarotskiy, V.Yu. (2013) 'Carbon stock and dynamic assessment in the forests of North-East of Ukraine', *Scientific Bulletin of UNFU*, 23(6), pp. 57–62 (in Ukrainian).
- Prokopuk, Yu.S. and Netsvetov, M.V. (2016) 'Dynamics of depositing carbon in the stubble biomass of *Quercus robur* L. in the park Theophania', *Scientific Bulletin of UNFU*, 26 (3), pp. 158–164 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.15421/40260326>
- Sanitary Forest Regulations in Ukraine* (2016). Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 756 dated 26 October 2016. Available at: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/555-95-п> (Accessed: 18 March 2024) (in Ukrainian).
- Shpakivska, I.M. and Maryskevych, O.G. (2009) 'Estimation the reserves of organic carbon in the forest ecosystems of Eastern Beskydy', *Forestry and Forest Melioration*, 115, pp. 176–180 (in Ukrainian).
- Siahaan, H., Kunarso, A., Sumadi, A., Purwanto, P., Rusolono T., Tiryan, T., Sumantri, H. and Haasler, B. (2020) 'Carbon loss affected by fires on various forests and land types in South Sumatera', *Indonesian Journal of Forestry Research*, 7(1), pp. 15–25.

- State Forest Resources Agency of Ukraine (2024) *Public report of the Head of the State Forest Resources Agency of Ukraine for 2023*. Available at: <https://forest.gov.ua/storage/app/sites/8/uploaded-files/%D0%9F%D1%83%D0%B1%D0%BB%D1%96%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%B9%20%D0%B7%D0%B2%D1%96%D1%82%20%D0%93%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D0%B8%202023.pdf> (Accessed: 2 April 2024).
- Siahaan, H., Kunarso, A., Sumadi, A., Purwanto, P., Rusolono, T., Tiryana, T., ... & Haasler, B. (2020). Carbon loss affected by fires on various forests and land types in South Sumatera. *Indonesian Journal of Forestry Research*, 7(1), 15-25. <https://doi:10.20886/ijfr.2020.7.1.15-25>
- Sydorenko, S., Voron, V., Koval, I., Sydorenko, S., Rumiantsev M. and Hurzhii, R. (2021) 'Postfire tree mortality and fire resistance patterns in pine forests of Ukraine', *Central European Forestry Journal*, 67, pp. 21–29. <https://doi.org/10.2478/forj-2020-0029>
- Tkach, V.P., Vysotska N.Yu., Torosov, A.S., Buksha, I.F., Pasternak, V.P., Los, S.A., Kobets, O.V., Tarnopilska, O.M., Tarnopilskyi, P.B., Kalashnikov, A.O., Zhezhkun, I.M., Koval I.M., Sydorenko, S.H., Sydorenko, S.V., Bondarenko, V.V. and Bondar, O.B. (2023) *Economic evaluation of ecosystem services of Ukrainian forests*. Kharkiv: URIFFM (in Ukrainian). <https://doi.org/10.33220/2023.978-617-8195-57-1>
- Voron, V.P., Koval I.M., Sydorenko S.G., Melnyk E.E., Bologov O.Yu., Tkach O.M. and Tymoshchuk I.V. (2019) *Recommendations on measures to increase the fire resistance of forests and methods predicting their post-fire development*. Kharkiv: URIFFM (in Ukrainian).
- Voron, V.P., Koval, I.M., Sydorenko, S.G., Melnyk, E.E., Tkach, O.M., Borysenko, V.G., Tymoshchuk, I.V. and Bologov, O.Yu. (2021) *Pyrogenic transformation of forests of Ukraine*. Kharkiv: Planet-Print. SSBN 978-617+77897-54-4 (in Ukrainian).
- Walker, R.B., Coop, J.D., Downing, W.M., Krawchuk, M. A., Malone, S. L., & Meigs, G. W. (2019). How much forest persists through fire? High-resolution mapping of tree cover to characterize the abundance and spatial pattern of fire refugia across mosaics of burn severity. *Forests*, 10(9), 782. <https://doi.org/10.3390/f10090782>

ASSESSMENT OF LOSSES OF CARBON STORED IN THE ABOVEGROUND BIOMASS OF PINE STANDS DAMAGED BY SURFACE FIRES IN THE POLISSIA AND LEFT-BANK FOREST-STEPPE

Koval I.M.^{1*}, Voron V.P.², Sydorenko S.H.³, Melnyk E.E.⁴, Pasternak V.P.⁵, Budzinsky I.L.⁶

The article presents findings on the loss of stored carbon in the above-ground biomass of middle-aged pine stands as a result of their damage by surface fires in Polissia (forest natural zone in Ukraine) and Left-Bank Forest-Steppe are. In the conditions of Polissia, in the stand with a scorch height of about 1 m, the proportion of tree mortality increased as the health condition of the trees deteriorated. It was found that 14% of the trees had died one year after the fire and 58% of trees had died three years after the fire. The loss of stored carbon in aboveground biomass was 6% one year after the fire and 61% three years after the fire. In the conditions of the Left-Bank Forest-Steppe, the loss of stored carbon in the aboveground biomass of middle-aged pine stands damaged by a fire with a scorch height of 0.61 cm was 3% three years after the fire. The loss was 8% for the stand with a scorch height of 1.76 cm and 30% for the most damaged pine stand with an average scorch height of 3.76 cm.

Key words: pine stands, tree mortality, state dynamics, scorch height.

Одержано редколегією 15.04.2024

¹ Koval Iryna, Dr. habil. (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: koval_iryana@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6328-1418>

² Voron Volodymyr, Dr. habil. (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: 52corvus@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1059-3032>

³ Sydorenko Serhiy, 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: serhii88sido@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5972-0067>

⁴ Melnyk Yevgen, 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: wudckij@bigmir.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9821-2751>

⁵ Pasternak Volodymyr, Dr. 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: pasternak@uriffm.org.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1346-1968>

⁶ Budzinsky Ihor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 15 Geroiv Oborony Street, Kyiv, 03041, Ukraine; State Forest Resources Agency of Ukraine, 9-A Shota Rustaveli Street, Kyiv, Ukraine. E-mail: igor_budzynskiy@meta.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0298-5494>

* Correspondence: koval_iryana@ukr.net