

**ЕКОЛОГІЯ І МОНІТОРИНГ**

УДК 630.114.351:630.425:630.43:630.561.243

<https://doi.org/10.33220/1026-3365.144.2024.88>**ПІДСТИЛКА ЯК МАРКЕР АНТРОПОТЕХНОГЕННИХ ЗМІН  
У СОСНОВИХ ЛІСАХ РІВНИННОЇ ЧАСТИНИ УКРАЇНИ**В. П. Ворон<sup>1</sup>, І. М. Коваль<sup>2\*</sup>

Виявлено особливості трансформації ланки «опад – підстилка» соснових лісостанів в умовах антропогенного забруднення та рекреації. Запас і структура лісової підстилки залежать від типу лісорослинних умов і віку насаджень. Через порушення екологічних умов уповільнюються процеси мінералізації фітодетриту. Унаслідок цього накопичується мортмаса, що відбивається на запасах, потужності та структурі підстилки. Так, у техногенній зоні період формування лісової підстилки збільшується на 0,9–3,0 року, а вміст важких металів у ній – у 3,4–5,5 разу, ніж за межами цієї зони. У міру збільшення рівня рекреаційного навантаження зменшується запас підстилки, а тривалість існування мортмаси в усіх підгоризонтах подовжується (різниця між сосняками першої та четвертої стадій рекреаційної дигресії становить один рік). Одержані дані свідчать про доцільність використання показників запасу, потужності та структури підстилки для індикації інтенсивності антропогенного впливу.

Ключові слова: запаси підстилки, потужність підстилки, *Pinus sylvestris* L., промислове забруднення, рекреаційне навантаження, лісові пожежі.

**Вступ.** Раціональне лісокористування має базуватися на комплексному вивченні механізму впливу екологічних факторів на лісостани. Однією з необхідних умов підтримання стійкості лісових насаджень є нормальне функціонування зооценозу й мікробоценозу, що є гетеротрофним блоком, який забезпечує утилізацію, перебудову та розкладання складних речовин. Підстилка відрізняється як від мінеральної частини ґрунту, так і від опадів органічним складом, факторами утворення тощо. Кожен із шарів підстилки є дискретним утворенням із певними фізичними, хімічними й біотичними властивостями (Chornobay, 2000; Ganteaume *et al.*, 2011). Підстилка як біоценотичній системі притаманна просторова ієрархічність процесів, яка визначається якістю субстрату (Bogatyrev, 1996) та загальною схемою реакцій (Alexandrova, 1980), причому кожна наступна взаємодія не є можливою без попередніх процесів (Chornobay, 2000). Особливістю підстилки є також те, що попередні етапи трансформації відбуваються в її вище розташованих шарах (Davidova, 1983; Grishina, 1986). Структура і період існування профілю підстилки визначаються співвідношенням стійких і нестійких компонентів та їхньою взаємодією в певних екологічних умовах (Bogatyrev, 1996). Інтенсивність деструкції фітодетриту залежить як від початкової резистентності його компонентів (наприклад лігніну, целюлози), так і від вторинної резистентності проміжних і кінцевих продуктів, що утворюються в процесі розкладання (Alexandrova, 1980; Davidova, 1983).

Оскільки лісова підстилка бере участь у процесі ґрунтоутворення, важливим є питання її трансформації. Інтенсивність деструктивного процесу залежить як від кількості та якості підстилки й умов розкладання, так і від активності процесу розкладання (Karpachevsky, 1981; Uchvatov, 1983). Водночас деструкцію мортмаси може лімітувати комплекс природних і антропогенних чинників (Davidova, 1983; Koptsik *et al.*; 2001; Vorobeychik, 2003;

<sup>1</sup> 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](mailto:52corvus@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1059-3032>

<sup>2</sup> 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](mailto:koval_iryana@ukr.net), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6328-1418>.

\* Адреса для кореспонденції: [koval\\_iryana@ukr.net](mailto:koval_iryana@ukr.net)

Banerjee *et al.*, 2023). За певних умов товщина та структура лісової підстилки можуть сприяти виникненню пожежі. Оскільки підстилка є основною складовою горючих матеріалів у лісовій екосистемі, від її маси та стану може залежати розвиток пожежі (Ganteaume *et al.*, 2011). Це є важливим для сосняків не тільки Степу, але й Полісся, де запас підстилки може сягати  $830 \text{ ц} \cdot \text{га}^{-1}$ , а товщина – 15 см (Voron, 2021). Потужність підстилки є зручним інтегральним параметром сапрофітного комплексу діяльності ґрунтової біоти, який може бути ефективно використаний у діагностиці антропогенного порушення лісових екосистем (Vodyanitskii *et al.*, 2016).

*Метою досліджень* було виявити особливості трансформації ланки «опад – підстилка» соснових лісостанів в умовах антропогенного впливу.

**Матеріали й методи.** Дослідження формування підстилки в разі аеротехногенного забруднення проводили на постійних пробних площах (ППП) (Voron, 2021) у техногенних зонах:

– Рівненського виробничого акціонерного товариства «Азот» (РВАТ «Азот») та Лисичансько-Рубіжансько-Северодонецької промагломерації (ЛРСПА) із домінуванням у викидах  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NH}_3$ ;

– Зміївської теплової електростанції (ЗТЕС), у викидах якої переважають оксиди сірки, азоту та попіл із великим умістом важких металів.

Величину опадів й запасів підстилки визначали в сосняках зеленої зони м. Харків, які становлять екологічний ряд за стадією рекреаційної дигресії (СРД) (Voron *et al.*, 2008).

Вихідною точкою оцінювання процесу біокругообігу речовин є свіжий опад, із якого починається весь процес детритної трансформації. Під опадом розуміють як процес надходження фітодетриту на поверхню ґрунту, так і мортмасу, з якої формується верхній шар підстилки.

Для обліку надходження опадів на кожній ППП закладено по 10 облікових площадок площею  $1 \text{ м}^2$ . Облік надходження опадів здійснювали впродовж року, з початку жовтня попереднього до кінця вересня поточного року. Масу підстилки визначали наприкінці вересня з розподілом на шари мінералізації на 10 ділянках розміром  $1 \times 1 \text{ м}$ . Одночасно виділяли три шари підстилки (Chornobay, 2000):

– L, опадовий – складається зі свіжого опадів, що зберіг початкову форму, морфологію та потужність побурілих рослинних залишків рихлого складення;

– F, ферментативний – бурі (коричнево-бурі) органічні залишки, які наполовину розклалися та втратили початкову форму та потужність, ущільнений, зв'язаний тонким корінням наземного покриву та гіфами грибів;

– H, гуміфікаційний – темно-бурий, чорний, що повністю розклався, дещо брудниться, часто порошкоподібної структури з домішками шматочків рослин і плодів, густо пронизаний корінням, з домішкою мінеральних часток ґрунту.

Запаси підстилки визначали за методикою Л. Є. Родіна та Н. І. Базилевича (Rodin and Bazilevich, 1965). Хід процесів розкладання оцінювали за підстилково-опадовим коефіцієнтом (ПОК), тобто за відношенням маси підстилки до маси річного опадів, а також за коефіцієнтом накопичення (K), який, згідно з Ю. М. Чернобаєм (Chornobay, 2000), є відношенням маси нижчого шару мінералізації до маси вище розташованого. Наприклад, для шару L коефіцієнт накопичення  $K_L$  є відношенням маси шару ( $M_L$ ) до маси річного опадів ( $M_{\text{ОП}}$ ):  $K_L = M_L / M_{\text{ОП}}$ . При  $K > 1$  у шарі переважає процес накопичення, при  $K < 1$  – розкладання, а при  $K = 1$  потоки надходження і витрат є збалансованими. Мортмаса перебуває в межах кожного шару підстилки певний час, пропорційний до величини K. Тривалість існування (T) для маси кожного із шарів становить:  $T_L = T_{\text{ОП}} \cdot K_L$ ;  $T_F = T_L \cdot K_F$ ;  $T_H = T_F \cdot K_H$ .

Маса кожного шару є результатом проходження всіх попередніх стадій розкладання. Характерна тривалість існування маси (TM) шару становить суму TM попереднього шару і T цього шару:

$$TM_L = TM_{\text{ОП}} + T_L; TM_F = TM_L + T_F; TM_H = TM_F + T_H.$$

Сумарний вік підстилки – це тривалість існування системи, яка збільшується від шару до шару, наближаючись у максимумі до значення підстилково-опадового коефіцієнта – ПОК.

Зразки рослинного матеріалу (хвою) відібрано для визначення в них вмісту важких металів методом атомно-абсорбційної спектрофотометрії (Voron *et al.*, 2008).

**Результати.** У разі аеротехногенного забруднення внаслідок накопичення фітотоксикантів відбувається передчасне осипання хвої другого і третього року. Так, у зоні Лиси-чансько-Рубіжансько-Северодонецької промислової агломерації (ЛРСПА) у сильно пошкодженому сосняку (на відстані 3 км від ЛРСПА) уміст у хвої Сульфуру більше ніж втричі перевищує його вміст у хвої сосни на контрольній ділянці (на відстані 30 км від ЛРСПА) (табл. 1).

Таблиця 1

**Вміст Сульфуру у хвої середньовікових сосняків у техногенній зоні ЛРСПА\***

Table 1

**Sulfur content in pine needles in the technogenic zone of LRSPA\***

Відстань від джерела забруднення, км Distance to the source of pollution, km	Вміст Сульфуру у хвої різного віку, % Sulfur content in needles of different ages, %	
	Однорічна One-year-old	Дворічна Two-year-old
3,0	0,27	0,30
9,0	0,09	0,12
30,0	0,08	0,11

\*ЛРСПА – Лисичансько-Рубіжансько-Северодонецька промислова агломерація.

LRSPA – Lysychansk-Rubizhne-Severodonetsk Industrial Agglomeration.

Виявлено, що внаслідок забруднення в техногенній зоні РВАТ «Азот» уміст Сульфуру в опаді був в 1,3–2,5 разу, у підстилці – в 1,6–2,2 разу більшим, ніж на контролі. Децю меншою була різниця у вмісті Нітрогену: в опаді – в 1,1–1,6 разу і в підстилці – в 1,5–1,7 разу (табл. 2).

Таблиця 2

**Вміст Сульфуру й Нітрогену в підстилці та опаді 70-річних сосняків в зоні РВАТ «Азот»\***

Table 2

**Sulfur and nitrogen content in the forest litter and the floor of 70-year-old pine forests in the area of RIJSC “Azot”**

Відстань від РВАТ «Азот», км Distance to “Azot”, km	Сульфур Sulfur				Нітроген Nitrogen			
	Підстилка The litter		Опад The floor		Підстилка The litter		Опад The floor	
	%	кг·га <sup>-1</sup> kg·ha <sup>-1</sup>	%	кг·га <sup>-1</sup> kg·ha <sup>-1</sup>	%	кг·га <sup>-1</sup> kg·ha <sup>-1</sup>	%	кг·га <sup>-1</sup> kg·ha <sup>-1</sup>
4	0,28	92	0,22	12	2,09	686	1,71	93
7	0,21	63	0,14	8	1,98	595	1,39	83
9	0,22	61	0,11	7	1,78	492	1,20	77
25	0,13	27	0,09	6	1,20	249	1,09	74

\*РВАТ «Азот» – Рівненське виробниче акціонерне товариство «Азот».

\*RIJSC “Azot” – Rivne Industrial Joint Stock Company “Azot”.

У разі аеротехногенного забруднення Нітрогеном максимальний уміст у підстилці загального Нітрогену (3,15 %) відзначено в найбільш забрудненому насадженні. У міру віддалення від техногенної зони ЛРСПА вміст Нітрогену знижується: на відстані 5 км – на 3,12 %, на відстані 7 км – на 2,47 %.

Дослідження підстилки в сосняках, що перебували під впливом ЗТЕС, виявили, що зольність і вміст важких металів збільшуються від верхнього (опадового) до нижнього (гуміфікаційного) шару підстилки. Різниця між цими шарами досягає десятків разів. Для

важких металів у підстилці ці тенденції є особливо виразними. Наприклад, уміст Cr у нижньому шарі підстилки є у 12–14 разів більшим, ніж в опаді, Cu – в 14–19 разів, Zn – у 7–11 разів, Sr – у 8–13, Pb – у 13–18 разів, причому загальний уміст і перевищення за вмістом нижніх шарів над вище розташованими збільшуються у міру наближення до джерела забруднення. У верхньому шарі підстилки вміст Хрому є в 2,0–5,0, Цинку – в 1,6–2,0, Плюмбуму – в 1,6–3,0 разу вищим, ніж в опаді. Вміст важких металів у підстилці збільшується вниз за її профілем. Особливо високий уміст важких металів зафіксовано в нижньому шарі підстилки (табл. 3).

Таблиця 3

Уміст важких металів у підстилці соснових насаджень зони Зміївської теплової електростанції, мг·кг<sup>-1</sup>

Table 3

**Heavy metal content in the litter of pine forests in Zmiyiv Thermal Power Plant area, mg·kg<sup>-1</sup>**

Відстань, до ЗТЕС км Distance to the Power Plant, km	Шар Layer	Уміст важких металів Heavy metal content					
		Cr	Zn	Ni	Cu	Pb	Σ
4,6	L	1,9	28,8	3,0	3,8	3,1	155,3
10,5		1,4	22,5	1,2	3,6	1,8	132,8
16,0		0,9	9,9	0,6	1,0	0,8	52,4
28,2		0,9	6,4	0,6	1,0	0,8	68,2
4,6	F	2,9	46,8	5,6	9,0	5,8	157,4
10,5		5,2	24,6	6,2	7,7	2,9	330,7
16,0		1,6	25,6	3,8	5,1	2,4	118,9
28,2		2,2	15,0	3,6	4,8	2,3	106,6
4,6	H	21,5	70,8	53,8	28,3	14,2	1638,9
10,5		25,6	64,0	38,4	20,5	11,3	1459,5
16,0		12,3	99,5	27,9	19,9	12,3	587,9
28,2		6,3	41,3	10,6	13,2	5,0	335,9

Середнє надходження опадів в сосняках у техногенній зоні РВАТ «Азот» коливається від 5,4 до 6,8 т·га<sup>-1</sup>·рік<sup>-1</sup>, у зоні ЛРСПА – в межах 6,7–9,5 т·га<sup>-1</sup>·рік<sup>-1</sup>, у зоні ЗТЕС – у межах 9,7–11,4 т·га<sup>-1</sup>·рік<sup>-1</sup>. У разі збільшення техногенного навантаження з одного боку зменшується частка хвої у складі опадів, з іншого – зростає запас підстилки, тому що забруднювачі гальмують процес розкладання органічних речовин. Так, якщо за межами техногенної зони маса підстилки становить 20,8 т, то в сосняках у техногенній зоні РВАТ «Азот» на відстані 9 км від джерела забруднення вона є більшою в 1,3–1,6 разу. Особливо значним є накопичення підстилки в техногенно пошкоджених сосняках у степу. За межами дії техногенних викидів загальна маса підстилки в сосняках перевищує 50 т·га<sup>-1</sup>. У зоні ЛРСПА максимальний запас підстилки у сильно пошкоджених сосняках становив 54,6 т·га<sup>-1</sup>, що є на 18 % більшим, ніж за межами дії техногенних викидів (контроль).

У зоні забруднення ЗТЕС загальна маса підстилки на 20 % є більшою проти контролю. Визначення запасів підстилки дає змогу оцінити сумарне накопичення важких металів. Оскільки вміст важких металів і запас підстилки збільшуються у міру наближення до ЗТЕС, відносна величина забруднення сумарного накопичення суттєво збільшується. Так, загальний запас важких металів у підстилці коливається від 158,8 до 384,3 г·га<sup>-1</sup>, що є в 3,4–5,5 разу більшим, ніж на контролі (табл. 4, 5).

Накопичення важких металів збільшується зверху донизу підстилки. Так, сумарний вміст Ті в шарі Н у радіусі до 8,5 км від ЗТЕС є у 92–158 разів, Mn – у 32–82 рази, Cr – у 33–52, V – у 68–92, Ni – у 70–178 разів вищим, ніж у шарі L.

**Маса підстилки й опадів та підстилково-опадовий коефіцієнт у сосняках техногенної зони**

Table 4

**Mass of litter and litter-floor coefficient in pine forests of the industrial zone**

Відстань від джерела забруднення, км Distance to pollution source, km	Маса підстилки за горизонтами Litter mass by horizons						Загальна маса, т·га <sup>-1</sup> Total mass, t·ha <sup>-1</sup>		ПОК* FLC*
	L		F		H		Підстилка The litter	Опад The floor	
	т·га <sup>-1</sup> t·ha <sup>-1</sup>	%	т·га <sup>-1</sup> t·ha <sup>-1</sup>	%	т·га <sup>-1</sup> t·ha <sup>-1</sup>	%			
Рівненське виробниче акціонерне товариство «Азот» Rivne Industrial Joint Stock Company "Azot"									
4	7,06	21,5	7,17	21,8	18,60	56,7	32,83	5,41	6,06
7	6,47	21,5	6,80	22,6	16,80	55,9	30,07	5,96	5,04
9	6,37	23,0	6,38	23,1	14,90	53,9	27,65	6,38	4,34
25	5,05	24,3	5,80	28,0	9,90	47,7	20,75	6,80	3,06
Лисичансько-Рубіжансько-Северодонецька промислова агломерація Lysychansk-Rubizhne-Severodonetsk Industrial Agglomeration									
3,0	13,7	25	32,3	59	8,7	16	54,6	6,7	8.15
5,0	14,9	27	30,3	55	10,2	18	55,4	6,7	8.27
7,0	13,8	29	23,6	49	10,3	21	47,7	7,2	6.63
30,0	19,5	39	20,0	40	11,1	22	50,5	9,5	5.32
Зміївська теплова електростанція Zmiyiv Thermal Power Plant									
4,0	5,9	13,2	13,7	30,4	25,2	56,4	44,8	9,7	4,62
6,5	6,8	18,0	13,2	33,9	18,2	48,1	38,2	10,9	3,49
7,5	5,9	18,9	10,6	34,2	14,7	47,0	31,1	8,8	3,56
28,0	11,3	27,4	14,4	35,9	15,0	36,7	40,8	11,4	3,59

\*ПОК – підстилково-опадовий коефіцієнт.

\*FLC – the floor-litter coefficient.

Природно, що в опадовому та ферментативному шарах підстилки сосняків переважають процеси розкладання мортмаси і лише в шарі гуміфікації – накопичення. Однак у техногенній зоні вже на відстані 9 км від РВАТ «Азот» в опадовому і ферментативному шарах підстилки процеси розкладання й накопичення мортмаси є врівноваженими, а в шарі гуміфікації процеси надходження є більшими в 1,6 разу. У ближче розташованих до джерела емісії сосняках деструкція фітодетриту гальмується в усіх шарах, але найсильніше – у ланці гуміфікації.

Значне накопичення підстилки на контролі свідчить про природну загальмованість деструкції фітодетриту в Степу. У техногенній зоні ЛРСПА у верхньому горизонті підстилки L опад становить майже дві річні норми. На контролі найбільш потужним є ферментативний шар – на нього припадає 40–46 % маси підстилки, а найменшим є шар гуміфікації, який становить 21–24 % маси підстилки.

У техногенній зоні значно зростає період сумарного часу існування підстилки. Особливо значне зростання періоду деструкції фітодетриту характерне для нижнього шару H підстилки. Загальний час формування запасу мортмаси Т<sub>Н</sub> у техногенній зоні є на 0,9–3,0 року більшим, ніж на контролі (30 км від джерела забруднення). На контролі тривалість існування мортмаси коливається від 0,37 до 0,54 року, а загальний час формування наявного запасу Т<sub>Н</sub> становить 1,92 року, що є в 1,6 разу меншим, ніж ПОК. У техногенній зоні ці показники значно збільшуються. Виявлено значне збільшення тривалості знаходження мортмаси в шарі H. Так, час перебування детриту Т<sub>Н</sub> у сосняку, що знаходиться на відстані 4,0 км від РВАТ «Азот», є у 5,5 разу довшим, ніж на контролі. Для відстані 7 км і 9 км збільшення часу становить 3,5 і

2,3 разу відповідно. Загальний час формування запасу мортмаси Т<sub>Н</sub> на 0,9–3,0 року перевищує час її формування на контролі. Показники запасу за шарами мінералізації підстилки мають чітку тенденцію до збільшення у міру наближення до джерела забруднення. На всіх ППП час сумарного існування підстилки є меншою від величини ПОК (табл. 6).

*Таблиця 5*

**Запас важких металів у підстилці сосняків техногенної зони Зміївської теплової електростанції**

*Table 5*

**The content of heavy metals in the litter of the pine forests in the polluted area around the Zmiyiv Thermal Power Plant**

Відстань від джерела забруднення, км Distance from pollution source, km	Шар Layer	Маса підстилки т·га <sup>-1</sup> Litter weight, t·ha <sup>-1</sup>	Сумарний вміст важких металів, кг·га <sup>-1</sup> Total heavy metal content, kg·ha <sup>-1</sup>					
			Cr	Zn	Ni	Cu	Pb	Σ
4,6	L	6,5	0,13	0,94	0,10	0,25	0,10	8,96
6,9		7,1	0,09	0,84	0,07	0,17	0,10	4,33
7,9		6,6	0,12	1,23	0,29	0,31	0,07	5,19
8,5		7,1	0,08	0,92	0,03	0,17	0,06	4,05
12,5		6,4	0,08	0,58	0,04	0,09	0,04	3,76
28,2		9,0	0,08	0,29	0,03	0,09	0,04	5,80
4,6	F	16,0	0,46	3,74	0,44	1,44	0,46	20,49
6,9		14,0	0,47	2,41	0,36	1,20	0,37	17,36
7,9		11,5	0,29	2,09	0,26	1,05	0,23	12,97
8,5		14,	0,68	1,70	0,27	1,06	0,26	23,97
12,5		13,5	0,49	1,73	0,30	0,99	0,16	35,76
28,2		15,0	0,32	1,12	0,27	0,72	0,17	14,39
4,6	H	26,2	6,56	10,25	9,02	9,84	2,62	354,84
6,9		20,0	3,14	3,93	4,72	5,24	1,42	193,99
8,5		20,0	4,30	7,08	5,38	5,66	1,42	313,90
12,5		10,4	1,37	2,74	2,19	2,19	0,52	106,92
28,2		16,0	1,01	3,31	0,85	2,12	0,40	49,31

Зміни лісової підстилки внаслідок рекреаційного впливу мають інший характер. Основним фактором впливу на підстилку є механічний тиск. На ранніх стадіях рекреаційної дегресії підстилка ущільнюється, подрібнюється, змінюються потужність і співвідношення підгоризонтів. Збільшення щільності підстилки супроводжується зменшенням її потужності навіть на найбільш ранніх стадіях дигресії. Товщина підстилки сосняків у зеленій зоні Харкова коливається від 1 до 5 см. Найбільшу товщину зафіксовано на контролі – 3,2 см, найменшу – у сосняках третьої та четвертої стадій рекреаційної дигресії – 2,3 см. Опід, що формує підстилку, може не залишатися на місці формування як завдяки пішоходам, так і в результаті ерозії. Наявна чітка тенденція зменшення запасу підстилки у міру збільшення рівня рекреаційного навантаження. Найбільшу масу підстилки виявлено в деревостанах першої стадії рекреаційної дигресії (контроль) – 338,75 ц·га<sup>-1</sup>. Порівнюючи з контролем, маса підстилки в пошкоджених рекреацією сосняках другої стадії рекреаційної дигресії є меншою на 18 %, на ППП третьої та четвертої стадій дигресії – на 50,8 та 56,3 % відповідно (табл. 7).

Найбільша маса детриту характерна для шару Н, де вона варіює від 86 до 177 ц·га<sup>-1</sup>. Максимальну величину мортмаси в цьому шарі мінералізації визначено на контролі. Далі мортмаса шару Н зменшується в такому порядку: на ПП другої, четвертої та третьої стадій рекреаційної дигресії. Маса детриту в цьому горизонті в сосняках третьої стадії рекреаційної

дигресії є вдвічі меншою, ніж на контролі. Другим за величиною запасу мортмаси (від 66 до 95 ц·га<sup>-1</sup>) є ферментативний (F) шар. Опавий шар підстилки (L) характеризується найменшими запасами детриту – 44–65 ц·га<sup>-1</sup>.

Таблиця 6

**Показники трансформації опаду та підстилки в сосняках техногенних зон**

Table 6

**Indicators of floor and litter transformation in pine forests in the polluted areas**

Відстань від джерела забруднення, км Distance from pollution source, km	Коефіцієнт накопичення Accumulation coefficient			Вік опаду Age of the floor	Тривалість Time					
					перебування в шарі in the layer			існування of existence		
	K <sub>L</sub>	K <sub>F</sub>	K <sub>H</sub>		T <sub>L</sub>	T <sub>F</sub>	T <sub>H</sub>	TM <sub>L</sub>	TM <sub>F</sub>	TM <sub>H</sub>
Рівненське виробниче акціонерне товариство «Азот» Rivne Industrial Joint Stock Company "Azot"										
4,0	1,30	1,33	3,44	0,50	0,65	0,66	1,72	1,15	1,82	3,53
7,0	1,09	1,14	2,82	0,55	0,60	0,63	1,55	1,15	1,77	3,32
9,0	1,00	1,00	2,34	0,53	0,53	0,53	1,24	1,06	1,59	2,83
25,0	0,74	0,85	1,46	0,58	0,43	0,49	0,84	1,01	1,51	2,35
Лисичансько-Рубіжансько-Северодонецька промислова агломерація Lysychansk-Rubizhne-Severodonetsk Industrial Agglomeration										
3,0	2,17	2,36	0,27	0,42	0,91	2,17	0,59	1,34	3,50	4,09
5,0	2,40	2,03	0,34	0,43	1,02	2,06	0,70	1,44	3,50	4,20
7,0	2,02	1,70	0,44	0,43	0,88	1,50	0,64	1,31	2,81	3,45
30,0	2,14	1,03	0,58	0,52	1,12	1,17	0,64	1,63	2,80	3,44
Зміївська теплова електростанція Zmiyiv Thermal Power Plant										
4,0	0,67	2,46	1,64	0,58	0,39	0,96	1,57	0,97	1,92	3,49
6,5	0,65	1,97	1,43	0,54	0,36	0,70	1,00	0,90	1,60	2,60
28,0	0,80	1,65	1,07	0,55	0,44	0,72	0,78	0,99	1,71	2,49
7,5	0,75	1,74	1,42	0,57	0,43	0,74	1,06	0,99	1,73	2,79

У верхньому горизонті підстилки L міститься найменша частка опаду від загальної величини запасу підстилки (19–25 %) (див. табл. 7). Далі за величиною опаду йде ферментативний шар – 28–37 %. Найбільш потужним є шар гуміфікації – 38–52 %. Тобто це підстилка на контролі гуміфікаційного типу. У міру збільшення рекреаційного навантаження частка шарів L та F у загальному запасі зростає, а частка шару H, навпаки, зменшується.

В усіх підгоризонтах запас мортмаси зменшується у міру зростання рівня рекреаційного навантаження. Можна визначити термін перебування шарів підстилки в тому чи іншому горизонті мінералізації. Тривалість існування фітодетриту зростає від верхнього до нижнього підгоризонту. І, якщо величина T<sub>L</sub> коливається від 0,82 до 1,22 року, то T<sub>F</sub> змінюється в межах 1,19–1,84, а T<sub>H</sub> – в межах 1,92–2,37 року. Найбільшим є час перебування опаду біля стовбура, найменшим – на галявині. Здебільшого в усіх варіантах термін перебування збільшується до третьої стадії рекреаційної дигресії, а в сосняках четвертої стадії рекреаційної дигресії може дещо знижуватися. Мортмаса кожного шару є матеріалом, який пройшов усі попередні стадії розкладання, отже підстилка має певний загальний сумарний вік. Цей вік можна ідентифікувати як тривалість її існування, який від шару до шару зростає, максимально наближаючись до значення загального коефіцієнта накопичення підстилки – ПОК

**Структура підстилки в сосняках різних стадій рекреаційної дигресії**

Table 7

**Litter structure in pine forests at different degrees of recreational digression**

Місце відбору Sampling point	Стадія рекреаційної дигресії Degree of recreational digression	L		F		H		Загалом Total
		100 кг·га <sup>-1</sup> hundred kilograms per hectare	%	100 кг·га <sup>-1</sup> hundred kilograms per hectare	%	100 кг·га <sup>-1</sup> hundred kilograms per hectare	%	
Біля стовбура Near the trunk	1	85,7	17,7	161,3	33,3	237,9	49,1	484,9
	2	74,6	19,2	137,7	35,4	176,3	45,4	388,5
	3	74,7	22,3	122,1	36,4	138,5	41,3	335,3
	4	86,0	26,2	102,7	31,3	139,0	42,4	327,6
Під кронами Under crowns	1	67,1	20,9	92,2	28,8	161,4	50,3	320,7
	2	57,7	19,7	82,9	28,3	152,1	52,0	292,8
	3	52,3	24,4	72,2	33,7	89,7	41,9	214,2
	4	54,1	24,2	58,4	26,2	110,8	49,6	223,4
Між кронами Between crowns	1	42,7	18,0	65,0	27,4	129,9	54,7	237,5
	2	34,2	17,5	47,0	24,1	114,1	58,4	195,2
	3	31,4	23,6	45,1	33,9	56,6	42,5	133,0
	4	31,0	25,0	38,4	31,0	54,6	44,1	124,0
Середнє Average	1	65,8	19,4	95,6	28,2	177,4	52,4	338,7
	2	56,2	19,6	85,7	29,9	144,9	50,5	286,8
	3	55,0	24,5	82,9	37,0	86,2	38,5	224,1
	4	48,8	22,5	66,5	30,7	101,5	46,8	216,7

У міру посилення рекреаційного навантаження зростає тривалість існування мортмаси. Такі результати отримано під час розрахунку характерного часу ТМ для всіх шарів мінералізації підстилки, а найбільший загальний час формування існуючого запасу мортмаси виявлено для гуміфікаційного шару. І якщо на контролі цей час становив 4,76 року, то в сосняку другої стадії рекреаційної дигресії він був на півроку більшим, в сосняку третьої стадії рекреаційної дигресії – на 0,75 року більшим і в сосняку четвертої стадії рекреаційної дигресії – на рік більшим, ніж на контролі (табл. 8).

Вік опадів (ТОП) біля стовбура для третьої та четвертої стадій рекреаційної дигресії становить 7,78 та 7,20 року відповідно, що є на 1,5–2,0 року більшим, ніж для верхнього опадового шару на контролі.

Підстилка є основною складовою горючих матеріалів. Розвиток пожежі залежатиме від її маси та стану. У сосняках Полісся запас підстилки може сягати 830 ц·га<sup>-1</sup>, а її товщина – 15 см.

У соснових насадженнях в умовах субору накопичуються більші запаси підстилки, ніж в умовах бору. Так, у 60-річних борах запас підстилки становить 355 ц·га<sup>-1</sup>, тоді як у суборах – 703 ц·га<sup>-1</sup>. Водночас у сугруді запас мортмаси є значно меншим, що свідчить про інтенсивніший процес розкладання підстилки.

Запас підстилки збільшується з віком насадження, що підвищує ймовірність загрози пошкодження дерев пожежею. Найменший запас підстилки відзначено у віці 20–30 років (124–246 ц·га<sup>-1</sup>). У 40 років запас підстилки збільшився у 2,3–2,6 разу. Максимальною маса підстилки є у 80-річних сосняках – 830 ц·га<sup>-1</sup>.

У 70–80-річних сосняках у шарі Н біля стовбура маса мортмаси досягає 708 ц·га<sup>-1</sup>, на межі крони – 486 ц·га<sup>-1</sup>, а у просторі між кронами – 467 ц·га<sup>-1</sup>. Різниця запасів підстилки в різних частинах насаджень може сягати 150–200 % (табл. 9).



Таблиця 8

**Показники трансформації опадів та підстилки в сосняках різних ступенів рекреаційної дигресії**

Table 8

**Indicators of the floor and the litter transformation in pine forests of different degrees of recreational digression**

Місце відбору Sampling point	Стадія рекреаційної дигресії Degree of recreational digression	ПОК* FLC*	Коефіцієнт накопичення Accumulation coefficient			Тривалість перебування Time					
						перебування в шарі stay in layer			існування existence		
			K <sub>L</sub>	K <sub>F</sub>	K <sub>H</sub>	T <sub>L</sub>	T <sub>F</sub>	T <sub>H</sub>	TM <sub>L</sub>	TM <sub>F</sub>	TM <sub>H</sub>
Біля стовбура Near the trunk	1	9,49	1,68	1,88	1,47	0,94	1,77	2,61	1,50	3,27	5,87
	2	10,75	2,06	1,85	1,28	1,16	2,13	2,73	1,72	3,85	6,58
	3	12,89	2,87	1,63	1,13	1,61	2,63	2,98	2,17	4,80	7,78
	4	11,85	3,11	1,19	1,35	1,74	2,08	2,81	2,30	4,38	7,20
Під кронами Under crowns	1	7,20	1,51	1,37	1,75	0,84	1,16	2,03	1,40	2,56	4,59
	2	7,06	1,39	1,44	1,83	0,78	1,12	2,05	1,34	2,46	4,51
	3	6,82	1,66	1,38	1,24	0,93	1,29	1,60	1,49	2,78	4,38
	4	8,41	2,04	1,08	1,90	1,14	1,23	2,34	1,70	2,93	5,27
Між кронами Between crowns	1	7,43	1,33	1,52	2,00	0,75	1,14	2,28	1,31	2,45	4,72
	2	8,35	1,46	1,37	2,43	0,82	1,12	2,73	1,38	2,50	5,24
	3	9,35	2,20	1,44	1,26	1,23	1,77	2,23	1,79	3,57	5,80
	4	6,95	1,74	1,24	1,42	0,97	1,21	1,72	1,53	2,74	4,45
Середнє Average	1	7,51	1,46	1,45	1,86	0,82	1,19	2,20	1,38	2,56	4,76
	2	8,39	1,64	1,52	1,69	0,92	1,40	2,37	1,48	2,88	5,26
	3	8,90	2,18	1,51	1,04	1,22	1,84	1,92	1,78	3,63	5,54
	4	9,37	2,11	1,36	1,53	1,18	1,61	2,46	1,74	3,35	5,81

\*ПОК - підстилково-опадовий коефіцієнт, Top – вік опадів. Top = 0,56.

\*FLC – floor-litter coefficient, Top – age of floor. Top = 0,56.

У міру зростання віку сосняків збільшуються не тільки запаси підстилки, але і її щільність (об’ємна маса) (див. табл. 8), причому діапазон мінливості об’ємної маси є доволі широким (30,6–97,3 г·дм<sup>-3</sup>).

Таблиця 9

**Об’ємна маса підстилки в соснових насадженнях (ГЛУ В<sub>з</sub>), г·дм<sup>-3</sup>**

Table 9

**Volumetric mass of litter in pine forests (B<sub>z</sub>), g·dm<sup>-3</sup>**

Клас віку насадження Forest age class	Мікрозони Microzones			
	біля стовбура near the trunk	на межі крони on the edge of the crown	між кронами between crowns	Середнє Average
II	33,7	39,6	19,1	31,5
III	35,1	43,0	31,4	36,2
IV	44,0	47,5	56,8	48,4
V	55,3	41,2	43,7	46,4
VI	68,9	93,9	66,2	74,8
VII	105,3	81,7	65,0	84,1
VIII	110,1	91,6	89,3	97,3

У соснових насадженнях віком до 60 років максимальну об’ємну масу підстилки реєстрували на межі крони, а в старших – навпаки, біля стовбура. Проте з віком різниця між цими ділянками суттєво зростала: від 6–8 г·дм<sup>-3</sup> у 30–40 років до 20–24 г·дм<sup>-3</sup> у 70–80 років.

**Обговорення.** У зв’язку із цим маса підстилки завжди збільшується в разі наближення до джерела забруднення, де детрит перегниває повільніше, порівнюючи з незабрудненими ділянками (Mikryukov and Dulya, 2017).

Зміна товщини лісової підстилки є одним із найпомітніших проявів порушення кругообігу органічної речовини в лісових екосистемах, які зазнали хімічного забруднення. Багато досліджень свідчать про 2–3-разове збільшення маси й товщини підстилки поблизу заводів кольорової металургії, викиди яких містять важкі метали та діоксид Сульфуру (Jackson and Watson, 1997). Таке збільшення є наслідком зниження активності дощових хробаків, ґрунтових мікроорганізмів тощо, які розкладають органічну речовину в лісових екосистемах (Vodyanitskii *et al.*, 2016).

Дослідження лісової підстилки в Польщі, в районі агломерації міста Краков виявили, що вміст важких металів у підстилці зменшувався у міру збільшення відстані від центру Кракова (Sawicka-Karusta *et al.*, 2003). Визначено концентрацію Cd, Pb, Cu, Zn і Fe у підстилці. Надходження Cd коливалося від 84 мкг м<sup>-2</sup> на Корнатці (контроль) у 1998 р. до 382 мкг м<sup>-2</sup> на Бонарці (забруднений район) у 2000 р. Надходження Pb було приблизно в 10 разів вищим, ніж кадмію. Розподіл Cu, Zn та Fe у лісовій підстилці виявив подібну тенденцію (Sawicka-Karusta *et al.*, 2003).

Інтенсивність біоциркуляції в ланці «опад – підстилка» в сосняках Полісся є загальмованою, а в найбільш пошкодженому промисловими викидами насадженні знижується до рівня сильно загальмованої. П. С. Погребняк зазначав (Pogrebnyak, 1993), що на відстані 9 км від джерела забруднення підстилка розкладається на 1,28 року довше, ніж на контролі, а в найближче розташованому сосняку – на 3 роки. Якщо розраховувати тривалість існування опадів як середньозважену величину часу його надходження та періоду перебування у верхньому шарі підстилки, то для досліджуваних сосняків він становить 0,50–0,58 року.

Дослідженнями в сосняках Харківщини виявлено, що формування підстилки в умовах рекреаційного впливу на лісові екосистеми має інший характер: відбувається її ущільнення, унаслідок чого зменшуються її потужність і запас відповідно до рівня рекреаційного навантаження. Це підтверджено також попередніми дослідженнями наших колег з УкрНДІЛГА (Bondaruk, 1986). Постійні пробні площі закладено у 20–50-річних насадженнях сосни звичайної в Харківській області на ділянках різних стадій рекреаційної дигресії. Маса підстилки зменшилася з 2,6–3,6 кг·м<sup>-2</sup> до 1,5–1,7 кг·м<sup>-2</sup>, а питома маса підстилки збільшилася з 32–66 кг·м<sup>-3</sup> до 98–110 кг·м<sup>-3</sup> у міру наростання рекреаційного тиску від 1 до 4 стадії (Bondaruk, 1986).

#### **Висновки.**

1. У техногенній зоні загальний час формування лісової підстилки є на 0,9–3,0 року більшим, ніж на контролі. Вміст забруднювачів, зокрема Сульфуру та Нітрогену, зростає від верхнього до нижнього шару підстилки. Вміст Cr у гуміфікаційному шарі підстилки є більшим, ніж в опаді, у 12–14 разів, Cu – у 14–19, Zn – у 7–11, Sr – у 8–13, Pb – у 13–18 разів. Загалом запас важких металів у підстилці в техногенній зоні є у 3,4–5,5 разу більшим, ніж у непорушеному насадженні.

2. У соснових насадженнях в умовах субору накопичуються більші запаси підстилки, ніж в умовах бору: в 60-річних борах – 35 500 кг·га<sup>-1</sup>, а у суборах – 70 300 кг·га<sup>-1</sup>.

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

**Джерела фінансування.** Статтю підготовлено авторами в межах виконання тем досліджень УкрНДІЛГА (№ держреєстрації 0104U001926, 0104U001926, 0120U101893), замовником яких було Державне агентство лісових ресурсів України.

#### **ПОСИЛАННЯ – REFERENCES**

- Alexandrova, L.N. (1980) *Organic matter and processes of its transformation*, Leningrad: Nauka (in Russian).
- Banerjee, R., Gangopadhyay, S., Batabyal, S., Das, N., Ray, H. and Mandal, S. (2023) 'Litter dynamics of forest ecosystem in an urban and pristine area of West Bengal, India', *Journal of Environmental Biology*, 44, pp. 691–698.
- Bogatyrev, L.G. (1996) 'Formation of litter is one of the most important processes in forest ecosystems', *Soil Science*, 4, pp. 501–511. (in Russian).

- Bondaruk, G.V. (1986) 'Effect of recreational pressure on forest litter characteristics', *Forestry and Forest Melioration*, 72, pp. 54–56 (in Russian).
- Chornobay, Yu.M. (2000) *Transformation of plant detritus in natural ecosystems*. Lviv: Publishing House of the State Natural Museum of NAS of Ukraine (in Ukrainian).
- Davidova, N.D. (1983) *Forest litter in the zone of technogenic influence*. Moscow: Nauka (in Russian).
- Ganteaume, A., Jappiot, M., Lampin-Maillet, C., Curt, Th. and Borgniet, L. (2011) 'Effects of vegetation type and fire regime on flammability of undisturbed litter in Southeastern France', *Forest Ecology and Management*, 261(12), pp. 2223–2231. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.09.046>
- Grishina, L.A. (1986) *Humus formation and humus status of soils*. Moscow: Moscow State University (in Russian).
- Jackson, D.R. and Watson, A.P. (1997) 'Disruption of nutrient pools and transport of heavy metals in a forested watershed near the lead smelter', *Journal of Environmental Science*, 6 (4), pp. 331–338.
- Karpachevsky, L.O. (1981) *Forest and forest soils*. Moscow: Lesnaya Promyshlennost (in Russian).
- Koptsik, G.N., Koptsik, S.V. and Murashkina-Miis, M.A. (2001) 'Chemical properties of forest litter under atmospheric pollution', *Forestry*, 6, pp. 22–28 (in Russian).
- Mikryukov, V.S. and Dulya, O.V. (2017) 'Contamination-induced transformation of bacterial and fungal communities in spruce-fir and birch forest litter', *Applied Soil Ecology*, 114, pp. 111–122. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.03.003>
- Pogrebnyak, P.S. (1993) *Forest ecology and forest typology*. Kyiv: Naukova Dumka (in Ukrainian).
- Rodin, L.E and Bazilevich, N.I. (1965) *Dynamics of organic matter and biological circulation of ash elements and nitrogen in the main types of vegetation of the globe*. Leningrad: Nauka (in Russian).
- Sawicka-Kapusta, K, Zakrzewska, M., Bajorek, K. and Gdula-Argasińska, J. (2003) 'Input of heavy metals to the forest floor as a result of Cracow urban pollution', *Environment International*, 28(8), 691–698. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(02\)00069-7](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00069-7)
- Uchvatov, V.P. (1983) *The role of forest litter in transformation of the geochemical flow of substances in the forest ecosystem*. Moscow: Nauka (in Russian).
- Vodyanitskii, Yu.N., Vorobeichik, E.L. and Savichev, A.T. (2016) 'Heavy Metals as a Biodegradation Inhibitor of the Forest Litter. Chapter V', in Alvarez, J. (ed.) *Biodegradation: Properties, Analysis and Performance*. New-York: NOVA, pp. 201–226.
- Vorobeichik, E.L. (2003) 'Reaction of forest litter and its connection with soil biota during toxic pollution', *Forestry*, 2, pp. 32–42 (in Russian).
- Voron, V.P. (2021) *Aerotechnogenic transformation of forests in Ukraine. Part 1 Atmospheric pollution by acids and nitrogen, leaching phytotoxicants and important metals*. Kharkiv: Nove Slovo (in Ukrainian).
- Voron, V.P., Ivashinyuta S.V., Koval I.M. and Bondaruk M.A. (2008) *Forests of the green zone of Rivne and their ecological protection functions*. Kharkiv (in Ukrainian).

#### LITTER AS A MARKER OF ANTHROPOTECHNOGENIC CHANGES IN THE PINE FORESTS IN THE PLAIN PART OF UKRAINE

Voron V.P.<sup>1</sup>, Koval I.M.<sup>2\*</sup>

The transformation of the “floor–litter” link in the pine forests under anthropogenic pollution and recreation has been investigated. The stock and structure of the forest litter depend on the type of forest site conditions and the age of the stands. As a result of the violation of ecological conditions, the mineralization processes of phytodetritus slow down. Accumulation of the dead mass affects the litter stock, capacity and structure. Thus, in the technogenic zone, the period of forest litter formation increases by 0.9–3.0 years, and the content of heavy metals in it is 3.4–5.5 times higher than outside this zone. As the level of recreational load increases, the supply of litter decreases, and the duration of mortmass existence in all sub horizons increases (the difference in pine forests of the first and fourth stages of recreational digression is one year). The obtained data show the necessity of using litter stock, capacity, and structure values to indicate the intensity of anthropogenic impact.

**К е y w o r d s :** litter stock, litter capacity, *Pinus sylvestris* L., industrial pollution, recreational load, forest fires.

*Одержано редколегією 04.12.2023*

<sup>1</sup> 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](mailto:52corvus@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1059-3032>

<sup>2</sup> 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](mailto:koval_iryana@ukr.net), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6328-1418>

\* Correspondence: [koval\\_iryana@ukr.net](mailto:koval_iryana@ukr.net)