

УДК 630.425:630.114.351

В. П. ВОРОН*

**АКУМУЛЯЦІЯ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ В ЕКОСИСТЕМАХ СОСНОВИХ ЛІСІВ
В УМОВАХ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ ВИКИДАМИ ТЕС**

Український науково-дослідний інститут лісового господарства та агролісомеліорації ім. Г. М. Висоцького

Наведено результати досліджень акумуляції важких металів у різних компонентах екосистем соснових лісів техногенної зони Зміївської ТЕС. Дослідження базувалися на методах порівняльної екології. Їх проводили на екологічному профілі, розташованому на відстані від 4 до 28 км від ЗТЕС. Індекс концентрації (I_c) визначали як відношення вмісту елемента в досліджуваному об'єкті до його вмісту на контролі. Встановлено, що надходження викидів в атмосферу є першопричиною забруднення та негативних змін не тільки аеротопу (повітря, опадів), але й трофотопу (підстилки та ґрунту). За рівнем індексу концентрації важкими металами найменше забруднені ґрунти, найбільше – підстилка. Хвоя має середнє значення індексів концентрації. У техногенній зоні зольність і вміст важких металів у хвої зростають у міру її старіння. Основним джерелом забруднення підстилки є седиментація викидів попелу на земній поверхні. Отримані дані запасів мортмаси підстилки дали змогу визначити величину сумарного забруднення цього компонента екосистеми. Співвідношення вмісту важких металів збільшується до низу профілю підстилки. Особливо значною є різниця між опадом і гумусованим шаром підстилки. Запас ВМ у шарі Н у десятки і навіть у сотні разів більший, ніж у шарі L.

Ключові слова: аеротехногенне забруднення, важкі метали, мортмаса, хвоя, ґрунт, шари підстилки.

Вступ. У 1990-ті роки обсяг утворення відходів в Україні знизився вдвічі, проте вона залишається однією з найбільш екологічно несприятливих країн Європи [15]. В атмосферу щорічно надходить понад 5 млн. т промвикидів, які в багатьох регіонах України призводять до деградації лісових екосистем [15].

Забруднення атмосфери викидами Зміївської теплової електростанції (ЗТЕС) негативно впливає на ліси південного сходу Лівобережного Лісостепу [4, 5, 8, 9]. Узагальнюючи результати попередніх досліджень [4, 5, 13], слід відзначити, що хоча в 1990-ті роки обсяг викидів ЗТЕС і зменшився в 2,7 рази, забруднення залишається сильним лімітувальним фактором для розвитку сосняків [5, 11]. Так, у районі ТЕС щороку може осідати 3–6 т·га⁻¹ забруднювачів. Забруднення атмосфери викидами ЗТЕС посилює мінералізованість і підлугування опадів, збільшує в них вміст сульфатів, гідрокарбонатів, лужних і важких металів (ВМ) [6]. У зоні ТЕС знижується кислотність ґрунтів, порушується азотне й калійне живлення рослин. Гумус збіднюється на азот, про що свідчить значне зростання співвідношення С/Н. Накопичення забруднювачів у ґрунті гальмує хід деструкції фітодетриту та збільшує термін формування підстилки [3].

Теплові електростанції є потужним джерелом забруднення довкілля викидами важких металів (ВМ). Під час спалювання вугілля ВМ із попелом, який становить до 40 % викидів ЗТЕС, виносяться через димарі в атмосферу. При цьому вміст у ній Be, Li, V, Ni, Cu, Zn, Ag, W у декілька разів, а B, Pb, Mo, Ge у десятки разів перевищує фон [14]. Під час виробництва кожного 1 млн кВт·г електроенергії на ТЕС, що працює на кам'яному вугіллі, викидається 2,6 т Pb [12]. За такої умови навколо ТЕС формуються території з аномальним вмістом важких металів і бенз(а)пірену в аеротопі та трофотопі і, як наслідок, у грибах, ягодах, лікарських рослинах [10, 14]. У лісовій полуниці вміст Cd у 2–3, Zn – у 9, а Cr – в 1,7–3 рази може перевищувати гранично допустиму концентрацію (ГДК) для людини. У разі надходження їх у продукти харчування створюється загроза для здоров'я людини [4, 5, 13]. У той же час мало вивченою є акумуляція ВМ в інших компонентах екосистем соснових лісів.

Мета роботи – виявити особливості акумуляції ВМ у компонентах екосистем соснових лісів техногенної зони Зміївської ТЕС.

Об'єкти та методика досліджень. Дослідження аеротехногенних змін лісових екосистем базувалися на методах порівняльної екології й проведені на екологічному профілі

* © В. П. Ворон, 2016

на відстані від 4 до 28 км від ЗТЕС (табл. 1). Постійні пробні площі (ППП) на профілі закладали відповідно до загальноприйнятих методик [2].

Таблиця 1

Характеристика чистих сосняків у свіжому суборі на ППП у зоні Зміївської ТЕС

ППП	Л-во*-кв.	Напря- відстань від ТЕС, км	A, років	D, см	H, м	Повнота	M, м ³ ·га ⁻¹	Індекс стану
10	A-2	ПдСх-4,6	68	25,8	25,6	0,65	346	2,88
11	A-25	ПдСх-6,5	65	23,4	24,8	0,87	501	2,74
9	З-168	ПдЗх-7,9	59	25,3	24,6	0,79	397	2,70
8	З-129	ПдЗх-8,5	70	27	25,5	0,88	254	2,36
4	З-78	ПнЗх-13,0	56	23,4	23,7	0,87	245	2,04
5	З-99	ПнЗх-10,5	63	19,9	20,6	0,72	177	2,21
2	З-32	ПнЗх-11,0	78	33,9	29,5	0,75	341	2,36
3	З-63	ПнЗх-14,5	58	24,8	24,1	0,76	251	2,21
12	В-104	ПнЗх-28,2	65	32,2	23,6	0,78	331	1,54

*Скорочення: З – Задонецьке, А – Андріївське, В – Васищевське лісництва.

Опад і лісову підстилку вивчали за методикою Ю. М. Чернобая [15]. У підстилці виділяли три шари мінералізації:

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

– ферментативний F – бурі (коричнево-бурі) органічні залишки, що напіврозклалися та втратили початкову форму та міцність; має ущільнене складення, зв'язане тонким корінням наземного покриву;

– гуміфікаційний H – гомогенний, темно забарвлений (темно-бурий, чорний), що повністю розклався, часто порошкоподібної структури зі включеннями шматків кори та плодів, густо пронизаний корінням трав'яного покриву, підросту та деревно-чагарникових ярусів, з домішкою мінеральних часток ґрунту.

Ґрунтові профілі описували за морфологічними характеристиками за стандартними методиками, прийнятими в ґрунтознавстві [14]. Тип ґрунту в досліджуваних насадженнях – дерновий опідзолений середньоглибокий глинисто-піщаний на давньоалювіальному піску.

Частку попелу (зольність) хвої та підстилки визначали за загальноприйнятими методиками аналізу рослинного матеріалу [13].

У викидах попелу ЗТЕС нами виявлено елементи найбільш токсичної першої групи: Со, Ni, Pb, Sn, Hg; другої: Mn, Cu, Zn, Cr, As, Sb, Zr, Nb, Cd, Ba, Mo, Se і третьої – Sr і Br. Вміст ВМ визначали спектроемісійним та рентген-флуоресцентним методами [10, 11]. Ми визначали вміст Ti, Mn, Cr, Sr, V, Zn, Ni, Cu, Pb, Со. Усього проведено 720 визначень у підстилці, 228 у ґрунті та 513 у хвої. Водночас подано сумарний вміст ВМ, а також забруднення окремими елементами. Оскільки титан і ванадій не входять до складу викидів ТЕС, їх не враховували під час подальшого аналізу.

Однією з основних характеристик геохімічної техногенної аномалії є ступінь накопичення елементу-забруднювача в порівнянні з природним фоном [14]. Показником рівня аномальності вмісту елементів є індекс концентрації I_c , який розраховують як відношення вмісту елемента в досліджуваному об'єкті C_i до його середнього фонового вмісту C_ϕ : $I_c = C_i : C_\phi$. Оскільки техногенні аномалії звичайно мають поліелементний склад, то розраховується сумарний показник забруднення Z_c як сума перевищень індексів концентрації:

$$Z_c = \sum (C_i - C_\phi) / C_\phi + 1 = \sum I_{c\ n-1} \quad (1)$$

де K_c – коефіцієнт концентрації,

n – кількість хімічних елементів досліджуваної асоціації,

C_i – аномальний вміст елемента,

C_f – фоновий вміст елемента.

Результати досліджень. Сумарний вміст важких металів у верхньому гумусовому горизонті на контролі становить $1030 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$, а в зоні забруднення – $660\text{--}1315 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$ (табл. 2). Відбувається це за рахунок коливання вмісту Ti , який на більшості ППП становить 45–60 % від вмісту суми ВМ. Водночас вміст Mn , Zn , Ni , Cu , Pb у техногенній зоні є значно вищим, ніж на контролі. Так, якщо на контролі вміст Mn становить $150 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$, то в сосняках зони забруднення 150–380, Pb – 7 і 7–70 $\text{мг} \cdot \text{кг}^{-1}$ відповідно, Cu – 4 і 6–30, Ni – 19 і 18–48 $\text{мг} \cdot \text{кг}^{-1}$ тощо (див. табл. 2).

Таблиця 2

Вміст (чисельник, $\text{мг} \cdot \text{кг}^{-1}$ ґрунту) та індекси концентрації (знаменник) ВМ у гумусовому горизонті соснових насаджень у зоні ЗТЕС

ППП	Л-во-кв.	Напря-відстань від ТЕС, км	Сума Z_c	У тому числі					
				Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	Pb
10	А-2	ПдСх-4,6	$\frac{798}{10,10}$	$\frac{40}{0,74}$	$\frac{280}{1,87}$	$\frac{18}{0,95}$	$\frac{10}{2,50}$	$\frac{100}{1,25}$	$\frac{10}{1,43}$
11	А-25	ПдСх-6,5	$\frac{631}{8,65}$	$\frac{40}{0,74}$	$\frac{190}{1,27}$	$\frac{48}{2,53}$	$\frac{3}{0,75}$	$\frac{8}{1,00}$	$\frac{7}{1,00}$
9	3-168	ПдЗх-7,9	$\frac{815}{10,42}$	$\frac{50}{0,93}$	$\frac{160}{1,07}$	$\frac{19}{1,00}$	$\frac{8}{2,00}$	$\frac{80}{1,00}$	$\frac{20}{2,86}$
5	3-99	ПнЗх-10,5	$\frac{978}{10,53}$	$\frac{50}{0,93}$	$\frac{220}{1,47}$	$\frac{19}{1,00}$	$\frac{8}{2,00}$	$\frac{100}{1,25}$	$\frac{15}{2,14}$
2	3-32	ПнЗх-11	$\frac{1115}{11,62}$	$\frac{54}{0,93}$	$\frac{250}{2,53}$	$\frac{20}{1,05}$	$\frac{30}{1,50}$	$\frac{80}{1,00}$	$\frac{70}{1,29}$
3	3-63	ПнЗх-14,5	$\frac{1200}{11,48}$	$\frac{40}{0,74}$	$\frac{250}{1,67}$	$\frac{19}{1,00}$	$\frac{10}{2,50}$	$\frac{80}{1,00}$	$\frac{20}{2,86}$
12	В-104	ПнЗх-28,2	1052	54	150	19	4	80	7

Найнижчим є рівень накопичення ВМ у ґрунтах. Величина індексів концентрації окремих елементів не є високою, на багатьох ППП вона навіть менша за 1. Найбільше зростання індексів концентрації характерне для Mn , Ni (до 2,5), Cu (7,5 рази), Pb (до 10).

Найвищий рівень забруднення характерний для південного, південно-західного, північно-західного напрямків в урочищі Сербівка та Гініївські піски для зони, розташованої в 3–5 км від ЗТЕС, на узліссях, спрямованих до неї. Проте чіткої достовірної просторової залежності вмісту елементів з віддаленням від ЗТЕС не виявлено (див. табл. 1, 2), оскільки збільшення їхнього вмісту в периферійних зонах, якщо порівняти з ближніми, зумовлено легкими частками попелу, які переносяться на значну відстань від джерела. Від 10 до 30 % загального викиду металів в атмосферу поширюються на відстань до 10 і більше кілометрів [14]. За вмістом у ґрунті ВМ розташовуються у такому порядку: $Ti > Mn > Zn > Cr > Ni > V > Cu > Pb > Co$.

Друге місце за рівнем акумуляції ВМ посідає хвоя (табл. 3). Наприкінці 1980-х років запиленість хвої сосняків унаслідок значної седиментації ВМ у зоні ЗТЕС була в 5–40 разів більшою, ніж на контролі [8]. Найвищі значення індексів концентрації – у дворічної хвої. Вміст хрому, нікелю, міді, цинку, стронцію, кобальту зростає в 2–4, ванадію та свинцю в 1,5–2 рази (табл. 3).

Опосередкованим показником техногенного забруднення є зольність. У техногенній зоні вміст попелу в хвої першого року коливається від 2,4 до 3,5 %, другого – в межах 2,5–3,8 %, третього – 2,9–3,8 %. Це в 1,1–1,7 рази є більшим, ніж на контролі.

ЛІСІВНИЦТВО І АГРОЛІСОМЕЛІОРАЦІЯ
Харків: УкрНДЛГА, 2016. – Вип. 129

Таблиця 3

Вміст (числівник, мг·кг⁻¹) та індекси концентрації (знаменник) ВМ у хвої сосняків техногенної зони ЗТЕС

ППП	Л-во-кв.	Напря-відстань від ТЕС, км	Сума Z _c	У тому числі								
				Mn	Cr	Sr	Zn	Ni	Cu	Pb	Co	
Хвоя першого року												
10	A-2	ПдСх-4,6	<u>27,38</u> 18,22	<u>0,15</u> 0,83	<u>0,49</u> 1,71	<u>2,8</u> 1,59	<u>11,2</u> 1,59	<u>1,33</u> 2,75	<u>6,3</u> 2,86	<u>0,7</u> 1,87	<u>0,7</u> 2,45	
11	A-25	ПдСх-6,5	<u>22,35</u> 12,5	<u>0,05</u> 0,27	<u>0,29</u> 1,01	<u>2,32</u> 1,32	<u>11,6</u> 1,65	<u>0,99</u> 2,04	<u>2,9</u> 1,32	<u>0,44</u> 1,16	<u>0,44</u> 1,52	
9	3-168	ПдЗх-7,9	<u>31,36</u> 15,52	<u>0,06</u> 0,35	<u>0,45</u> 1,57	<u>3,2</u> 1,82	<u>16</u> 2,27	<u>0,77</u> 1,59	<u>3,2</u> 1,45	<u>0,35</u> 0,94	<u>0,48</u> 1,68	
5	3-99	ПнЗх-10,5	<u>22,13</u> 14,55	<u>0,35</u> 1,88	<u>0,38</u> 1,32	<u>2,32</u> 1,32	<u>9,28</u> 1,32	<u>0,75</u> 1,56	<u>4,35</u> 1,98	<u>0,32</u> 0,85	<u>0,44</u> 1,52	
2	3-32	ПнЗх-11	<u>28,11</u> 18,55	<u>0,62</u> 3,36	<u>0,35</u> 1,23	<u>5,4</u> 3,07	<u>10,8</u> 1,53	<u>0,92</u> 1,9	<u>4,05</u> 1,84	<u>0,38</u> 1,01	<u>0,41</u> 1,42	
3	3-63	ПнЗх-14,5	<u>25,27</u> 15,3	<u>0,24</u> 1,3	<u>0,46</u> 1,59	<u>6</u> 3,41	<u>9,6</u> 1,36	<u>0,48</u> 0,99	<u>3,6</u> 1,64	<u>0,36</u> 0,96	<u>0,41</u> 1,43	
12	B-104	ПнЗх-28,2	15,52	0,18	0,29	1,76	7,04	0,48	2,2	0,37	0,29	
Хвоя другого року												
10	A-2	ПдСх-4,6	<u>34,8</u> 26,74	<u>0,11</u> 0,72	<u>0,38</u> 1,65	<u>0</u> 1,59	<u>19</u> 3,3	<u>1,48</u> 2,8	<u>5,7</u> 3,1	<u>0,84</u> 2,14	<u>0,95</u> 6,88	
11	A-25	ПдСх-6,5	<u>27,32</u> 17,88	<u>0,11</u> 0,72	<u>0,31</u> 1,35	<u>3,1</u> 1,32	<u>13,02</u> 2,26	<u>0,81</u> 1,52	<u>4,03</u> 2,19	<u>0,65</u> 1,66	<u>0,47</u> 3,37	
9	3-168	ПдЗх-7,9	<u>29,93</u> 22,59	<u>0,04</u> 0,29	<u>0,32</u> 1,37	<u>0</u> 1,82	<u>17,5</u> 3,04	<u>1,26</u> 2,38	<u>5,6</u> 3,04	<u>0,74</u> 1,88	<u>0,81</u> 5,83	
5	3-99	ПнЗх-10,5	<u>25,02</u> 22,24	0,42 2,85	<u>0,6</u> 2,61	<u>2,4</u> 1,32	<u>10,5</u> 1,83	<u>0,96</u> 1,81	<u>3,6</u> 1,96	<u>0,63</u> 1,61	<u>0,57</u> 4,13	
2	3-32	ПнЗх-11	<u>29,44</u> 24,42	<u>0,36</u> 2,47	<u>0,33</u> 1,43	<u>3,3</u> 3,07	<u>11,55</u> 2,01	<u>1,09</u> 2,06	<u>4,62</u> 2,51	<u>0,73</u> 1,86	<u>0,59</u> 4,3	
3	3-63	ПнЗх-14,5	<u>13,49</u> 14,91	<u>0,14</u> 0,92	<u>0,25</u> 1,09	<u>0</u> 3,41	<u>6,25</u> 1,09	<u>0,68</u> 1,28	<u>2,25</u> 1,22	<u>0,45</u> 1,15	<u>0,33</u> 2,36	
12	B-104	ПнЗх-28,2	11,49	0,15	0,23	0	5,75	0,53	1,84	0,39	0,14	
Хвоя третього року												
10	A-2	ПдСх-4,6	<u>35,19</u> 16,88	<u>0,99</u> 1,27	<u>0,38</u> 1,33	<u>3,8</u> 0,73	<u>13,3</u> 2,05	<u>1,6</u> 2,36	<u>5,7</u> 2,74	<u>0,91</u> 1,53	<u>0,61</u> 1,8	
11	A-25	ПдСх-6,5	<u>42,51</u> 19,2	<u>0,85</u> 1,09	<u>0,74</u> 2,59	<u>14,8</u> 2,85	<u>9,25</u> 1,42	<u>1,26</u> 1,86	<u>5,55</u> 2,67	<u>0,59</u> 0,99	<u>0,74</u> 2,19	
9	3-168	ПдЗх-7,9	<u>30,92</u> 15,36	<u>0,43</u> 0,55	<u>0,36</u> 1,26	<u>7,2</u> 1,38	<u>9</u> 1,38	<u>1,37</u> 2,02	<u>4,32</u> 2,08	<u>0,97</u> 1,63	<u>0,79</u> 2,34	
5	3-99	ПнЗх-10,5	<u>41,93</u> 18,24	<u>0,7</u> 0,9	<u>0,63</u> 2,2	<u>14</u> 2,69	<u>11,2</u> 1,72	<u>1,4</u> 2,07	<u>3,85</u> 1,85	<u>0,74</u> 1,23	<u>0,67</u> 1,97	
2	3-32	ПнЗх-11	<u>36,97</u> 17,1	<u>1,14</u> 1,46	<u>0,42</u> 1,46	<u>9,5</u> 1,83	<u>12,16</u> 1,87	<u>1,48</u> 2,19	<u>4,56</u> 2,19	<u>0,65</u> 1,08	<u>0,68</u> 2,02	
3	3-63	ПнЗх-14,5	<u>25,2</u> 11,93	<u>0,58</u> 0,74	<u>0,38</u> 1,32	<u>4,35</u> 0,84	<u>9,28</u> 1,43	<u>0,84</u> 1,24	<u>2,9</u> 1,39	<u>0,78</u> 1,31	<u>0,41</u> 1,2	
12	B-104	ПнЗх-28,2	20,98	0,78	0,29	5,2	6,5	0,68	2,08	0,6	0,34	

Найвищий вміст попелу та ВМ у хвої виявлено в найбільш забрудненій частині лісів в урочищі Сербівка, а максимальний – на узліссі, що спрямоване до ТЕС. У техногенній зоні ці показники значно сильніше зростають із старінням хвої.

Зольність підстилки (табл. 4) збільшується вниз по профілю. На контролі вже у ферментативному шарі вона становить 6,0, а в самому нижньому гумусовому шарі – 16,5 %. У техногенній зоні ці процеси виявлені ще сильніше. Так, вміст попелу в шарі F коливається від 6,3 до 9,1, а в шарі Н – від 18,6 до 31,3 %. Це в 1,1–1,5 разу більше, ніж на контролі. Зольність у шарі Н є у 2,91–3,72 разу більшою, ніж у шарі F. Вміст попелу в цьому шарі є у 8–13 разів більшим, ніж у хвої.

Таблиця 4

Зольність у шарах підстилки в соснових насадженнях у техногенній зоні ЗТЕС, %

ППП	Л-во-кв.	Напря- відстань від ТЕС, км	Шар підстилки		
			L	F	H
10	A-2	ПдСх-4,6	4,8	9,0	31,3
11	A-25	ПдС-6,5	4,7	8,6	26,2
9	3-168	ПдЗх-7,9	4,7	7,6	28,3
8	3-129	ПдЗх-8,5	4,7	7,6	28,3
5	3-99	ПнЗх-10,5	4,5	7,7	25,6
2	3-32	ПнЗх-11,0	4,1	6,3	19,9
1	3-16	ПнЗх-11,0	3,9	6,4	19,4
4	3-78	ПнЗх-13,0	3,8	6,8	24,3
3	3-63	ПнЗх-14,5	5,8	6,4	18,6
12	B-104	ПнЗх-28	3,2	6,0	16,5

Перевищення вмісту може досягати 4 і більше разів. Рівень забруднення підстилки є значно вищим, ніж ґрунту та хвої (табл. 5). Значне зростання індексів концентрації ВМ виявлено в найближчих до ЗТЕС сосняках. Найбільш високий індекс концентрації характерний для Mn, Ni, Cu, Zn.

Таблиця 5

Вміст (числівник, мг·кг⁻¹) та індекси концентрації (знаменник) ВМ у підстилці соснових насаджень техногенної зони ЗТЕС

ППП	Л-во-кв.	Напря- відстань від ТЕС, км	Шар	Сума Z _c	У тому числі окремі елементи						
					Mn	Cr	Zn	Ni	Cu	Pb	Co
10	A-2	ПдСх-4,6	L	<u>155,28</u>	<u>96</u>	<u>1,92</u>	<u>28,8</u>	<u>2,98</u>	<u>3,84</u>	<u>3,07</u>	<u>0,24</u>
				22,32	3,00	3,00	1,74	2,17	1,50	2,44	2,10
				<u>103,59</u>	<u>37,6</u>	<u>1,88</u>	<u>37,6</u>	<u>8,93</u>	<u>4,7</u>	<u>2,26</u>	<u>0,38</u>
				16,27	2,07	1,47	1,43	1,63	1,47	2,18	1,55
				<u>132,75</u>	<u>90</u>	<u>1,35</u>	<u>22,5</u>	<u>1,22</u>	<u>3,6</u>	<u>1,76</u>	<u>0</u>
				15,76	2,15	1,41	1,96	2,34	0,56	1,56	1,80
9	3-168	ПдЗх-7,9	L	<u>61,94</u>	<u>28,1</u>	<u>0,99</u>	<u>22,8</u>	<u>0,84</u>	<u>1,52</u>	<u>1,29</u>	<u>0</u>
				9,47	1,33	1,19	1,10	0,66	0,71	0,97	1,03
				<u>48,64</u>	<u>21,7</u>	<u>0,78</u>	<u>15,5</u>	<u>1,18</u>	<u>1,55</u>	<u>1,24</u>	<u>0,19</u>
				10,55	1,03	1,26	1,22	1,72	0,58	0,90	1,18
				<u>68,16</u>	<u>51,2</u>	<u>0,9</u>	<u>6,4</u>	<u>0,64</u>	<u>0,96</u>	<u>0,77</u>	<u>0,32</u>
				68,16	51,2	0,9	6,4	0,64	0,96	0,77	0,32
10	A-2	ПдСх-4,6	F	<u>157,41</u>	<u>57,6</u>	<u>2,88</u>	<u>46,8</u>	<u>5,58</u>	<u>9</u>	<u>5,76</u>	<u>0,45</u>
				19,18	1,04	3,00	1,83	4,05	1,50	1,07	2,03
				<u>135,23</u>	<u>56,42</u>	<u>2,55</u>	<u>36,4</u>	<u>4,55</u>	<u>9,1</u>	<u>4</u>	<u>0,46</u>
9	3-168	ПдЗх-7,9	15,48	1,17	1,21	2,00	2,28	2,02	1,08	1,72	
5	3-99	ПнЗх-10,5	F	<u>330,72</u>	<u>184,8</u>	<u>5,24</u>	<u>24,64</u>	<u>6,16</u>	<u>7,7</u>	<u>2,93</u>	<u>1,16</u>
				18,96	1,58	1,28	2,19	1,54	1,28	2,57	1,91

ППП	Л-во-кв.	Напря-відстань від ЗТЕС, км	Шар	Сума Z _c	У тому числі окремі елементи						
					Mn	Cr	Zn	Ni	Cu	Pb	Co
4	3-78	ПнЗх-13,0	F	<u>117,23</u> 11,28	<u>54,4</u> 0,87	<u>1,84</u> 1,70	<u>34</u> 1,16	<u>4,08</u> 1,13	<u>6,8</u> 1,51	<u>2,86</u> 0,76	<u>0</u> 1,15
3	3-63	ПнЗх-14,5		<u>129,22</u> 12,49	<u>76,8</u> 1,07	<u>1,66</u> 2,13	<u>20,48</u> 1,09	<u>3,97</u> 1,71	<u>5,12</u> 1,42	<u>2,82</u> 0,81	<u>0,32</u> 1,27
12	B-104	ПнЗх-28,2		106,56	60	2,16	15	3,6	4,8	2,28	0,6
10	A-2	ПдСх-4,6	H	<u>1437,92</u> 36,99	<u>782,5</u> 2,44	<u>25,04</u> 2,85	<u>78,25</u> 4,52	<u>68,86</u> 3,22	<u>37,56</u> 0,95	<u>20,03</u> 6,52	<u>6,26</u> 3,60
5	3-99	ПнЗх-10,5		<u>1459,46</u> 23,30	<u>1024</u> 1,77	<u>25,6</u> 1,55	<u>64</u> 2,22	<u>38,4</u> 3,29	<u>20,48</u> 1,55	<u>11,26</u> 3,68	<u>3,84</u> 2,62
4	3-78	ПнЗх-13,0		<u>636,17</u> 20,08	<u>194,4</u> 1,79	<u>16,04</u> 1,47	<u>121,5</u> 2,10	<u>38,88</u> 3,12	<u>24,3</u> 2,21	<u>11,66</u> 1,93	<u>1,46</u> 2,45
3	3-63	ПнЗх-14,5		<u>1533,94</u> 19,46	<u>1116</u> 1,21	<u>13,02</u> 1,13	<u>46,5</u> 2,42	<u>31,62</u> 2,10	<u>18,6</u> 1,69	<u>7,81</u> 2,78	<u>3,72</u> 2,04
12	B-104	ПнЗх-28,2		335,94	135,3	6,27	41,25	10,56	13,2	4,95	1,65

Індекси концентрації ВМ зростають униз по профілю підстилки. Особливо сильно забруднюється найнижчий гумусований шар підстилки, де індекси концентрації Mn, Ni перевищують 4, а Cr, Pb та Co – 2.

Отримані дані запасів мортмаси підстилки [3] дають змогу визначити величину сумарного забруднення цього компонента екосистеми. Сумарний запас важких металів у підстилці – 158,8–384,3 г·га⁻¹, що є в 3,4–5,9 разу більшим, ніж на контролі.

Вказані тенденції забруднення підстилки ВМ характерні також для величин сумарної акумуляції. Запас підстилки шару L у техногенній зоні є меншим, ніж на контролі, тому сумарна величина забруднення цього шару лише за найсильнішого забруднення (ППП 10) є в 1,54 разу більшою, ніж на контролі.

У ферментативному шарі разом зі зростанням рівня забруднення накопичується мортмаса. І хоча запас фітодетриту лише на найближчій ППП перевищує відповідні чинники на контролі, загальна величина акумуляції є більшою в 1,2–1,6 разу.

У техногенній зоні сумарний рівень акумуляції ВМ у шарі H підстилки є в 4–7 разів більшим, ніж на контролі. Аналогічну ситуацію маємо й із запасами макроелементів у цьому шарі підстилки.

Про збільшення накопичення ВМ від верху до низу профілю підстилки свідчить співвідношення запасів ВМ у шарі F і L та H і F. Особливо значною є різниця між шарами L і H підстилки. Запас ВМ у шарі H у десятки та в сотні разів є більшим, ніж у шарі L (табл. 6). Так, сумарний вміст Mn у шарі H в радіусі до 8,5 км від ЗТЕС у 32–82, Cr – у 33–52, V – у 68–92, Ni – у 70–178 разів є більшим, ніж у шарі L (табл. 7).

Під час дослідження акумуляції ВМ в умовах забруднення ЗТЕС важливим є не тільки визначення просторових тенденцій накопичення, але й порівняння співвідношення вмісту металів в окремих компонентах лісових екосистем. Порівняння вмісту ВМ у хвої різного віку дає уявлення про їхнє вікове накопичення відповідно до її старіння. Для більшості елементів акумуляція збільшується у міру старіння хвої. З іншого боку, якщо співвідношення між вмістом ВМ у хвої другого і першого року зростає, то для третього і другого року, навпаки, зменшується з наближенням до ЗТЕС (табл. 8). Схожа тенденція збільшення вмісту відзначається й для сірки [3]. Це пояснюється тим, що охвоєність пагонів третього року внаслідок передчасної дефоліації є меншою, ніж другого. А оскільки осипається хвоя, що накопичила летальну дозу, то й загальний рівень вмісту з віком буде знижуватись.

Таблиця 6

Запас ВМ у підстилці соснових насаджень техногенної зони ЗТЕС, кг·га⁻¹

ППП	Л-во-кв.	Напря-відстань від ТЕС, км	Шар	Запас підстилки т·га ⁻¹	Усього ВМ	У тому числі окремі елементи						
						Mn	Cr	Zn	Ni	Cu	Pb	Co
10	A-2	ПдСх-4,6	L	6,5	8,96	6,24	0,13	0,94	0,10	0,25	0,10	0,02
11	A-25	ПдСх-6,5		7,1	4,33	2,35	0,09	0,84	0,07	0,17	0,10	0,02
9	3-168	ПдЗх-7,9		6,6	5,19	2,46	0,12	1,23	0,29	0,31	0,07	0,03
4	3-78	ПнЗх-13,0		6,4	3,76	2,36	0,08	0,58	0,04	0,09	0,04	0,02
12	B-104	ПнЗх-28,2		9,0	5,80	4,63	0,08	0,29	0,03	0,09	0,04	0,03
10	A-2	ПдСх-4,6	F	16,0	20,49	9,20	0,46	3,74	0,45	1,44	0,46	0,07
11	A-25	ПдСх-6,5		14,0	17,36	8,91	0,47	2,41	0,36	1,20	0,37	0,02
9	3-168	ПдЗх-7,9		11,5	12,97	6,49	0,29	2,09	0,26	1,05	0,23	0,05
4	3-78	ПнЗх-13,0		13,5	35,76	19,71	0,49	1,73	0,30	0,99	0,16	0,08
12	B-104	ПнЗх-28,2		15,0	14,39	8,98	0,32	1,12	0,27	0,72	0,17	0,09
10	A-2	ПдСх-4,6	H	26,2	354,84	205,02	6,56	10,25	9,02	9,84	2,62	1,64
11	A-25	ПдСх-6,5		20,0	193,99	99,56	3,14	3,93	4,72	5,24	1,42	0,52
4	3-78	ПнЗх-13,0		10,4	106,92	65,65	1,37	2,74	2,19	2,19	0,52	0,22
12	B-104	ПнЗх-28,2		16,0	49,31	21,69	1,01	3,31	0,85	2,12	0,40	0,27

Таблиця 7

Співвідношення запасів ВМ у підстилці соснових насаджень у зоні ЗТЕС

ППП	Л-во-кв.	Напря-відстань від ТЕС, км	Шар	Сума	У тому числі						
					Mn	Cr	Zn	Ni	Cu	Pb	Co
10	A-2	ПдСх-4,6	F/L	2,29	1,47	3,68	3,99	4,61	5,76	4,61	4,61
11	A-25	ПдСх-6,5		4,01	3,80	5,00	2,87	5,39	7,18	3,71	Н. в.
9	3-168	ПдЗх-7,9		2,50	2,63	2,38	1,70	0,89	3,40	3,12	2,12
8	3-129	ПдЗх-8,5		5,93	2,68	8,09	1,85	8,82	6,35	4,35	Н.в.
4	3-78	ПнЗх-13,0		9,52	8,35	6,34	2,99	8,21	11,41	3,65	Н.в.
12	B-104	ПнЗх-28,2		2,48	1,94	3,99	3,88	9,32	8,28	4,92	3,11
10	A-2	ПдСх-4,6	H/F	17,32	22,29	14,27	2,74	20,25	6,85	5,71	22,83
11	A-25	ПдСх-6,5		11,17	11,17	6,70	1,63	13,06	4,35	3,79	Н.в.
8	3-129	ПдЗх-8,5		13,09	33,49	6,32	4,16	20,21	5,32	5,54	5,32
4	3-78	ПнЗх-13,0		2,99	3,33	2,78	1,59	7,40	2,22	3,30	2,78
12	B-104	ПнЗх-28,2		3,43	2,42	3,11	2,95	3,14	2,95	2,33	2,95
10	A-2	ПдСх-4,6	H/L	39,60	32,85	52,57	10,95	93,27	39,43	26,28	105,14
11	A-25	ПдСх-6,5		44,85	42,42	33,49	4,69	70,33	31,26	14,07	Н. в.
8	3-129	ПдЗх-8,5		77,60	89,69	51,10	7,67	178,20	33,76	24,12	Н. в.
4	3-78	ПнЗх-13,0		28,46	27,80	17,59	4,75	60,78	25,33	12,03	Н. в.
12	B-104	ПнЗх-28,2		8,50	4,69	12,42	11,44	29,29	24,40	11,44	9,15

Порівняння вмісту попелу та ВМ у хвої і підстилці дає можливість встановити їхню роль у забрудненні підстилки під час надходження їх із мортмасою хвої. За винятком міді та кобальту, у верхньому шарі підстилки вміст ВМ є значно вищим, ніж у хвої третього року. Наприклад, для хрому перевищення сягає 2,0–5,0 разу, цинку – 1,6–2,0, свинцю – 1,6–3,0 разу. Тобто надходження ВМ із мортмасою хвої не є основним джерелом забруднення підстилки. Воно визначається рівнем їхньої седиментації із золою на земну поверхню.

Співвідношення між вмістом ВМ у різних компонентах соснових насаджень

ППП	Л-во-кв.	Напрямовідстань від ТЕС, км	Компоненти*	Сума	У тому числі					
					Cr	Zn	Ni	Cu	Pb	Co
10	A-2	ПдСх-4,6	X ₂ /X ₁	1,27	0,78	1,70	1,11	0,90	1,19	1,36
9	3-168	ПдЗх-7,9	X ₂ /X ₁	1,51	1,75	1,02	1,59	1,09	1,63	1,35
5	3-99	ПнЗх-10,5	X ₂ /X ₁	1,13	1,59	1,13	1,27	0,83	1,97	1,31
3	3-63	ПнЗх-14,5	X ₂ /X ₁	0,53	0,55	0,65	1,41	0,63	1,25	0,80
12	B-104	ПнЗх-28,2	X ₂ /X ₁	0,74	0,80	0,82	1,09	0,84	1,05	0,48
10	A-2	ПдСх-4,6	X ₃ /X ₂	1,01	1,00	0,70	1,08	1,00	1,09	0,64
9	3-168	ПдЗх-7,9	X ₃ /X ₂	1,03	1,14	0,51	1,09	0,77	1,32	0,98
5	3-99	ПнЗх-10,5	X ₃ /X ₂	1,68	1,05	1,07	1,46	1,07	1,17	1,17
3	3-63	ПнЗх-14,5	X ₃ /X ₂	1,87	1,51	1,48	1,25	1,29	1,74	1,25
12	B-104	ПнЗх-28,2	X ₃ /X ₂	1,83	1,24	1,13	1,28	1,13	1,53	2,45
10	A-2	ПдСх-4,6	L/X ₃	4,41	5,05	2,17	1,86	0,67	3,37	0,39
9	3-168	ПдЗх-7,9	L/X ₃	2,15	2,81	1,56	0,98	0,21	2,08	0,00
5	3-99	ПнЗх-10,5	L/X ₃	3,17	2,14	2,01	0,87	0,94	2,39	0,00
3	3-63	ПнЗх-14,5	L/X ₃	1,93	2,06	1,67	1,40	0,53	1,58	0,46
12	B-104	ПнЗх-28,2	L/X ₃	3,25	3,13	0,98	0,95	0,46	1,28	0,95
10	A-2	ПдСх-4,6	F/L	1,01	1,50	1,63	1,88	2,34	1,88	1,88
9	3-168	ПдЗх-7,9	F/L	4,08	3,00	1,42	3,89	5,41	1,73	нв
5	3-99	ПнЗх-10,5	F/L	2,49	3,88	1,10	5,07	2,14	1,67	нв
3	3-63	ПнЗх-14,5	F/L	2,66	2,15	1,32	3,37	3,30	2,27	1,72
12	B-104	ПнЗх-28,2	F/L	1,56	2,41	2,34	5,63	5,00	2,97	1,88
10	A-2	ПдСх-4,6	H/F	9,13	8,69	1,67	12,34	4,17	3,48	13,91
5	3-99	ПнЗх-10,5	H/F	4,41	4,89	2,60	6,23	2,66	3,85	3,32
3	3-63	ПнЗх-14,5	H/F	11,87	7,82	2,27	7,97	3,63	2,77	11,63
12	B-104	ПнЗх-28,2	H/F	3,15	2,90	2,75	2,93	2,75	2,17	2,75
10	A-2	ПдСх-4,6	ГР/Н	0,54	1,60	1,28	0,26	0,27	0,50	0,80
5	3-99	ПнЗх-10,5	ГР/Н	0,65	1,95	1,56	0,49	0,39	1,33	1,30
3	3-63	ПнЗх-14,5	ГР/Н	0,61	3,07	1,72	0,60	0,54	2,56	0,00
12	B-104	ПнЗх-28,2	ГР/Н	3,07	8,61	1,94	1,80	0,30	1,41	0,00
10	A-2	ПдСх-4,6	ГР/X ₃	22,11	105,26	7,52	11,28	1,75	10,96	8,22
9	3-168	ПдЗх-7,9	ГР/X ₃	23,82	125,00	6,94	41,67	1,54	9,26	0,00
5	3-99	ПнЗх-10,5	ГР/X ₃	22,73	79,37	8,93	13,57	2,08	20,41	7,52
3	3-63	ПнЗх-14,5	ГР/X ₃	37,10	106,10	8,62	22,59	3,45	25,54	0,00
12	B-104	ПнЗх-28,2	ГР/X ₃	49,09	188,81	12,31	28,11	1,92	11,71	0,00

*X₁, X₂, X₃ – хвоя першого, другого, третього року відповідно; шари підстилки: L – опадовий, F – ферментативний, H – гуміфікаційний; ГР – ґрунт.

Співвідношення вмісту ВМ у різних шарах підстилки зростає вниз по профілю, а найвищим воно є для варіанту H/F. Цікавим є те, що в техногенній зоні із сильним забрудненням вміст ВМ у ґрунті зазвичай є меншим, ніж у нижньому шарі підстилки. Тобто рівень накопичення золи в підстилці внаслідок седиментації викидів на земну поверхню є значно вищим, ніж у ґрунті. Водночас вміст ВМ у ґрунті є значно більшим, ніж у хвої.

Висновки. Надходження викидів в атмосферу є першопричиною забруднення та негативних змін не тільки аеротопу (повітря, опадів), але й трофотопу (підстилки та ґрунту) екосистем соснових лісів техногенної зони Зміївської ТЕС.

За рівнем індексу концентрації ВМ найменшою мірою забруднені ґрунти, а найбільшою – підстилка. У хвої виявлено середнє значення індексів концентрації.

Максимальний рівень забруднення характерний для 3–5-кілометрової зони навколо ЗТЕС, особливо на узліссях, спрямованих до неї.

У техногенній зоні вміст попелу та ВМ у хвої зростає у міру її старіння.

У верхньому шарі підстилки вміст ВМ є значно вищим, ніж у хвої третього року. Основним джерелом забруднення підстилки ВМ є не надходження їх із мортмасою хвої, а седиментація викидів попелу на земну поверхню.

Сумарний запас важких металів у підстилці є у 3,4–5,9 разу більшим, ніж на контролі. Індєкси концентрації Mn, Ni перевищують 4, Cr, Pb та Co – 2. Забруднення ВМ збільшується вниз по профілю підстилки. Найбільш сильно забруднюється ВМ найнижчий гумусований шар підстилки. Запас ВМ у шарі Н є в десятки і навіть в сотні разів більшим, ніж у шарі L.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Авессаломова И. А. Геохимические показатели при изучении ландшафтов / И. А. Авессаломова. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1987. – 108 с.
2. Воробьев Д. В. Методика лесотипологических исследований / Д. В. Воробьев. – К. : Урожай, 1967. – 388 с.
3. Ворон В. П. Швидкість деструкції фітодетриту як показник біоциркуляції речовин соснових лісостанів у ланці «опад-підстилка» в зоні Зміївської ТЕС / В. П. Ворон // Лісівництво і агролісомеліорація. – 2013. – Вип. 124. – С. 139–145.
4. Ворон В. П. Вплив емісій Зміївської ДРЕС на компоненти лісової екосистеми / В. П. Ворон, М. А. Бондарук, С. П. Распоїна // Лісівництво і агролісомеліорація. – 1999. – Вип. 94. – С. 48–52.
5. Ворон В. П. Розвиток соснових деревостанів в умовах зниження аеротехногенного забруднення Зміївської ТЕС / В. П. Ворон, І. М. Коваль, О. В. Леман та ін. // Науковий вісник НАУ. Лісівництво. Декоративне садівництво. – 2006. – № 103. – С. 24–33.
6. Ворон В. П. Забруднення снігового покриву в сосняках техногенної зони Зміївської теплової електростанції / В. П. Ворон, В. А. Лещенко // Лісівництво і агролісомеліорація. – 2008. – Вип. 113 – С. 225–230.
7. Габович Р. Д. Гигиенические основы охраны продуктов питания от вредных химических веществ / Р. Д. Габович, Л. С. Приступа. – К. : Здоровье, 1987. – 248 с.
8. Зибцев С. В. Влияние загрязнения атмосферы выбросами тепловых электростанций на сосновые насаждения Левобережья УССР : автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. биол. наук / С. В. Зибцев. – Днепропетровск, 1990. – 17 с.
9. Зибцев С. В. Состояние сосняков в районе загрязнения атмосферы выбросами теплоэлектростанций / С. В. Зибцев, В. П. Ворон // Лесоводство и агролесомелиорация. – 1989. – Вип. 78. – С. 32–35.
10. Ильин В. Б. Тяжелые металлы в системе почва – растение / В. Б. Ильин. – Новосибирск : Наука, Сибирское отделение, 1991. – 152 с.
11. Кабата-Пендиас А. Микроэлементы в почвах и растениях / А. Кабата-Пендиас, Х. Пендиас. – М. : Мир, 1989. – 439 с.
12. Полевой определитель почв / Мин-во сел. хоз-ва УССР и др.; под ред. Н. И. Полупана и др. – К. : Урожай, 1981. – 320 с.
13. Практикум по агрохимии / А. С. Радов, И. В. Пустовой, А. В. Корольков; Под ред. И. В. Пустового. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Агропромиздат, 1985. – 312 с.
14. Саєт Ю. Е. Геохимия окружающей среды. / Ю. Е. Саєт, Б. А. Ревич, Е. П. Янин. – М. : Недра, 1990. – 335 с.
15. Чорнобай Ю. М. Трансформація рослинного детриту в природних екосистемах / Ю. М. Чорнобай. – Львів : Вид-во ДПМ НАН України, 2000. – 352 с.

Voron V. P.

HEAVY METALS ACCUMULATION IN PINE FOREST ECOSYSTEMS UNDER ATMOSPHERIC POLLUTION BY THERMAL POWER PLANT EMISSIONS

Ukrainian Research Institute of Forestry and Forest Melioration named after G. M. Vysotsky

The results of research of heavy metals accumulation in various components of ecosystems in pine forests of the industrial zone of Zmiev Thermal Power Plant are presented. The studies were based on methods of comparative ecology. The sample plots were located on the ecological profile on 4 to 28 km from the Zmiev Thermal Power Plant. The concentration index (I_c) was defined as the ratio of the element content in the investigated object to its content in the control. It was shown that the release of emissions into the atmosphere is the primary cause of pollution and

negative changes not only in an aerotope (air, precipitation), but also in a trophotope (litter and soil). By the level of concentration index, soils are less contaminated by heavy metals than the litter. In the needles, the mean value of concentration indices is determined.

In the industrial zone, the ash and heavy metals content in the needles increases with the aging. The main source of litter contamination is the sedimentation of ash emissions on the earth's surface. The obtained data on the mortmass reserves of the litter allowed determining the value of the total pollution of this ecosystem component. The proportion of heavy metals increases downward along the litter profile. The extremely big difference is between the litter and humus layers of the litter. Heavy metals storage in the H layer is tens or even hundreds of times larger than in the L layer.

Key words: industrial air pollution, heavy metals, mortmass, needles, soil, litter layer.

Ворон В. П.

АККУМУЛЯЦИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ЭКОСИСТЕМАХ СОСНОВЫХ ЛЕСОВ В УСЛОВИЯХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ВЫБРОСАМИ ТЭС

Український науково-дослідницький інститут лісного господарства і агролісомеліорації ім. Г. Н. Висоцького

Приведены результаты исследований аккумуляции тяжелых металлов в различных компонентах экосистем сосновых лесов техногенной зоны Змиевской ТЭС. Исследования базировались на методах сравнительной экологии и проводились на экологическом профиле с расположением пробных площадей на расстоянии от 4 до 28 км от ЗТЭС. Индекс концентрации (I_c) определяли как отношение содержания элемента в исследуемом объекте к его содержанию на контроле. Установлено, что поступление выбросов в атмосферу является первопричиной загрязнения и негативных изменений не только в аэротопе (воздух, осадки), но и в трофотопе (подстилка и почвы). По уровню индекса концентрации тяжелыми металлами меньше загрязнены почвы, больше – подстилка. В хвое отмечено среднее значение индексов концентрации.

В техногенной зоне зольность и содержание тяжелых металлов в хвое увеличивается по мере ее старения. Основным источником загрязнения подстилки является седиментация выбросов пепла на земную поверхность. Полученные данные запасов мортмассы подстилки позволили определить величину суммарного загрязнения этого компонента экосистемы. Соотношение содержания тяжелых металлов увеличивается вниз по профилю подстилки. Особенно большой оказалась разница между опадовым и гумусированным слоями подстилки. Запас тяжелых металлов в слое Н в десятки и даже в сотни раз больше, чем в слое L.

Ключевые слова: аэротехногенное загрязнение, тяжелые металлы, мортмасса, хвоя, почва, слои подстилки.

E-mail: voron@uriffm.org.ua

Одержано редколегією 18.11.2016