

JERZY KWAPULIŃSKI, JANUSZ MIROSŁAWSKI, MARTA  
CYGANEK, BARBARA CZOMPERLIK, ALEKSANDRA SZYWAŁA

## Skutki zjawiska wtórnego pylenia lasu zanieczyszczonego toksycznymi metalami

The Consequences of Secondary Dusting of a Forest  
Polluted by Toxic Metals

### Wstęp

Zjawisko wtórnego pylenia ma znaczny udział w procesie zanieczyszczenia środowiska, co potwierdziły prowadzone liczne badania (3,4). Pyły pochodzące z emisji dalekiego zasięgu osiadające na powierzchni gruntu oraz innych płaszczyznach, wskutek oddziaływania wiatru mogą ponownie stać się nowym i istotnym źródłem zanieczyszczenia atmosfery toksycznymi metalami. Przepływ powietrza nad powierzchnią ze zdeponowanym pyłem pokonuje działanie sił adhezji i cząstki pyłu są ponownie kierowane do atmosfery. Zjawisko to zwane wtórnym pyleniem zachodzi w warstwie powietrza graniczącej bezpośrednio z podłożem, glebą lub w warstwie danej szaty roślinnej uprzednio mocno obciążonej pyłem zdeponowanym.

Wielkość emisji cząstek pyłu do atmosfery zależy głównie od składu jakościowego i wielkości zdeponowanego na powierzchni podłoża lub liści drzew, ładunku zanieczyszczeń, sił adhezji działających na cząstki, kształtu i wymiarów cząstek, prędkości wiatru i turbulencji powietrza. Zależy także od innych parametrów, takich jak temperatura i wilgotność (1,5). Podobne zjawisko wtórnego pylenia zauważa się w lasach położonych na terenach pozostających w zasięgu oddziaływania przemysłu.

Osiadły na liściach lub igłach pył jest wtórnie unoszony do przyziemnej warstwy powietrza, w której obserwuje się niejednokrotnie okresowe zwiększenie zawartości niektórych metali przewyższające obowiązujące normy. Zatem uzasadnione jest podjęcie badań nad oceną udziału wtórnego pylenia w zanieczyszczeniu powietrza wybranego kompleksu leśnego położonego w zasięgu emisji przemysłowej.

W tym celu określono udział badanych metali w opadzie kierunkowym i opadzie całkowitym z uwzględnieniem form ich występowania. Określono również udział metali

w składzie chemicznym gleby. W celu całościowego przedstawienia zagrożeń spowodowanych możliwością wtórnego zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego w ekosystemie leśnym wyznaczono współczynniki kontaminacji oraz współczynniki wzbogacenia środowiska w metale ciężkie.

## **Metodyka poboru prób i ich preparatyka**

### **Pył zawieszony o ukierunkowanej emisji**

Pył zbierano za pomocą pyłomierza kierunkowego ustawionego w bezpośrednim sąsiedztwie lasu w Knurowie w odległości 20 metrów. Próby zbierano do słoików z 100 ml wody destylowanej przez 6 miesięcy (od listopada 1989 do kwietnia 1990 r.). Ekspozycji ściśle określonej czasowo towarzyszyły różnorodne warunki klimatyczne. Zebraną próbę pyłu przesączono przez sącdek z bibuły filtracyjnej typu Whatman 1 w celu oddzielenia pyłów nierozpuszczalnych w wodzie. Po ustaleniu masy tych pyłów sącdek spopielono w piecu muflowym w temp. 400°C, a następnie poddano mineralizacji na mokro 10 ml 65%  $\text{HNO}_3$  przez 24 godziny. Całość po odparowaniu do sucha ponownie zalano 10 ml 65%  $\text{HNO}_3$  i przeniesiono ilościowo do kolby miarowej na 25 ml uzupełniając wodą destylowaną do kreski.

Masę pyłu rozpuszczalnego w wodzie określono przez odparowanie przesącza w temp. 105°C. Suchą pozostałość zakwaszono 0,5 ml 65%  $\text{HNO}_3$  i przeniesiono ilościowo do kolby miarowej na 25 ml uzupełniając wodą destylowaną do tej objętości.

### **Suchy opad pyłu na powierzchnię płaską**

Pył do badań pobrano z powierzchni płaskiej 3,3 m<sup>2</sup> na stanowisku w bezpośrednim sąsiedztwie lasu. Tok postępowania był podobny jak w przypadku prób pyłu zawieszonego.

### **Gleba**

Próbki gleby o grubości 5 cm pobrano z powierzchni 100 cm<sup>2</sup>. Glebę pobrano na terenie zalesionym i odkrytym w bezpośrednim sąsiedztwie lasu.

## **Wyniki**

Przeprowadzone badania zawartości metali ciężkich w opadzie kierunkowym pyłu w Knurowie wskazują na duże różnice w zawartości badanych metali w próbach, jak również na duże różnice w ładunku tych metali w kierunkowo opadającym pyłu. Zawartość badanych metali analizowano z uwzględnieniem form ich występowania. Masa rozpuszczalnego w wodzie pyłu waha się w granicach 0,00155 g do 0,0199 g, natomiast dla pyłu nierozpuszczalnego w wodzie wynosi od 0,00155 g do 0,05845 g. Zakresy zmian zawartości form rozpuszczalnych metali w opadzie kierunkowym pyłu przedstawiają się następująco:

ołów	–	96,77	–	943,22	µg/g pyłu
żelazo	–	1291,80	–	11051,84	µg/g pyłu

mangan	– 601,64	– 2487,10 $\mu\text{g/g}$ pyłu
nikiel	– 121,86	– 3306,45 $\mu\text{g/g}$ pyłu
cynk	– 2613,71	– 30064,52 $\mu\text{g/g}$ pyłu
miedź	– 109,19	– 8658,06 $\mu\text{g/g}$ pyłu
kadm	– 2,22	– 100,00 $\mu\text{g/g}$ pyłu

Analogicznie dla form nierozpuszczalnych metali zakresy te wynoszą:

ołów	– 26,07	– 349,58 $\mu\text{g/g}$ pyłu
żelazo	– 5250,20	– 11018,68 $\mu\text{g/g}$ pyłu
mangan	– 58,29	– 251,36 $\mu\text{g/g}$ pyłu
nikiel	– 30,37	– 196,50 $\mu\text{g/g}$ pyłu
cynk	– 324,93	– 2551,59 $\mu\text{g/g}$ pyłu
miedź	– 9,51	– 1497,28 $\mu\text{g/g}$ pyłu
kadm	– 1,71	– 14,79 $\mu\text{g/g}$ pyłu

Zwraca uwagę podobny trend zmian zawartości form rozpuszczalnych i nierozpuszczalnych poszczególnych metali w pyłe zawieszonym. Otrzymane wyniki świadczą o dużej zawartości żelaza, miedzi i cynku w pyłe w obydwu formach. Nieco niższą zawartość stwierdzono dla ołowiu, manganu, niklu a stosunkowo niedużą zawartość kadmu.

Analizując udział form rozpuszczalnych i nierozpuszczalnych w opadzie kierunkowym na podstawie wartości ilorazu zawartości poszczególnych metali w obu formach – K stwierdzono większy ładunek form rozpuszczalnych w tym opadzie.

Zakresy zmian wartości "K" są następujące:

ołów (Pb)	– 0,17	– 5,36
żelazo (Fe)	– 0,19	– 1,87
mangan (Mn)	– 2,57	– 17,91
nikiel (Ni)	– 2,69	– 16,83
cynk (Zn)	– 3,46	– 32,45
miedź (Cu)	– 3,22	– 27,10
kadm (Cd)	– 0,50	– 6,76

Największą przewagę w występowaniu form rozpuszczalnych w porównaniu do form nierozpuszczalnych obserwowano dla manganu, niklu, cynku i miedzi. Wielkość opadu kierunkowego wybranych metali w formie rozpuszczalnej i nierozpuszczalnej przypadająca na jednostkę powierzchni przedstawiono w tab. 1.

Z kolei interesujące było wyznaczenie zakresów i średnich szybkości opadu kierunkowego badanych pierwiastków z uwzględnieniem form ich występowania (tab. 2). Największą szybkość opadu kierunkowego form rozpuszczalnych i nierozpuszczalnych pyłu obserwowano dla żelaza i cynku, wartości dla pozostałych pierwiastków z wyjątkiem kadmu są zbliżone. W otoczeniu lasu opad całkowity zawiera następujące ilości metali w formie rozpuszczalnej: Pb – 163,07  $\mu\text{g/g}$ , Fe – 693,20  $\mu\text{g/g}$ , Mn – 278,84  $\mu\text{g/g}$ , Ni – 30,88  $\mu\text{g/g}$ , Zn – 1582,51  $\mu\text{g/g}$ , Cu – 55,72  $\mu\text{g/g}$ , Cd – 2,27  $\mu\text{g/g}$  oraz w formie

TABELA 1

Zawartość form rozpuszczalnych i nierozpuszczalnych wybranych metali w opadzie kierunkowym pyłu [ $\mu\text{g g}^{-1}$ ]

		Pb	Fe	Mn	Ni	Zn	Cu	Cd
Formy	X	459,47	4581,93	1164,31	910,22	7861,94	1980,49	24,66
rozpuszczalne	max.	943,22	11051,84	2487,10	3306,45	30064,52	8658,06	100,0
	min.	96,77	1291,80	601,64	121,86	2613,71	106,19	2,22
-----								
Formy	X	193,85	7327,58	155,86	92,73	785,74	353,53	7,40
nierozpuszczalne	max.	349,59	11018,68	251,36	196,50	2551,59	1497,28	14,79
	min.	26,07	5250,2	58,29	30,37	324,93	9,51	1,71

nierozpuszczalnej: Pb – 1283,93  $\mu\text{g/g}$ , Fe – 117,69  $\mu\text{g/g}$ , Mn – 177,69  $\mu\text{g/g}$ , Ni – 8,88  $\mu\text{g/g}$ , Zn – 90,82  $\mu\text{g/g}$ , Cu – 22,18  $\mu\text{g/g}$ , Cd – 2,68  $\mu\text{g/g}$ .

Porównując uzyskane wyniki z wynikami dla opadu kierunkowego obserwuje się niską zawartość badanych metali w opadzie suchym z przewagą ich form rozpuszczalnych. Dużą zawartość ołowiu w opadzie całkowitym można tłumaczyć jego komunikacyjnym pochodzeniem pomimo iż punkt poboru zlokalizowano w pewnej odległości od drogi. Zgodne to jest z sugestią wielu autorów o możliwości przemieszczania się pyłów komunikacyjnych na odległość 200–300 m (2).

TABELA 2

Charakterystyka szybkości opadania form rozpuszczalnych i nierozpuszczalnych wybranych metali [ $\mu\text{g godz}^{-1}$ ]

		Pb	Fe	Mn	Ni	Zn	Cu	Cd
Formy	zakres	0,41–	11,8–	5,5–	4,8–	46,1–	3,44–	0,088–
rozpuszczalne		–26,20	–300,0	–68,4	–17,5	–217,0	–56,3	–0,97
	$\bar{x}$	11,47	122,67	27,76	11,66	118,41	23,70	0,46
-----								
Formy	zakres	0,91–	161,8–	3,21–	1,21–	17,40–	0,746–	0,269–
nierozpuszczalne		–41,47	–1752,2	–48,4	–8,73	–89,90	–52,30	–0,716
	$\bar{X}$	15,27	572,9	12,57	4,83	44,26	16,52	0,39

Przeprowadzone badania obejmowały również ustalenie zawartości wybranych metali ciężkich w glebie z terenu zalesionego i terenu odkrytego. Zestawione w tab. 3 średnie zawartości badanych metali nasuwają wniosek, iż możemy się spodziewać większego zanieczyszczenia gleby na terenie zalesionym przez prawie wszystkie metale z wyjątkiem manganu i żelaza. To dodatkowe skażenie gleby można tłumaczyć spłukaniem przez deszcz zdeponowanego na liściach pyłu. Zmniejszenie ładunku poszczególnych metali w glebie na terenie odkrytym tłumaczy się brakiem bezpośredniego źródła (drzewa) oraz unoszeniem się zanieczyszczeń w związku z łatwiejszą penetracją wiatru.

**TABELA 3**  
Średnia zawartość wybranych metali w glebie [ $\mu\text{g g}^{-1}$ ]

Miejsce poboru gleby	Pb	Fe	Mn	Ni	Zn	Cu	Cd
Teren zalesiony	134,84	1511,82	43,75	5,2	94,43	32,31	1,02
Teren otwarty	29,46	1623,25	57,23	3,5	51,93	4,47	0,765

W celu określenie stopnia zanieczyszczenia powietrza i gleby obliczono współczynnik kontaminacji wyrażający stosunek zawartości metalu w badanym środowisku do zawartości tego metalu w środowisku odnośnikowym. Jako środowisko odnośnikowe przyjęto tereny rekreacyjne w Brennej. Wartości współczynników kontaminacji przedstawiono w tab. 4.

**TABELA 4**  
Współczynniki kontaminacji wybranych prób na terenie lasu w Knurowie

	Pb	Fe	Mn	Ni	Zn	Cu	Cd
<b>Opad kierunkowy</b>							
– formy rozpuszcz.	0,71	0,77	1,79	1,6	4,24	21,14	0,62
– - formy nierozpuszcz.	0,19	0,41	0,58	0,09	0,42	1,25	0,06
– suma	0,39	0,50	1,44	0,63	1,52	6,20	0,19
<b>Opad suchy</b>							
– formy rozpuszcz.	2,99	0,43	1,18	0,03	12,72	–	0,18
– formy nierozpuszcz.	7,41	0,03	0,39	3,06	0,19	1,09	1,07
– suma	6,35	0,13	0,66	0,04	2,81	3,82	0,33
<b>Gleba z terenu</b>							
odkrytego	–	0,04	5,23	–	0,49	0,06	0,16
zalesionego	–	0,06	15,09	–	2,15	0,94	10,2

Dla opadu kierunkowego pyłu, zawartych w nim form rozpuszczalnych metali, współczynniki kontaminacji są większe od jedności dla Mn, Zn, Ni i Cu ( $C = 21,14$ ). Świadczy to o większym zanieczyszczeniu badanego środowiska leśnego. W Brennej pyły zawierały więcej form nierozpuszczalnych metali. Wyjątek stanowi Cu ( $C = 1,25$ ). Współczynniki kontaminacji obliczone dla sumy ładunków poszczególnych metali wskazują na większą zawartość Cu, Zn i Mn w opadzie kierunkowym w Knurowie, natomiast pozostałe metale były obecne w większej ilości w pyłe zdeponowanym w Brennej.

Porównanie współczynników kontaminacji dla suchego opadu atmosferycznego wykazało większą kontaminację formami rozpuszczalnymi Pb, Mn i Zn oraz formami nieroz-

**TABELA 5**  
Współczynniki wzbogacenia metalami ciężkimi – rejon "Knurów"

		WK <sub>Pb</sub>	WK <sub>Fe</sub>	WK <sub>Ni</sub>	WK <sub>Zn</sub>	WK <sub>Cu</sub>	WK <sub>Cd</sub>
Opad	a)	0,68	1,58	7,06	1,19	8,52	2,60
kierunkowy–	b)	0,17	70,98	0,08	0,10	0,06	0,32
–opad suchy	c)	0,15	5,07	8,74	1,79	10,41	2,18
<hr style="border-top: 1px dashed black;"/>							
Opad	a)	0,19	0,07	0,93	2,63	0,27	0,35
suchy–	b)	2,34	0,02	0,42	0,24	0,17	0,65
–gleba	c)	1,03	0,05	0,73	1,69	0,23	0,47
<hr style="border-top: 1px dashed black;"/>							
Gleba–	a)	7,81	8,78	0,15	0,32	0,43	1,10
–opad	b)	2,48	0,74	0,20	0,43	0,33	0,49
kierunkowy	c)	1,05	3,14	0,08	0,14	0,04	0,56

- a) formy rozpuszczalne
- b) formy nierozpuszczalne
- c) suma opadów

puszczalnymi Pb i Ni rejonu leśnego "Knurów". Pozostałe metale charakteryzowały współczynniki mniejsze od 1. Łączna ocena obu form występowania metali w opadzie suchym wskazuje na większe zanieczyszczenie Pb, Zn, Cu środowiska leśnego położonego w zasięgu oddziaływania przemysłu. W rezultacie gleba z tereny zadrzewionego jest bardziej zanieczyszczona Mn, Zn i Cd niż gleba z otwartej przestrzeni. Świadczy to wyraźnie o emisjachłonných zdolnościach lasu.

Następnie przeprowadzono analizę wzbogacenia środowiska w metale ciężkie. Jako pierwiastek odnośnikowy przyjęto Mn. Wartości współczynników wzbogacenia WK zestawiono w tab. 5.

Pyły opadu kierunkowego w przypadku wszystkich rozpatrywanych metali z wyjątkiem ołowiu wskazują na większe ich zanieczyszczenie względem pyłów z opadu na powierzchnię płaską. Wykazano większe zanieczyszczenie pyłów opadu kierunkowego żelaza w formie nierozpuszczalnej w stosunku do pyłu z opadu na powierzchnię płaską (WK<sub>Fe</sub> = 70,98). Pyły opadu kierunkowego są bardziej zanieczyszczone wszystkimi badanymi metalami w porównaniu do gleby niezależnie od miejsca jej poboru. Wyjątek stanowi ołów w układzie gleba z terenu zadrzewieniowego – opad kierunkowy pyłu. Współczynniki wzbogacenia w układzie opad suchy – gleba z terenu otwartego, większe od jedności obserwowano dla Pb, Ni, Zn i Cu. Wskazuje to, że pyły opadające zawierają większe ilości badanych metali w stosunku do gleby. Współczynniki wzbogacenia dla Pb i Fe w układzie gleba z terenu otwartego i gleba z terenu zalesionego w stosunku do pyłów z opadu kierunkowego świadczą o większym zanieczyszczeniu gleby tymi metalami.

## Wnioski

- Wtórne pylenie lasu jest dodatkowym źródłem występowania wybranych metali w powietrzu oraz w glebie.
- Stwierdzono przewagę występowania w opadzie kierunkowym pyłów form rozpuszczalnych toksycznych metali ciężkich w porównaniu do form nierozpuszczalnych.

*Z Katedry i Zakładu Toksykologii Śląskiej Akademii Medycznej*

## Literatura

1. **Andrzejewski R., Gutowski W.:** "Fizyczne właściwości pyłów". Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1968.
2. **Curzydło I.:** Materiały III Krajowej Konferencji nt. "Wpływ zanieczyszczeń pierwiastkami śladowymi na przyrodnicze warunki rolnictwa". Puławy 28–30.05.1983.
3. **Kwapuliński J., Mirosławski J., Cyganek M.:** "Ocena toksyczności zjawiska wtórnego pylenia w sąsiedztwie ulicy". *Ochrona Powietrza*. 25, 1991.
4. **Kwapuliński J., Pastuszka J.:** "Ocena wielkości wtórnego skażenia powietrza wybranymi metalami z wysypiska odpadów komunalnych na terenach rolniczych". Materiały z konferencji nt. "Wpływ zanieczyszczenia pierwiastkami śladowymi", Puławy 1987.
5. **Sorbjan Z.:** "Turbulencja i dyfuzja w dolnej atmosferze". PWN, Warszawa 1983.

## Summary

In this paper results are presented of studies on valuation of atmospheric air- and soil-pollution in a forest area influenced by industrial emissions.

The amounts of potentially accessible metals have been determined: lead, iron, manganese, nickel, zinc and copper. The results consider the metal contents in dust of known origin. The form of occurrence has been taken into account, that is the soluble and the non-soluble form.

The dust- and soil- analyses have been done by use of the spectrophotometric atomic absorption method.

The results allowed for determination of the ranges and average speed of directional descent of the elements considered. In order to specify the loads of the metals in the natural environment, the indices of contamination and the indices of air and soil-enrichment have been determined.