

B. GWOREK¹, K. KLIMCZAK², J. ŁABĘTOWICZ¹, E. BIERNACKA³,
E. POLUBIEC², M. BOROWIAK⁴

WIELOPIERŚCIENIOWE WĘGLOWODORY AROMATYCZNE (WWA) W ROŚLINACH SUKCESYWNIE PORASTAJĄCYCH OSADY POCHODZENIA PRZEMYSŁOWEGO

POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBON'S (PAHS) CONTENT IN PLANTS GROWING ON INDUSTRIAL SEWAGE SLUDGE

¹SGGW, Katedra Nauk o Środowisku Glebowym, ²Instytut Ochrony Środowiska,
³SGGW, Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska,
⁴Instytut Chemii Przemysłowej, Warszawa

Abstract: Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH's) are classified as very dangerous organic pollutants. Due to the fact that they enter the soil, it is necessary to evaluate if their transfer from soil into plants is possible, and check if they can be included in the trophic chain. In the present work content of PAH's in plants growing on industrial sewage sludge was tested. High contents of PAH's in sewage sludge enabled to observe how the amount of PAH's in the ground influence their content in plants. The pilot research showed, that PAH's content in plants could depend on PAH's content in the ground.

Słowa kluczowe: WWA, osad ściekowy, rośliny

Keywords: PAH's, sewage sludge, plants

WSTĘP

W ostatnich latach odnotowuje się wyraźne zainteresowanie trwałymi zanieczyszczeniami organicznymi (TZO) w środowisku, a zwłaszcza ich występowaniem i przemianami. Do tej grupy związków należą wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne (WWA), które powstają głównie w procesach niepełnego spalania wszelkiego rodzaju paliw organicznych, zarówno w energetyce, jak i w procesach produkcyjnych [Ribes i in. 2003, Miroń 1995, Environmental Health Criteria 1998]. Nierzadko związki te są znajdowane z dala od antropogenicznych źródeł ich emisji.

Tłumaczone jest to naturalnymi procesami, podczas których powstają pewne ilości WWA, a zalicza się tu naturalne pożary lasów, wybuchy wulkanów, procesy geochemiczne oraz przemiany związków organicznych przy udziale drobnoustrojów [Miroń 1995, Environmental Health Criteria 1998, Maliszewska-Kordybach 1993, Ribes i in. 2003]. Jednakże naturalne źródła WWA w środowisku stanowią obecnie jedynie śladową część całej ich zawartości [Indeka, 1996].

Toksyczność WWA wynika z faktu, że związki te występują zawsze w mieszaninach, a działanie jednych węglowodorów może być zwielokrotnione w obecności innych [za Indeką, 1996]. Ponadto związki te mogą przechodzić w środowisku przemiany, w których często powstają związki dużo bardziej toksyczne od związków wyjściowych [Reyes i in. 2000].

WWA mogą być pobierane przez rośliny bezpośrednio z powietrza bądź z gleby, przy ich odpowiednim stężeniu [Mikołajek i in. 1985, Simonich, Hites 1995, Böhme i in. 1999]. Badania przeprowadzone przez Janikowską i Wardas [2002] wykazały, że benzo/a/piren jest akumulowany w dużych ilościach w komórkach *Chlorelli*. Na ogół uważa się, że pobieranie TZO jest zdeterminowane zmiennością warunków środowiskowych oraz rodzajem i wiekiem związku. Większość badań na temat biodostępności TZO dotyczy oddziaływań w układzie mikroorganizmy – TZO. Natomiast niewiele prac dotyczy oddziaływań w układzie gleba/podłoże-roślina.

Stąd też podjęto pilotowe badania, których celem było zbadanie, czy zawartość WWA w podłożu ma wpływ na ich zawartość w roślinach, jak również określenie, które z WWA w największej ilości są włączane do obiegu biologicznego. Aby osiągnąć cel pracy, do badań wybrano rośliny sukcesywnie porastające przemysłowe osady ściekowe. Hipotezę badawczą oparto na wcześniejszych badaniach wskazujących, które z osadów ściekowych są najbogatsze w te związki [Bernacka, Pałowska 1999]

MATERIAŁ I METODY BADAŃ

Do realizacji celu pracy wybrano dwa obiekty badań. Jeden z nich stanowiły osady ściekowe pochodzące z przemysłu petrochemicznego, drugi zaś osady ściekowe pochodzące z przemysłu karbochemicznego oraz rośliny sukcesywnie je porastające. Próbkę osadów petrochemicznych oraz roślin je porastających zostały pobrane z terenu Petrochemii Płock, natomiast próbki pochodzenia karbochemicznego – z terenu Karbochemii znajdującej się w Górnośląskim Okręgu Przemysłowym (GOP). W obydwu obiektach osady ściekowe składowane były od około 20 lat w tym samym miejscu.

Z wyznaczonych powierzchni badawczych pobrano po 10 próbek osadu ściekowego z głębokości 0–20 cm, z których przygotowano próbkę mieszaną. Próbki te wysuszono, zmielono i przesiano przez sito o średnicy oczek 1 mm.

Materiał roślinny do badań stanowiły następujące rośliny jednoliścienne porastające osad ściekowy pochodzący z przemysłu petrochemicznego: chwastnica jednostronna (*Echinochloa crus-galli*), mozga trzcinowata (*Phalaris arundinacea*), wiechlina łąkowa (*Poa pratensis*), perz właściwy (*Agropyron repens*) oraz dwuliścienne: rdest plamisty (*Polygonum persicaria*), wiklina (*Salix purpurea*) i nawłóć późna (*Solidago serotina*).

Z osadu pochodzącego z przemysłu karbochemicznego pobrano roślinę jednoliścienną – trzcinnik piaskowy (*Calamagrostis epigeios*) oraz dwuliścienne: wiesiołek (*Oenothera sp.*), liście topoli (*Populus sp.*) i brzozy (*Betula sp.*).

Nadziemne części roślin do badań pobrano w fazie kwitnienia. Przed wykonaniem analiz chemicznych materiał roślinny wysuszono, a następnie rozdrobnilo.

Za kontrolę przyjęto glebę, pochodzącą z pola doświadczalnego SGGW w Skierniewicach oraz pszenżyto uprawiane na tym polu. Ponadto, w celu wyeliminowania depozytu, kontrolę stanowił również owies uprawiany w szklarni na tej glebie.

W tak przygotowanych próbkach wykonano oznaczenia 16 WWA wymienionych na liście US EPA. Związki te oznaczano w czterech powtórzeniach metodą wysokosprawnej chromatografii cieczowej (HPLC), na aparacie firmy Waters z detektorem fotodiodowym UV/VIS oraz detektorem fluorescencyjnym z programowaniem długości fal wzbudzenia i emisji. Materiał do badań był ekstrahowany chlorkiem metylenu, w obecności miedzi, w aparacie Soxteca. W trakcie oznaczeń z próbkami postępowano zgodnie z procedurą ISO 13877 [1998].

WYNIKI BADAŃ

W badanych osadach ściekowych zdecydowanie więcej WWA oznaczono w osadach pochodzących z przemysłu karbochemicznego niż petrochemicznego (tab.1). Zawartość w nich sumy WWA sięgała nawet $97\ 350\ \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. W osadzie pochodzenia petrochemicznego wartość ta była prawie 40 razy mniejsza i wynosiła $2539\ \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. W glebie przyjętej za niezanieczyszczoną oznaczona suma WWA wyniosła $81,3\ \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m.

W osadach pochodzących z przemysłu karbochemicznego oznaczono najwięcej indeno/123-cd/ pirenu, benzo/b/fluorantenu i pirenu. Szereg ilościowy zawartości badanych WWA układał się następująco, z uwzględnieniem miejsca pobrania:

- w osadzie ściekowym, na którym rósł wiesiołek:

indeno/123-cd/piren > piren > benzo/a/piren > benzo/a/antracen > antracen > dibenzo/ah/antracen > fluoranten > chryzen > benzo/b/fluoranten > fenantren > benzo/k/fluoranten > fluoren

- w osadzie ściekowym, na którym rósł trzcinnik piaskowy:

benzo/b/fluoranten > indeno/123-cd/piren > fluoranten > benzo/a/piren > piren > fenantren > benzo/k/fluoranten > benzo/a/antracen > fluoren > chryzen > dibenzo/ah/antracen > antracen.

W osadzie petrochemicznym najwięcej było pirenu, a szereg zawartości poszczególnych WWA układał się następująco:

piren > benzo/k/fluoranten > fluoranten > benzo/b/fluoranten > benzo/a/piren > chryzen > benzo/ghi/perylene > antracen > fenantren > dibenzo/ah/antracen.

Analiza materiału roślinnego wykazała, że więcej WWA było w roślinach porastających osady pochodzące z przemysłu karbochemicznego niż z przemysłu petrochemicznego (tab. 2 i 3). Zawartość sumy WWA dochodziła nawet do $17\ 831\ \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. w wiesiołku. Natomiast w roślinach porastających osady petrochemiczne ilość tych związków była kilkudziesięciokrotnie mniejsza, a najwyższa zawartość, jaką oznaczono to $598\ \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. w wiechlinie łąkowej. W nawłoci późnej i chwastnicy jednostronnej zawartość sumy WWA była zbliżona do zawartości w roślinach kontrolnych i kształtowała się na poziomie około $50\ \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m.

TABELA 1. Zawartość WWA w osadach ściekowych
TABLE 1. PAH's content in sewage sludge

Nr No	WWA PAH's	Zawartość WWA ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s. m.}$) – PAH's content in $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ d. m}$			
		Karbochemia – Carbochemistry		Petrochemia Petrochemistry Płock	Czysta gleba non contam- inated soil Skierniewice
		osad 1 sewage sludge 1	osad 2 sewage sludge 2		
1	Naftalen	n. o.	n. o.	n. o.	n. o.
2	Acenaftylen	n. o.	n. o.	n. o.	n. o.
3	Acenaften	n. o.	n. o.	n. o.	n. o.
4	Fluoren	1080	1300	n. o.	6
5	Fenantren	1740	2600	24	1,5
6	Antracen	5300	740	35	1,2
7	Fluoranten	3230	3800	530	8,9
8	Piren	22000	3500	770	4,9
9	Benzo/a/antracen	7000	1700	n. o.	5,1
10	Chryzen	3200	920	140	6,5
11	Benzo/b/fluoranten	2900	4800	200	8,9
12	Benzo/k/fluoranten	1200	1900	560	4,4
13	Benzo/a/piren	21000	3600	180	2,9
14	Dibenzo/ah/antracen	4500	780	20	4
15	Benzo/ghi/perylen	n. o.	n. o.	80	14
16	Indeno/123-cd/piren	24200	4100	n. o.	13
	Σ WWA – Σ PAH's	97350	29740	2539	81,3

n. o. – nie wykryto – not detected, osad 1 – sewage sludge 1 – osad spod *Oenothera* sp. – sewage sludge from under *Oenothera* sp.; osad 2 – sewage sludge 2 – osad spod *Calamagrostis epigeios* – sewage sludge from under *Calamagrostis epigeios*

Spośród roślin porastających osady przemysłu karbochemicznego najmniej WWA stwierdzono w trzcinniku piaskowym. Pod względem zawartości sumy WWA badane rośliny można ustawić w następującym szeregu:

wiesiołek > liście topoli > liście brzozy > trzcinnik piaskowy.

Przy czym w wiesiołku zawartość WWA była pięciokrotnie wyższa niż w trzcinniku piaskowym.

W roślinach porastających osady pochodzące z przemysłu karbochemicznego spośród badanych węglowodorów najczęściej oznaczono fluorantenu oraz pirenenu, a ich zawartość dochodziła odpowiednio do 4300 i 5400 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$

Spośród roślin porastających osady przemysłu petrochemicznego najczęściej WWA oznaczono w wiechlinie łąkowej (598 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$). Pod względem zawartości WWA rośliny z tego obiektu można uszeregować następująco:

wiechlina > rdest > mozga > wiklina > perz > chwastnica > nawłóć.

Z powyższego szeregu wynika, że największa ilość WWA była w roślinie jednoliściennej, a najmniejsza w dwuliściennej, co jest odmiennym wynikiem niż w przypadku analizowanych roślin porastających osady pochodzące z przemysłu karbochemicznego.

TABELA 2. Zawartość WWA w roślinach rosnących na osadzie z Petrochemii Płock
 TABLE 2. PAH's content in plants growing on sewage sludge from Petrochemistry of Płock

Nr No	WWA PAH's	Zawartość WWA ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s. m.}$); Petrochemia Płock Chęłpowo PAH's content in $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ d. m}$; Płock Chęłpowo Petrochemistry						
		<i>Echinochloa crus-galli</i>	<i>Salix purpurea</i>	<i>Solidago serotina</i>	<i>Polygonum persicaria</i>	<i>Phalaris arundinacea</i>	<i>Poa pratensis</i>	<i>Agropyron repens</i>
1	Naftalen	n. o.	n. o.	n. o.	n. o.	n. o.	n. o.	n. o.
2	Acenaftylen	n. o.	n. o.	n. o.	n. o.	n. o.	n. o.	n. o.
3	Acenaften	n. o.	n. o.	n. o.	n. o.	n. o.	n. o.	n. o.
4	Fluoren	0,3	n. o.	n. o.	2,8	19	n. o.	n. o.
5	Fenantren	17	44	6	98	41	59	39
6	Antracen	n. o.	5	n. o.	5,1	1,5	2,4	2,8
7	Fluoranten	5,3	103	13	32	111	208	10
8	Piren	5,7	83	9,9	43	108	177	9
9	Benzo/a/antracen	15	9	5,5	68	7	n. o.	16
10	Chryzen	11	7,5	6	81	15	n. o.	12
11	Benzo/b/fluoranten	0,8	3,7	1,6	14	2,1	49	11
12	Benzo/k/fluoranten	0,3	2,3	0,8	2,5	1,6	17	1,8
13	Benzo/a/piren	0,1	1,3	0,2	2,2	1,9	20	1,4
14	Dibenzo/ah/antracen	0,2	0	0,2	2	11	60	2,1
15	Benzo/ghi/perylene	0,3	2,4	1,1	13	1,7	5,6	11
16	Indeno/123-cd/piren	0,7	4,7	n. o.	2,7	2,8	n. o.	1,3
	Σ WWA – Σ PAH's	56,7	265,9	44,3	366,3	323,6	598	117,4

n. o. – nie wykryto – not detected

DYSKUSJA

W badanych osadach ściekowych, jak i materiale roślinnym oznaczono 13 z 16 WWA, które wymienione są na liście US EPA. W żadnej z prób nie wykryto WWA o najmniejszej liczbie pierścieni, czyli naftalenu, acenaftyłenu i acenaftenu. Powodów tego może być kilka: zawartość tych trzech WWA była zbyt mała i kształtowała się poniżej granicy oznaczalności metody; podczas ekstrakcji, ze względu na ulatnianie się, miały miejsce straty tych związków; straty związane z ulatnianiem się tych trzech węglowodorów mogły mieć również miejsce podczas przygotowywania prób do badań, zwłaszcza podczas suszenia; w przypadku prób podłoża ulatnianie się naftalenu, acenaftyłenu i acenaftenu mogło nastąpić jeszcze przed pobraniem prób, gdyż WWA o niewielkiej liczbie pierścieni mogą ulatniać się z powierzchni gleby [Miroń 1995].

W większości opracowań dotyczących WWA uznaje się, że zawartość tych związków w osadach ściekowych na poziomie $10\ 000\text{--}25\ 000\ \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s. m.}$ jest bardzo wysoka [Janoszka i in. 1997, Environmental Health Criteria 1998]. Natomiast gleby o zawartości WWA powyżej $10\ 000\ \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s. m.}$ są uznawane za gleby bardzo silnie zanieczyszczone i powinny być wyłączone z produkcji rolniczej, ze względu na ryzyko zanieczyszczenia roślin [Państwowa Inspekcja Ochrony Środowiska 1995].

TABELA 3. Zawartość WWA w roślinach rosnących na osadzie z Karbochemii z terenu GOP ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ s. m.)

TABLE 3. PAH's content in plants growing on sewage sludge from Carbonchemistry located in the Upper Silesia area ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ d. m.)

Nr No.	WWA –PAH's	Karbochemia – Carbochemistry				Kontrola – Control	
		<i>Betula</i> sp.	<i>Oenothera</i> sp.	<i>Populus</i> sp.	<i>Calamagrostis epigeios</i>	<i>Avena sativa</i>	Triticale
1	Naftalen	n. o.	n. o.	n. o.	n. o.	n. o.	n. o.
2	Acenaftylen	n. o.	n. o.	n. o.	n. o.	n. o.	n. o.
3	Acenaften	n. o.	n. o.	n. o.	n. o.	n. o.	n. o.
4	Fluoren	62	315	338	321	30	6,1
5	Fenantren	254	730	269	187	2,1	n. o.
6	Antracen	119	411	167	74	3,8	5,5
7	Fluoranten	1200	4300	151	373	1,4	19
8	Piren	784	3100	5400	760	0,5	9
9	Benzo/a/antracen	469	1000	129	161	1	n. o.
10	Chryzen	324	990	191	246	1,2	n.o.
11	Benzo/b/fluoranten	415	1600	268	378	0,7	3
12	Benzo/k/fluoranten	157	610	92	115	0,3	2,3
13	Benzo/a/piren	202	890	122	171	0,3	0,6
14	Dibenzo/ah/antracen	226	885	154	206	5,8	2,5
15	Benzo/ghi/perylene	197	1100	189	268	0,8	2,5
16	Indeno/123-cd/pire	476	1900	263	389	2,3	2,4
	Σ WWA – Σ PAF's	4885	17831	7733	3260	50,2	52,9

n. o. – nie wykryto – not detected

Z przeprowadzonych badań wynika, że zawartość sumy WWA w osadach ściekowych pochodzenia petrochemicznego stanowiła 2,6% ich zawartości w osadach ściekowych z przemysłu karbochemicznego. Bernacka i Pawłowska [1999] oraz Baran i Oleszczuk [2003b], badając w tym zakresie osady ściekowe z wielu oczyszczalni Polski, otrzymali podobne wyniki. Niższa zawartość WWA w osadach pochodzenia petrochemicznego może być wynikiem zastosowania w Petrochemii Płock nowej technologii, dzięki której WWA osadzają się w czasie procesów petrochemicznych na glinokrzemianach i nie dostają się do oczyszczalni ścieków.

Wielu autorów [Państwowa Inspekcja Ochrony Środowiska 1995, Maliszewska-Kordybach 1998, Ribes i in. 2003, Baran, Oleszczuk 2003a] podaje, że w glebie niezanieczyszczonej zawartość WWA wynosi maksymalnie $200 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. Z niniejszych badań wynika, że zawartość WWA w glebie przyjętej za kontrolę wyniosła $81,3 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m.

Śród badanych WWA, niezależnie od osadu, najczęściej oznaczono piren, na ogół stanowił on ponad 10% sumy WWA, a w przypadku osadu pochodzenia petrochemicznego nawet 30%. Fluoranten stanowił zaś około 20% sumy WWA w osadzie z Petrochemii i około 13% w osadzie pochodzenia karbochemicznego.

W roślinach również najwięcej było pirenu. Jego procentowy udział w sumie WWA wahał się od około 16% w liściach brzozy z obiektu Karbochemii do nawet 70% w liściach topoli z tego samego obiektu. Natomiast udział fluorantenu w roślinach porastających osady ściekowe z przemysłu petrochemicznego wahał się w granicach 8–39%. Na podstawie powyższych danych można przypuszczać, że istnieje zależność pomiędzy zawartością pirenu i fluorantenu w badanych roślinach a podłożem, na którym rosną.

Z uwagi na fakt, że przy wysokim stężeniu WWA w glebie, mogą być one pobierane przez korzenie roślin, wysoka zawartość tych związków w podłożu stanowi poważne ryzyko wejścia ich do łańcucha troficznego [Mikołajek i in. 1985, Simonich, Hites 1995, Bernacka, Pawłowska 1999]. Na podstawie uzyskanych wyników można przypuszczać, że im wyższe stężenie WWA w podłożu, tym tych związków więcej w roślinach. Z uwagi na to, że analizowane były tylko części nadziemne roślin, można przypuszczać, że w roślinach zachodzi dość szybki transport WWA z korzeni do wyższych części roślin, co również znajduje swoje potwierdzenie w danych literaturowych [Wild, Jones 1991, Simonich, Hites 1995]. Nie można jednak wykluczyć możliwości pobierania WWA bezpośrednio z powietrza przez liście. Niektórzy autorzy uważają, że ten sposób pobierania WWA przez rośliny bardziej wpływa na wysoką zawartość węglowodorów w tkankach niż pobieranie ich przez korzenie z podłoża [Wild, Jones 1992, Wągrowski, Hites 1997].

W badanych roślinach oznaczono największe ilości czteropierścieniowych WWA. Udział pięcio- i sześciopierścieniowych WWA był większy niż zawartość WWA dwu- i trójpierścieniowych. Odwrotne zależności otrzymał Kipopoulou i in. [1999] stwierdzając, że WWA o mniejszej masie cząsteczkowej są łatwiej akumulowane przez rośliny. Możliwe, że było to spowodowane tym, że rośliny badane przez wymienionych autorów pochodziły z zanieczyszczonych gleb, a nie bezpośrednio z osadów. Osady ściekowe mogą bowiem zawierać substancje ułatwiające pobieranie WWA przez rośliny [Bąkowski, Bodzek 1988, Dutkiewicz i in. 1988]. Wśród badanych roślin zdecydowanie więcej WWA oznaczono w roślinach z osadów z Karbochemii. Roślina jednoliścienna, czyli trzcinnik piaskowy z tego obiektu, charakteryzowała się zdecydowanie mniejszą zawartością WWA niż pozostałe rośliny z tego terenu. Być może powodem była stosunkowo mała powierzchnia liści w porównaniu z pozostałymi roślinami, a zatem mniejsze pobieranie WWA tą drogą w porównaniu z roślinami dwuliściennymi rosnącymi na tym terenie. Tego typu zależności nie udało się zauważyć w roślinach rosnących na osadzie petrochemicznym – największą zawartość WWA oznaczono właśnie w roślinie jednoliściennej – w wiechlinie łąkowej, zaś najmniejszą w roślinie dwuliściennej – nawłoci późnej. Może to być spowodowane tym, że petrochemiczne osady ściekowe są składowane w znacznej odległości od Petrochemii, a więc rośliny je porastające były narażone na niewielki depozyt suchy i mokry, w związku z czym większe znaczenie miało pobieranie WWA za pomocą korzeni. Natomiast rośliny rosnące na osadach pochodzenia karbochemicznego były narażone na depozyt węglowodorów z powietrza, z uwagi na usytuowanie powierzchni badawczej. Możliwe jest również, że rośliny wykazują pewną selektywność przy pobieraniu WWA. Niniejsze badania nie wykazały jednak tej zależności pomiędzy roślinami jedno- i dwuliściennymi. Ponadto w literaturze spotyka się dane, że rośliny o dużych, pofałdowanych liściach zawierają dużo więcej

WWA niż pozostałe rośliny [Miroń 1995, Kipopoulou i in. 1999], jak również że związki te najchętniej są pobierane przez rośliny o dużej zawartości lipidów w tkankach [Simonich, Hites, 1994].

WNIOSKI

1. Zawartość WWA w osadach ściekowych pochodzących z przemysłu petrochemicznego była znacznie niższa niż w osadach ściekowych pochodzących z przemysłu karbochemicznego i stanowiła 2,6% sumy oznaczonych węglowodorów.
2. Spośród badanych węglowodorów piren i fluoranten dominowały w badanych osadach ściekowych pochodzenia przemysłowego, a ich procentowy udział w oznaczonej sumie WWA wahał się w granicach 10–30%.
3. W roślinach sukcesywnie porastających osady ściekowe, podobnie jak w osadach, oznaczono najwięcej pirenu i fluorantenu, co sugeruje, że istnieje zależność pomiędzy ich stężeniem w podłożu a pobieraniem przez rośliny.
4. Szereg ilościowy zawartości badanych WWA w roślinach sukcesywnie porastających osady ściekowe pochodzenia petro- i karbochemicznego układał się następująco, uwzględniając ilość pierścieni w cząsteczce:
czteropierścieniowe > pięcio- i sześciopierścieniowe > trójpierścieniowe
5. Nie odnotowano jakiegokolwiek zależności między analizowaną grupą roślin jednolściennych a roślin dwulściennych w zakresie selektywnego pobierania WWA.

Podziękowanie

Autorzy składają podziękowania Pani dr Jadwidze Sienkiewicz za pomoc przy określaniu gatunków roślin.

LITERATURA

- BARAN S., OLESZCZUK P. 2003a: Zawartość wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych w glebie lekkiej w zależności od źródeł emisji. *Rocz. Glebozn.* **54**,3: 49–60.
- BARAN S., OLESZCZUK P. 2003b: The Concentration of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Sewage Sludge in Relation to the Amount and Origin of Purified Sewage. *Pol. J. Environ. Studies* **12**, 5: 523–529.
- BAKOWSKI W., BODZEK D. 1988: Wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne w naturalnym środowisku człowieka – pochodzenie, występowanie, toksyczność, oszacowanie emisji w Polsce. *Arch. Ochr. Środ.* **3–4**: 197–215.
- BERNACKA J., PAWŁOWSKA L. 1999: Substancje szkodliwe i ich obecność w osadach z miejskich oczyszczalni ścieków. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych* **16**: 25–42.
- BÖHME F., WELSCH-PAUSCH K., McLACHLAN M.S. 1999: Uptake of Airborne Semivolatile Organic Compounds in Agricultural Plants: Field Measurements of Interspecies Variability. *Environ. Sci. Technol.* **33**(11): 1805–1813.
- DUTKIEWICZ T. i in. 1998: Wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne w środowisku przyrodniczym. PWN, Warszawa: 80 ss.

- ENVIRONMENTAL HEALTH CRITERIA 202, 1998: Selected Non-heterocyclic Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. International Programme on Chemical Safety (IPCS). World Health Organization (WHO): 883 ss.
- INDEKA L. 1996: Chemiczne skażenia wybranych roślin uprawianych w rejonie oddziaływania Mazowieckich Zakładów Rafineryjnych i Petrochemicznych. Rozprawy Naukowe i Monografie. Wydaw. SGGW, Warszawa: 94 ss.
- ISO 13877, 1998: Oznaczanie wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych. Metoda z zastosowaniem wysokosprawnej chromatografii cieczowej: 35 ss.
- JANIKOWSKA G., WARDAS W. 2002: Bioconcentration of Benzo(a)pyrene in *Chlorella* Cells. *Pol. J. Environ. Studies* **11**, 4: 345–348.
- JANOSZKA B., BODZEK D., BODZEK M. 1997: Występowanie i oznaczanie wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych i ich pochodnych w wybranych osadach ściekowych. *Archiwum Ochrony Środowiska* **23**, 1–2: 55–67.
- KIPOPOULOU A.M., MANOLI E., SAMARA C. 1999: Bioconcentration of polycyclic aromatic hydrocarbons in vegetables grown in an industrial area. *Environmental Pollution* **106**: 369–380.
- MALISZEWSKA-KORDYBACH B. 1993: Trwałość WWA w glebie. Rozprawa habilitacyjna. Puławy, IUNG, seria H, 4.
- MALISZEWSKA-KORDYBACH B. 1998: Zależność między właściwościami gleb i zawartością w nich WWA, na przykładzie gleb z terenu użytków rolnych w województwie lubelskim. *Archiwum Ochrony Środowiska* **24**, 3: 79–91.
- MIKOŁAJEK A., BRANDYS J., LIPNIAK M. 1985: Zawartość wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA) w glebie pracowniczych ogródków działkowych na terenie miasta Krakowa. *Roczn. PZH*, **36**, 2: 125–133.
- MIRON M.I. 1995: Wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne w odpadach i innych elementach środowiska. Instytut Gospodarki Odpadami, Katowice: 48 ss.
- PAŃSTWOWA INSPEKCJA OCHRONY ŚRODOWISKA 1995: Podstawy oceny chemicznego zanieczyszczenia gleb. Metale ciężkie, siarka i WWA. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa: 41 ss.
- REYES C.A., MEDINA M., CRESPO-HERNANDEZ C., CEDENO M.Z., ARCE R., ROSARIO O., STEFFENSON D.M., IVANOV I.N., SIGMAN M.E., DABESTANI R. 2000: Photochemistry of Pyrene on Unactivated and Activated Silica Surfaces. *Environ. Sci. Technol.* **34** (3): 415–421.
- RIBES A., GRIMALT J.O., TORRES GARCÍA C.J., CUEVAS E. 2003: Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Mountain Soils of the Subtropical Atlantic. *J. Environ. Qual.* **32**: 977–987.
- SIMONICH S.L., HITES R.A. 1994: Importance of vegetation in removing polycyclic aromatic hydrocarbons from the atmosphere. *Nature* **370**: 49–51.
- SIMONICH S.L., HITES R.A. 1995: Organic Pollutant Accumulation in Vegetation. *Environ. Sci. Technol.* **29** (12): 2905–2913.
- WAGROWSKI D.M., HITES R.A. 1997: Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Accumulation in Urban, Suburban and Rural Vegetation. *Environ. Sci. Technol.* **31**: 279–282.
- WILD S.R., JONES K.C. 1991: Studies on the polynuclear aromatic hydrocarbon content of carrots (*Daucus carota*). *Chemosphere* **23** (2): 243–251.
- WILD S.R., JONES K.C. 1992: Polynuclear Aromatic Hydrocarbon Uptake by Carrots Grown in Sludge-Amended Soil. *J. Environ. Qual.* **21**: 217–225.

prof. dr hab. Barbara Gworek
Instytut Ochrony Środowiska
ul. Krucza 5/11, 00-548 Warszawa

