

Wpływ palenia papierosów na ryzyko zdrowotne mieszkańców miast wywołane środowiskową ekspozycją inhalacyjną na metale ciężkie (As, Cd, Ni)

The effect of cigarette smoking on health risks for city residents caused by environmental inhalation exposure to heavy metals (As, Cd, Ni)

Marzena Trojanowska^(b, c), Ryszard Świetlik^(a, c)

Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego, Katedra Ochrony Środowiska, Zakład Analityki Stosowanej i Chemii Środowiska

Kierownik Zakładu Analityki Stosowanej i Chemii Środowiska: dr hab. R. Świetlik, prof. UTH

Kierownik Katedry Ochrony Środowiska: dr hab. R. Świetlik, prof. UTH

^(a) opracowanie koncepcji i założeń

^(b) zabranie i opracowanie materiału do badań

^(c) opracowanie tekstu i piśmiennictwa

STRESZCZENIE

Wstęp. Zanieczyszczenie powietrza miejskiego metalami ciężkimi wpływa negatywnie na zdrowie mieszkańców. Osoby palące papierosy są narażone na dodatkową ekspozycję inhalacyjną, której źródłem są metale ciężkie obecne w tytoniu. Celem pracy było oszacowanie wpływu palenia papierosów na ryzyko zdrowotne mieszkańców miast, towarzyszące środowiskowej ekspozycji inhalacyjnej na metale ciężkie. **Materiał i metody.** Analizowano narażenie palaczy na metale ciężkie obecne w dymie papierosowym i zanieczyszczonym powietrzu atmosferycznym. Zastosowano metodologię oceny ryzyka zalecaną przez amerykańską Agencję Ochrony Środowiska (US EPA). **Wyniki.** Wartości indeksu zagrożenia i ryzyka nowotworowego dla przyjętego scenariusza narażenia inhalacyjnego palacza na kadm, nikiel i arsen są kilkadziesiąt razy większe od wartości wyznaczonych dla osoby niepalącej. **Wnioski.** Poziom zagrożenia uzyskany dla scenariusza osoby palącej odznacza się większym prawdopodobieństwem wystąpienia chronicznych skutków zdrowotnych, natomiast poziom ryzyka nowotworowego palacza należy zakwalifikować jako poziom nieakceptowany.

Słowa kluczowe: narażenie inhalacyjne, palenie papierosów, metale ciężkie, indeks zagrożenia, ryzyko nowotworowe

WSTĘP

Dym tytoniowy zawiera kilka tysięcy związków chemicznych, w tym ponad kilkadziesiąt substancji rakotwórczych oraz wiele substancji toksycznych.

ABSTRACT

Introduction. Heavy metal contamination of urban air has a negative effect on residents' health. Cigarette smokers are subjected to additional inhalation exposure caused by heavy metals present in tobacco. The aim of this study was the assessment of the impact of smoking on the health risk for residents of Polish cities, combined with environmental inhalation exposure to heavy metals. **Materials and methods.** The health risk for smokers was analyzed. The risk assessment methods used have been recommended by the US Environmental Protection Agency. **Results.** Hazard index and cancer risk values for the assumed scenario of Cd, Ni and As inhalation hazard for smokers are from several to about fifty times higher than the values determined for nonsmokers. **Conclusion.** Hazard index obtained for the smoker shows a high probability of chronic health effects, and the estimated cancer risk is at an unacceptable level.

Key words: inhalation hazard, smoking cigarettes, heavy metals, hazard index, cancer risk

Do głównych czynników odpowiedzialnych za choroby wywołane paleniem papierosów zaliczane są nitrozoaminy, wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne, lotne związki organiczne oraz metale ciężkie, zwłaszcza: arsen (As), kadm (Cd), chrom (Cr),

nikiel (Ni) i ołów (Pb) [1]. Na priorytetowej liście substancji niebezpiecznych amerykańskiej Agencji ds. Substancji Toksycznych i Rejestru Chorób (ATSDR) As zajmuje miejsce pierwsze (TDD – ang. *Theoretical Daily Dose*: $7 \cdot 10^{-2}$ mg/kg-d), Pb jest na miejscu drugim ($3 \cdot 10^{-1}$ mg/kg-d), Cd jest na miejscu siódmym ($4 \cdot 10^{-2}$ mg/kg-d), Cr(VI) na siedemnastym ($8 \cdot 10^{-1}$ mg/kg-d), a Ni na miejscu pięćdziesiątym siódmym ($4 \cdot 10^{-1}$ mg/kg-d) [2].

Związki As, Cd, Cr(VI) oraz Ni zostały zaklasyfikowane przez Międzynarodową Agencję Badań nad Rakiem (IARC) do grupy substancji o udowodnionym działaniu rakotwórczym na człowieka [3]. As i Cd wykazują również toksyczność nienowotworową dotyczącą układu sercowo-naczyniowego oraz nerek. Pb jest kancerogenem należącym do klasy 2B i toksycznym dla ludzi, w szczególności mającym negatywny wpływ na układ nerwowy [4].

Występowanie metali ciężkich w tytoniu jest przede wszystkim wynikiem pobierania ich przez krzewy *Nicotiana tabacum* z gleby, nawozów oraz środków ochrony roślin. Pewien wpływ na poziom metali w tytoniu mogą mieć także zanieczyszczenia substancji dodatkowych używanych przy produkcji tytoniu i wyrobów tytoniowych [5]. Poziom metali ciężkich w tytoniu wypełniającym papierosy referencyjne 2R4F jest następujący: As – 0,35 µg/g, Cd – 1,4 µg/g, Cr – 1,3 µg/g, Pb – 0,70 µg/g, Hg – 0,019 µg/g, Ni – 2,6 µg/g i Se <0,50 µg/g [6]. Zawartości metali publikowane dla innych gatunków papierosów mogą niekiedy znacznie różnić się od wartości referencyjnych, np. As 0,09–0,78 µg/g, Cd 0,65–3,6 µg/g i Pb 0,44 – 12,2 µg/g [5,7].

Podczas palenia, metale ciężkie obecne w tytoniu i bibułce przechodzą do dymu papierosowego, pozostają w tworzącym się popiele mineralnym oraz częściowo są zatrzymywane w niedopałku papierosa. Metale uwalniane do dymu mogą znajdować się w strumieniu głównym dymu (ang. *main stream*), który jest wdychany bezpośrednio przez palacza, oraz w strumieniu bocznym dymu (ang. *sid stream*), który wydziela się z ognika papierosa pomiędzy kolejnymi zaciągnięciami [8]. W obu strumieniach dymu metale występują w fazie gazowej i w fazie cząstek zawieszonych. Znacznie wyższa temperatura spalania towarzysząca generowaniu strumienia głównego dymu (800–900°C, wobec ok. 600°C dla strumienia bocznego) powinna sprzyjać przechodzeniu lotnych związków metali do fazy gazowej [9]. Z drugiej strony dym wciągany ustami palacza, przechodząc przez gęsty filtr papierosowy traci dużą część aerozoli zanim trafi do układu oddychowego. Strumień boczny dymu papierosowego nie jest filtrowany i niemal w całości jest

wprowadzany do otaczającego powietrza. W rezultacie oba strumienie dymu różnią się znacznie stężeniem i wielkością cząstek zawieszonych: 10^5 – 10^6 cząstek/cm³ wobec $5 \cdot 10^9$ cząstek/cm³ oraz $\phi=0,2$ µm wobec $\phi=0,5$ µm, odpowiednio dla strumienia głównego i bocznego [10]. W przypadku Cd, którego związki są stosunkowo łatwo lotne, oceniono że 25% jego całkowitej zawartości w spalonym tytoniu jest uwalniane do strumienia bocznego dymu, a tylko 5% do strumienia głównego [11].

Poziom emisji metali ciężkich poprzez dym papierosowy jest zatem z jednej strony wynikiem ich zawartości w papierosach, a z drugiej jest kształtowany przez warunki spalania. Jako wartości wskaźnikowe można traktować zawartości metali w strumieniu głównym dymu papierosa referencyjnego 2R4F, spalanego w warunkach znormalizowanych: As – 10,4 ng/papieros, Cd – 47,8 ng/papieros, Cr – 73 ng/papieros, Pb – 33 ng/papieros, Hg – 3,82 ng/papieros, Ni 5,12 ng/papieros i Se 34,9 ng/papieros [12]. I w tym przypadku również wartości publikowane dla innych gatunków papierosów mogą znacznie odbiegać od wartości referencyjnych, np. As 2,8–5,5 ng/papieros, Cd 1,6–260 ng/papieros i Pb 2,0–980 ng/papieros [7].

Poziom narażenia na metale ciężkie obecne w dymie papierosowym pochodzącym z wypalenia jednego papierosa jest stosunkowo niewielki i nie może wywołać toksyczności ostrej. Przyczyną problemów zdrowotnych staje się akumulacja metali ciężkich w organizmie podczas ekspozycji długookresowej [4]. Cd, As, Pb i Ni obecne w dymie tytoniowym, mogą gromadzić się w tkankach i płynach ustrojowych, co jest szczególnie istotne w przypadku Cd i Pb mających długie okresy półtrwania w organizmie człowieka (10–12 lat) [4, 13].

Ekspozycja palaczy czynnych i biernych na metale ciężkie nie powinna być oceniana w oderwaniu od innych źródeł tych metali, w szczególności zanieczyszczonego powietrza atmosferycznego. Z tego względu w tej pracy zdecydowaliśmy się na określenie w jakim stopniu palenie tytoniu wpływa na inhalacyjne narażenie środowiskowe na metale ciężkie mieszkańców miast o podniesionym poziomie zanieczyszczeń pyłowych. Według naszej wiedzy takie podejście nie było dotychczas prezentowane w krajowej literaturze naukowej. Celem tej pracy było oszacowanie wpływu palenia papierosów na środowiskowe ryzyko zdrowotne i nowotworowe wywołane narażeniem inhalacyjnym mieszkańców wybranych miast polskich na metale ciężkie. Uwagę skoncentrowano na metalach, których stężenia podlegają systematycznej kontroli w ramach Państwowego Monitoringu Środowiska (As, Cd i Ni).

MATERIAŁ I METODY

Ocenę środowiskowej ekspozycji na metale ciężkie przeprowadzono dla dorosłej części populacji miejskiej, na podstawie danych monitoringowych dla wybranych aglomeracji (górnosląskiej, krakowskiej, lubelskiej, poznańskiej, trójmiejskiej, warszawskiej i wrocławskiej) za lata 2007–2009. Scenariusz narażenia obejmował całonocne przewlekłe narażenie osoby dorosłej na arsen, kadm oraz nikiel i został oparty na zaleceniach Amerykańskiej Agencji Ochrony Środowiska (US EPA) [14–16].

Podstawą szacowania ryzyka zdrowotnego palacza były wartości dawek inhalacyjnych wynikających zarówno z zanieczyszczonego powietrza atmosferycznego jak i z palenia papierosów. Całkowitą dawkę pobraną przez osobę dorosłą o masie 70 kg oszacowano sumując dawkę metali wprowadzonych do organizmu po wypaleniu 20 papierosów na dzień oraz dawkę metali pochodzącą z zanieczyszczonego powietrza:

$$D_{\text{całk}} = D_p + D_{\text{atm}}$$

gdzie:

$D_{\text{całk}}$ – całkowita dawka metali pobrana przez osobę dorosłą [mg/d·kg],

D_p – dawka pobrana przez palacza [mg/d·kg],
 D_{atm} – dawka wynikająca z zanieczyszczonego powietrza atmosferycznego [mg/d·kg].

Wartość D_{atm} obliczono jako średnią wartość dawki wyznaczonej dla kobiet i mężczyzn podaną w pracy [16].

Wartość dawki inhalowanej podczas palenia papierosów oszacowano korzystając ze wzoru:

$$D_p = \frac{C_{Me} \cdot m_p \cdot n \cdot P_{Me} \cdot 10^{-3}}{M_{pal}}$$

gdzie:

D_p – dawka pobrana przez palacza [mg/d·kg],
 C_{Me} – stężenie metalu w papierosie [μg/g],
 m_p – masa papierosa [g],
 n – ilość papierosów wypalanych w ciągu doby (20 szt.),
 P_{Me} – współczynnik przyswajalności inhalowanego metalu,
 M_{pal} – masa palacza (70 kg) [kg].

W obliczeniach przyjęto masę papierosa – 0,75 g [4, 17], współczynniki przyswajalności inhalowanych metali: Cd – 0,13, As – 0,035 oraz Ni – 0,012 [4] oraz stężenia kadmu, niklu i arsenu w tytoniu jako średnie z wartości opublikowanych (Tab. I).

Tabela I. Stężenie metali w papierosach oraz dawka metali pobrana drogą inhalacyjną po wypaleniu 20 sztuk papierosów
 Table I. The concentration of metals in cigarettes and the daily inhalation intake of metals after smoking 20 cigarettes

Lp.	Stężenie metali w papierosach [μg/g]			Źródło	Zawartość metali/20 szt. papierosów [μg/20 szt.]			Średnia dawka pobrana w wyniku wypalenia 20 szt. papierosów na dobę [$\cdot 10^{-6}$ mg/d·kg]		
	C _{Cd}	C _{Ni}	C _{As}		Cd	Ni	As	Cd	Ni	As
1	1,70	5,50	–	[5]	25,5	71,59	–	45,5±19,2	5,16±3,18	2,57±2,09
2	1,42	2,34	–	[18]	21,3	29,02	–			
3	2,53	1,32	0,82	[19]	35,3	17,16	10,66			
4	0,86	2,21	0,17	[4]	12,9	28,73	2,21			
5	1,50	–	–	[20]	22,5	–	–			
6	1,81	–	–	[21]	27,2	–	–			
7	1,29	3,13	0,29	[6]	19,4	38,81	3,77			
8	3,12	1,41	0,79	[17]	46,8	21,2	11,80			
9	1,89	1,02	–	[22]	28,4	15,3	–			
10	0,65	1,26	0,09	[23]	9,75	18,9	1,35			
11	0,91	–	–	[13]	13,7	–	–			
12	2,05	–	–	[24]	30,8	–	–			
Xśr ± SD										
	1,64 ±0,71	2,27 ±1,48	0,43 ±0,35		24,5 ±10,4	30,1 ±18,5	5,96 ±4,91			

Ryzyko zdrowotne, które jest funkcją narażenia na substancje toksyczne oceniano poprzez tzw. iloraz narażenia HQ (ang. *Hazard Quotient*):

$$HQ = \frac{D_{catk}}{RfD}$$

gdzie:

- D_{catk} – całkowita dawka metali pobrana przez osobę dorosłą [mg/d·kg],
 RfD – dawka referencyjna (ang. *Reference Dose*) [mg/d·kg].

Wartości dawek referencyjnych RfD zaczerpnięto z toksykologicznej bazy danych *IRIS* (ang. *Integrated Risk Information System*) [25] (Tab. II).

Efekt wynikający z narażenia na działanie więcej niż jednego czynnika toksycznego, tzw. całkowity indeks zagrożenia HI_{catk} (ang. *Hazard Index*) [14, 15] wyznaczono przez sumowanie wartości HQ obliczonych dla poszczególnych metali:

$$HI_{catk} = HQ_{Cd} + HQ_{Ni} + HQ_{As}$$

W przypadku, gdy HI_{catk} nie przekracza jedności ($HI_{catk} < 1$), przyjmuje się, że nie występuje prawdopodobieństwo wystąpienia negatywnych skutków zdrowotnych wynikających z długotrwałego narażenia na metale [14, 15, 26].

Tabela II. Wartości dawek referencyjnych (RfD) oraz współczynników siły działania kancerogennego dla kadmu, niklu i arsenu [25, 27]

Table II. The values of the reference doses (RfD) and slope factors (SF_{Me}) for cadmium, nickel and arsenic [25, 27]

Pierwiastek	RfD_{Me} [mg/d·kg] [25]	SF_{Me} [mg/kg·d] ⁻¹ [27]
Cd	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{+1}$
Ni	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$9,1 \cdot 10^{-1}$
As	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{+1}$

Ryzyko nowotworowe CR (ang. *Cancer Risk*) wywołane inhalacją arsenu, kadmu i niklu oszacowano na podstawie równania:

$$CR = D_{catk} \cdot SF_{Me}$$

gdzie:

- D_{catk} – dawka pobrana [mg/d·kg];
 SF_{Me} – współczynnik siły działania kancerogennego (Tab. II) [27].

Obliczone wartości porównywano z akceptowalnym (dopuszczalnym) ryzykiem nowotworowym $1 \cdot 10^{-6}$ – $1 \cdot 10^{-4}$ [14, 15, 26].

WYNIKI BADAŃ I DISKUSJA

Metoda oceny ryzyka zdrowotnego, wzorowana na procedurach Amerykańskiej Agencji Ochrony Środowiska (US EPA), pozwala oszacować istniejące i przewidywane ryzyko zdrowotne, przy określonym zanieczyszczeniu środowiska [14,15].

W tej pracy analizowano działanie toksyczne oraz działanie rakotwórcze metali wprowadzanych do organizmu osoby dorosłej. W pierwszym przypadku wyznaczano iloraz zagrożenia, w drugim – ryzyko nowotworowe. Porównano zagrożenie zdrowotne powodowane obecnością metali w powietrzu atmosferycznym z zagrożeniem wywołanym wprowadzaniem tych metali do organizmu poprzez wypalanie jednej paczki papierosów (20 sztuk) dziennie.

Dawka metali pobranych z powietrza atmosferycznego drogą inhalacyjną przez mieszkańców miast jest bardzo zróżnicowana (Tab. III). W rejonach uprzemysłowionych wartość pobranej dawki Cd, Ni i As jest kilkakrotnie większa (maksymalnie siedmiokrotnie) od dawki charakterystycznej dla powietrza atmosferycznego w Puszczy Boreckiej (tło środowiskowe) [16].

Według przyjętych szacunków wypalenie przez palacza 20 sztuk papierosów dziennie powoduje wprowadzenie do organizmu dawki wielokrotnie większej od wartości wynikającej wyłącznie z ekspozycji na metale obecne w powietrzu atmosferycznym (Tab. III). Dawka metali obciążająca organizm palacza wobec dawki pobranej przez osobę niepalącą wynosi średnio:

- D_{Cd} $45,5 \cdot 10^{-6}$ mg/d·kg wobec $0,22 \cdot 10^{-6}$ mg/d·kg;
 D_{Ni} $5,16 \cdot 10^{-6}$ mg/d·kg wobec $0,68 \cdot 10^{-6}$ mg/d·kg;
 D_{As} $2,57 \cdot 10^{-6}$ mg/d·kg wobec $0,44 \cdot 10^{-6}$ mg/d·kg.

W przypadku Cd palenie papierosów powoduje zwiększenie dawki inhalacyjnej nawet 100 do 200 razy. Dla pozostałych pierwiastków (Ni i As) obserwowany wzrost jest mniejszy (maksymalnie pięćdziesięciokrotny).

Całkowita inhalacyjna dawka metali jest zbliżona dla mieszkańców wszystkich rozważanych miast i tylko w niewielkim stopniu zależy od zanieczyszczenia powietrza na danym terenie: Cd $45,6 \cdot 10^{-6}$ mg/d kg – $45,9 \cdot 10^{-6}$ mg/d·kg; Ni $5,26 \cdot 10^{-6}$ mg/d kg – $6,40 \cdot 10^{-6}$ mg/d kg; As $2,62 \cdot 10^{-6}$ mg/d·kg – $3,25 \cdot 10^{-6}$ mg/d·kg (Tab. III).

Porównanie dawki metali pobieranych z powietrza atmosferycznego z dawkami zatrzymywanymi w organizmie palacza w wyniku palenia wykazuje, że palenie papierosów stanowi główne źródło inhalacyjnego narażenia na metale. Do zbliżonych

wniosków dochodzą też autorzy innych prac [5, 20, 28]. Dawki metali obliczone na podstawie danych cytowanych przez innych autorów są zbliżone i wynoszą: Cd $20 \cdot 10^{-6}$ – $38,6 \cdot 10^{-6}$ mg/d kg [29]; $14,3 \cdot 10^{-6}$ – $28,6 \cdot 10^{-6}$ mg/d kg [20]; $62,8 \cdot 10^{-6}$ – $86,9 \cdot 10^{-6}$ mg/d kg [28]; As $3,7 \cdot 10^{-6}$ – $9,1 \cdot 10^{-6}$ mg/d kg [28]; Ni $9,2 \cdot 10^{-6}$ – $60,3 \cdot 10^{-6}$ mg/d kg [28].

Ilorazy narażenia na metale HQ_{Me} dla osób palących papierosy są od 7 do 200 razy większe od war-

tości wynikających wyłącznie z ekspozycji na metale pochodzące z powietrza atmosferycznego (Tab. IV). Największy wzrost obserwowany jest dla kadmu. Średnia wartość HQ_{Cd} dla palaczy wynosi $91,4 \cdot 10^{-3}$, natomiast dla osoby niepalącej $0,43 \cdot 10^{-3}$.

Można zatem przyjąć, że o narażeniu zdrowotnym decydują przede wszystkim dawki metali wprowadzone do organizmu człowieka na skutek palenia papierosów.

Tabela III. Dzielne dawki kadmu, niklu i arsenu pobrane przez osobę dorosłą drogą inhalacyjną z powietrza atmosferycznego i w wyniku palenia papierosów

Table III. The daily inhalation intake of cadmium, nickel and arsenic from the ambient air and as a result of cigarette smoking by adults

Miejsce	Dawka pobrana z powietrza atmosferycznego [$\cdot 10^{-6}$ mg/d·kg]			Średnia dawka pobrana w wyniku wypalenia 20 szt. papierosów na dobę [$\cdot 10^{-6}$ mg/d·kg]			Całkowita dawka metalu [$\cdot 10^{-6}$ mg/d·kg]		
	Cd	Ni	As	Cd	Ni	As	Cd	Ni	As
Puszcza Borecka – tło	0,06	0,20	0,11				45,6	5,36	2,68
Aglomeracja Górnośląska	0,43	0,93	0,61				45,9	6,09	3,18
Aglomeracja Krakowska	0,43	1,00	0,53				46,9	6,16	3,10
Aglomeracja Lubelska	0,11	0,90	0,48				45,6	6,06	3,05
Aglomeracja Poznańska	0,09	0,10	0,49	45,5	5,16	2,57	45,6	5,26	3,06
Aglomeracja Trójmiejska	0,18	0,57	0,57	$\pm 19,2$	$\pm 3,18$	$\pm 2,09$	45,7	5,73	3,14
Aglomeracja Warszawska	0,23	1,24	0,05				45,7	6,40	2,62
Aglomeracja Wrocławska	0,19	0,47	0,68				45,7	5,63	3,25
$X_{\text{sr}} \pm \text{SD}$	0,22 $\pm 0,14$	0,68 $\pm 0,41$	0,44 $\pm 0,23$				45,7 $\pm 0,13$	5,84 $\pm 0,41$	3,01 $\pm 0,23$

Całkowity indeks zagrożenia $HI_{\text{całk}}$. Efekt wynikający z narażenia na działanie więcej niż jednego metalu toksycznego wyznaczono przez zsumowanie wartości HQ obliczonych dla poszczególnych metali: kadmu, niklu i arsenu (Tab. IV).

Jak się okazało, całkowity indeks zagrożenia dla osób palących papierosy wzrasta od 35 razy w rejonach uprzemysłowionych do 200 razy na terenie niezanieczyszczonym, średnio pięćdziesięciokrotnie (Tab. IV). Dla mieszkańców niepalących wyznaczona wartość $HI_{\text{całk}}$ wynosi bowiem średnio $1,93 \cdot 10^{-3}$, podczas gdy dla palaczy indeks $HI_{\text{całk}}$ osiąga poziom $102 \cdot 10^{-3}$. Choć wyznaczony całkowity indeks zagrożenia nie przekracza 1, to uzyskana wartość wyraźnie świadczy o dużym wpływie palenia na zagrożenia zdrowotne oraz o zwiększonym prawdopodobieństwie wystąpienia negatywnych skutków zdrowotnych będących wynikiem chronicznego narażenia na metale.

Należy zaznaczyć, że największy wpływ na całkowity indeks zagrożenia ma kadm, dla którego

HQ_{Cd} przyjmuje wartość $91,4 \cdot 10^{-3}$, co stanowi aż 90% $HI_{\text{całk}}$ (Tab. IV). W literaturze opublikowano również większe wartości ilorazu narażenia na kadm: 0,95–1,7 [26]; 0,68–12,98 [28] oraz 35 [1].

W pracy oszacowano również ryzyko nowotworowe CR wywołane inhalacją arsenu, kadmu i niklu (Tab. V). Obliczone wartości porównywano z akceptowalnym (dopuszczalnym) ryzykiem nowotworowym $1 \cdot 10^{-6}$ – $1 \cdot 10^{-4}$.

Analizowane przez nas metale są zaliczane do substancji rakotwórczych o działaniu bezprogowym, dla których nie wyznacza się naturalnego progu szkodliwości. Narażenie nawet na bardzo niskie stężenia takich substancji przez długi czas może być przyczyną powstania nowotworów [15].

Obliczone wartości sumarycznego ryzyka nowotworowego dla przyjętego scenariusza narażenia, w przypadku palacza są średnio osiemdziesiąt razy większe od wartości wyznaczonych dla mieszkańców niepalących (Tab. V).

Tabela IV. Wartości ilorazów narażenia dla osób dorosłych podlegających ekspozycji na metale obecne w powietrzu atmosferycznym i papierosach

Table IV. The values of the Hazard Quotients for adults exposed to metals from atmospheric air and cigarettes

Miejsce	Iloraz narażenia HQ						Całkowity indeks zagrożenia	
	Cd [$\cdot 10^{-3}$]		Ni [$\cdot 10^{-3}$]		As [$\cdot 10^{-3}$]		$\sum HI_{\text{całk}}$ [$\cdot 10^{-3}$]	
	powietrze	powietrze + papierosy	powietrze	powietrze + papierosy	powietrze	powietrze + papierosy	powietrze	powietrze + papierosy
Puszcza Borecka – tło	0,12	91,2	0,010	0,27	0,36	8,93	0,49	100
Aglomeracja Górnośląska	0,86	91,8	0,047	0,30	2,03	10,6	2,94	103
Aglomeracja Krakowska	0,86	91,8	0,050	0,31	1,77	10,3	2,68	102
Aglomeracja Lubelska	0,22	91,2	0,045	0,30	1,60	10,1	1,87	102
Aglomeracja Poznańska	0,18	91,2	0,005	0,26	1,63	10,2	1,82	102
Aglomeracja Trójmiejska	0,36	91,4	0,029	0,28	1,90	10,5	2,29	102
Aglomeracja Warszawska	0,46	91,4	0,062	0,32	0,16	8,73	0,68	101
Aglomeracja Wrocławska	0,38	91,4	0,024	0,28	2,27	10,8	2,67	103
$X_{\text{sr}} \pm \text{SD}$	0,43 $\pm 0,29$	91,4 $\pm 0,25$	0,034 $\pm 0,02$	0,29 $\pm 0,02$	1,47 $\pm 0,78$	10,0 $\pm 0,77$	1,93 $\pm 0,92$	102 ± 1

Inhalacyjne ryzyko nowotworowe dla osób niepalących przyjmuje stosunkowo niską wartość – średnio $9,1 \cdot 10^{-6}$, natomiast dla palaczy jest o dwa rzędy większe – średnio $7,27 \cdot 10^{-4}$. W świetle standardowej interpretacji wyników poziom ryzyka nowotworowego wynoszący $9,1 \cdot 10^{-6}$ jest poziomem ryzyka uznanego powszechnie za akceptowalny, natomiast wartość ryzyka na poziomie 10^{-4} , wyznaczona dla osób palących, budzi już duży niepokój. Choć za wartość bezwarunkowo wymagającą interwencji przyjmuje się ryzyko na poziomie $1 \cdot 10^{-3}$, to wartość $7,27 \cdot 10^{-4}$ świadczy o potencjalnym wysokim ryzyku nowotworowym [26,28]. W tym przypadku maksymalna, akceptowalna wartość CR ($1 \cdot 10^{-4}$) została przekroczona ponad siedmiokrotnie.

Warto zwrócić uwagę, że dominujący wpływ (ok. 95%) na inhalacyjne ryzyko nowotworowe ma kadm ($CR_{\text{Cd}} = 6,86 \cdot 10^{-4}$). Znacznie mniejszy wpływ mają arsen (4,96%) i nikiel (0,72%).

Wartości ryzyka uzyskane w naszej pracy nie odbiegają od wartości podawanych w publikacjach zagranicznych. Według Behery i wsp. (2014) oszacowana wartość inhalacyjnego ryzyka nowotworowego dla osoby palącej jedną paczkę papierosów dziennie utrzymywała się na poziomie od $1,4 \cdot 10^{-4}$ do $2,3 \cdot 10^{-4}$, zależnie od gatunku papierosów [26]. Z kolei podana w pracy Xie i wsp. (2012) wartość sumarycznego ryzyka nowotworowego, uwzględniającego wpływ kadmu i arsenu, wynosiła $6,1 \cdot 10^{-4}$, przy czym dominujący udział (89%), podobnie jak w naszej pracy, miał kadm, dla którego ryzyko CR_{Cd} wynosiło średnio $5,4 \cdot 10^{-4}$ [1]. W publikacji innych autorów wyznaczone ryzyko dla Cd miało

ten sam poziom jak w prezentowanej przez nas pracy, choć jego wartość była nieco mniejsza $2,5 \cdot 10^{-4}$ [29].

Marano i wsp. (2012) dokonali oceny ryzyka nowotworowego wynikającego wyłącznie z ekspozycji palacza na arsen obecny w papierosach [30]. Oszacowane przez tych autorów CR_{As} przyjmowało wartość od $3,1 \cdot 10^{-5}$ do $5,4 \cdot 10^{-5}$ i było zbliżone do ryzyka nowotworowego wyznaczonego w tej pracy – $3,6 \cdot 10^{-5}$ (Tabela V). Podobny poziom inhalacyjnego ryzyka $CR_{\text{As}} = 6,6 \cdot 10^{-5}$ wyznaczyli również Xiu i wsp. (2012) [1].

PODSUMOWANIE

W świetle standardowej interpretacji wyników oceny ryzyka (tzn. wartości ilorazu zagrożenia i ryzyka nowotworowego) można uznać, że palenie papierosów ma zdecydowanie większy wpływ na poziom inhalacyjnego narażenia na metale ciężkie niż ekspozycja środowiskowa. Wyznaczone dla palaczy ilorazy narażenia są nawet kilkaset razy większe od wartości wynikających wyłącznie z ekspozycji na metale pochodzące z zanieczyszczonego powietrza atmosferycznego. Całkowity indeks zagrożenia dla osób palących papierosy wzrasta średnio pięćdziesiąt razy, osiągając poziom $102 \cdot 10^{-3}$ (wobec $1,93 \cdot 10^{-3}$ dla mieszkańców niepalących), co świadczy o tym, że palenie znacznie zwiększa prawdopodobieństwo wystąpienia szkodliwych skutków zdrowotnych, wynikających z chronicznego narażenia na metale ciężkie.

Tabela V. Wartości ryzyka nowotworowego CR dla osób dorosłych podlegających ekspozycji na metale obecne w powietrzu atmosferycznym i w papierosach

Table V. The value of cancer risk for adults exposed to the metals present in the atmospheric air and the cigarette

Miejsce	CR [$\cdot 10^{-6}$]						Σ CR [$\cdot 10^{-6}$]	
	Cd		Ni		As		powietrze	powietrze + papierosy
	powietrze	powietrze + papierosy	powietrze	powietrze + papierosy	powietrze	powietrze + papierosy		
Puszcza Borecka – tło	0,90	684	0,18	4,82	1,32	32,2	2,40	721
Aglomeracja Górnośląska	6,45	689	0,85	5,49	7,32	38,2	14,62	733
Aglomeracja Krakowska	6,45	689	0,91	5,55	6,36	37,2	13,72	732
Aglomeracja Lubelska	1,65	684	0,82	5,46	5,76	36,6	8,23	726
Aglomeracja Poznańska	1,35	684	0,09	4,73	5,88	36,7	7,32	725
Aglomeracja Trójmiejska	2,70	686	0,52	5,16	6,84	37,7	10,06	727
Aglomeracja Warszawska	3,45	686	1,13	5,77	0,60	31,4	5,18	723
Aglomeracja Wrocławska	2,85	686	0,43	5,07	8,12	39,0	11,4	730
$X_{\text{sr}} \pm \text{SD}$	3,2 \pm 2,2	686 \pm 2	0,62 \pm 0,37	5,26 \pm 0,37	5,3 \pm 2,8	36,1 \pm 2,8	9,1 \pm 4,2	727 \pm 4

Wartość sumarycznego ryzyka nowotworowego na poziomie $7,27 \cdot 10^{-4}$ wyznaczona dla mieszkańców palących papierosy, również może budzić niepokój, jest bowiem osiemdziesiąt razy większa od wartości wyznaczonej dla mieszkańców niepalących ($9,1 \cdot 10^{-6}$). Maksymalna, akceptowalna wartość CR ($1 \cdot 10^{-4}$) została w tym przypadku przekroczona ponad siedmiokrotnie. Spośród rozważanych metali dominujący udział w oszacowanym inhalacyjnym ryzyku zdrowotnym ma kadm, który stanowi ponad 90% ogólnej wartości indeksu zagrożenia oraz ryzyka nowotworowego.

Podsumowując, należy podkreślić, że wyniki przeprowadzonej oceny ryzyka dotyczą jedynie wybranych trzech metali (kadmu, arsenu i niklu) oraz tylko jednej, inhalacyjnej drogi narażenia. W kształtowaniu pełnego ryzyka mogą mieć udział także inne substancje toksyczne wprowadzane do organizmu na skutek palenia papierosów (np. benzo(a)piren, akrylonitryl, benzen, formaldehyd, pirydyna).

WNIOSKI

Dla narażonej środowiskowo populacji generalnej, palenie papierosów stanowi główne źródło narażenia inhalacyjnego na kadm, nikiel i arsen.

Poziom narażenia wyznaczony dla scenariusza osoby palącej wskazuje na podwyższone prawdopodobieństwo wystąpienia przewlekłych efektów zdrowotnych, wynikających z długotrwałego nara-

żenia inhalacyjnego na metale, natomiast odpowiadający mu poziom ryzyka nowotworowego palacza można zakwalifikować jako poziom nieakceptowalny.

Spośród badanych metali (Cd, Ni, As) dominujący wpływ na zagrożenie zdrowotne palaczy ma kadm wprowadzony do organizmu w wyniku palenia.

WYKAZ PIŚMIENICTWA

- [1] Xie J, Marano KM, Wilson CL et al. A probabilistic risk assessment approach used to prioritize chemical constituents in mainstream smoke of cigarettes sold in China. Regul Toxicol Pharm 2012;62:355-362.
- [2] ATSDR Agency for Toxic Substances & Disease Registry, Division of Toxicology & Human Health Sciences, Priority List of Hazardous Substances http://www.atsdr.cdc.gov/spl/resources/ATSDR_2013_SPL_Detailed_Data_Table.pdf
- [3] International Agency for Research on Cancer, IARC, 2015. Agents Classified by the IARC Monographs, vol. 1-112. Retrieved July 12, 2015 from: <http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/ClassificationsAlphaOrder.pdf>
- [4] Caruso RV, O'Connor RJ, Stephens WE et al. Toxic metal concentrations in cigarettes obtained from U.S. smokers in 2009: Results from the International Tobacco Control (ITC) United States Survey Cohort. Int J Environ Res Public Health 2014;11:202-217.
- [5] Chiba M, Masironi R. Toxic and trace elements in tobacco and tobacco smoke. B World Health Organ 1992;70(2):269-275.
- [6] Fresquez MR, Pappas SR, Watson CH. Establishment of toxic metal reference range in tobacco from US cigarettes. J Anal Toxicol 2013;37:298-304.
- [7] Piadé J-J, Jaccard G, Dolkaa C et al. Differences in cadmium transfer from tobacco to cigarette smoke, compared to arsenic or lead. Toxicology Reports 2015;2:12-26.

- [8] Khlifi R, Hamza-Chaffai A. Head and neck cancer due to heavy metal exposure via tobacco smoking and professional exposure: A review. *Toxicol Appl Pharm* 2010;248:71-88.
- [9] Ljung A, Nordin A. Theoretical feasibility for ecological biomass ash recirculation: chemical equilibrium behavior of nutrient elements and heavy metals during combustion. *Environ Sci Technol* 1997;31:2499-2503.
- [10] Pieszkowski W, Florek E. Tytoń w liczbach na początku nowego stulecia. *Przegl Lek* 2006;63(10):823-826.
- [11] Suna S, Asakawa F, Jitsunari F et al. Assessment of cadmium and lead released from cigarette smoke. *Jap J Hyg* 1991;46:1014-1024.
- [12] Chen PX, Moldoveanu SC. Mainstream smoke chemical analyses for 2R4F Kentucky Reference Cigarette. *Contributions to Tobacco Research* 2003;20(7):448-458.
- [13] Galazyn-Sidorczuk M, Brzózka MM, Moniuszko-Jakoniuk J. Estimation of Polish cigarettes contamination with cadmium and lead, and exposure to these metals via smoking. *Environ Monit Assess* 2008;137:481-493.
- [14] US EPA 1989: Risk Assessment Guidance for Superfund, Vol. I, Human Health Evaluation Manual (Part A), EPA/540/1-89/002. Office of Emergency and Remedial Response, Washington, DC
- [15] Biesiada M. Ocena ryzyka zdrowotnego mieszkańców Wiślinki związanego z oddziaływaniem hałdy fosfogipsu. Instytut Medycyny Pracy i Zdrowia Środowiskowego, Sosnowiec 2006.
- [16] Trojanowska M, Świetlik R. Inhalacyjne narażenie mieszkańców miast Polski na zanieczyszczenie powietrza atmosferycznego arsenem, kadmem i niklem. *Med Środow* 2012;15(2):33-41.
- [17] Kazi TG, Jalbani N, Arain HI et al. Determination of toxic elements in different brands of cigarette by atomic absorption spectrometry using ultrasonic assisted acid digestion. *Environ Monit Assess* 2009;154:155-167.
- [18] Anhwange BA, Yiase SG, Ugye JT et al. Trace metals content of some brands of cigarette found within Makurdi Metropolis. *Intern J Chem and Appl* 2011;3(2):143-149.
- [19] Afridi HI, Farah Naz Talpur FN, Kazi TG et al. Effect of trace and toxic elements of different brands of cigarettes on the essential elemental status of Irish referent and diabetic Mellitus consumers. *Biol Trace Elem Res* 2015; doi:10.1007/s12011-015-0308-5.
- [20] El-Agha O, Gökmen G. Smoking habits and cadmium intake in Turkey. *Biol Trace Elem Res* 2002;88:31-42.
- [21] Ashraf MW. Levels of heavy metals in popular cigarette brands and exposure to these metals via smoking. *Scientific World J* 2012; Article ID 729430, doi:10.1100/2012/729430
- [22] Afridi HI, Kazi TG, Talpur FN et al. Estimation of toxic elements in the samples of different cigarettes and their impact on human health of Irish hypertensive consumer. *Clin Chim Acta* 2013;426:51-57.
- [23] Viana GFS, Garcia KS, Menezes-Filho JA. Assessment of carcinogenic heavy metal levels in Brazilian cigarettes. *Environ Monit Assess* 2011;181:255-265.
- [24] Zawadzka T, Brulińska-Ostrowska E, Wojciechowska-Mazurek M i wsp. Cadmium and lead levels in domestic and imported cigarettes. *Rocz Panstw Zakl Hig* 1989;40(2):145-52.
- [25] US EPA, Integrated Risk Information System, A-Z List of Substances, <http://cfpub.epa.gov/ncea/iris/index.cfm?fuseaction=iris.showSubstanceList>
- [26] Behera SN, Xian H, Balasubramanian R. Human health risk associated with exposure to toxic elements in mainstream and sidestream cigarette smoke. *Sci Total Environ* 2014;472:947-956.
- [27] Appendix A: Hot Spots Unit Risk and Cancer Potency Values http://www.oehha.ca.gov/air/hot_spots/2009/AppendixA.pdf
- [28] Czogała J, Dutkiewicz T. Próba oceny narażenia na pierwiastki toksyczne u palaczy papierosów. Cz. II. Retencja pierwiastków z dymu papierosowego w układzie oddechowym palacza i ocena dawek zatrzymanych metali. *Bromat Chem Toksykol* 1992;25(1):53-62.
- [29] Marano KM, Naufal ZS, Kathman SJ et al. Cadmium exposure and tobacco consumption: biomarkers and risk assessment. *Regul Toxicol Pharm* 2012;64:243-252.
- [30] Marano KM, Naufal ZS, Kathman SJ et al. Arsenic exposure and tobacco consumption: Biomarkers and risk assessment. *Regul Toxicol Pharm* 2012;64:225-232.

Adres do korespondencji:

*dr inż. Marzena Trojanowska
Katedra Ochrony Środowiska
Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny
im. Kazimierza Pułaskiego
ul. B. Chrobrego 27, 26-600 Radom
tel. 48-361-75-05, e-mail: m.trojanowska@uthrad.pl*