

Recenzenci / Recenzenti

dr Agnieszka Dołhańczuk-Śródka

dr Małgorzata Rajfur

dr Tadeusz Majcherczyk

dr hab. Zbigniew Ziembik

Redakcja językowa i korekta / Jazyková úprava

Aleksandra Domka-Kordek

Projekt typograficzny i skład / Sazba

Waldemar Szweda

Projekt okładki / Obálka

Waldemar Szweda

All Rights Reserved

Printed in Poland

ISBN 978-83-916958-5-2

Agencja Handlowo-Reklamowa BASNET

Druk: „Drukarnia Smolarski”, Józef Smolarski, 45-326 Opole, ul. Sandomierska 1.

Emisja toksycznych metali z dużych elektrowni węglowych na czesko-polskim pograniczu. Modele matematyczne

Vladimír Štěpánek, Stanislav Eminger, David Stoklas, Ivo Jež,
Simona Klímová, Lidmila Hyšplerová i Jan Kříž

Katedra Fizyki, Wydział Nauk Przyrodniczych, Uniwersytet w Hradec Králové, Rokitanského 62,
500 03 Hradec Králové, tel. +42 049 333 11 81, email: lidmila.hysplerova@uhk.cz

ABSTRAKT Czesko-polski region turystyczny zlokalizowany na terenie województwa Hradec Králové i województwa opolskiego z kilkoma parkami narodowymi znajduje się pod wpływem emisji z dwóch dużych elektrowni spalających węgiel. Mowa tu o elektrowni w Opatovicach nad Labem i elektrowni w Opolu. W przeszłości emisje stanowiły wyjątkowo duże obciążenie środowiska na tym obszarze. Dlatego też na całym terenie prowadzi się długofalowe badania emisji toksycznych metali za pomocą bioindykatorów (porosty, mchy, grzyby borowikowate), przy udziale pracowników i studentów z dwóch współpracujących uczelni: Uniwersytetu Opolskiego i Uniwersytetu Hradec Králové. W artykule opisano procedurę obliczeń charakterystyk emisji źródła w warstwie przyziemnej w wartościach referencyjnych według Systemu Modelowania Źródeł Stacjonarnych SYMOS 97 i porównano prawidłowości przyjętych parametrów źródła (wysokość komina) z limitami emisji. Wyniki te zestawiono następnie ze średnimi wartościami toksycznych metali zakumulowanych w biosorbentach, tj. w próbkach mchów *Pleurozium schreberi*, porostów *Hypogymnia physodes* i podgrzybków brunatnych, pobieranych regularnie na monitorowanym obszarze w pobliżu punktów referencyjnych polsko-czeskiego pogranicza. Z uzyskanych wartości wynika, że emisje Elektrowni Opatovice na tym terenie po wprowadzeniu nowoczesnych metod odsiarczania i odpylania spalin są już bardzo niskie. Modelowanie emisji na tym obszarze powinno się więc skupić przede wszystkim na średnich i mniejszych źródłach, które mają w chwili obecnej największy udział w emisji toksycznych metali w tym regionie.

SŁOWA KLUCZOWE modelowanie emisji, SYMOS 97, zanieczyszczenia stałe, cząstki zawieszane PM_{10} i $PM_{2,5}$, metale toksyczne

Wstęp

W ubiegłych latach preferowanym paliwem stał się bez wątpienia gaz. Tymczasem Unia Europejska wydobywa dziś ponad 170 mln ton węgla kamiennego

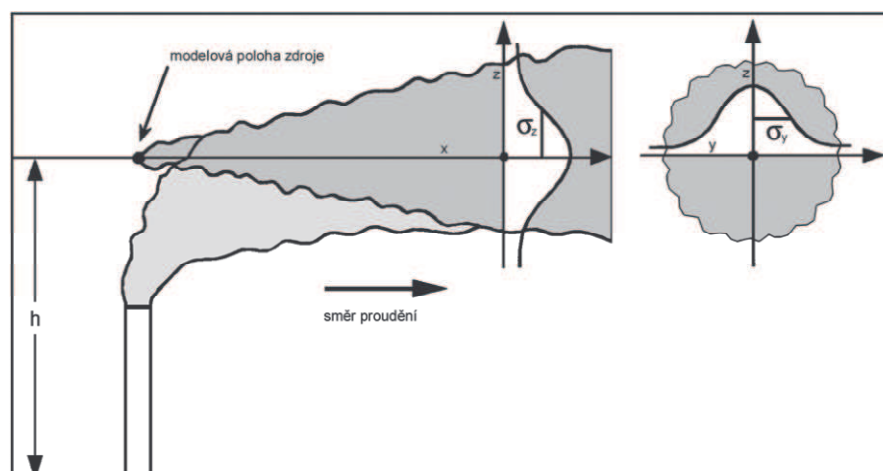
i ponad 382 mln ton węgla brunatnego i lignitu rocznie. Oznacza to, że jest trzecim największym obszarem wydobywania na świecie. Powrót węgla jako głównego źródła energii elektrycznej jest odwróceniem aktualnego trendu. Główną przyczyną są zmiany technologiczne, które umożliwiły zwiększenie efektywności produkcji prądu i ciepła oraz zmniejszenie emisji z tych źródeł energii.

Przygraniczny region województw Hradec Králové i opolskiego znajduje się pod wpływem emisji z dwóch dużych elektrowni spalających węgiel, znajdujących się w Opatovicach nad Labem i w Opolu. Elektrownia Opatovice (EOP) ma wyjątkową pozycję ze względu na położenie na gęsto zaludnionym terenie między miastami wojewódzkimi Hradec Králové i Pardubice. Elektrownia Opole także znajduje się w pobliżu dużego miasta. Oba zakłady położone są niedaleko popularnego regionu turystycznego, na terenie którego mieści się kilka parków krajobrazowych. W przeszłości emisje z dużych elektrowni węglowych stanowiły wyjątkowo duże obciążenie środowiska na tym obszarze. Z tej przyczyny kierownictwo obu firm przywiązuje dużą wagę do wykorzystywania najnowocześniejszych technologii odpylania, odsiarczania i usuwania tlenków azotu ze spalin.

Wiąże się z tym także ciągły monitoring emisji. Bardzo kosztowne urządzenia pomiarowe nieprzerwanie kontrolują zawartość emisji w spalinach. Gęsta sieć stacji automatycznego monitoringu emisji w trybie ciągłym sprawdza imisje na danym terenie.

Aby można było stwierdzić udział monitorowanego źródła w całkowitej emisji na danym obszarze, należy przeprowadzić obliczenia rozprzestrzenienia się smugi dymu źródła. W Republice Czeskiej w 1998 r. wprowadzono Procedurę metodyczną Wydziału Ochrony Powietrza Ministerstwa Środowiska do obliczeń zanieczyszczeń powietrza pochodzących ze źródeł punktowych i przenośnych SYMOS 97 – System Modelowania Źródeł Stacjonarnych [1].

Metoda SYMOS 97 jest oparta na gaussowskim modelu rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w atmosferze. Rysunek 1 przedstawia schemat ideowy takiego podejścia.



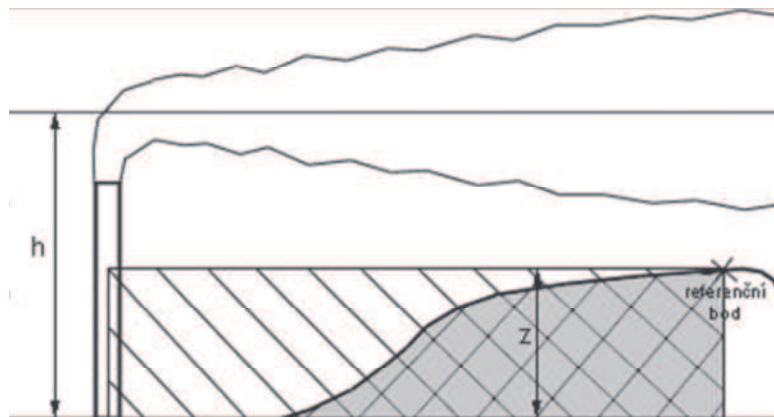
Rys. 1. Gaussowski model rozprzestrzeniania się emisji w atmosferze [2]

Model rozprzestrzeniania się emisji według metodyki SYMOS 97 ma po zmianach postać (2)

$$\bar{c}(x, y, z) = \frac{M_e}{2\pi\sigma_y\sigma_z u + V_s} \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \exp\left(-k_u \frac{x_L}{u}\right) K_h \left[(1 + J) \exp\left(\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right) + (1 - J) \exp\left(\frac{(|z+h|)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad (2)$$

gdzie: $\bar{c}(x, y, z)$ – średnie stężenie punktowe substancji zanieczyszczającej [$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$], M_e – masowe natężenie przepływu emisji (w poprzednim przypadku Q) [$\text{mg} \cdot \text{s}^{-1}$], V_s – objętościowe natężenie przepływu emisji [$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$], k_u – parametr uwzględniający przekształcenie i opad zanieczyszczeń na drodze do punktu referencyjnego, K_h – uwzględnienie zmniejszenia wpływu niskich źródeł w terenie górzystym.

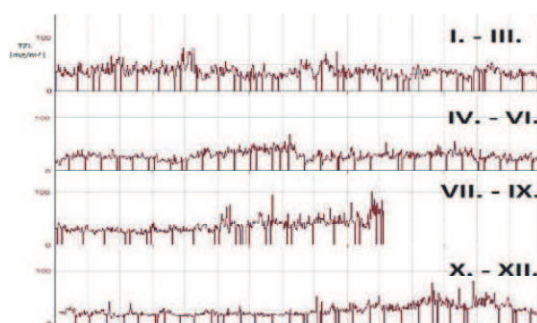
Człony $(1 + J)$ i $(1 - J)$ obejmują przeszacowanie i niedoszacowanie. Współczynnik J wyraża się stosunkiem powierzchni określonej jako całość profilu terenu w przekroju pionowym i powierzchni prostokąta między źródłem a punktem referencyjnym. Wszelkie skrajne wysokości terenu, wykraczające poza ten prostokąt, zostaną pominięte (rys. 4).



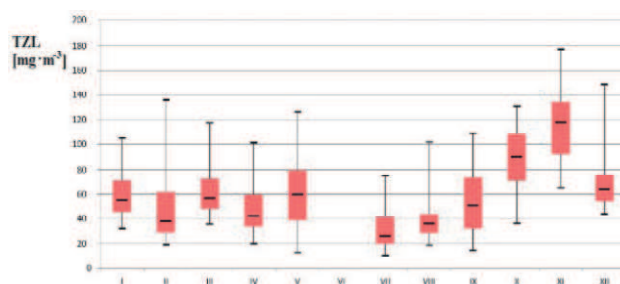
Rys. 4. Schemat parametrów do obliczenia J [2]

Część eksperymentalna

Analizowano dane półgodzinnych średnich emisji zanieczyszczeń stałych, które są archiwizowane zgodnie z obowiązującymi przepisami prawa. Rysunek 5 przedstawia przykład pomiaru ciągłego zanieczyszczeń stałych za rok 2013. Dane te poddano analizie statystycznej. Na rysunku 6 widnieje przykład analizy statystycznej emisji zanieczyszczeń stałych za rok 2013, wyniki opracowano za pomocą wykresu pudełkowego.



Rys. 5. Przykład pomiaru ciągłego zanieczyszczeń stałych za rok 2013



Rys. 6. Przykład analizy statystycznej emisji zanieczyszczeń stałych za rok 2013

Modelowanie rozprzestrzeniania się emisji zanieczyszczeń stałych z Elektrowni Opatovice zostało przeprowadzone zgodnie z metodyką SYMOS 97 [2]. Do systemu wprowadzono:

- dane terenu - hipsografia analizowanego terenu, wprowadzona w postaci cyfrowej;
- dane meteorologiczne i klimatyczne; różę wiatrów z podziałem kierunku przepływu (po 45°), oddzielnie dla każdej kategorii stabilności atmosfery i prędkości przepływu; dane te dostarcza Czeski Instytut Hydrometeorologii;
- dane dotyczące źródła - dokładna pozycja, masowe natężenie przepływu emisji, wysokość budowlana komina, wydajność cieplna lub temperatura spalin (do obliczenia wyniesienia spalin), godziny pracy w ciągu roku i objętościowe natężenie przepływu spalin; dane wejściowe źródła znajdują się w tabeli 1.

Tabela 1. Dane wejściowe źródła EOP

Współrzędna X	m	-644913
Współrzędna Y	m	-1051196
Współrzędna Z	m n.p.m.	224
Emisja zanieczyszczeń stałych	$g \cdot s^{-1}$	6,13
Wysokość komina	m	142
Temperatura spalin	°C	90
Godziny pracy	$godz \cdot rok^{-1}$	6800
Przepływ spalin	$m^3 \cdot s^{-1}$	355,7

W celu oceny opadu zanieczyszczeń stałych z Elektrowni Opatovice na polsko-czeskim pograniczu do badań rozproszenia włączono dziewięć punktów referencyjnych z tego rejonu, które wyszczególniono w tabeli 2.

Tabela 2. Punkty referencyjne na czesko-polskim pograniczu

Numer PR	Nazwa	X	Y	Z	GPS N – szerokość	GPS E – długość
3001	Velká Deštná	-600071	-1036653	1115	50°18'05"	16°23'52"
3002	Suchý vrch	-581919	-1066826	995	50°03'14"	16°41'14"
3003	Souš	-569116	-1057714	1224	50°48'30"	15°18'2"
3004	Králický Sněžník	-569135	-1050600	1423	50°12'18"	16°50'58"
3005	Adam	-587648	-1059587	765	50°06'31"	16°37'23"
3006	Komáří vrch	-594841	-1045185	992	50°13'55"	16°29'06"
3007	Vrchmezí	-601984	-1030860	1084	50°21'01"	16°20'59"
3008	Dobrošov	-612729	-1023881	624	50°23'59"	16°12'59"
3009	Božanovský Špičák	-603464	-1012629	773	50°31'03"	16°19'00"

Wyniki

Dane wejściowe modelowania zgodnie z metodyką SYMOS 97, System modelowania źródeł stacjonarnych stanowią charakterystyki emisji obliczone dla warstwy przyziemnej w punktach referencyjnych. Uzyskane wartości porównano z limitami emisji. W ten sposób otrzymano informacje dotyczące poprawności ustalonych parametrów źródła, tj. wysokości komina i temperatury spalin.

Zgodnie z przepisami wykonawczymi ustawy o ochronie środowiska dla Elektrowni Opatovice ustalono limit emisji zanieczyszczeń stałych (TZL) (w normalnych warunkach 101,3 kPa i 273,15 K) w wysokości $100 \text{ mg} \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-3}$, z czego wynika wskaźnik rocznej emisji: $250 \text{ t} \cdot \text{rok}^{-1}$. Ponieważ nie ma możliwości zmiany technologii produkcji (eksploatacja od 1959 r.), a metodę odpylania wymuszają parametry pracy, jedynym sposobem zmniejszenia rozproszenia emisji była zmiana wysokości komina i temperatury spalin. Pierwotna wysokość komina (wg pierwotnego studium – 135 m) została zwiększona do 142 m, a temperatura spalin wyjściowych wynosi 90°C . Na podstawie obliczeń w systemie SYMOS 97 (wersja 2006) potwierdzono, że takie parametry są odpowiednie.

W tabeli 3 przedstawiono wartości udziałów emisji obliczone za pomocą modelu SYMOS 97.

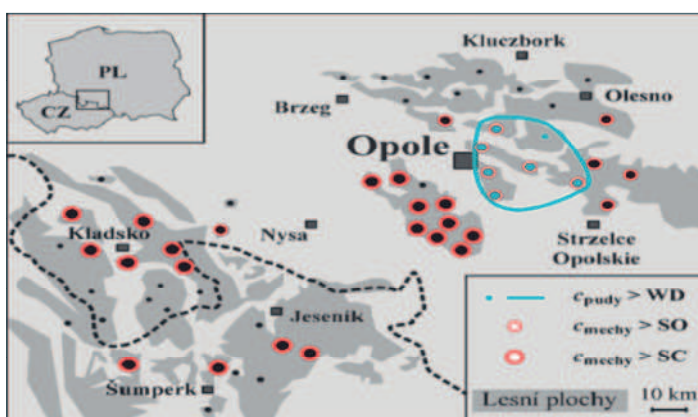
Jak wynika z rysunku 7, na którym oznaczono punkty referencyjne badania rozproszenia, analizowany obszar znajduje się także pod wpływem udziałów emisji Elektrowni Opole. Dlatego ta część pogranicza czesko-polskiego jest od 2002 r. nieprzerwanie monitorowana dzięki wspólnym badaniom pracowników i studentów Uniwersytetu Hradec Králové i Uniwersytetu Opolskiego, którzy śle-

Tabela 3. Wartości udziałów emisji obliczone za pomocą modelu SYMOS 97

Parametry modelowe – średnie roczne		
Parametr	min.	max.
PM _{2,5} [ng/m ³]	0,22	0,99
Hg [ng/m ³]	0,0045	0,011
Cd [ng/m ³]	0,000028	0,000069
As + Pb [ng/m ³]	0,0090	0,023



Rys. 7. Umieszczenie punktów referencyjnych badania rozproszenia zanieczyszczeń stałych



Rys. 8. Wyznaczenie miejsc pobierania próbek bioindykatorów [11]

dążą zmiany stężeń metali ciężkich w mchach, porostach i grzybach borowikowatych [3–15]. Rysunek 8 przedstawia miejsca pobierania próbek bioindykatorów.

W tabeli 4 zawarto średnie wartości stężeń metali ciężkich zakumulowanych w biosorbentach pobranych do badań na monitorowanym obszarze.

Tabela 4. Średnie stężenia toksycznych metali w bioindykatorach znajdujących się na monitorowanym obszarze

Bioindykatory – roczne średnie toksycznych metali		
Toksyczny metal	porosty	mchy
Cr [mg·kg ⁻¹]	1,72	2,06
Cd [mg·kg ⁻¹]	1,22	0,93
Hg [mg·kg ⁻¹]	0,133	0,094
Pb [mg·kg ⁻¹]	16,08	9,16

Podsumowanie

Aktualna eksploatacja elektrowni, zgodnie z modelem SYMOS 97, wnosi do obszaru czesko-polskiego pogranicza udziały emisji cząstek zawieszonych PM₁₀ w stężeniach rocznych w sieci obliczeniowej do 0,047 μg·m⁻³, w punktach obliczeniowych do 0,020 μg·m⁻³. Z uzyskanych wartości wynika, że emisje Elektrowni Opatovice i Elektrowni Opole na polsko-czeskim pograniczu po wprowadzeniu nowoczesnych metod odsiarczania i odpylania spalin są już bardzo niskie. Modelowanie emisji dla tego obszaru powinno się więc skupić przede wszystkim na średnich i mniejszych źródłach.

Część niniejszych wyników została zaprezentowana na polsko-czeskiej studenckiej konferencji naukowej na Uniwersytecie Opolskim w 2013 r. oraz w 2014 r. na polsko-czeskiej konferencji MED14 i na Środkowoeuropejskiej Konferencji ECOPE'14.

Podziękowania

Systematyczny biomonitoring metali toksycznych na czesko-polskim pograniczu odbywał się przy wsparciu dwóch powiązanych ze sobą projektów POWT RCz-PR, w latach 2009–2011 nr projektu PL.3.22/2.3.00/08.00062 „Biomonitoring na transgranicznym obszarze polsko-czeskim” i w latach 2012–2014 nr projektu PL.3.22/2.3.00/11.02553 „Propagowanie badań jakości środowiska na transgranicznym obszarze polsko-czeskim”. Dzięki uzyskanym środkom na Wydziale Nauk Przyrodniczych Uniwersytetu Hradec Králové płomieniowy spektrometr absorpcyjny AAnalyst 400 firmy Perkin-Elmer został rozbudowany o urządzenie do atomizacji elektrotermicznej HGA-900 oraz system rtęciowy i hybrydowy FIAS-100.

Przy wsparciu powyższego projektu eksperymentalne pomiary i modelowanie były prowadzone w latach 2012–2014 w ramach stażów naukowych studentów w komercyjnych firmach ekologicznych EMPLA AG i EMPLA TECH w Hradec Králové oraz w Zakładzie Wykonywania Pomiarów EMITOR S.C. w Opolu. Dzięki wsparciu grantu PO WER CZ.1.07/2.2.00/28.0118 „Innowacja kierunków studiów w instytutach WNP UHK” studenci przeprowadzili również analizę

danych i sporządzili publikacje podczas stażu na Wydziale Przyrodniczo-Technicznym Uniwersytetu Opolskiego.

Literatura

- [1] Kol. SYMOS 97, Výpočet znečištění ovzduší z bodových a mobilních zdrojů. Metodický pokyn odboru ochrany ovzduší MŽP. Praha: ČHMÚ; 1998.
- [2] Vach M. Ochrana ovzduší. 1. vyd. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze; 2005.
- [3] Dołhańczuk-Śródka A, Ziembik Z, Kříž J, Hyšplerová L, Waclawek M. Pb-210 isotope as a pollutant emission indicator. *Ecol Chem Eng S.* 2015;22(1):49–59.
- [4] Rajfur M, Kłos A, Kříž J. Translocation of cations during sorption of copper in the system solution – algae (*Spirogyra sp.*). *Ecol Chem Eng S.* 2014;21(3):425–433. DOI: 10.2478/eces-2014-0031.
- [5] Dołhańczuk-Śródka A, Ziembik Z, Kříž J, Hyšplerová L, Waclawek M. Investigation of committed radiation dose rate and relationships between alkaline metals concentrations in mushroom *Xerocomus badius*. *Ecol Chem Eng S.* 2012;19(4):649–664.
- [6] Dołhańczuk-Śródka A, Ziembik Z, Kříž J, Hyšplerová L, Waclawek M. Estimation of radioactivity dose rate absorbed with ingested mushrooms and related health risk. *Proc ECOpole.* 2012;6(2):499–503.
- [7] Ziembik Z, Dołhańczuk-Śródka A, Kříž J, Hyšplerová L, Vybíral B, Waclawek M. Investigation of relationships between alkaline metals content in mushroom *Xerocomus badius*. *Proc ECOpole.* 2012;6(3):520–524.
- [8] Dołhańczuk-Śródka A, Ziembik Z, Waclawek M, Hyšplerová L. Transfer of Cesium-137 from forest soil to moss. *Ecol Chem Eng S.* 2011;18(4):509–516.
- [9] Kłos A, Waclawek M, Kolář K. Lišejníky a mechy v biomonitoringu životního prostředí. Opole: Monograph POWT RCz-RP, TCHiE; 2010:61–67.
- [10] Dołhańczuk-Śródka A, Ziembik Z, Majcherczyk T, Waclawek M, Hyšplerová L. Akumulace radionuklidů ve vzorcích lišejníků, mechů a půdy, které byly odebrány v oblasti Euroregionů Praděd a Glacensis. Opole: Monograph POWT RCz-RP, TCHiE; 2010:99–104.
- [11] Kłos A, Rajfur M, Waclawek M, Šrámek I, Trnková L, Radvan R, Hyšplerová L. Využití lišejníků, mechů a půdy pro hodnocení znečištění oblastí Euroregionů Praděd a Glacensis. Opole: Monograph POWT RCz-RP, TCHiE; 2010:75–98.
- [12] Rajfur M, Kłos A, Gawlik D, Hyšplerová L, Waclawek M. Accumulation of heavy metals in the mosses *Pleurozium schreberi* exposed near the track racing in Kamień Slaski. *Proc ECOpole.* 2010;4(2):477–482.
- [13] Dołhańczuk-Śródka A, Ziembik Z, Waclawek M, Hyšplerová L. Badanie aktywności radiocezu na obszarze transgranicznym polsko-czeskim. *Proc ECOpole.* 2007;1(1/2):113–118.
- [14] Dołhańczuk-Śródka A, Ziembik Z, Waclawek M, Hyšplerová L. Radiocesium activity in the Polish-Czech border region (in Polish, Czech and English). Opole: Monograph co-financed INTERREG IIIA. TCHiE; 2007.
- [15] Dołhańczuk-Śródka A, Smuda M, Waclawek M, Majcherczyk T, Hyšplerová L. Badanie aktywności Cs-137 na obszarze anomalii Opola oraz w wybranych obszarach w Czechach. *Proc. XII Central European Conference ECOpole'03*; Opole: TchiE; 2003:229–234.