

Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska nr 72, 2016: 177–185  
(Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. 72, 2016)  
Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences No 72, 2016: 177–185  
(Sci. Rev. Eng. Env. Sci. 72, 2016)

**Andrzej MAZUR**

Institut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy  
Institute of Meteorology and Water Management – National Research Institute

**Ocena bilansu transportu zanieczyszczeń powietrza między Polską a krajami sąsiednimi w latach 2008–2012 na podstawie symulacji atmosferycznej dyspersji zanieczyszczeń. Część I. Metale ciężkie i pył PM<sub>10</sub>**  
**Air transport of pollutants between Poland and neighbouring countries in 2008–2012 – assessment of the balance, based on the simulation of atmospheric dispersion. Part I. Heavy metals and particulate matter PM<sub>10</sub>**

**Słowa kluczowe:** transport atmosferyczny zanieczyszczeń, modelowanie dyspersji, bilans transgraniczny zanieczyszczeń

**Key words:** transport of atmospheric pollutants, dispersion modeling, trans-boundary balance of pollutants

**Wprowadzenie**

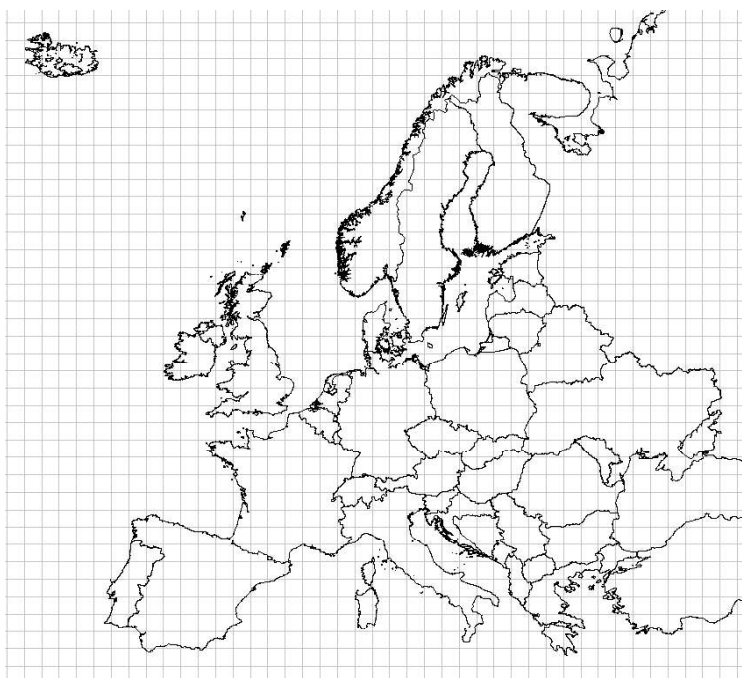
Zanieczyszczenia atmosferyczne jako istotny czynnik degradacji środowiska stały się problemem międzynarodowym dotyczącym nie tylko krajów, na obszarze których zlokalizowane są źródła emisji, ale również krajów sąsiednich (jako efekt transportu trans-granicznego), a czasem również – w rezultacie globalnej dyspersji – krajów i regionów położonych w znacz-

nej odległości od źródeł (Alcamo i Bartnicki, 1986; Zwoździak, 1995). Zarówno do poznania przyczyn tej degradacji, jak i do jej zapobiegania niezbędne jest tworzenie narzędzi, które umożliwiają ocenę aktualnego stanu środowiska naturalnego, i określanie kierunków proekologicznych działań gospodarczych i społecznych. Do tego typu analiz powszechnie stosowane są modele transportu zanieczyszczeń w atmosferze (Łobocki i in., 2006; Simpson i in., 2012). W pracy opisano zastosowanie zunifikowanego modelu dyspersji (Mazur, 2008) do zadania diagnostycznego, jakim była ocena bilansu strumieni transgranicznych wybranych zanieczyszczeń z terytorium i na terytorium Polski.

## Metodyka badań

Symulacje transportu zanieczyszczeń wykonano z wykorzystaniem zunifikowanego modelu dyspersji (Mazur, 2008; Mazur i in., 2014). Model pracuje w siatce  $28 \times 28$  km obróconych współrzędnych geograficznych (Schaeffler i Doms, 2000) pokrywającej prawie całą Europę (rys. 1). Górna granica obszaru obliczeń modelu to około 5 km. Wynika to z faktu, iż większość zanieczyszczeń ulega dyspersji w warstwie mieszania (której wysokość zwykle nie przekracza 2–3 km), jednak procesy konwekcyjne mogą je przetransportować wyżej. Model jest w stanie symulować rozprzestrzenianie się metali ciężkich, związków zakwaszających (tlenków siarki, związków azotu) i substancji radioaktywnych

oraz aerozoli atmosferycznych. Model opracowano na poniższych założeniach, które dość powszechnie przyjmowane są w praktyce modelowania transportu zanieczyszczeń. I tak, zakłada się, że wspomniane zanieczyszczenia są nieaktywne meteorologicznie, tzn. nie wpływają na stan elementów meteorologicznych (wiatru, temperatury, ciśnienia, bilansu radiacyjnego itp.). W modelu uwzględnia się jedynie poziomą adwekcję i pionową dyfuzję zanieczyszczeń. Przyjmuje się, że emisja ze wszystkich źródeł zlokalizowanych w danym „oczku” siatki natychmiast wypełnia całą jego przestrzeń, a mieszanina zanieczyszczeń i powietrza, powstająca natychmiast po emisji, jest idealna i jednorodna. Zanieczyszczenia usuwane są z atmosfery w drodze depozycji suchej (osadzania)



RYSUNEK 1. Domena modelu dyspersji z siatką obliczeniową  
FIGURE 1. Domain of dispersion model with computational grid

lub mokrej (wymywania). Obydwa strumienie substancji do powierzchni ziemi dają w sumie tzw. depozycję całkowitą, określaną za pomocą funkcji zaniku masy danej substancji o wykładniczym charakterze. Prędkość zaniku masy zależy od właściwości danej substancji, podłoża, na którym występuje osadzenie, jak również od warunków meteorologicznych. W modelu uwzględnione są zarówno transport zanieczyszczeń w atmosferze, jak i procesy fizyczne oraz (opcjonalnie) przemiany chemiczne, które zachodzą w trakcie dyspersji zanieczyszczeń. Modelowanie tych przemian wymaga czasem osobnego podejścia do każdego z rozpatrywanych związków i substancji. Dla przykładu zakłada się, że metale ciężkie są zasadniczo niereaktywne, a zatem nie ma potrzeby uwzględniania przemian chemicznych w opisie ich dyspersji. Z kolei uwzględnienie przemian chemicznych związków zakwaszających, czyli tlenków siarki oraz związków azotu utlenionego i zredukowanego, można przybliżyć za pomocą opisu dwóch oddzielnych cykli reakcji sprzężonych ze sobą poprzez obecność siarczanów amonowych. Powoduje to dość istotne wydłużenie czasu obliczeń, jednakże zwiększa wiarygodność otrzymanych wyników. W trakcie badań określone i porównane ze sobą zostały dwa strumienie zanieczyszczeń – strumień mający swe źródło na obszarze Polski, będący rezultatem emisji zanieczyszczeń z polskich źródeł, oraz napływający do Polski, będący wynikiem emisji z europejskich źródeł.

Dla wybranego okresu szczegółowe dane emisyjne pozyskano z bazy Centre on Emission Inventories and Projections (dane CEIP, [http://www.ceip.at/ms/ceip\\_home1/ceip\\_home/we-](http://www.ceip.at/ms/ceip_home1/ceip_home/we-)

[bdab\\_emepdatabase](http://www.ceip.at/ms/ceip_home1/ceip_home/we-bdab_emepdatabase)), natomiast dane meteorologiczne z European Centre for Medium-range Weather Forecasts (dane ECMWF, <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily>).

## Rezultaty

W tabeli 1 zamieszczono sumy emisji badanych zanieczyszczeń w poszczególnych latach. Poza emisjami PM<sub>10</sub> (którego emisja utrzymuje się, w dosyć dobrym przybliżeniu, na niezmiennym poziomie) widoczny jest trend malejący ilości emitowanych zanieczyszczeń, w przypadku kadmu nawet do 45% w skali pięciu lat.

Wartości emisji badanych zanieczyszczeń w kolejnych latach wprowadzono jako dane wejściowe do modelu dyspersji zanieczyszczeń. Obliczenia zostały wykonane według następującego schematu:

1. Obliczono rozkład depozycji zanieczyszczeń w domenie obliczeniowej w danym roku pochodzących ze źródeł zlokalizowanych poza obszarem Polski.
2. Obliczono depozycję na terenie Polski zanieczyszczeń pochodzących wyłącznie ze źródeł zlokalizowanych poza Polską („import” zanieczyszczeń do Polski).
3. Obliczono rozkład depozycji zanieczyszczeń w domenie obliczeniowej w danym roku, przy uwzględnieniu emisji wyłącznie ze źródeł zlokalizowanych na terenie Polski.
4. Obliczono depozycję zanieczyszczeń poza obszarem Polski w wyniku emisji wyłącznie ze źródeł zlokalizowanych na terenie Polski („eksport” zanieczyszczeń).

TABELA 1. Roczne emisje badanych zanieczyszczeń w latach 2008–2012 ze źródeł zlokalizowanych w domenie modelu dyspersji

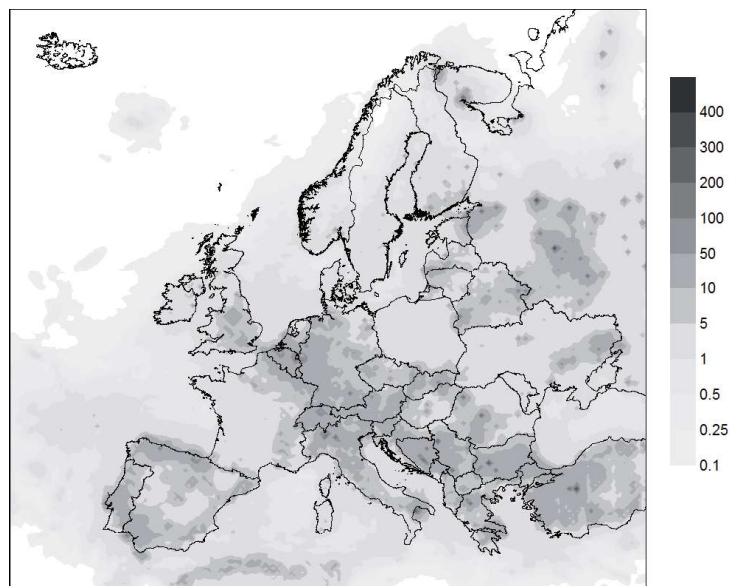
TABLE 1. Annual emissions of pollutants in 2008–2012 from sources located in domain of the dispersion model

Rok Year	Emisja Emission		
	Cd, Mg	Pb, Mg	PM <sub>10</sub> , Gg
	Mg		
2008	225,658	5813,492	4341,560
2009	185,249	5406,237	4226,054
2010	140,366	3663,267	4305,882
2011	127,759	3213,311	4208,191
2012	124,331	3058,840	4223,469

Źródło: Rys. 1, [http://www.ceip.at/ms/ceip\\_home1/ceip\\_home/webdab\\_emepdatabase](http://www.ceip.at/ms/ceip_home1/ceip_home/webdab_emepdatabase).

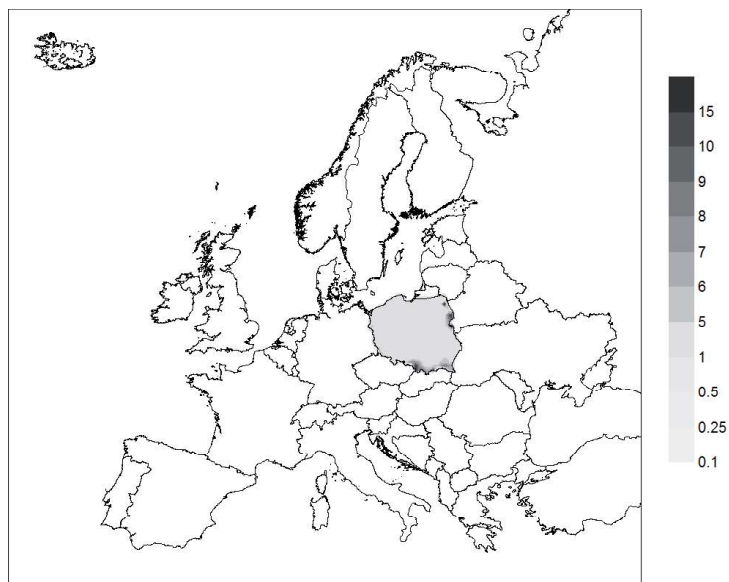
Source: Fig. 1, [http://www.ceip.at/ms/ceip\\_home1/ceip\\_home/webdab\\_emepdatabase](http://www.ceip.at/ms/ceip_home1/ceip_home/webdab_emepdatabase).

5. Obliczono bilanse strumieni zanieczyszczeń transportowanych (napływających i wypływających) przez granice Polski, czyli wyników obliczeń z punktów 2 i 4. Na rysunkach 2–4 przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń dla punktów 1, 2 oraz 4. Przykłady dotyczą depozycji Cd w 2012 roku z uwzględnieniem



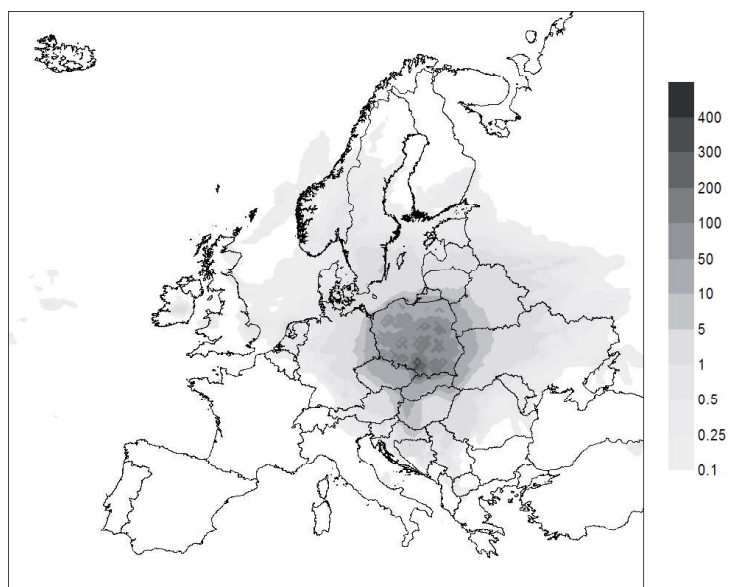
RYSUNEK 2. Depozycja kadmu [ $\text{mg}/\text{m}^2$ ] w 2012 roku w wyniku emisji ze źródeł w domenie obliczeniowej zlokalizowanych poza obszarem Polski (zob. objaśnienia w tekście; punkt 1)

FIGURE 2. Deposition of cadmium [ $\text{mg}/\text{m}^2$ ] in 2012 as a result of emissions from sources in the computational domain located outside the Polish territory (see explanations in text, item 1)



RYSUNEK 3. Depozycja kadmu [ $\text{mg}/\text{m}^2$ ] w 2012 roku na obszarze Polski w wyniku emisji ze wszystkich źródeł w domenie obliczeniowej z wyjątkiem zlokalizowanych w Polsce (zob. objaśnienia w tekście; punkt 2 – „import” zanieczyszczeń)

FIGURE 3. Deposition of cadmium [ $\text{mg}/\text{m}^2$ ] in 2012 over Polish territory as a result of emissions from sources in the computational domain located outside the Polish territory (see explanations in text, item 2 – “import” of pollutants)



RYSUNEK 4. Depozycja kadmu [ $\text{mg}/\text{m}^2$ ] w 2012 roku poza obszarem Polski w wyniku emisji ze wszystkich źródeł zlokalizowanych w Polsce (zob. objaśnienia w tekście; punkt 4 – „eksport” zanieczyszczeń)

FIGURE 4. Deposition of cadmium [ $\text{mg}/\text{m}^2$ ] in 2012 outside Poland as a result of emissions from all sources located in Poland (see explanations in text, item 4 – “export” of pollutants)

lokalizacji źródeł i obszaru, na który deponowane są zanieczyszczenia.

W tabeli 2 przedstawiono rezultaty obliczeń bilansu zanieczyszczeń „importowanych” do Polski i „eksportowanych” z Polski w przypadku depozycji badanych zanieczyszczeń.

tycznie w całej domenie aktywne byłyby jedynie polskie źródła. Jeśli, jak w przypadku wartości przytoczonych w tabeli 2, bilans jest dodatni, oznacza to, że ilość zanieczyszczeń emitowanych z polskich źródeł i zanieczyszczeń transportowanych poza obszar Polski jest

TABELA 2. Bilans depozycji  
TABLE 2. Balance of deposition

Rok Year	Cd			Pb			PM <sub>10</sub>		
	depozycja deposition [mg/m <sup>2</sup> ]		bilans* balance [%]	depozycja deposition [mg/m <sup>2</sup> ]		bilans* balance [%]	depozycja deposition [mg/m <sup>2</sup> ]		bilans* balance [%]
	źródła poza Polską external sources	źródła polskie Polish sources		źródła poza Polską external sources	źródła polskie Polish sources		źródła poza Polską external sources	źródła polskie Polish sources	
2008	2,25	14,13	72,47	36,42	197,11	68,81	27,95	57,32	34,43
2009	1,55	12,31	77,53	38,24	163,55	62,10	27,93	50,12	28,43
2010	0,98	13,53	86,49	26,75	159,03	71,20	26,71	52,20	32,29
2011	0,88	13,89	88,01	25,32	182,09	75,58	27,99	52,18	30,16
2012	0,97	11,21	84,01	26,05	158,92	71,83	24,36	42,41	27,04

\*Zob. wyjaśnienia w tekście poniżej/See explanation in text below.

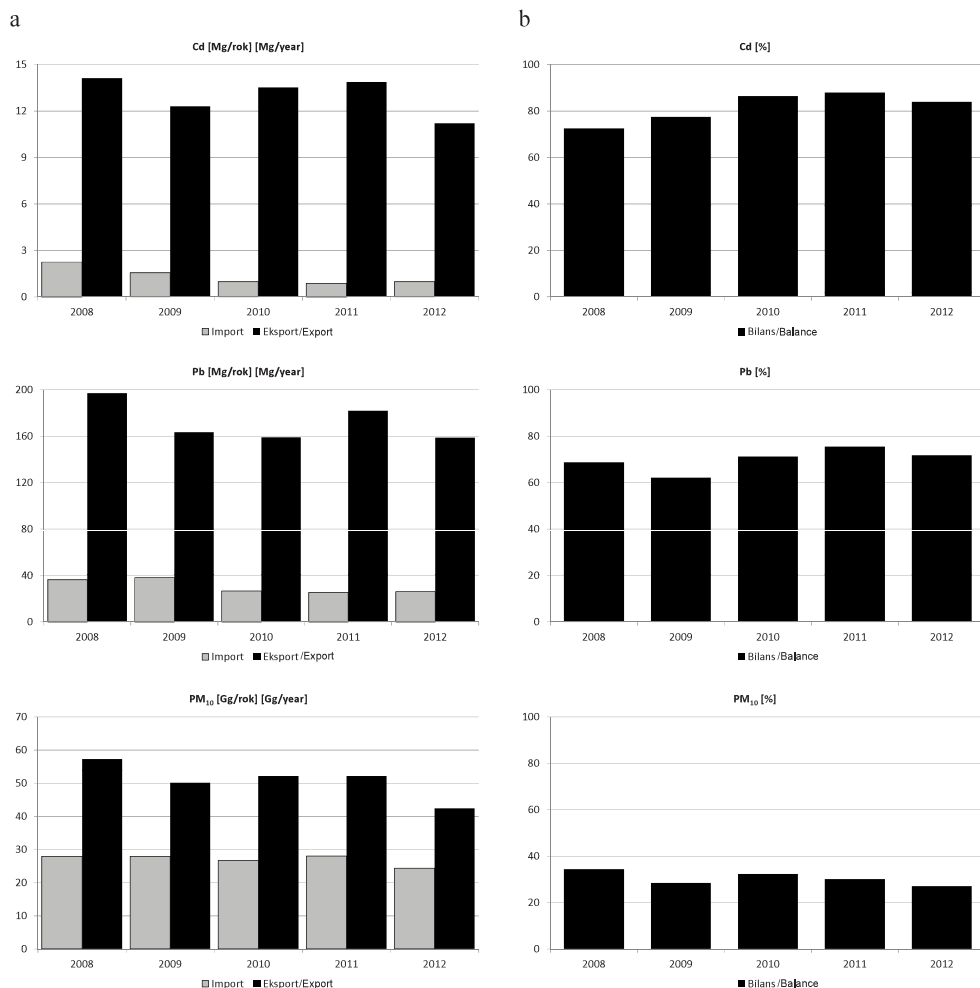
Bilans depozycji (*B*) rozumiany jest jako iloraz różnicy i sumy depozycji zanieczyszczeń w Polsce w wyniku ich emisji ze źródeł spoza Polski (*D<sub>PO</sub>*) i depozycji poza Polską w rezultacie emisji z polskich źródeł (*D<sub>OP</sub>*) i wyrażony jest w procentach:

$$B = \frac{D_{OP} - D_{PO}}{D_{OP} + D_{PO}} \cdot 100\%$$

Z formalnego punktu widzenia może przyjmować wartości od -100% (przy braku emisji i – co za tym idzie – depozycji zanieczyszczeń pochodzących z polskich źródeł) do 100% – gdyby hipote-

większa niż tych emitowanych poza Polską i deponowanych na obszarze Polski. Innymi słowy oznacza to przewagę „eksportu” nad „importem”. Bilans ujemny określałby sytuację odwrotną. W sytuacji równych wartości „importu” i „eksportu” bilans byłby zerowy. Takie określenie bilansu pozwala na jednoznacznie określenie, czy Polska lub dowolny inny rozpatrywany kraj jest (netto) „importerem”, czy też „eksporterem” zanieczyszczeń.

Ilustracją danych z tabeli 2 jest rysunek 5, na którym przedstawiono trendy wartości „importu”, „eksportu” i bilansu dla poszczególnych zanieczyszczeń.



RYSUNEK 5. Wartości i bilanse strumieni zanieczyszczeń transportowanych do Polski (w wyniku emisji poza Polską) i poza obszar Polski w latach 2008–2012 (z polskich źródeł): a – strumienie depozycji zanieczyszczeń, b – bilanse strumieni depozycji

FIGURE 5. Values and balances of pollutants' fluxes transported to Poland (as a result of emissions outside Poland) and out of Polish territory in 2008–2012 (from Polish sources): a – pollutants' deposition fluxes, b – balances of pollutants' fluxes

### Podsumowanie i wnioski

Na podstawie uzyskanych wyników należy stwierdzić, że w badanym bilansie transportu transgranicznego wybranych metali ciężkich i pyłu PM<sub>10</sub>

w rozpatrywanym okresie pięciu lat zdecydowanie więcej substancji zostaje „wyeksportowanych” poza obszar Polski – ze źródeł polskich, niż napływa nad teren Polski – ze źródeł leżących za granicami kraju. Sytuacja ta pozostaje

zasadniczo niezmienna w całym okresie, mimo zmniejszania się emisji wielkości rozpatrywanych zanieczyszczeń. W ocenie autora jest to najprawdopodobniej związane z faktem, iż Polska jest jednym z większych emitentów zanieczyszczeń w skali europejskiej, oraz z charakterem transportu atmosferycznego, zwłaszcza dalekiego zasięgu. Przykładowo, w 2009 roku emisja kadmu z Polski wynosiła ponad 13% całkowitej emisji tego pierwiastka w Europie, ołowiu – 5%, a pyłu zawieszonego PM<sub>10</sub> – ponad 3,5% (Degórska i in., 2011). Podobnie w 2010 roku emisja PM<sub>10</sub> z Polski wyniosła 279,5 Gg, co stanowi około 3,7% emisji w całej Europie. Co więcej Polska jako kraj leżący w centrum Europy (oraz, co nie jest bez znaczenia, znajduje się w obszarze domeny obliczeniowej modelu) ma większy udział w transporcie transgranicznym i depozycji zanieczyszczeń w krajach sąsiednich (Niemcy, Czechy, Słowacja, również akweny międzynarodowe jak Morze Bałtyckie) niż „importuje” je ze źródeł (państw) położonych daleko od naszego kraju i w rejonach, dla których dominujące kierunki dyspersji zanieczyszczeń nie obejmują Polski. Wszystkie powyższe czynniki wpływają na fakt, iż Polska jest eksporterem netto tych zanieczyszczeń. Można wnioskować, że podobna sytuacja może zachodzić dla innych zanieczyszczeń, jak na przykład związków siarki czy azotu, będzie to jednak przedmiotem osobnego opracowania.

## Literatura

- Alcamo, J. i Bartnicki, J. (red.) (1986). Atmospheric computations to assess acidification in Europe: work in progress. *Austria, Laxenburg: IIASA Research Report RR-86-5*.
- Degórska, A., Gendolla, T., Iwanek, J., Karska, J., Kobus, D., Liana, E., ... Toczko, B. (2011). *Zanieczyszczenie powietrza w Polsce w 2009 roku na tle wielolecia*. Warszawa: Biblioteka Monitoringu Środowiska.
- Degórska, A., Prządka, Z., Skotak, K. i Śnieżek, T. (2012). *Ocena zanieczyszczenia powietrza metalami ciężkimi i WWA oraz ocena składu pyłu PM<sub>2,5</sub> na stacjach tła regionalnego w Polsce w latach 2010–2011*. Warszawa: Państwowy Monitoring Środowiska – Inspekcja Ochrony Środowiska.
- Loboocki, L., Strużewska, J., Zdunek, M., Kamiński, J., Lupu, A. i Neary, L. (2006). Multiscale meteorological modelling for the “Health effects of air pollution – an integrated methodology” project in Kraków, Poland 2005. W C. Granier, P. Monks, O. Tarasova, S. Tuncel, P. Borrell (red.) *Air Quality in Eastern Europe*. ACCENT/JRC Expert Workshop. ACCENT Secretariat, Report 8.2006, Urbino, Włochy.
- Mazur, A. (2008). *Zunifikowany model atmosferycznego transportu zanieczyszczeń dla Polski*. Rozprawa doktorska. Warszawa: IMGW.
- Mazur, A., Bartnicki, J. i Zwoździak, J. (2014). Operational Model for Atmospheric Transport And Deposition of Air Pollution. *Ecol. Chem. Eng.-S.* 2014;21(3),385-400. doi: 10.2478/eces-2014-0028.
- Schaettler, U. i Doms, G. (2000). *The Nonhydrostatic Limited-Area Model LM (Lokal-Modell) of DWD. Implementation Documentation*. Offenbach: DWD
- Simpson, D., Benedictow, A., Berge, H., Bergström, R., Emberson, L.D., Fagerli, H., ... Wind, P. (2012). The EMEP MSC-W chemical transport model - Part I: Model description, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 12, 3781-3874. doi:10.5194/acpd-12-3781-2012.



Zwoździak, J. (1995). *Metody prognozy i analizy stężeń zanieczyszczeń w powietrzu w regionie Czarnego Trójkąta*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.

## Streszczenie

**Ocena bilansu transportu zanieczyszczeń powietrza między Polską a krajami sąsiednimi w latach 2008–2012 na podstawie symulacji atmosferycznej dyspersji zanieczyszczeń. Część I. Metale ciężkie i pył PM<sub>10</sub>.** Zanieczyszczenia atmosferyczne są istotnym elementem degradacji środowiska w całej Europie, w tym również w Polsce, a emisje w jednym z państw mogą powodować szkody w innym. W niniejszej pracy dokonano oceny ilości zanieczyszczeń „eksportowanych” z Polski do krajów sąsiednich oraz dostających się do Polski w rezultacie emisji poza jej obszarem. Bilansowania tych strumieni dokonano na podstawie symulacji atmosferycznego rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń przy użyciu autorskiego modelu dyspersji zanieczyszczeń. Część pierwsza badań obejmowała wybrane metale ciężkie i pyły PM<sub>10</sub>. Okres badań, z uwagi na dostęp do danych emisyjnych i meteorologicznych, ustalony został na lata 2008–2012.

## Summary

**Air transport of pollutants between Poland and neighbouring countries in 2008–2012 – assessment of the balance, based on the simulation of atmospheric dispersion. Part I. Heavy metals and particulate matter PM<sub>10</sub>.** Atmospheric pollution is an important element of environmental degradation across Europe, including Poland, because emissions in one country can cause harm to others. In this paper an amount of pollution “exported” from Poland to neighbouring countries and flowing into Polish territory as a result of emissions from the outside was assessed. Balancing these streams was based on the simulation of atmospheric dispersion using suitable numerical model. The first part of the research is pertained to selected heavy metals and to PM<sub>10</sub>. The research period due to access to emission and meteorological data was set for 2008–2012.

### Author's address:

Andrzej Mazur  
Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej  
Państwowy Instytut Badawczy  
01-673 Warszawa, ul. Podleśna 61, Poland  
e-mail: andrzej.mazur@imgw.pl