

Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska (2016), 25 (4), 472–482
Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. (2016), 25 (4)
Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences (2016), 25 (4), 472–482
Sci. Rev. Eng. Env. Sci. (2016), 25 (4)
<http://iks.pn.sggw.pl>

Andrzej MAZUR

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

**Ocena bilansu transportu zanieczyszczeń powietrza
pomiędzy Polską a krajami sąsiednimi w latach 2008–2012 na
podstawie symulacji atmosferycznej dyspersji zanieczyszczeń.
Część II – związki azotu i siarki
Air transport of pollutants between Poland and neighbouring
countries in 2008–2012 – assessment of the balance, based on
the simulation of atmospheric dispersion. Part II – nitrogen
and sulphur compounds**

Słowa kluczowe: transport atmosferyczny zanieczyszczeń, modelowanie dyspersji, bilans trans-graniczny zanieczyszczeń, związki zakwaszające

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

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 dysper-

sji – kraje i regiony, położone w znacznej odległości od źródeł (Alcamo i Bartnicki, 1986; Zwoździak, 1995; EMEP, 2006, 2013). Z uwagi na fakt, że czasami niektóre kraje stają się „importerami netto” zanieczyszczeń (tzn. napływa do nich, w wyniku transportu trans-granicznego, więcej zanieczyszczeń, niż same emitują) istotną wielkością jest bilans zanieczyszczeń, czyli wielkość określająca relację pomiędzy ilościami zanieczyszczeń napływających do danego kraju („import”) i emitowanych („eksport”). Wielkość ta pozwala określić stan środowiska naturalnego w odniesieniu do bieżących wartości emisji poszczególnych zanieczyszczeń oraz określić (postulować) niezbędne proekologiczne działania w ramach gospodarki narodowej. Tak, jak to stwier-

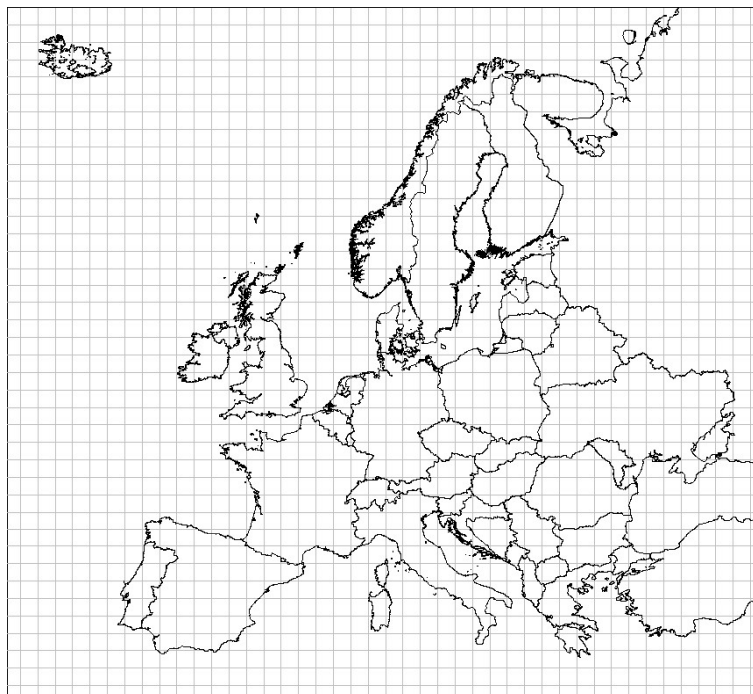
dzono w poprzedniej części pracy (Mazur, 2016), podstawowym narzędziem, pozwalającym na takie diagnozowanie, są modele transportu zanieczyszczeń w atmosferze (Simpson i in., 2012).

Metodyka badań

Symulacje transportu zanieczyszczeń wykonane zostały z wykorzystaniem zunifikowanego modelu dyspersji (Mazur, 2008; Mazur i in., 2014), opartego na założeniach, które są dość powszechnie przyjmowane w praktyce modelowania transportu zanieczyszczeń. Model jest w stanie symulować rozprzestrzenianie się metali ciężkich, związków zakwaszających (tlenków siarki, związków azotu) i substancji radioaktywnych oraz aerozoli cząsteczkowych. Bardziej szczegółowe założenia, na których bazuje koncepcja i realizacja modelu, opisane zostały w poprzedniej części pracy (Mazur, 2016) oraz w (Mazur, 2008). Ta część badań dotyczyła związków zakwaszających, które, w odróżnieniu od większości metali ciężkich czy pyłów, podlegają reakcjom chemicznym, częstokroć o charakterze nieliniowym. Powoduje to konieczność uwzględnienia cyklu przemian chemicznych, w tym przypadku – azotowo-siarkowych, i potraktowania jako osobne typy zanieczyszczeń przynajmniej dziesięć związków azotu i siarki: NO, NO₂, PAN (azotan nadtlenoacetylu), HNO₃, NO₃, NH₄NO₃, NH₃, (NH₄)₂SO₄, SO₄ oraz SO₂, przy czym warto zauważyć, że przemiany chemiczne związków siarki i azotu, w tym azotu zarówno w postaci zredukowanej jak i utlenionej, są sprzęgnięte ze sobą poprzez obecność amoniaku – w postaci

siarczanu bądź azotanu amonu (Barrett i Berge, 1996; Mazur, 2008). Takie sprzężenie powoduje konieczność zastosowania odmiennej metodyki symulacji transportu zanieczyszczeń niż w przypadku substancji uznawanych za pasywne chemicznie, jak część metali ciężkich czy pył z frakcji PM₁₀ (Mazur, 2016). O ile bowiem dla zanieczyszczeń niereaktywnych zakładana jest liniowa zależność między wartością emisji a depozycją w danym punkcie (receptorze), o tyle substancje aktywne chemicznie, jak sprzężone ze sobą w cyklu reakcji związki azotu i siarki wymagają uwzględnienia zmiany warunków reakcji i przemian chemicznych w zależności od zmian stężenia reagentów. Z tego powodu należy przyjąć metodykę, która jest w stanie przynajmniej przybliżyć te zależności (Barrett i Berge, 1996; Bartnicki, 1999; Simpson i in., 2012). Przyjęto sposób proponowany w pracy Bartnickiego (1999), gdzie depozycja związana z emisją z wybranego kraju jest liczona jako różnica między wynikami obliczeń modelu z uwzględnionymi emisjami ze wszystkich krajów (źródeł), a wynikami z uwzględnionymi emisjami ze wszystkich źródeł za wyjątkiem danego kraju. Taka metoda jest obciążona stosunkowo najmniejszym błędem (poniżej 5%) w porównaniu do innych rozważanych procedur (Bartnicki, 1999).

Analogicznie jak w poprzedniej pracy (Mazur, 2016), wyliczono i zbilansowano dwa strumienie zanieczyszczeń – strumień mający swe źródło na obszarze Polski, będący rezultatem emisji zanieczyszczeń ze źródeł polskich, oraz napływający do Polski, będący wynikiem emisji ze źródeł europejskich, zlokalizowanych w domenie modelu (rys. 1).



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

Dla wybranego okresu dane emisyjne pozyskane były z bazy Centre on Emission Inventories and Projections – CEIP (strona internetowa CEIP, 2015), natomiast dane meteorologiczne – European Centre for Medium-range Weather Forecasts (<http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-deily>; Dee i in., 2011).

Wyniki i dyskusja

W tabeli 1 zamieszczone zostały sumy emisji badanych zanieczyszczeń w poszczególnych latach. Emisje związków azotu w postaci utlenionej (NO_x) oraz w postaci zredukowanej (NH_3) wykazywały istotny trend malejący pod

względem ilości emitowanych zanieczyszczeń. Jeśli chodzi o wielkości emisji siarki, pozostawały one w badanych okresie na zbliżonym poziomie.

Wartości emisji badanych zanieczyszczeń w kolejnych latach wprowadzone zostały jako dane wejściowe do modelu atmosferycznego transportu zanieczyszczeń. Podobnie, jak w przypadku metali ciężkich, wykonano obliczenia transportu i depozycji wg poniższego schematu, analogicznie jak w poprzedniej części pracy (Mazur, 2016):

1. Obliczono rozkład depozycji zanieczyszczeń w całej domenie obliczeniowej (rys. 1) w danym roku, pochodzących ze źródeł zlokalizowanych poza obszarem Polski. Wynik przedstawiono na rysunku 2.

TABELA 1. Roczne emisje badanych zanieczyszczeń w latach 2008–2012 ze źródeł zlokalizowanych w domenie modelu dyspersji (rys. 1, http://www.ceip.at/ms/ceip_home1/ceip_home/weddab_emepdatabase)

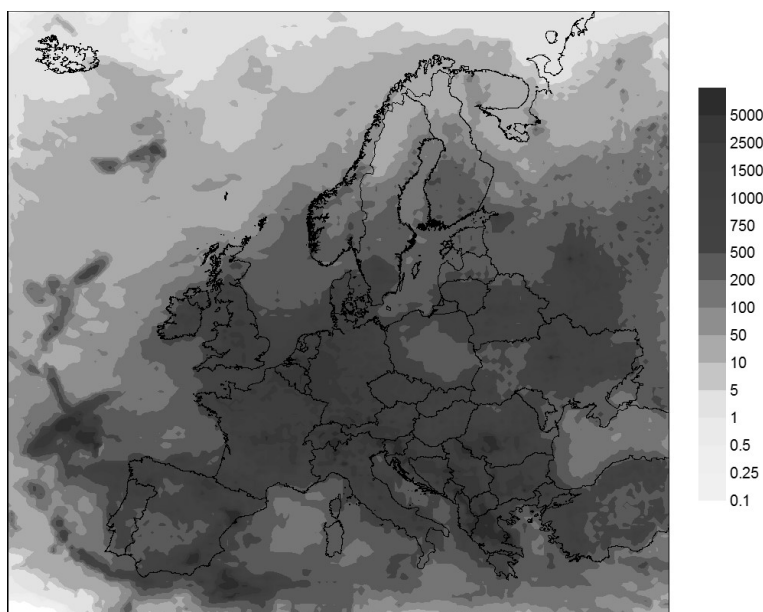
TABLE 1. Annual emissions of pollutants in 2008–2012 from sources located in domain of the dispersion model (Fig. 1. http://www.ceip.at/ms/ceip_home1/ceip_home/weddab_emepdatabase)

Rok Year	Emisja/Emission [Mg]		
	siarka sulphur	azot utleniony oxidized nitrogen	azot zredukowany reduced nitrogen
2008	314,719	4151,499	705,483
2009	314,565	3891,157	660,554
2010	314,439	3839,154	650,475
2011	314,444	4102,739	642,328
2012	314,344	3677,744	622,342

2. Ograniczając wyniki z punktu 1 do obszaru Polski, obliczono rozkład depozycji na terytorium Polski zanieczyszczeń pochodzących wyłącznie ze źródeł zlokalizowanych poza Polską („import”

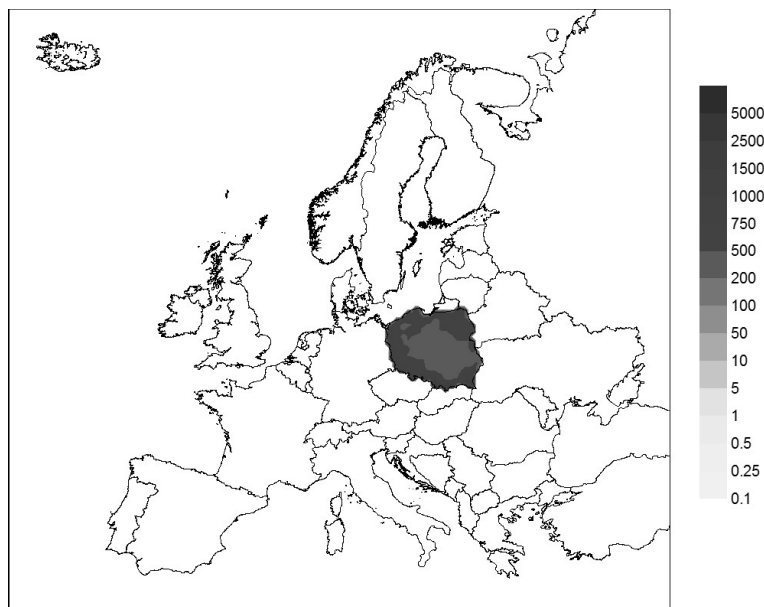
zanieczyszczeń do Polski). Wynik przedstawiono na rysunku 3.

3. Obliczono rozkład depozycji zanieczyszczeń w całej domenie obliczeniowej w danym roku, przy uwzględnieniu



RYSUNEK 2. Depozycja azotu [$\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$] 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 nitrogen [$\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$] 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 azotu [$\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$] w 2012 roku na obszarze Polski w wyniku emisji ze wszystkich źródeł w domenie obliczeniowej za wyjątkiem zlokalizowanych w Polsce (zob. objaśnienia w tekście, punkt 2 – „import” zanieczyszczeń)

FIGURE 3. Deposition of nitrogen [$\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$] 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)

emisji wyłącznie ze źródeł zlokalizowanych na terenie Polski.

4. Obliczono rozkład depozycji zanieczyszczeń poza obszarem Polski w wyniku emisji wyłącznie ze źródeł zlokalizowanych na terenie Polski („eksport” zanieczyszczeń). Wynik przedstawiono na rysunku 4.

5. Obliczono bilanse strumieni zanieczyszczeń transportowanych (napływających i wypływających) przez granice Polski, czyli wyników obliczeń z punktów 2 i 4.

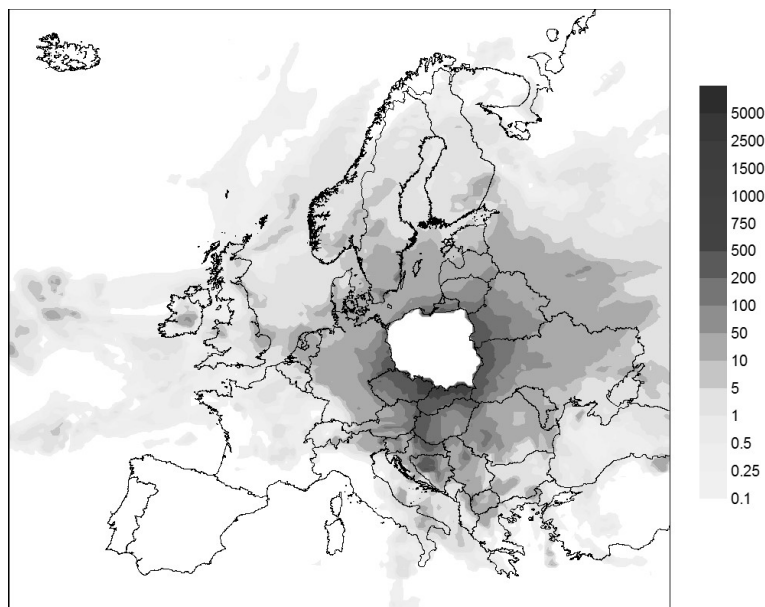
Na rysunkach 2–4 przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń dla punktów 1–4. Przykłady dotyczą depozycji azotu (jako sumy azotu w postaci zredukowanej i utlenionej) w 2012 roku,

z uwzględnieniem lokalizacji źródeł i obszaru, na który deponowane jest zanieczyszczenie.

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

Bilans rozumiany jest jako iloraz różnicy i sumy depozycji zanieczyszczeń w Polsce w wyniku ich emisji ze źródeł spoza Polski (D_{PO}) i depozycji poza Polską w rezultacie emisji ze źródeł polskich (D_{OP}), wyrażony w procentach (Mazur, 2016):

$$B = \frac{D_{OP} - D_{PO}}{D_{OP} + D_{PO}} \times 100\% \quad (1)$$



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

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

TABELA 2. Bilans depozycji
TABLE 2. Balance of deposition

Rok Year	Siarka Sulphur			Azot utleniony Oxidized nitrogen			Azot zredukowany Reduced nitrogen		
	depozycja deposition [$\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$]		bilans* balance* [%]	depozycja deposition [$\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$]		bilans* balance* [%]	depozycja deposition [$\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$]		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	44,93	148,42	53,52	130,32	188,03	18,12	52,38	50,83	-1,50
2009	42,53	126,85	49,78	124,56	162,05	13,08	56,89	45,91	-10,68
2010	35,80	130,07	56,83	103,26	167,47	23,71	49,41	42,95	-6,99
2011	33,59	129,43	58,78	105,71	195,25	29,75	56,95	49,26	-7,24
2012	33,79	121,34	56,43	124,05	179,94	18,38	53,13	38,35	-16,16

* Zob. wyjaśnienia w tekście.

* See explanations in the text.

Z formalnego punktu widzenia może przyjmować wartości od -100% (przy braku emisji i – co za tym idzie – depozycji zanieczyszczeń pochodzących ze źródeł polskich) do 100% – gdyby hipotetycznie w całej domenie aktywne byłyby jedynie źródła polskie. Jeśli, jak w przypadku wartości przytoczonych w tabeli 2, bilans jest dodatni, oznacza to, że ilość zanieczyszczeń emitowanych ze źródeł polskich i transportowanych poza obszar Polski jest 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.

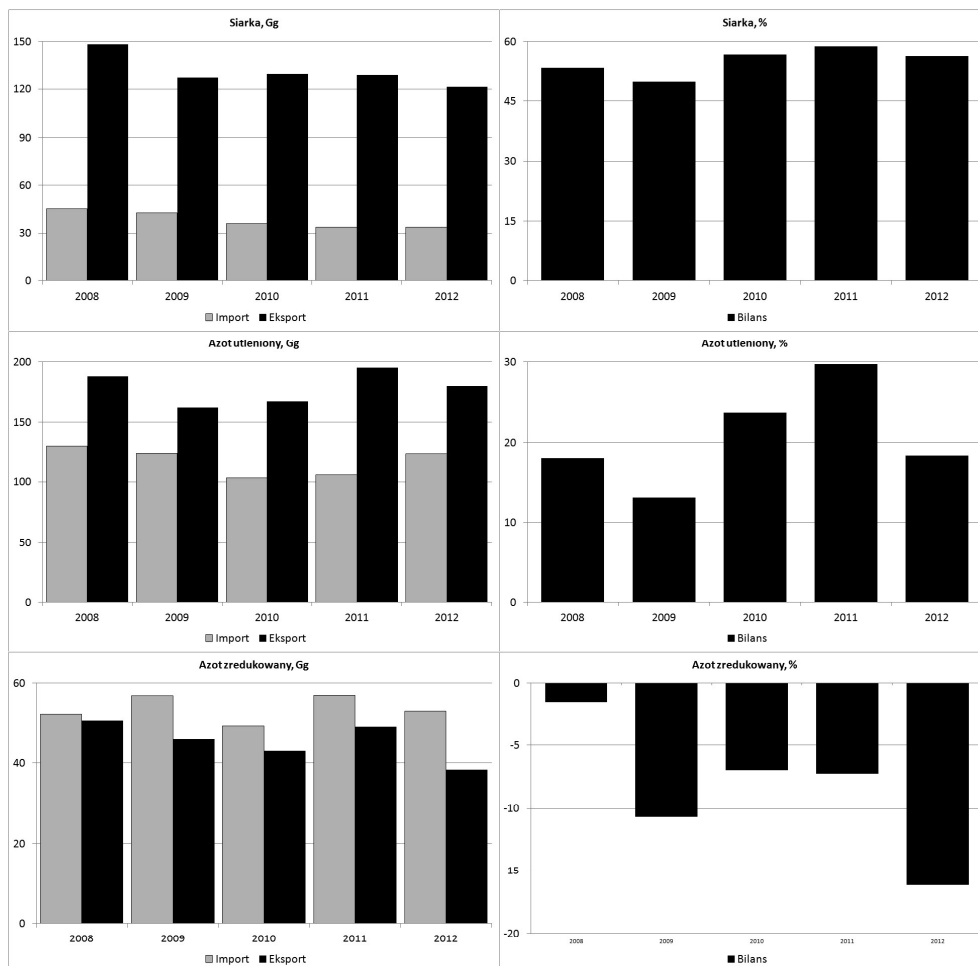
Ilustracją danych z tabeli 2 jest rysunek 5, na którym przedstawiono trendy wartości „importu”, „eksportu” i bilansu dla poszczególnych zanieczyszczeń.

Podsumowanie i wnioski

W pracy przedstawione zostały rezultaty obliczeń długoterminowych symulacji dyspersji zanieczyszczeń, wykonanych za pomocą operacyjnego modelu atmosferycznego transportu zanieczyszczeń. W trakcie badań przeprowadzono symulacje dyspersji zanieczyszczeń emitowanych ze źródeł zagregowanych do obszaru podstawowych jednostek siatki obliczeniowej modelu. Określono depozycję na terenie Polski zanieczyszczeń pochodzących ze źródeł emisyj-

nych, zlokalizowanych na terenie całej Europy – poza Polską – w celu wyznaczenia „importu” zanieczyszczeń, czyli strumienia zanieczyszczeń związanego z napływem transgranicznym do Polski oraz *vice versa* – depozycję na obszarze całej Europy zanieczyszczeń „eksportowanych” z Polski poza granice kraju.

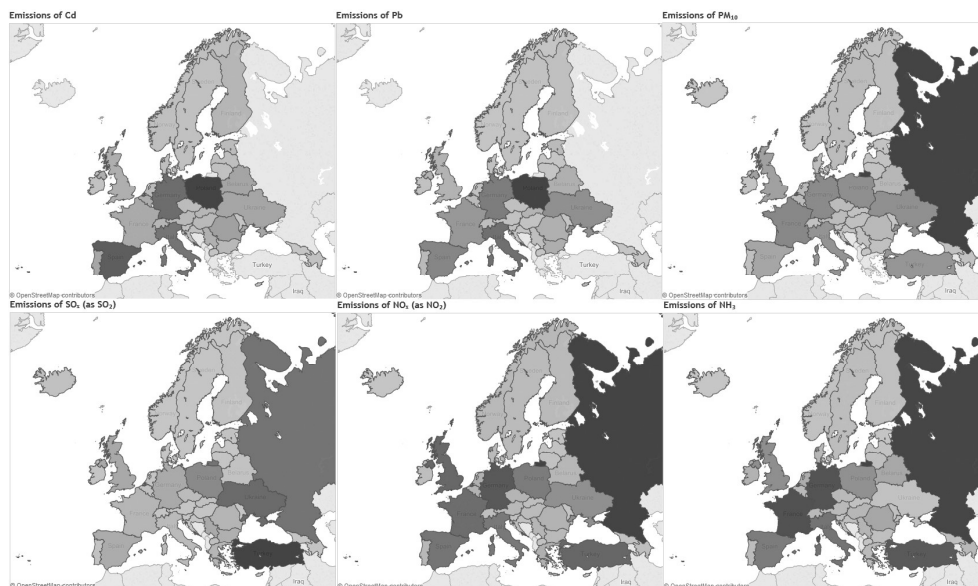
Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że w badanym bilansie transportu transgranicznego związków zakwaszających w rozpatrywanym okresie pięciu lat Polska pozostaje znaczącym „eksporterem netto” siarki i azotu utlenionego, natomiast jest „importerem netto” azotu w postaci zredukowanej. Innymi słowy, zdecydowanie więcej siarki czy azotu w formie utlenionej zostaje wyekspediowanych poza obszar Polski – ze źródeł polskich, niż napływa nad teren Polski – ze źródeł leżących za granicami kraju (sytuacja jest odwrotna, jeśli chodzi o azot zredukowany). Taki stan utrzymuje się w całym rozpatrywanym okresie, mimo zmniejszania się emisji większości rozpatrywanych zanieczyszczeń. Podobnie jak w przypadku metali ciężkich i PM_{10} (Mazur, 2016) jest to prawdopodobnie rezultatem tego, iż Polska jest jednym z większych emitentów siarki i tlenków azotu w skali europejskiej, a główne źródła amoniaku leżą poza Polską, jak też wynikiem dominujących kierunków wiatru, powodujących rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń od znaczących emitentów, jak Niemcy czy Francja, do Polski. Tak jak to uprzednio zostało zasugerowane, Polska jako kraj leżący w centrum domeny obliczeniowej modelu w daleko większym stopniu daje wkład do transportu transgranicznego i depozycji w krajach sąsiednich, zwłaszcza



RYSUNEK 5. Wartości i bilanse strumieni zanieczyszczeń transportowanych do Polski (w wyniku emisji poza Polską) i poza obszar Polski (ze źródeł polskich)
 FIGURE 5. Values and balances of pollutants' fluxes transported to Poland (as a result of emissions outside Poland) and out of Polish territory (from Polish sources)

leżących na wschód i północny wschód od Polski. Na rysunku 6 przedstawione są emisje kadmu, ołowiu, PM_{10} , tlenków siarki, tlenków azotu i amoniaku w 2012 roku z krajów zlokalizowanych w domenie obliczeniowej modelu. Widać, że jeśli rozważyć zanieczyszczenia, dla których bilans jest dodatni (tab. 2, siarka lub azot utleniony), to Polska, ro-

zumiana jako jedno źródło, jest ich największym lub jednym z największych emitentów. Dotyczy to zarówno siarki i azotu w formie utlenionej (panel górny lewy i górny środkowy na rys. 6), jak i metali ciężkich (Mazur, 2016). Sytuacja jest odmienna w przypadku bilansu ujemnego (tab. 2, azot zredukowany) – jak widać na rysunku 5 (panel dolny



RYSUNEK 6. Emisje zanieczyszczeń ujęte w modelu dyspersji w 2012 roku (w skali szarości od najniższej do najwyższej wartości rocznej). Panel górny lewy – emisje kadmu, środkowy – ołowiu, prawy – pyłu frakcji PM_{10} . Panel dolny lewy – emisje siarki (SO_2), środkowy – azotu utlenionego (NO_2), prawy – azotu zredukowanego (NH_3). Wszystkie dane zgodnie z raportami do CEIP (http://www.ceip.at/ms/ceip_home1/cap_home/data_viewers/officio_tableau)

FIGURE 6. Emission of pollutants included in dispersion model in 2012 (in a grayscale, from lowest to highest annual values). Upper left chart – emissions of Cadmium, middle – Lead, right – PM_{10} . Lower left chart – emissions of sulphur (SO_2), middle – oxidized nitrogen (NO_2), right – reduced nitrogen (NH_3). All data as reported to CEIP (source: webpage CEIP, 2015a, modified)

prawy), emisje azotu zredukowanego (NH_3) z Polski są generalnie na tle innych państw europejskich na średnim poziomie lub nawet poniżej. Taka sytuacja utrzymuje się w ciągu całego badanego okresu, zatem o wartości bilansu transportu zanieczyszczeń decydują zarówno czynniki geograficzne (lokalizacja źródła czy receptora), meteorologiczne (np. przeważające kierunki wiatru), jak i te związane bezpośrednio z wartościami emisji z danego źródła.

Szczegółowe dane ilustrujące bilanse pomiędzy Polską a poszczególnymi krajami sąsiednimi oraz morzem Bałtyckim, rozumianym jako receptor o szczególnym znaczeniu (zwłaszcza pod ką-

tem ochrony tego ekosystemu i działań w ramach Baltic Marine Environment Protection Commission – HELCOM (<http://www.helcom.fi/helcom-at-work/groups/pressure>) będą przedmiotem osobnej pracy.

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.
- Barrett, K. i Berge E. (1996). *Transboundary Air Pollution in Europe. Estimated dispersion of acidifying agents and of near surface ozone*. EMEP/MS-C-W Report 1/96, Oslo, Norwegia.

- Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., ... i Vitart, F. (2011). The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137, 553-597. doi:10.1002/qj.828.
- Bartnicki, J. (1999). *Computing Source-Receptor Matrices with the Eulerian Acid Deposition Model*. EMEP/MSC-W Note 5/99.
- EMEP (2006). *Transboundary Acidification, Eutrophication and Ground Level Ozone In Europe from 1990 to 2004 in support for the review of the Gothenburg Protocol*. Pobrano z http://www.emep.int/publ/reports/2006/status_report_1_2006_ch.pdf.
- EMEP (2013). *Transboundary Acidification, Eutrophication and Ground Level Ozone in Europe in 2011*. Pobrano z http://www.emep.int/publ/reports/2013/EMEP_status_report_1_2013.pdf.
- 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. *Ecological Chemistry and Engineering*, 5, 21 (3), 385-400. doi: 10.2478/eces-2014-0028.
- Mazur, A. (2016). Ocena bilansu transportu zanieczyszczeń powietrza pomiędzy Polską a krajami sąsiednimi w latach 2008-2012 na podstawie symulacji atmosferycznej dyspersji zanieczyszczeń. Część I. Metale ciężkie i pyły frakcji PM₁₀. *Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 25 (2), 72, 177-185.
- Simpson, D., Benedictow, A., Berge, H., Bergström, R., Emberson, L. D., Fagerli, H., ... i Wind, P. (2012). The EMEP MSC-W chemical transport model. Part 1: Model description, *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 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 pomiędzy Polską a krajami sąsiednimi w latach 2008–2012 na podstawie symulacji atmosferycznej dyspersji zanieczyszczeń. Część II – związki azotu i siarki. 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 dopływających 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. Druga część badań obejmowała związki zakwaszające siarki i azotu (w postaci zredukowanej i utlenionej). Okres badań, z uwagi na dostęp do danych meteorologicznych, a zwłaszcza emisyjnych ustalony został na lata 2008–2012. Podsumowano rezultaty obliczeń, wykonanych w obydwu częściach badań.

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 II – nitrogen and sulphur compounds. Atmospheric pollution is an important element of environmental degradation across Europe, including in Poland, while 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 Poland as a result of emissions from outside was assessed. Balancing these streams was based on the simulation of atmospheric dispersion using a suitable numerical model. The second part of the research pertained to aci-

difying compounds of sulphur and nitrogen (in both reduced and oxidized form). The research period due to the limited access to meteorological data, especially emission ones, was set for 2008–2012. The results of the calculations carried out in both parts of the study were also evaluated.

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