

Scientific Review – Engineering and Environmental Sciences (2017), 26 (4), 437–446
Sci. Rev. Eng. Env. Sci. (2017), 26 (4)
Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska (2017), 26 (4), 437–446
Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ. (2017), 26 (4)
<http://iks.pn.sggw.pl>
DOI 10.22630/PNIKS.2017.26.4.42

**Małgorzata CZARNECKA, Jadwiga NIDZGORSKA-LENCEWICZ,
Kacper RAWICKI**

Katedra Meteorologii i Kształtowania Terenów Zieleni, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Department of Meteorology and Landscape Architecture, West Pomeranian University of Technology in Szczecin

Warunki termiczne a zanieczyszczenie powietrza w wybranych miastach Polski w sezonie zimowym 2016/2017 Thermal conditions and air pollution in selected Polish cities during the winter period 2016/2017

Słowa kluczowe: inwersje temperatury, pył zawieszony, PM10, PM2,5, SO₂, regresja
Key words: temperature inversion, particulate matter, PM10, PM2.5, SO₂, regression

Wprowadzenie

O stanie arosanitarnym w chłodnej porze roku decydują przede wszystkim stężenia pyłu zawieszonego, ale także dwutlenku siarki, jako skutek tzw. niskiej emisji wywołanej głównie procesami grzewczymi. O ile stężenia SO₂ w Polsce na ogół mieszczą się w dopuszczalnej normie, o tyle emisja pyłu zawieszonego jest najczęstszą przyczyną naruszenia standardów jakości powietrza. W sezonie zimowym (XII–II) 2016/2017 w całym kraju rejestrowano liczne przy-

padki ponadnormatywnych stężeń dobowych pyłu zawieszonego PM10. W wielu rejonach wojewódzkie inspektoraty ochrony środowiska wydawały także komunikaty o przekroczeniach poziomu zanieczyszczeń (200 µg·m⁻³), o których według Prawa o ochronie środowiska trzeba informować społeczeństwo, ale często także i o ryzyku przekroczenia poziomu alarmowego (300 µg·m⁻³).

Wysokie stężenia pyłu zawieszonego w naszych miastach są przede wszystkim skutkiem tzw. niskiej emisji z lokalnych kotłowni węglowych i indywidualnych palenisk domowych, zwykle opalanych węglem słabej jakości, zasiarczonym, o dużej zawartości popiołu i niskich parametrach grzewczych, często w nieprzystosowanych i wyeksploatowanych

paleniskach. O wielkości emisji zanieczyszczeń pochodzących z procesów grzewczych decyduje ich intensywność uwarunkowana przebiegiem temperatury. Statystycznie istotną rolę temperatury powietrza w kształtowaniu zmienności stężeń zanieczyszczeń powietrza w chłodnej porze roku, najczęściej w ujęciach średniej dobowej, rzadziej temperatury minimalnej czy maksymalnej, wykazano w bardzo wielu pracach (Walczewski, 2005; Majewski, Kleniewska i Brandyk, 2011; Krynicka i Drzeniecka-Osiadacz, 2013; Oleniacz, Bogacki, Rzeszutek i Kot, 2014; Rawicki, 2014; Ćwiek i Majewski, 2015; Nidzgorska-Lencewicz i Czarnecka, 2015).

Temperatura powietrza jako podstawowy element warunków meteorologicznych kształtuje także procesy dynamiczne zachodzące w troposferze. Procesy te decydują o rozprzestrzenianiu się zanieczyszczeń od źródeł emisji, powodując ich rozpraszanie, ale mogą być także istotnym czynnikiem ograniczenia naturalnej wentylacji. Warunki sprzyjające lub ograniczające pionową wymianę zanieczyszczonego powietrza wiążą się ściśle ze stratyfikacją termiczną dolnej troposfery. Najgorsze sytuacje pogodowe, uniemożliwiające pionową wymianę powietrza, stwarzają inwersje temperatury zaliczane do tzw. termicznych warstw hamujących (Parczewski, 1976). W wielu publikacjach opisujących sezony bądź epizody zimowe o podwyższonej lub bardzo wysokiej koncentracji zanieczyszczeń wśród czynników odpowiedzialnych za taką sytuację wskazuje się właśnie występowanie warstw inwersyjnych w dolnej części warstwy granicznej atmosfery. Prace z tego zakresu nie są jednak zbyt liczne, przede wszyst-

kim ze względu na to, że ciągle pomiary temperatury powietrza w profilu pionowym wykonują tylko stacje aerologiczne, a opracowanie wyników pomiarów jest bardzo pracochłonne. Inne metody identyfikacji zjawiska inwersji na ogół są prowadzone w krótkich seriach pomiarowych w wybranych lokalizacjach. Wyniki oceny oddziaływania warunków inwersyjnych, identyfikowanych i klasyfikowanych różnymi metodami na stan zanieczyszczenia powietrza przedstawili m.in.: Malek, Davis, Martin i Silva (2006), Godłowska, Tomaszowska i Hajto (2008), Wallace i Kanaroglou (2009), Bokwa (2011), Gramsch, Cáceres, Oyola, Reyes, Vásquez, Rubio i Sánchez (2014), LARGERON i Staquet (2016), Czarnecka, Nidzgorska-Lencewicz i Rawicki (2016), Czarnecka i Nidzgorska-Lencewicz (2017).

Celem opracowania jest statystyczne udokumentowanie wpływu warunków termicznych w dolnej części troposfery na zanieczyszczenie powietrza pyłem zawieszonym i dwutlenkiem siarki w Gdańsku, we Wrocławiu i w Warszawie.

Material i metody

Podstawę opracowania stanowiły wyniki pomiarów radiosondażowych wykonywanych na Stacji Hydrologiczno-Meteorologicznej IMGW-PIB w Łebie (nr WMO: 12120), w Legionowie (nr WMO: 12374) i we Wrocławiu (nr WMO: 12425) w dwóch terminach, o 00:00 UTC i 12:00 UTC, podczas kalendarzowej zimy (XII–II) 2016/2017. Na podstawie pionowych profili temperatury powietrza określono miąższość przygruntowych (dolnych)

warstw inwersyjnych, a także wysokość podstawy oraz miąższość pierwszej (najniższej położonej) warstwy w swobodnej atmosferze (górnej), oddzielnie w porze nocnej (00:00 UTC) i dziennej (12:00 UTC). Miąższość inwersji, zarówno przygruntowej (dolnej), jak wzniesionej (górnej), była równoznaczna z grubością warstwy z dodatnim pionowym gradientem temperatury. W przypadku inwersji dolnej warstwa rozciągała się bezpośrednio od powierzchni Ziemi do wysokości, powyżej której temperatura powietrza przybierała rozkład normalny, czyli wykazywała spadek wraz z wysokością. W atmosferze, szczególnie nad obszarami miejsko-przemysłowymi, niejednokrotnie stwierdza się występowanie wielu warstw inwersji górnych, rozdzielonych warstwami powietrza, w których temperatura spada wraz z wysokością. W dostępnej, stosunkowo nielicznej literaturze z zakresu inwersji przedstawiane są nie tylko bardzo różne sposoby identyfikacji samego zjawiska, ale także różne klasyfikacje inwersji wzniesionych. W niniejszej pracy, za Parczewskim (1976), do inwersji górnych zaliczono warstwy zalegające na wysokości do 1000 m.

Wyniki standardowych pomiarów temperatury powietrza, w postaci średnich godzinnych wartości, pochodziły z trzech stacji IMGW-PIB w Gdańsku (Rębiechowo), Warszawie (Okęcie) i we Wrocławiu. Nawiązując do podziału inwersji na dzienne i nocne, obliczono temperaturę dla dwóch przedziałów czasowych: 07:00–18:00 (średnia dzienna) oraz 19:00–06:00 (średnia nocna).

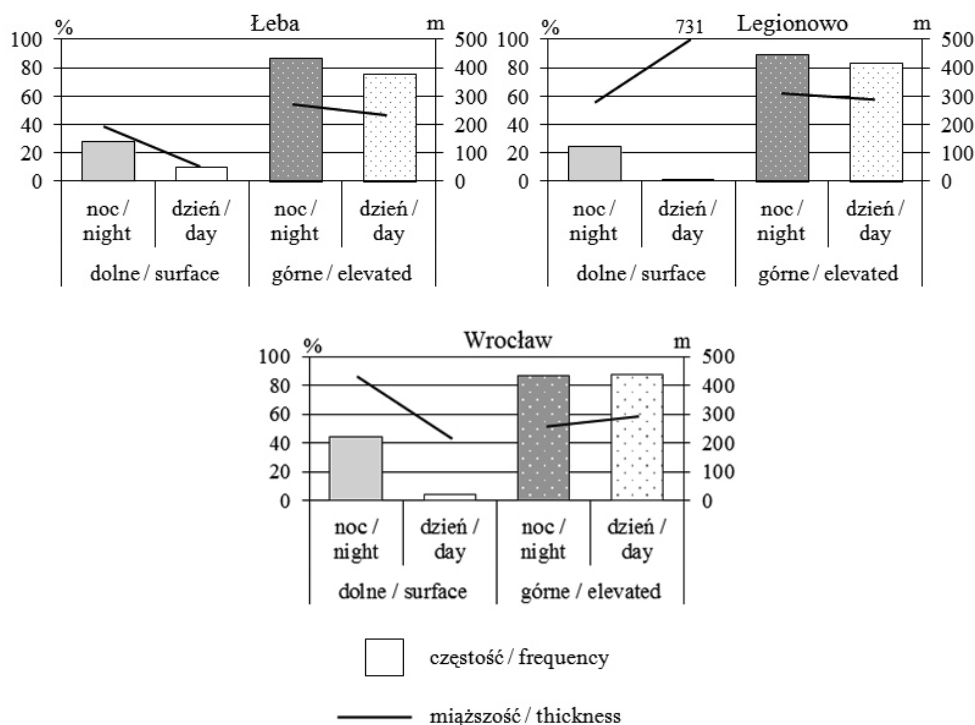
Dane imisyjne stanowiły godzinne stężenia pyłu zawieszonego PM₁₀ i PM_{2,5} oraz dwutlenku siarki z automa-

tycznych stacji imisyjnych, wytypowanych z sieci monitoringu jakości powietrza. Były to stacje Gdańsk – Wrzeszcz, Warszawa – Targówek oraz Wrocław – Psie Pole. Gdańsk – Wrzeszcz należy do Fundacji Agencja Regionalnego Monitoringu Atmosfery Aglomeracji Gdańskiej (ARMAAG) stacje w Warszawie i we Wrocławiu to stacje wojewódzkiego inspektoratu ochrony środowiska (WIOŚ). Przy ich wyborze kierowano się kompletnością i ciągłością wyników pomiarów, a jednocześnie (w miarę możliwości) – położeniem stacji w centralnej części miasta.

Wpływ warunków termicznych na zmienność dobowych stężeń zanieczyszczeń oceniono przy zastosowaniu analizy regresji liniowej, na poziomach istotności $\alpha = 0,05$ i $\alpha = 0,01$. Wyniki przedstawiono za pomocą współczynników determinacji R^2 . Zmienne, których rozkłady nie spełniały warunku normalności, poddano przekształceniu formułą Boxa-Coxa. Obliczenia wykonano w programie Statistica 12.

Wyniki

Średnia temperatura trzech miesięcy kalendarzowej zimy (XII–II) obliczona dla 22 stacji meteorologicznych (Biuletyn Państwowej Służby Hydrologiczno-Meteorologicznej 2016–2017) była o około 0,5°C wyższa od normy. Według klasyfikacji stosowanej w Biuletynie Monitoringu Klimatu Polski (2017) tylko luty był termicznie w normie. Zdecydowanie najcieplejszy (o około 2°C w porównaniu do średniej) był grudzień, określony jako lekko ciepły. W sezonie zimowym 2016/2017 najniższą średnią miesięczną temperaturą powietrza (oko-



RYSUNEK 1. Częstość [%] i średnia miąższość warstw inwersyjnych podczas kalendarzowej zimy (XII–II) 2016/2017

FIGURE 1. Frequency [%] and the average thickness of inversion layers during calendar winter (December – February) 2016/2017

ło -4°C) charakteryzował się styczeń, który w skali kraju zakwalifikowano jako chłodny.

Warunki termiczne dolnej części troposfery kształtowały się także pod wpływem inwersji termicznych. Jak wynika z analizy rysunku 1, inwersje górne (wzniesione) stwierdzono w około 80% zarówno nocy, jak i dni. Przygruntowe (dolne) warstwy inwersyjne tworzyły się przede wszystkim nocą, z około 20% częstością w Łebie i Legionowie, a dwukrotnie częściej – we Wrocławiu; generalnie rzadziej niż w dziesięcioleciu 2004–2014 (Czarnecka i in., 2016). Dienne inwersje dolne częściej

zdarzały się w Łebie niż we Wrocławiu, w Legionowie stwierdzono zaś tylko jeden przypadek dziennej warstwy przygruntowej, o grubości ponad 700 m.

W sezonie zimowym (XII–II) 2016/2017 zdecydowanie najmniejsze zanieczyszczenia powietrza dwutlenkiem siarki i pyłem zawieszonym obliczono dla Gdańska (tab. 1). Średnie sezonowe stężenia SO_2 i pyłu PM10 były w nim dwukrotnie niższe, a pyłu PM2,5 – nawet trzykrotnie niższe niż w Warszawie i we Wrocławiu. Najwyższe stężenia zanieczyszczeń rejestrowano w styczniu, niewiele niższe – w lutym, a zdecydowanie najniższe – w grudniu (rys. 1).

TABELA 1. Średnie stężenia [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] dwutlenku siarki oraz pyłu zawieszonego PM10 i PM2,5 podczas kalendarzowej zimy (XII–II) 2016/2017
TABLE 1. Average concentrations [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] of sulfur dioxide and particulate matter PM10 and PM2.5 during calendar winter (December – February) 2016/2017

Miasto / City	SO ₂	PM10	PM2,5
Gdańsk	5,3	26,8	14,9
Warszawa	7,9	52,1	46,6
Wrocław	9,4	56,1	49,1

TABELA 2. Liczba dni z przekroczeniami normy dobowej stężeń pyłu PM10 podczas kalendarzowej zimy (XII–II) 2016/2017

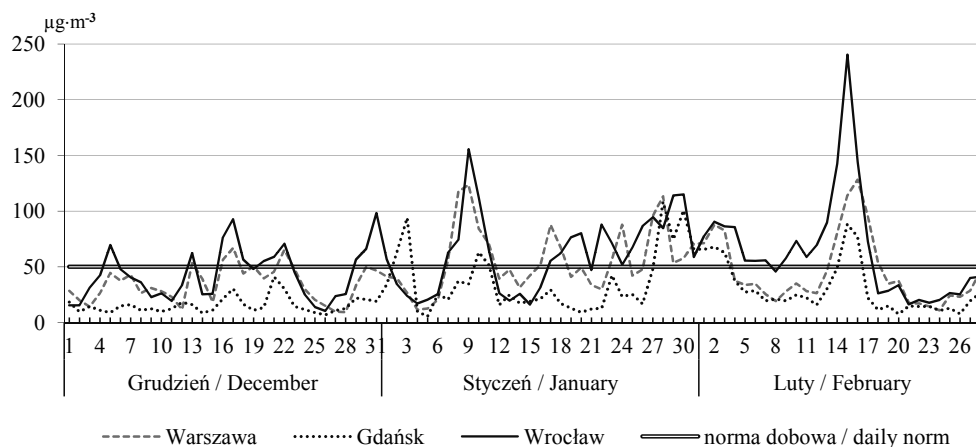
TABLE 2. Number of days during calendar winter (December – February) 2016/2017 when daily levels of PM10 were exceeded

Miasto / City	XII	I	II	XII–II
Gdańsk	0	7	5	12
Warszawa	5	18	10	33
Wrocław	11	20	16	47

Mimo że zima 2016/2017 generalnie należała do ciepłych, rejestrowano w niej liczne, ponadnormatywne stężenia pyłu PM10, głównie w styczniu i lutym (tab. 2). Najwięcej przekroczeń dobowej normy (w ponad połowie dni okresu XII–II) stwierdzono we Wrocławiu, mniej – około 37% dni w Warszawie, a najmniej – tylko w 13% dni w Gdańsku. Największe przekroczenia normy dobowej stwierdzono we Wrocławiu: prawie pięciokrotne – 15 lutego i około trzykrotne – 9 stycznia (rys. 2).

Wyniki statystycznej oceny wpływu warunków termicznych na zmienność stężeń analizowanych rodzajów zanieczyszczeń zawierają tabele 3 i 4. Ze względu na nieliczne przypadki wystąpienia dziennych inwersji przygruntowych nie była możliwa ich ocena.

W sezonie zimowym (XII–II) 2016/2017 wszystkie analizowane cechy reżimu termicznego istotnie wyjaśniały zmienność stężeń zanieczyszczeń w trzech ocenianych aglome-



RYSunEK 2. Dobowe stężenie [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] pyłu zawieszonego PM10 podczas kalendarzowej zimy (XII–II) 2016/2017

FIGURE 2. Daily concentration [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] of particulate matter PM10 during calendar winter (December – February) 2016/2017

TABELA 3. Współczynniki determinacji R^2 [%] dla zależności średnich dobowych stężeń SO_2 , pyłów PM_{10} i $\text{PM}_{2,5}$ od temperatury powietrza i charakterystyk warstw inwersyjnych podczas kalendarzowej zimy (XII–II) 2016/2017

TABLE 3. Coefficients of determination R^2 [%] for relationship between SO_2 , PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ daily concentrations and air temperature and characteristics of inversion layers during calendar winter (December – February) 2016/2017

Zanieczyszczenie Pollution	Temperatura Temperature		Miaższość inwersji dolnej Thickness of the surface inversion	Podstawa inwersji wzniesionej The base of the elevated inversion		Miaższość inwersji wzniesionej Thickness of the first elevated inversion	
	noc night	dzień day	noc night	noc night	dzień day	noc night	dzień day
Grudzień – Luty / December – February							
SO_2	(–) 27,4	(–) 14,1	(+) 30,5	(–) 1,7*	(–) 17,9	(+) 2,0*	(+) 9,7
PM_{10}	(–) 24,2	(–) 9,2	(+) 20,1	(–) 3,7	(–) 17,4	(+) 3,2	(+) 7,5
$\text{PM}_{2,5}$	(–) 23,2	(–) 9,1	(+) 23,7	(–) 1,8*	(–) 16,6	(+) 2,2*	(+) 10,5
Grudzień / December							
SO_2	(–) 44,2	(–) 32,0	·	(–) 6,8*	(–) 23,3	(+) 5,6*	(+) 14,7
PM_{10}	(–) 52,7	(–) 37,2	·	(–) 16,4	(–) 13,0	(+) 7,0*	(+) 16,4
$\text{PM}_{2,5}$	(–) 51,5	(–) 36,0	·	(–) 13,3	(–) 12,3	·	(+) 14,8
Styczeń / January							
SO_2	(–) 30,2	(–) 12,7	(+) 55,2	·	(–) 37,1	·	(+) 11,5
PM_{10}	(–) 28,7	(–) 12,4	(+) 41,0	·	(–) 34,2	·	(+) 5,8*
$\text{PM}_{2,5}$	(–) 33,8	(–) 14,2	(+) 47,8	·	(–) 32,9	·	(+) 7,0*
Luty / February							
SO_2	(–) 16,3	(–) 6,7*	(+) 26,1	(–) 8,7*	(–) 30,5	·	(+) 5,8*
PM_{10}	(–) 11,5	·	(+) 40,0	(–) 14,9	(–) 32,1	·	·
$\text{PM}_{2,5}$	(–) 11,0	·	(+) 40,6	(–) 11,1	(–) 25,7	·	·

(+) / (–) zależność dodatnia/ujemna; · zależność nieistotna przy $\alpha = 0,05$; * zależność istotna przy $\alpha = 0,05$; pozostałe wartości R^2 istotne przy $\alpha = 0,01$.

(+) / (–) relationship positive/negative; · non significant relationship at $\alpha = 0.05$; * significant at $\alpha = 0.05$; other values R^2 significant at $\alpha = 0.01$.

racjach miejskich, na ogół przy $\alpha = 0,01$ (tab. 3). Wzrost emisji dwutlenku siarki oraz pyłu zawieszonego obu frakcji następował głównie w warunkach spadku temperatury powietrza oraz przy rosnącej miaższości inwersji przygruntowych w nocnej porze doby. Temperatura po-

wietrza była dominującym czynnikiem w najcieplejszym miesiącu zimy, czyli w grudniu, i to w obu porach doby. Miaższość nocnych inwersji przygruntowych, nieistotna dla wielkości emisji w grudniu, okazała się głównym czynnikiem jej wzrostu nie tylko w styczniu, ale także

TABELA 4. Współczynniki determinacji R^2 [%] dla zależności średnich dobowych stężeń SO_2 , pyłu PM_{10} i $\text{PM}_{2,5}$ w Gdańsku, Warszawie i we Wrocławiu od temperatury powietrza i charakterystyk warstw inwersyjnych podczas kalendarzowej zimy (XII–II) 2016/2017

TABLE 4. Coefficients of determination R^2 [%] for relationship between SO_2 , PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ daily concentrations in Gdańsk, Warszawa and Wrocław and air temperature and characteristics of inversion layers during calendar winter (December – February) 2016/2017

Zanieczyszczenie Pollution	Temperatura Temperature		Miąższość inwersji dolnej Thickness of the surface inversion	Podstawa inwersji wzniesionej The base of the elevated inversion		Miąższość inwersji wzniesionej Thickness of the first elevated inversion	
	noc night	dzień day		noc night	dzień day	noc night	dzień day
Gdańsk							
SO_2	(-) 59,9	(-) 43,9	(+) 27,6	(-) 9,8	(-) 18,0	·	·
PM_{10}	(-) 31,9	(-) 19,2	(+) 29,7	(-) 19,3	(-) 20,6	(+) 9,4	·
$\text{PM}_{2,5}$	(-) 37,4	(-) 22,0	(+) 31,0	(-) 19,7	(-) 28,9	(+) 7,8*	·
Warszawa							
SO_2	(-) 13,1	(-) 4,5*	·	·	(-) 27,0	·	·
PM_{10}	(-) 20,8	(-) 9,2	·	(-) 9,4	(-) 36,6	(+) 5,8*	·
$\text{PM}_{2,5}$	(-) 20,1	(-) 9,0	·	(-) 8,7	(-) 36,9	(+) 5,7*	·
Wrocław							
SO_2	(-) 42,7	(-) 25,2	(+) 21,6	·	(-) 48,1	(+) 5,3*	(+) 20,3
PM_{10}	(-) 44,7	(-) 25,1	(+) 14,7*	(-) 7,6*	(-) 49,5	·	(+) 22,7
$\text{PM}_{2,5}$	(-) 48,3	(-) 29,5	(+) 14,2*	(-) 5,9*	(-) 50,8	·	(+) 24,2

(+) / (-) zależność dodatnia/ujemna; · zależność nieistotna przy $\alpha = 0,05$; * zależność istotna przy $\alpha = 0,05$; pozostałe wartości R^2 istotne przy $\alpha = 0,01$.

(+) / (-) relationship positive/negative; · non significant relationship: at $\alpha = 0.05$; * significant at $\alpha = 0.05$; other values R^2 significant at $\alpha = 0.01$.

w lutym. Główną cechą inwersji wzniesionych, korzystnie wpływającą na obniżenie stężeń, jest wysokość podstawy, która może być traktowana jako wysokość warstwy mieszania turbulencyjnego. W każdym miesiącu zimy w okresie 2016/2017 większy wpływ na wielkość emisji miała wysokość zalegania podstawy inwersji górnych w ciągu dnia, zdecydowanie mniejszy – nocą. Z przeprowadzonej analizy statystycznej wynika

jednak, że nie bez znaczenia jest także miąższość pierwszej, najniższej położonej inwersji górnej, decydująca o jej „szczelności” dla dyspersji zanieczyszczeń. Statystycznie istotny, ale negatywny wpływ miąższości najniższej położonych warstw inwersji wzniesionej wyraźniej zaznaczył się także podczas dnia. W grudniu współczynniki determinacji, wyrażające zależność stężeń ocenianych zanieczyszczeń z obydwoma cechami

dziennych inwersji wzniesionych, wysokością podstawy i miąższością, były zbliżone, w pozostałych miesiącach zimy niekorzystny wpływ miąższości był zaś wyraźnie mniejszy lub statystycznie nieistotny.

Znaczenie temperatury powietrza, przede wszystkim w nocnej porze doby (19:00–06:00), jako czynnika emisji zanieczyszczeń z procesów grzewczych zimą (XII–II) 2016/2017, potwierdziły także wyniki dla trzech miast (tab. 4). Mimo że zima 2016/2017 była w Warszawie wyraźnie chłodniejsza ($-1,1^{\circ}\text{C}$) niż we Wrocławiu ($0,5^{\circ}\text{C}$) czy w Gdańsku ($1,2^{\circ}\text{C}$), to wpływ temperatury powietrza na wielkość stężeń ocenianych zanieczyszczeń był zdecydowanie mniejszy. Miąższość warstw przygruntowych tworzących się nocą, jako głównego czynnika warunków inwersyjnych decydujących o zmienności stężeń w ujęciu trzech miast, potwierdziły tylko wyniki dla Gdańska. Wpływ nocnych inwersji dolnych na wielkość emisji we Wrocławiu był znacznie słabszy, pomimo że występowały dwukrotnie częściej, a w Warszawie okazał się statystycznie nieistotny. W obu miastach największe współczynniki determinacji wytestowano dla wysokości położenia podstawy inwersji wzniesionych występujących w daytime porze doby. Najsilniejszy związek stężeń SO_2 oraz pyłu frakcji PM_{10} i $\text{PM}_{2,5}$ z dziennymi inwersjami wzniesionymi stwierdzono we Wrocławiu; nie tylko z wysokością podstawy, ale także z ich miąższością.

Ze względu na różne metody pomiaru i sposoby opracowania oraz stosowane klasyfikacje inwersji trudno o dyskusję uzyskanych wyników ze stosunkowo nielicznymi prezentowanymi w literatu-

rze, pochodzącymi ponadto z różnej długości serii pomiarowych, odmiennych stref klimatycznych i różnych warunków topograficznych. Generalnie potwierdziły one istotny związek stężeń zanieczyszczeń z warunkami inwersyjnymi, nawet w pojedynczym i to stosunkowo łagodnym sezonie zimowym. Tym bardziej zaskakująca jest zgodność wyników z takiego sezonu z wynikami oceny zależności stężeń SO_2 i pyłu PM_{10} w Trójmieście i we Wrocławiu od inwersji termicznych przeprowadzonej dla wielu zim, zarówno przeciętnych, jak i kontrastowych termicznie (Czarnecka i in., 2016; Czarnecka i Nidzgorska-Lencewicz, 2017). Wykazanie negatywnego oddziaływania nocnych inwersji przygruntowych w zimie 2016/2017 jest o tyle oczywiste, że tego typu warstwy tworzą się głównie w chłodnej porze doby. Nawet w dziesięcioleciu 2004/2005–2013/2014 nieliczne przypadki dziennych inwersji dolnych wykluczały możliwość ich statystycznej oceny (Czarnecka i in., 2016). Ważne wydają się być wyniki dokumentujące znaczenie w okresie 2016/2017 tych samych parametrów inwersji wzniesionych, które według cytowanych wcześniej prac najsilniej determinowały wielkość i zmienność emisji w 9–10-letnich seriach zim.

Podsumowanie

Kalendarzowa zima (XII–II) 2016/2017 była cieplejsza niż przeciętnie; tylko w styczniu temperatura była niższa. Pomimo tego temperatura powietrza wywierała silny wpływ na zmienność stężeń dwutlenku siarki i pyłu zawieszonego obu frakcji, szczególnie w najcieplejszym miesiącu, w grudniu.

Poza tym we wszystkich miesiącach w każdym mieście znacznie większe znaczenie dla wielkości emisji miała temperatura w porze nocnej (19:00–6:00). Warunki inwersyjne kształtowały głównie inwersje wzniesione występujące ze zblizoną, około 80% częstością w obu porach doby. Inwersje przygruntowe tworzyły się przede wszystkim nocą. Najgrubsze nocne inwersje przygruntowe i jednocześnie najczęściej występujące zarejestrowano we Wrocławiu.

Niekorzystny wpływ na wielkość stężeń SO_2 , pyłu frakcji PM_{10} i $\text{PM}_{2,5}$ zimą 2016/2017 miała miąższość warstw inwersyjnych. Nocne inwersje przygruntowe istotnie kształtowały emisję w Gdańsku i we Wrocławiu. Równie duże znaczenie (w odniesieniu do pyłu zawieszonego nawet większe) miała we Wrocławiu miąższość inwersji wzniesionych występujących w ciągu dnia. Zjawiskiem jednoznacznie korzystnym dla dyspersji zanieczyszczeń i w konsekwencji do obniżenia ich stężeń była duża miąższość dziennej warstwy mieszania, uwarunkowana wysokim załeganiem podstawy inwersji wzniesionych. Ta cecha górnych inwersji najlepiej wyjaśniała emisję wszystkich analizowanych zanieczyszczeń we Wrocławiu.

Wyniki uzyskane dla jednego stosunkowo ciepłego sezonu zimowego wskazują na potrzebę badań nad rolą inwersji temperatury w kształtowaniu dyspersji zanieczyszczeń w dłuższych okresach, obejmujących także mroźne zimy. Jest to o tyle ważne, o ile mimo postępującego ocieplenia klimatu, zima jest porą roku charakteryzującą się w naszym kraju największą zmiennością międzyroczną.

Literatura

- Biuletyn Państwowej Służby Hydrologiczno-Meteorologicznej (2016-2017). *IMGW-PIB*, 12 (2016), 1, 2 (2017).
- Biuletyn Monitoringu Klimatu Polski (2017). Pobrano z lokalizacji: http://old.imgw.pl/ext-cont/biuletyn_monitoringu.
- Bokwa, A. (2011). Influence of air temperature inversions on the air pollution dispersion conditions in Krakow. *Prace Geograficzne Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego* 126, 41-51.
- Ćwiek, K. i Majewski, G. (2015). Wpływ elementów meteorologicznych na kształtowanie się stężeń zanieczyszczeń powietrza na przykładzie Krakowa. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 67, 54-66.
- Czarnecka, M. Nidzgorska-Lencewicz, J. (2017). The impact of thermal inversion on the variability of PM_{10} concentration in winter seasons in Tricity. *Environmental Protection Engineering*, 43(4), 157-172.
- Czarnecka, M., Nidzgorska-Lencewicz, J. i Rawicki, K. (2016). Thermal inversions and sulphure dioxide concentrations in some Polish cities in the winter season. *Journal of Elementology*, 21(4), 1001-1015. doi: 10.5601/jelem.2016.21.1.1038.
- Godłowska, J., Tomaszewska, A.M. i Hajto, M. (2008). Związek wysokości emisji zanieczyszczeń w Krakowie z warunkami w miejskiej warstwie granicznej, określonymi na podstawie danych sodarowych. W: *Klimat i bioklimat miast* (strony 455-465). Łódź: Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego.
- Gramsch, E., Cáceres, D., Oyola, P., Reyes, F., Vásquez, Y., Rubio, M.A. i Sánchez, G. (2014). Influence of surface and subsidence thermal inversion on $\text{PM}_{2.5}$ and black carbon concentration. *Atmospheric Environmental*, 98, 290-298.
- Krynicka, J., Drzeniecka-Osiadacz, A. (2013). Analysis of variability in PM_{10} concentration in the Wrocław Agglomeration. *Polish Journal of Environmental Studies*, 22(4), 1091-1099.
- Largerion, Y. i Staquet, C. (2016). Persistent inversion dynamics and wintertime PM_{10} air pollution in Alpine valleys. *Atmospheric Environmental*, 135, 92-108.

- Majewski, G., Kleniewska, M. i Brandyk, A. (2011). Seasonal variation of particulate matter mass concentration and content of metals. *Polish Journal of Environmental Studies*, 20(2), 417-427.
- Malek, E., Davis, T., Martin, R.S. i Silva, P.J. (2006). Meteorological and environmental aspects of one of the worst national air pollution episodes (January, 2004) in Logan, Cache Valley, Utah, USA. *Atmospheric Research*, 79(2), 108-122.
- Nidzgorska-Lencewicz, J., Czarnecka, M. (2015). Winter weather conditions vs. air quality in Tricity, Poland. *Theoretical and Applied Climatology*, 119(3-4), 611-627.
- Oleniacz, R., Bogacki, M., Rzesutek, M. i Kot, A. (2014). Meteorologiczne determinanty jakości powietrza w Krakowie. W J. Koniecznyński (red.), *Ochrona powietrza w teorii i praktyce* (strony 163-178). Zabrze: Wydawnictwo IPiS PAN.
- Parczewski, W. (1976). Termiczne warstwy hamujące w Polsce. *Prace Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej*, 8.
- Rawicki, K. (2014). Variability of particulate matter concentrations in Poland in the winter 2012/2013. *Folia Pomeranae Universitatis Technologiae Stetinensis*, 312(31), 143-152.
- Walczewski, J. (2005). The meteorological and climatological conditions of the air pollution dispersion in the atmosphere. *Przegląd Geofizyczny*, 3-4, 177-194.
- Wallace, J. i Kanaroglou, P. (2009). The effect of temperature inversions on ground-level nitrogen dioxide (NO₂) and fine particulate matter (PM_{2.5}) using temperature profiles from the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS). *Science of the Total Environment* 407(18), 5085-5095.

Streszczenie

Warunki termiczne a zanieczyszczenie powietrza w wybranych miastach Polski w sezonie zimowym 2016/2017. W pracy przedstawiono statystyczną ocenę wpływu temperatury powietrza oraz inwersji termicznych (dolnych i górnych) na stężenia pyłu zawieszonego frakcji PM₁₀ i PM_{2,5} oraz dwutlenku siarki w Gdańsku, we Wrocławiu i w Warszawie podczas kalendarzowej zimy (XII–II) 2016/2017. Wykazano, że

w analizowanym sezonie zimowym temperatura powietrza w przygrunтовой warstwie powietrza (do 200 cm) wywierała silny wpływ na zmienność stężeń dwutlenku siarki i pyłu zawieszonego obu frakcji w każdym mieście, zwłaszcza w porze nocnej (19:00–6:00). Niekorzystny wpływ na wielkość analizowanych zanieczyszczeń miała przede wszystkim miąższość dolnych warstw inwersyjnych, podczas gdy zjawiskiem jednoznacznie korzystnym dla dyspersji zanieczyszczeń była duża miąższość dziennej warstwy mieszania, uwarunkowana zaleganiem podstawy inwersji górnych.

Summary

Thermal conditions and air pollution in selected Polish cities during the winter period 2016/2017. The study presents statistical evaluation of the effect of air temperature and thermal inversion (surface and elevated) on concentrations of PM₁₀ and PM_{2.5} and sulphur dioxide in Gdańsk, Wrocław and Warsaw during calendar winter (December – February) 2016/2017. It was shown that in the analysed winter period, air temperature in the ground layer (up to 200 cm) strongly influenced variability in concentrations of sulphur dioxide and both fractions of particulate matter in each city, particularly in the night-time (19:00–6:00). Negative effect on the amount of analyzed pollutants were mainly the thickness of surface inversion layers. However, large thickness of day-time mixing layer determined by high altitude of the base of elevated inversion had a markedly positive effect on dispersion of pollutants.

Authors' address:

Małgorzata Czarnecka,
Jadwiga Nidzgorska-Lencewicz, Kacper Rawicki
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny
w Szczecinie
Katedra Meteorologii i Kształtowania Terenów
Zieloni
ul. Papieża Pawła VI 3, 71-469 Szczecin
Poland
e-mail: mczarnecka@zut.edu.pl