

Małgorzata KLENIEWSKA

Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska SGGW
Department of Hydraulic Engineering and Environmental Recultivation WAU
Zakład Meteorologii i Klimatologii
Department of Meteorology and Climatology

Związek między stężeniem dwutlenku siarki w powietrzu atmosferycznym a rodzajem napływających mas powietrza w półroczu chłodnym w Ursynowie SGGW
The relationship between sulphur dioxide concentration and kind of air-masses inflow in winter half-year period in Ursynów WAU

Słowa kluczowe: dwutlenek siarki, zanieczyszczenia powietrza, masy powietrza
Key words: sulphur dioxide, air pollution, air masses

Wprowadzenie

Wartość stężenia dwutlenku siarki w powietrzu atmosferycznym zależy od wielkości emisji i panujących warunków meteorologicznych, określających możliwości rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń. Najważniejsze elementy meteorologiczne determinujące przemiany i rozprzestrzenianie SO_2 w atmosferze to: prędkość i kierunek wiatru, temperatura powietrza, pionowy gradient temperatury powietrza, wilgotność względna powietrza, opady atmosferyczne. Dokładna znajomość i opisanie związków między warunkami meteorologicznymi a wielkością stężenia zanie-

czyszczenia powietrza jest istotna w prognozowaniu wielkości stężeń oraz przy modelowaniu rozprzestrzeniania i transportu zanieczyszczeń. Zagadnienia te podejmowane były w pracach autorki (Kleniewska 2000, 2001a, b).

W niniejszej pracy podjęto próbę określenia związków między wielkością stężenia dwutlenku siarki a elementami meteorologicznymi w zależności od rodzaju zalegającej masy powietrza (wewnątrz danej masy powietrza) oraz w dniach po przejściu frontu atmosferycznego (co związane jest ze zmianą masy).

Materiał i metoda

W badaniach wykorzystano dane ze stacji Ursynów SGGW, położonej na południowych przedmieściach Warszawy. Są to wartości średniodobowe stę-

zenia dwutlenku siarki i elementów meteorologicznych: temperatury powietrza, wilgotności względnej powietrza, prędkości wiatru oraz sumy dobowej wysokości opadu atmosferycznego i przeważający kierunek wiatru. Z *Codziennego Biuletynu Synoptycznego*, opracowywanego w IMGW, zaczerpnięto informacje o rodzaju mas powietrza występujących w rejonie Warszawy. Materiał pomiarowy obejmuje miesiące półrocza chłodnego od X 1997 roku do XII 2002 roku. W pracy obliczono średnie wartości stężenia dwutlenku siarki wewnątrzmasowe od X 1997 roku do XII 2002 roku (rys. 1) i dla przypadków po przejściu frontu atmosferycznego (tab. 2) oraz równania regresji między stężeniem dwutlenku siarki a elementami meteorologicznymi dla poszczególnych mas powietrza (tab. 1) i oddzielnie dla dni po przejściu frontu (tab. 2).

Związek między stężeniem dwutlenku siarki w powietrzu atmosferycznym a elementami meteorologicznymi określony został metodą analizy regresji wielokrotnej krokowej według równania:

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n$$

gdzie:

y – stężenie dwutlenku siarki,

x_1, x_2, \dots, x_n – zmienne niezależne (opisujące),

a – wyraz wolny,

b_1, b_2, \dots, b_n – współczynniki regresji informujące, o ile zmieni się wielkość y , gdy zmienna niezależna wzrośnie o 1, przy ustalonych pozostałych wartościach (Draper i Smith 1973).

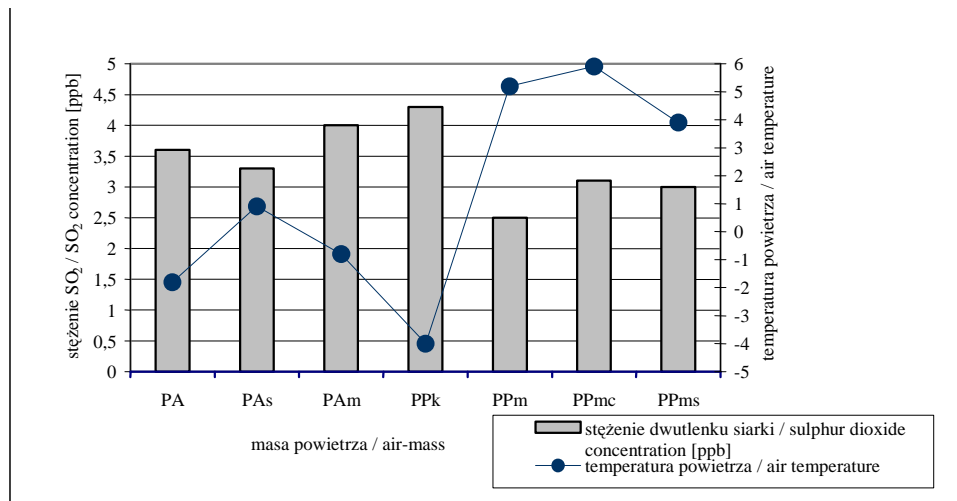
Jako zmienne niezależne przyjęto wartości średnie dobowe elementów

meteorologicznych, a jako zmienną zależną przyjęto średnią dobową wartość stężenia dwutlenku siarki. W pracy zastosowano następujące oznaczenia mas powietrza: PA – powietrze arktyczne, PAs – powietrze arktyczne stare, PAm – powietrze arktycznomorskie, PPk – powietrze polarnokontynentalne, PPM – powietrze polarnomorskie, PPmc – powietrze polarnomorskie ciepłe, PPms – powietrze polarnomorskie stare.

Wyniki

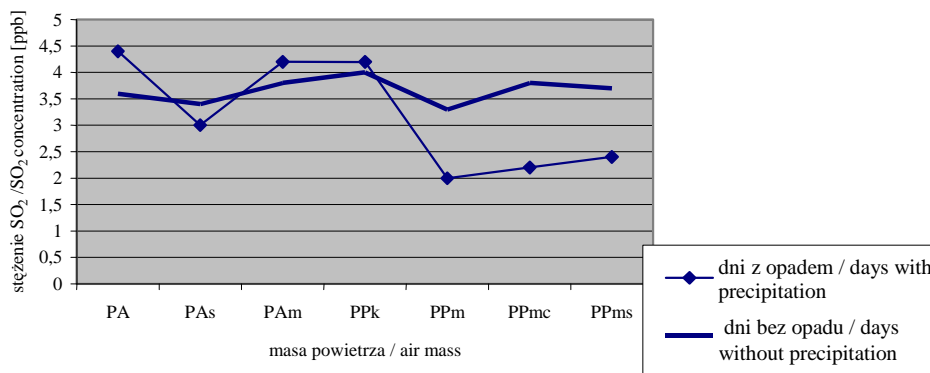
Rysunek 1 przedstawia średnie stężenie dwutlenku siarki w półroczu zimowym w zależności od rodzaju napływających mas powietrza. Najniższe, wewnątrzmasowe, średnie stężenie dwutlenku siarki (poniżej 3,1 ppb, czyli $8,8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) obserwowano przy napływie powietrza polarnomorskiego (PPm, PPmc, PPms), natomiast najwyższe (4,3 ppb) przy napływie mas powietrza polarnokontynentalnego. Średnie stężenie dwutlenku siarki w rozpatrywanym okresie wynosiło 3,4 ppb.

Ponieważ wymywanie zanieczyszczeń przez opady atmosferyczne wpływa na ich stężenie w powietrzu atmosferycznym obliczono średnie stężenie SO_2 w dniach z opadem i bez opadu atmosferycznego (rys. 2). W masach powietrza polarnomorskiego (PPm, PPmc, PPms) średnie stężenie dwutlenku siarki w dniach z opadem jest niższe około 40% aniżeli w dniach bez opadu atmosferycznego. Natomiast w pozostałych masach różnice te są niewielkie; zaobserwowano również, że w masie powietrza PA, PAm i PPk średnie stężenie dwutlenku siarki



RYSUNEK 1. Średnie stężenie dwutlenku siarki w zależności od rodzaju napływających mas powietrza w półroczu zimowym 1997–2002, Ursynów SGGW

FIGURE 1. Mean of sulphur dioxide concentration dependently on the kind of air inflow in winter half-year period since 1997–2002, Ursynów WAU



RYSUNEK 2. Średnie stężenie dwutlenku siarki w zależności od rodzaju napływających mas powietrza w półroczu zimowym 1997–2002 w dniach z opadem i bez opadu, Ursynów SGGW

FIGURE 2. Mean of sulphur dioxide concentration dependently on the kind of air inflow in winter half-year period in days with precipitation and days without precipitation 1997–2002, Ursynów WAU

w dniach z opadem atmosferycznym jest wyższe niż w dniach bez opadu. W tych przypadkach średnie dobowe sumy wysokości opadu były niskie i wynosiły około 1,5 mm.

Powietrze arktyczne (PA) napływa do Polski w chłodnej porze roku, sporadycznie w cieplej. Zawsze jest to powietrze chłodne, przynoszące spadek temperatury powietrza, ogrzewa się więc od podłoża i kształtuje się w nim stan równowagi chwiejnej. Spadek temperatury powietrza może spowodować wzrost wielkości emisji zanieczyszczeń, a tym samym i wzrost ich stężenia, z drugiej jednak strony, stan równowagi chwiejnej sprzyja ruchom pionowym powietrza, a tym samym wymianie masy i mieszaniu powietrza, czyli w efekcie zmniejszaniu wielkości stężenia zanieczyszczeń.

Masy powietrza polarnokontynentalnego kształtują się w chłodnej porze roku nad obszarami Syberii i Europy Wschodniej oraz Skandynawii. Do Polski napływają jako chłodne i suche. Przynoszą najczęściej spadek temperatury powietrza i pogodę bezchmurną, co sprzyja dalszemu wypromieniowaniu ciepła i silnym mrozom (Petterssen 1964).

W przypadku mas powietrza PA i PPK podwyższone stężenie dwutlenku siarki może być spowodowane transportem zanieczyszczeń nad rozpatrywany obszar bądź też zwiększoną emisją lokalną, albowiem napływowi PA i PPK towarzyszy spadek temperatury powietrza. Przebieg średniej temperatury powietrza w danej masie (rys. 1) oraz małe zróżnicowanie stężenia dwutlenku siarki w dniach bez opadu atmosferycznego (rys. 2) może świadczyć o tym, że istot-

ne znaczenie w kształtowaniu stężenia dwutlenku siarki w rozpatrywanych sytuacjach ma emisja lokalna zanieczyszczenia.

Powietrze polarnomorskie w chłodnej porze roku formuje się nad Oceanem Atlantyckim, w rejonie Islandii. Do Europy Środkowej przemieszcza się jako ciepłe od dołu; wychładza się zatem od podłoża i kształtuje się równowaga stała, której towarzyszy zachmurzenie warstwowe, a ponieważ masa ta zasobna jest w parę wodną, to charakterystyczne są opady ciągłe. Duża zawartość pary wodnej i opady atmosferyczne sprzyjają usuwaniu dwutlenku siarki z atmosfery, natomiast stan równowagi stałej w powietrzu atmosferycznym sprzyja zanikaniu ruchów pionowych i powstawaniu termicznej warstwy hamującej, co może powodować kumulowanie zanieczyszczeń przy powierzchni ziemi i wzrost ich stężenia.

W tabeli 1 przedstawiono równania regresji między stężeniem dwutlenku siarki i elementami meteorologicznymi w zależności od rodzaju napływających mas powietrza. Współczynniki determinacji (R^2) są zbliżone we wszystkich przypadkach i wynoszą od 0,55 przy występowaniu powietrza polarnokontynentalnego do 0,65 przy występowaniu powietrza arktycznomorskiego, ale w równaniach występują różne zmienne niezależne. Zaobserwowano, że w równaniach dla mas powietrza morskiego obecne są zmienne niezależne: t – temperatura powietrza i f – wilgotność względna powietrza.

Wszystkie równania są wysoce istotne statystycznie.

W przypadku wilgotności względnej powietrza wykazano (Kleniewska

TABELA 1. Równania regresji między stężeniem dwutlenku siarki (ppb) i elementami meteorologicznymi w zależności od rodzaju napływających mas powietrza w półroczu zimowym 1997–2002, Ursynów SGGW

TABLE 1. The regression equations between of sulphur dioxide concentration (ppb) and meteorological parameters in the different air masses in the winter half-year period 1997–2002, Ursynów WAU

Masa powietrza Air mass	Postać równania regresji Multiple regression equation	R	R ² _{adj} [%]	F	P p-value	Średnia Average	Odchylenie standardowe Standard deviation	Liczebność Count
PA	$SO_2 = 6,15 - 0,859v$	0,56	30,9	12,62	0,0015	3,6	2,5	27 (4,5%)
PAs	$SO_2 = 3,57 - 0,33t$	0,57	32,9	26,02	0,0000	3,3	2,7	52 (8,7%)
PAm	$SO_2 = 9,82 - 0,047f - 0,266t - 0,739v$	0,65	41,8	16,31	0,0000	4,0	2,8	65 (10,9%)
PPk	$SO_2 = 7,86 - 1,422v$	0,55	30,1	25,10	0,0000	4,3	3,0	57 (6,9%)
PPm	$SO_2 = 11,02 - 0,157t - 0,283v - 0,08f$	0,63	39,7	29,32	0,0000	2,5	1,6	130 (21,8%)
PPmc	$SO_2 = 15,41 - 0,120f - 0,122t - 0,441v$	0,60	36,2	23,31	0,0000	3,1	2,0	119 (20,0%)
PPms	$SO_2 = 12,7 - 0,102f - 0,147t - 0,136P$	0,55	30,2	21,86	0,0000	3,0	2,1	146 (24,5%)

Objaśnienia/Explanations:

v – prędkość wiatru / wind velocity [$m \cdot s^{-1}$],

t – temperatura powietrza / air temperature [$^{\circ}C$],

f – wilgotność względna powietrza / air humidity [%],

P – wysokość opadu atmosferycznego / precipitation [mm].

TABELA 2. Równania regresji między stężeniem dwutlenku siarki (ppb) i elementami meteorologicznymi po przejściu frontu w półroczu zimowym 1997–2002, Ursynów SGGW

TABLE 2. The regression equations between of sulphur dioxide concentration (ppb) and meteorological parameters after front in the winter half-year period 1997–2002, Ursynów WAU

Rodzaj frontu Fronts	Postać równania regresji Multiple regression equation	R	R ² _{adj} [%]	F	p-value	Średnia Average	Odchylenie standardowe Standard deviation	Liczebność Count
Front ciepły	$SO_2 = 14,06 - 0,11f - 0,095t - 0,37v$	0,75	55,5	19,3	0,0000	2,9	1,7	45
Front chłodny	$SO_2 = 2,56 - 0,08P$	0,26	6,9	5,1	0,0282	2,5	1,8	51
Front zokludowany	$SO_2 = 10,6 - 0,09f$	0,37	13,8	5,5	0,0266	2,3	1,5	29

Objaśnienia/Explanations:

f – wilgotność względna powietrza / air humidity [%],

t – temperatura powietrza / air temperature [$^{\circ}C$],

v – prędkość wiatru / wind velocity [$m \cdot s^{-1}$],

P – wysokość opadu / precipitation [mm].

2000), że przy spadku wilgotności względnej powietrza stężenie dwutlenku siarki rośnie, co jest wynikiem spadku wydajności reakcji katalitycznego utleniania dwutlenku siarki zachodzącego w fazie ciekłej.

Natomiast związek temperatury powietrza ze stężeniem dwutlenku siarki jest wynikiem oddziaływania różnych czynników:

- spadkowi temperatury powietrza towarzyszy większa emisja, w związku z tym również i wyższe stężenie dwutlenku siarki,
- spadkowi temperatury powietrza towarzyszy wzrost wydajności reakcji utleniania dwutlenku siarki i tym samym spadek jego stężenia.

W dniach po przejściu frontu i zmianie masy powietrza (tab. 2) zaobserwowano najwyższe średnie stężenie dwutlenku siarki po przejściu frontu ciepłego – 2,9 ppb, natomiast w przypadku frontu chłodnego i zokludowanego średnie stężenie dwutlenku siarki wynosi odpowiednio 2,5 i 2,3 ppb.

Stwierdzono niską korelację między stężeniem dwutlenku siarki a warunkami meteorologicznymi przy przejściu frontu chłodnego i zokludowanego, natomiast wysoki współczynnik korelacji jest charakterystyczny dla frontu ciepłego i wynosi $R_{adj} = 0,75$.

Podsumowanie i wnioski

Określenie związków między stężeniem dwutlenku siarki a rodzajem zalegającej masy powietrza jest trudne. Wynika to ze złożonego wpływu poszczególnych elementów meteorologicznych na kształtowanie się stężenia

dwutlenku siarki w powietrzu atmosferycznym i wymaga przeanalizowania dodatkowo kierunku napływu mas powietrza i sytuacji synoptycznej, co w obecnym materiale pomiarowym spowodowałoby znaczne zmniejszenie liczby przypadków w każdym wyodrębnionym zbiorze, wymaga więc wydłużenia okresu badawczego. Konieczna jest też ocena oddziaływania transportu zanieczyszczeń z większych odległości.

Na podstawie otrzymanych dotychczas wyników można stwierdzić, że:

1. Najwyższe średnie stężenie dwutlenku siarki zaobserwowano przy napływie mas powietrza polarno-kontynentalnego, natomiast najniższe przy napływie mas powietrza polarnomorskiego.
2. Średnie stężenie dwutlenku siarki w poszczególnych masach powietrza wykazuje wyraźny związek przede wszystkim z temperaturą powietrza (od której zależy wielkość emisji).
3. Zaobserwowano wysoki współczynnik korelacji między wielkością stężenia dwutlenku siarki a elementami meteorologicznymi przy przejściu frontu ciepłego.

Literatura

- DRAPER N.R., SMITH H. 1973: Analiza regresji stosowana. PWN, Warszawa.
- Codzienny Biuletyn Meteorologiczny IMGW.
- KLENIEWSKA M. 2000: Wyniki badań zależności stężenia SO_2 od wilgotności względnej powietrza w Warszawie – Ursynowie. *Przegląd Naukowy Wydziału Inżynierii i Kształtowania Środowiska* 18: 91–100.
- KLENIEWSKA M. 2001a: Wyniki badań zależności stężenia SO_2 od kierunku i prędkości

wiatru w Warszawie – Ursynowie. *Przegląd Naukowy Wydziału Inżynierii i Kształtowania Środowiska* 21: 187–194.

KLENIEWSKA M. 2001b: Wyniki badań zależności stężenia SO₂ od temperatury powietrza w Warszawie – Ursynowie. *Przegląd Naukowy Wydziału Inżynierii i Kształtowania Środowiska* 23: 119–126.

PETTERSEN S. 1964: *Zarys meteorologii*. PWN, Warszawa.

Author's address:

Małgorzata Kleniewska
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
Zakład Meteorologii i Klimatologii
02-776 Warszawa, ul. Nowoursynowska 159
Poland

Summary

The relationship between sulphur dioxide concentration and kind of air-masses inflow in winter half-year period in Ursynów WAU. The following characteristics were elaborated: mean of sulphur dioxide concentration dependently on the kind of air inflow in winter half period, regression equations between sulphur dioxide concentration and meteorological parameters and correlation coefficients of these equations.