

Katarzyna ROZBICKA, Małgorzata KLENIEWSKA

Katedra Inżynierii Wodnej i Rekultywacji Środowiska SGGW

Zakład Meteorologii i Klimatologii

Department of Hydraulic Engineering and Environmental Recultivation WULS

Division of Meteorology and Climatology

Związek między stężeniem dwutlenku siarki i dwutlenku azotu w powietrzu atmosferycznym a rodzajem napływających mas powietrza w Ursynowie SGGW

The relationship between sulphur dioxide and nitrogen dioxide concentration and type of air masses inflow in Ursynów WULS

Słowa kluczowe: dwutlenek siarki, dwutlenek azotu, masy powietrza

Key words: sulphur dioxide, nitrogen dioxide, air masses

Wprowadzenie

Stan zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego zależy od wielkości emisji i panujących warunków meteorologicznych, określających możliwości rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń (Markiewicz 2004). Najważniejsze elementy meteorologiczne, determinujące przemiany i rozprzestrzenianie SO_2 i NO_2 w atmosferze, to: prędkość i kierunek wiatru, temperatura powietrza, pionowy gradient temperatury powietrza, wilgotność względna powietrza, opady atmosferyczne. Stosunkowo mało roz-

poznany jest związek między stężeniem zanieczyszczeń powietrza a rodzajem zalegającej na danym obszarze masy powietrza, co może pomóc w określeniu przeważającego rodzaju emisji (lokalna bądź napływowa), kształtującej wielkość zanieczyszczenia powietrza. Dokładna znajomość i opisanie związków między warunkami meteorologicznymi a wielkością stężenia zanieczyszczenia powietrza jest istotna w prognozowaniu wielkości stężeń oraz przy modelowaniu rozprzestrzeniania się i transportu zanieczyszczeń.

W niniejszej pracy podjęto próbę określenia związków między wielkością stężenia dwutlenku siarki i dwutlenku azotu a elementami meteorologicznymi w zależności od rodzaju zalegającej masy powietrza (wewnątrz danej masy powietrza).

Material i metoda

W badaniach wykorzystano dane ze stacji Ursynów SGGW, położonej na południowych przedmieściach Warszawy. Były to wartości średnie dobowe stężenia dwutlenku siarki i dwutlenku azotu i elementów meteorologicznych: temperatury powietrza, wilgotności względnej powietrza, prędkości wiatru oraz sumy dobowej wysokości opadu atmosferycznego z lat 2001–2006. Z *Codziennego Biuletynu Synoptycznego*, opracowywanego w IMGW, zaczerpnięto informacje o rodzaju mas powietrza występujących w rejonie Warszawy. W pracy zastosowano następujące oznaczenia mas powietrza: PA – powietrze arktyczne, PAs – powietrze arktyczne stare, PAm – powietrze arktyczno-morskie, PPK – powietrze polarno-kontynentalne, PPM – powietrze polarno-morskie, PPMc – powietrze polarno-morskie ciepłe, PPMs – powietrze polarno-morskie stare.

Obliczono średnie wartości stężenia dwutlenku siarki i dwutlenku azotu od kwietnia 2001 roku do września 2006 roku oraz wyznaczono równania regresji między stężeniem omawianych zanieczyszczeń a elementami meteorologicznymi dla poszczególnych mas powietrza. Związek między stężeniem wybranych zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym a elementami meteorologicznymi określony został metodą analizy regresji wielokrotnej krokowej.

Wyniki

Najczęściej występującymi masami powietrza nad Polską są masy polarne morskie (PPM), docierające przez około

56% dni w roku. Dochodzą w różnym stopniu transformacji, czasem jako świeże, ale częściej już jako masy o umiarkowanym lub dużym stopniu transformacji. Napływają z sektora zachodniego, w zimie przynoszą ocieplenie, w lecie ochłodzenie, w ciągu całego roku wzrost wilgotności i zachmurzenia oraz opady. Powietrze polarne kontynentalne (PPK) występuje podczas około 20% dni w roku; napływa z sektora wschodniego, przynosząc w zimie mrozy, a w lecie upały, spadek wilgotności powietrza, niewielkie zachmurzenie i zwykle brak opadów. Względnie częste nad Polską jest jeszcze powietrze arktyczne (PA – około 10%), które dociera z sektora północnego; wiosną – kiedy występuje najczęściej – przynosi przymrozki, a zimą silne mrozy. Jest to powietrze o bardzo dużej przejrzystości. Najrzadziej nad Polskę napływa powietrze zwrotnikowe (PZ – około 3%); dociera z sektora południowego. Jest zawsze bardzo ciepłe i zwykle o znacznym zapyleniu. W lecie przynosi nie tylko upały w dzień, ale i bardzo ciepłe noce, a jesienią jest przyczyną cieplej pogody „babiego lata” (Kossowska-Cezak 2007).

Dwutlenek azotu

Średnie roczne stężenie dwutlenku azotu w latach 2001–2006 wahało się od $14,1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (2002 r.) do $26,8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (2006 r.), co stanowiło odpowiednio 35 i 67% dopuszczalnej wartości dla tego okresu ($40,0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). Średnie stężenie NO_2 we wszystkich latach było wyższe w półroczu chłodnym niż w półroczu ciepłym (tab. 1). W półroczu ciepłym (IV–IX) średnie stężenie NO_2 wahało

TABELA 1. Średnie stężenie SO₂ i NO₂ [μg·m⁻³] w latach 2001–2006, Ursynów SGGW
 TABLE 1. Mean of SO₂ and NO₂ [μg·m⁻³] concentration since 2001 to 2006, Ursynów WULS

Rok/Year	2001	2002	2003	2004	2005	2006
NO ₂						
Średnia roczna (I–XII) Mean annual	17,8	14,1	19,1	16,2	22,7	26,8
Półrocze ciepłe (IV–IX) Warm half year period	17,5	13,4	16,9	11,7	22,0	19,6
Półrocze chłodne (X–III) Cold half year period	19,3	18,0	17,9	24,3	31,0	24,9
Max 1 h	142,8	136,6	162,0	223,4	189,2	181,9
SO ₂						
Średnia roczna (I–XII) Mean annual	6,3	7,0	8,4	6,1	5,4	11,6
Półrocze ciepłe (IV–IX) Warm half year period	6,5	5,3	5,9	4,5	4,6	9,1
Półrocze chłodne (X–III) Cold half year period	5,7	12,3	8,0	6,7	11,9	–

się od 11,7 do 22,0 μg·m⁻³, natomiast w półroczu chłodnym od 17,9 do 31,0 μg·m⁻³. Najwyższe stężenie NO₂ w obydwu półroczach wystąpiło w 2005 roku (tab. 1). Natomiast stężenie NO₂ dla okresu 1-godzinnego najwyższe było w 2004 roku i wyniosło 223,4 μg·m⁻³ – wartość dopuszczalna (200 μg·m⁻³) została przekroczona. W analizowanym okresie (2001–2006) w Ursynowie SGGW, na podstawie średnich rocznych i półrocznych wartości stężenia NO₂, można zauważyć tendencję rosnącą stężenia NO₂ z roku na rok, zwłaszcza od 2004 roku, i jednocześnie wzrost oraz utrzymywanie się na wysokim poziomie stężenia maksymalnego 1-godzinnego NO₂.

W tabeli 2 przedstawiono średnie stężenie dwutlenku azotu dla całego okresu IV 2001 rok – IX 2006 rok oraz półroczy: ciepłego (IV–IX) i chłodnego (X–III) dla analizowanego okresu w zależności od rodzaju napływających mas powietrza. W całym analizowanym

okresie (IV 2001 r. – IX 2006 r.) najniższe, średnie stężenie dwutlenku azotu obserwowano przy napływie powietrza arktycznego (PAm i PA) oraz polarno-morskiego (PPm), natomiast najwyższe (powyżej 20,0 μg·m⁻³) przy napływie mas powietrza zwrotnikowego starego (PZs) oraz polarno-morskiego ciepłego (PPmc) i polarno-kontynentalnego (PPk). Podobny rozkład średniego stężenia NO₂, w zależności od rodzaju napływających powietrza, obserwuje się również w półroczu ciepłym w analizowanym okresie. Natomiast w półroczu chłodnym zauważa się nieco odmienny rozkład średniego stężenia dwutlenku azotu w zależności od rodzaju napływających mas powietrza. Najniższe średnie stężenie NO₂ (19,3 μg·m⁻³) obserwowano nie tylko przy napływie powietrza arktycznego, ale także polarno-morskiego, natomiast najwyższe (24,8 μg·m⁻³) przy napływie mas powietrza polarno-kontynentalnego. W przypadku powietrza starego (np. PAs, PPms), czyli zale-

TABELA 2. Stężenie SO₂ i NO₂ w różnych masach powietrza [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$], w okresie IV 2001 r. – IX 2006 r., Ursynów SGGW

TABLE 2. SO₂ i NO₂ concentration in different air masses [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$], since April 2001 to September 2006, Ursynów WULS

Masa powietrza Air mass	PA	PAm	PAms	PAs	PPk	PPm	PPmc	PPms	PZ	PZs
Stężenie NO ₂ / NO ₂ concentration (IV 2001 – IX 2006)	17,7	17,3	19,9	18,8	20,3	17,5	20,7	19,1	18,6	21,1
Stężenie NO ₂ NO ₂ concentration (półrocze ciepłe warm half year pe- riod IV 2001 – – IX 2006)	14,8	12,4	16,9	17,0	16,1	16,3	18,8	16,8	19,2	21,1
Stężenie NO ₂ NO ₂ concentration (półrocze chłodne cold half year period IV 2001 – IX 2006)	19,3	20,2	23,1	20,7	24,8	19,3	22,3	22,8	13,6	–
Stężenie SO ₂ SO ₂ concentration (IV 2001 – IX 2006)	10,1	7,7	6,0	9,1	10,8	5,4	7,4	6,6	5,7	11,4
Stężenie SO ₂ SO ₂ concentration (półrocze ciepłe warm half year pe- riod IV 2001 – – IX 2006)	4,6	6,5	5,4	6,6	7,4	4,8	7,7	6,0	5,7	11,4
Stężenie SO ₂ SO ₂ concentration (półrocze chłodne cold half year period IV.2001 – IX.2006)	12,8	8,6	7,1	11,4	13,7	6,3	7,4	8,0	5,7	–

gającego przez dłuższy czas nad danym obszarem, obserwuje się wzrost stężenia dwutlenku azotu.

W tabeli 3 przedstawiono równania regresji między stężeniem dwutlenku azotu a elementami meteorologicznymi w zależności od rodzaju napływających mas powietrza dla całego okresu (IV 2001 r. – IX 2006 r.). Najniższy współczynnik korelacji ($R = 0,41$) zaobserwo-

wano przy napływie powietrza polarno-morskiego (PPm), a najwyższy ($R = 0,82$) przy masie powietrza zwrotnikowego starego (PZs). W równaniach regresji najczęściej występujące zmienne niezależne to: prędkość wiatru (v), często jako zmienna przetransformowana, i temperatura powietrza (t). Wszystkie równania są wysoce istotne statystycznie $\alpha = 0,01$.

TABELA 3. Związek między stężeniem NO₂ a elementami meteorologicznymi w zależności od napływających mas powietrza w okresie IV 2001 r. – IX 2006 r., Ursynów SGGW

TABLE 3. The relationship between NO₂ concentration and meteorological elements in different air masses, April 2001 to September 2006, Ursynów WULS

Masy powietrza Air masses	Postać równania Equation	R ² _{adj} × 100	R _{adj}	F	p	n
PA / A	NO ₂ = 21,418 + 4,14 v - 0,029 t ² + - 18,214 lnv	45,87	0,68	26,14	0,0000	89
PAm / mA	NO ₂ = -2,077 + 29,17 v - 0,028 t ² + - 2,44 v ² - 42,97 lnv	54,21	0,74	30,6	0,0000	100
PAms / mA	NO ₂ = 4,326 + 23,068 v - 52,29 lnv	46,56	0,68	11,02	0,0005	23
PAs / mA	NO ₂ = 23,396 - 7,652 lnv	25,09	0,5	54,95	0,0000	161
PPk / cP	NO ₂ = 30,654 - 0,015 t ² - 15,085 lnv	41,56	0,64	61,45	0,0000	170
PPm / mP	NO ₂ = 27,043 - 0,012 t ² - 8,091 lnv	16,92	0,41	35,33	0,0000	337
PPmc / mP	NO ₂ = 30,965 - 0,276 t - 0,58 P - 8,74 lnv	18,56	0,43	18,92	0,0000	236
PPms / mP	NO ₂ = 28,8708 - 0,425 t - 7,181 lnv	17,74	0,42	45,97	0,0000	417
PZ / T	NO ₂ = 26,727 - 11,356 lnv	22,66	0,48	11,55	0,0000	36
PZs / T	NO ₂ = 34,676 - 21,678 lnv	67,92	0,82	20,05	0,0021	9

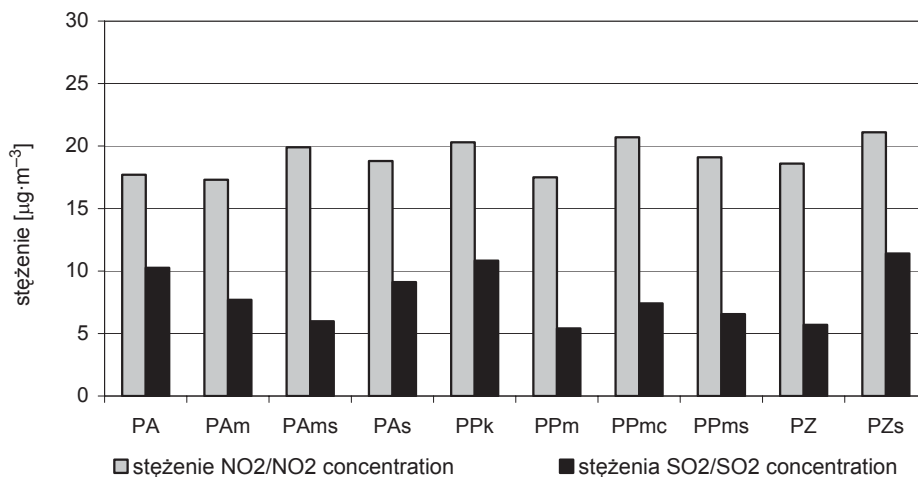
Objaśnienia / Explanations: PA – powietrze arktyczne / A – Arctic mass, PAm – powietrze arktyczne morskie / mA – maritime Arctic mass, PAms – powietrze arktyczne morskie stare / mA – maritime Arctic mass, PAs – powietrze arktyczne stare / mA – Arctic mass, PPk – powietrze polarne kontynentalne / cP – continental Polar mass, PPm – powietrze polarne morskie / mP – maritime Polar mass, PPmc – powietrze polarne morskie ciepłe / mP – maritime Polar mass, PPms – powietrze polarne morskie stare / mP – maritime Polar mass, PZ – powietrze zwrotnikowe / T – Tropical mass, PZs – powietrze zwrotnikowe stare / T – Tropical mass; R_{adj} – współczynnik korelacji regresji wielokrotnej poprawiony ze względu na liczbę stopni swobody / multiple regression correlation coefficient adjusted for degrees of freedom, R² – współczynnik determinacji regresji wielokrotnej (poprawiony) / multiple regression determination coefficient (adjusted), F – empiryczna wartość testu istotności Fishera-Snedecora / empirical value of Fisher-Snedecore test, p – poziom ufności / confidence level, NO₂ – stężenie dwutlenku azotu [µg·m⁻³] / nitrogen dioxide concentration, t – temperatura powietrza / air temperature [°C], v – prędkość wiatru / wind velocity [m·s⁻¹], f – wilgotność względna powietrza [%] / relative humidity of air [%], P – wysokość opadu / precipitation [mm]

Dwutlenek siarki

Średnie roczne stężenie dwutlenku siarki w latach 2001–2006 wahało się od 5,4 µg·m⁻³ (2004 r.) do 11,6 µg·m⁻³ (2006 r.), co stanowi odpowiednio od 14 do 29% wartości dopuszczalnej. Stężenie dwutlenku siarki w półroczach chłodnych było wyższe niż w półroczach ciepłych, poza 2001 rokiem, w którym

zanotowano wyższe średnie stężenie w półroczu ciepłym.

Na rysunku 1 i w tabeli 2 przedstawiono średnie stężenie dwutlenku siarki dla całego okresu (IV 2001 r. – IX 2006 r.) oraz półroczy: ciepłego (IV–IX) i chłodnego (X–III) dla analizowanego okresu, w zależności od rodzaju napływających mas powietrza. Podobnie jak w przypadku dwutlenku azotu, najwyż-



RYSUNEK 1. Stężenie dwutlenku siarki i dwutlenku azotu [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] w różnych masach powietrza, IV 2001 r. – IX 2006 r., Warszawa Ursynów
 FIGURE 1. Sulphur dioxide and nitrogen dioxide concentration [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] in different air masses, IV 2001 r. – IX 2006 r., Ursynów WULS

sze stężenie dwutlenku siarki obserwuje się przy zalegającej masie powietrza zwrotnikowego starego (PZs), jest to jednak masa powietrza występująca stosunkowo rzadko nad obszarem Polski – w badanym okresie stwierdzono 9 takich przypadków. Silnie zanieczyszczoną masą w całym analizowanym okresie jest powietrze polarno-kontynentalne (PPk), co może wynikać z faktu, że formuje się i przemieszcza do Polski nad kontynentem. Najniższe średnie stężenie dwutlenku siarki ($5,4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) obserwowano przy napływie powietrza polarno-morskiego (PPm) – masa ta powstaje i napływa do Polski znad oceanu, gdzie powietrze nie jest zanieczyszczone tak jak nad kontynentem. Wysokie średnie stężenie dwutlenku siarki stwierdzono również przy napływie powietrza arktycznego (PA).

Podobny rozkład średniego stężenia SO_2 , w zależności od rodzaju napływających mas powietrza, obserwuje się również w rozpatrywanych oddzielnie półroczach – ciepłych i chłodnych. Zaznaczają się większe różnice stężenia dwutlenku siarki w rozpatrywanych masach powietrza w półroczu chłodnym niż w półroczu ciepłym.

W tabeli 4 przedstawiono równania regresji między stężeniem dwutlenku azotu a elementami meteorologicznymi w zależności od rodzaju napływających mas powietrza dla całego okresu (IV 2001 r. – IX 2006 r.). Najniższy współczynnik korelacji ($R = 0,38$) zaobserwowano przy napływie powietrza polarno-morskiego starego (PPms), a najwyższy ($R = 0,77$) przy masie powietrza arktycznego (PA). W równaniach regresji najczęściej występujące zmienne niezależne to: prędkość wiatru (v), temperatura

TABELA 4. Związek między stężeniem SO₂ a elementami meteorologicznymi w zależności od napływających mas powietrza w okresie IV 2001 r. – IX 2006 r., Ursynów SGGW

TABLE 4. The relationship between SO₂ concentration and meteorological elements in different air masses, April 2001 to September 2006, Ursynów WULS

Masy powietrza Air masses	Postać równania Equation	R ² _{adj} × 100	R _{adj}	F	p	n
PA / A	SO ₂ = 5,15 – 0,219t – 0,66v	59,37	0,77	50,68	0,0000	94
PAm / mA	SO ₂ = 6,65 – 0,03f – 0,148t – 0,49v	43,10	0,66	18,42	0,0000	86
PAmS / mA	SO ₂ = 2,13 – 0,106P	23,40	0,48	6,50	0,0005	21
PAs / mA	SO ₂ = 7,78 – 0,047f – 0,186t – 0,322v	35,10	0,59	21,39	0,0000	151
PPk / cP	SO ₂ = 5,9 – 0,120t – 0,797v	39,40	0,63	40,02	0,0000	164
PPm / mP	SO ₂ = 6,61 – 0,039f – 0,091t – 0,231v	16,90	0,41	19,16	0,0000	354
PPmc / mP	SO ₂ = 8,46 – 0,057f – 0,203v	16,30	0,40	15,93	0,0000	283
PPms / mP	SO ₂ = 6,97 – 0,036f – 0,101t – 0,315v	14,80	0,38	19,06	0,0000	382
PZ / T	SO ₂ = 3,27 – 0,055P – 0,44v	40,00	0,63	10,04	0,0006	30
PZs / T	SO ₂ = 6,51 – 1,225v	55,50	0,74	9,75	0,0205	9

SO₂ – stężenie dwutlenku siarki / sulphur dioxide concentration [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$].

Oznaczenia jak w tabeli 3. / Symbols as in Table 3.

powietrza (*t*) oraz wilgotność powietrza (*f*). Wszystkie równania są wysoce istotnie statystycznie.

Podsumowanie

Związek między stężeniem dwutlenku siarki i dwutlenku azotu a rodzajem zalegającej masy powietrza jest złożony. Wynika to z wpływu wielu czynników na kształtowanie się stężenia analizowanych zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym. Wymaga to m.in. dokładniejszej analizy sytuacji synoptycznej, jak również warunków pogodowych w szerszym ujęciu niż w obecnym opracowaniu. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że:

1. Najwyższe średnie stężenie obu rozpatrywanych zanieczyszczeń zaobserwowano przy masie powietrza

zwrotnikowego starego (PZs), przy niewielkiej częstości występowania tej masy (9 przypadków w okresie IV 2001 r. – IX 2006 r.).

2. Wysokie stężenie rozpatrywanych zanieczyszczeń zanotowano przy napływie masy powietrza polarno-kontynentalnego (PPk) oraz (PA).
3. Najniższe średnie stężenie dwutlenku siarki i dwutlenku azotu zaobserwowano przy napływie powietrza polarno-morskiego (PPm).
4. Średnie stężenie dwutlenku siarki i dwutlenku azotu w poszczególnych masach powietrza wykazuje silny związek przede wszystkim z prędkością wiatru.
5. Wysoki współczynnik korelacji $R = 0,82$ i $R = 0,74$ uzyskano odpowiednio przy występowaniu masy powietrza zwrotnikowego starego (PZs) oraz powietrza arktyczno-

-morskiego (PAm) w przypadku dwutlenku azotu i powietrza arktycznego (PA) w przypadku dwutlenku siarki.

Literatura

- KLENIEWSKA M. 2005: Wpływ warunków meteorologicznych na stężenie dwutlenku siarki w atmosferze w rejonie aglomeracji warszawskiej. Rozprawa doktorska. Zakład Meteorologii i Klimatologii SGGW, Warszawa.
- KOSSOWSKA-CEZAK U. 2007: Podstawy meteorologii i klimatologii. Wydawnictwo Szkoły Wyższej Przymierza Rodzin, Warszawa.
- MARKIEWICZ M.T. 2004: Podstawy modelowania rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- ROZBICKA K. 2006: Wpływ warunków meteorologicznych na stężenie tlenków azotu w atmosferze w rejonie aglomeracji warszawskiej. Rozprawa doktorska. Zakład Meteorologii i Klimatologii SGGW, Warszawa.

Summary

The relationship between sulphur dioxide and nitrogen dioxide concentration and type of air masses inflow in Ursynów WULS. This work shows description of the state of air pollution by sulphur dioxide and nitrogen dioxide in different air mass on Ursynów WULS station. There are two main purposes in this work. First purpose is to calculate the value of SO₂ and NO₂ concentration in station Ursynów WULS in dependence on inflowing air mass. Second purpose is to calculate the relations between concentration of SO₂ and NO₂ in the air and some basic meteorological elements such as air temperature and relative humidity, wind velocity and rain fall. The studies covered the period of April 2001 to September 2006.

Authors' address:

Katarzyna Rozbicka, Małgorzata Kleniewska
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
Zakład Meteorologii i Klimatologii
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa
e-mail: katarzyna_rozbicka@sggw.pl
małgorzata_kleniewska@sggw.pl