

## OBSZARY SZCZEGÓLNIENIE NARAŻONE NA IMISJĘ DWUTLENKU SIARKI W REJONIE AGLOMERACJI WARSZAWSKIEJ

*Małgorzata Kleniewska*

Zakład Meteorologii i Klimatologii, Wydział Inżynierii i Kształtowania Środowiska, SGGW  
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa  
e-mail: małgorzata\_kleniewska@sggw.pl

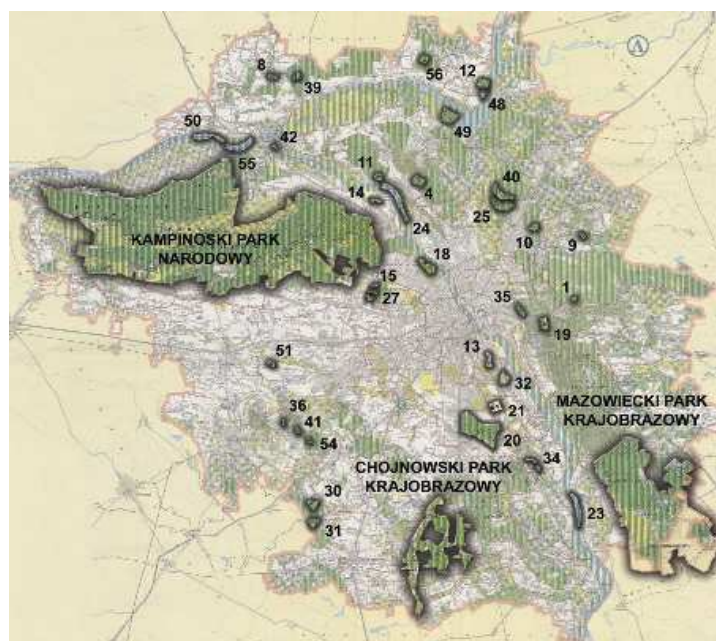
**Streszczenie.** Dwutlenek siarki uważa się za jeden z najważniejszych związków fitotoksycznych. Zagrożenie dla ekosystemów roślinnych mogą stanowić nie tylko wysokie stężenia  $\text{SO}_2$ , ale wynikać ono może również z długotrwałego działania tego gazu przy niskich stężeniach, które nie zawsze prowadzą do powstawania widocznych objawów uszkodzeń. Obok wartości stężenia ważny jest też czas i liczba ekspozycji na zanieczyszczenie. Ponieważ w rejonie aglomeracji warszawskiej występuje wiele obszarów specjalnie chronionych (Kampinoski Park Narodowy, Mazowiecki Park Krajobrazowy, Chojnowski Park Krajobrazowy, liczne rezerваты) wyznaczono zasięgi oddziaływania imisji dwutlenku siarki z głównych emitorów  $\text{SO}_2$  usytuowanych na obszarze Warszawy na tereny przyległe. W tym celu, w oparciu o obliczenia modelowe, wykonano wykresy sektorowe. Pozwoliło to na wyznaczenie zasięgów oddziaływania największych źródeł emisji tego gazu oraz częstości występowania smugi nad danym obszarem. Szczególnie narażone na częste działanie dwutlenku siarki w przypadku EC Siekierki są rezerваты: Kalinowa Łąka i Łosiowe Błota. W otoczeniu EC Kawęczyn są to rezerваты: Bagno Jacka, Las Bielański i Ławice Kiełpińskie, natomiast w przypadku EC Żerań, rezerwat Bagno Jacka.

Słowa kluczowe: dwutlenek siarki, aglomeracja warszawska, obszary chronione

### WSTĘP

Dwutlenek siarki uważa się za jeden z najważniejszych związków fitotoksycznych. Dla ekosystemów roślinnych znacznie bardziej niekorzystne są warunki długotrwałej ekspozycji na mniejsze stężenia  $\text{SO}_2$ , niż krótkotrwałe epizody podwyższonego stężenia. Udokumentowano większe znaczenie liczby ekspozycji, łącznego stężenia i czasu ekspozycji niż maksymalnych wartości stężenia  $\text{SO}_2$  (Krupa, Nosal 1989, za: Bell i Treshow 2004) oraz wpływ niskich wartości stężenia  $\text{SO}_2$  na wielkość i jakość plonów roślin uprawnych a także na wzrost wrażliwości roślin na inne czynniki

środowiskowe. Powyższe fakty są przyczyną obniżania wartości dopuszczalnych stężenia  $\text{SO}_2$  w powietrzu atmosferycznym (WHO 2000). Ekspozycje chroniczne – czyli występujące przy niskich stężeniach, trwające przez cały cykl wzrostu lub życia roślin, z okresowymi przerwami i rzadko występującym wzrostem stężenia, mogą, ale nie muszą prowadzić do powstawania widocznych objawów uszkodzeń (Bell i Treshow 2004).



**Rys. 1.** Rozmieszczenie obszarów specjalnie chronionych w rejonie Warszawy (Kozłowski (red.) 1995 – zmienione)

**Fig. 1.** Situation of protected areas in Warsaw urban area (Kozłowski 1995 – changed)

Rezerваты - Wildlife sanctuaries: 1. Bagno Jacka, 2\*. Biele Chojnowskie, 3\*. Bocianowskie Bagno, 4. Bukowiec Jabłonowski, 5\*. Celestynowski Grąd, 6\*. Chojnów, 7\*. Czarci Dół, 8. Dolina Wkry, 9. Grabicz, 10. Horowe Bagno, 11. Jabłonna, 12. Jadwisin, 13. Jezioro Czerniakowskie, 14\*. Jezioro Kielbińskie, 15. Kalinowa Łąka, 16\*. Kawęczyn, 17\*. Kępy Kazuńskie, 18. Las Bielański, 19. Las im. Króla Jana Sobieskiego, 20. Las Kabacki im. Stefana Starzyńskiego, 21. Las Natoliński, 22\*. Las Pęcherski, 23. Łachy Brzeskie, 24. Ławice Kielpińskie, 25. Łęgi Czarnej Strugi, 26\*. Łęgi Oborskie, 27. Łosiowe Błota, 28\*. Łoś, 29\*. Łyczynskie Olszyny, 30. Młochowski Grąd, 31. Młochowski Łęg, 32. Morysin, 33\*. Na Torfach, 34. Olszynka Grochowska, 35. Parów Sójek, 36. Pilawski Grąd, 37\*. Pogorzelski Mszar, 38\*. Pomiechówek, 39. Puszcza Słupecka, 40. Rezerwat im. Bolesława Hryniewieckiego, 41. Rуска Kępa, 42. Skarpa Jeziora, 43\*. Skarpa Oborska, 44\*. Skarpa Ursynowska, 45\*. Świder, 46\*. Uroczysko Stephens, 47\*. Wąwóz Szaniawskiego, 48. Wieliszewskie Łęgi, 49. Wikliny Wiślane, 50. Wolica, 51. Wyspy Świdzkie, 52\*. Wyspy Zawadowskie, 53\*. Zaborów, 54. Zakole Zakroczymskie, 55. Zegrze, 56. Żurawinowe Bagno.

\* rezerваты leżące w granicach Kampinoskiego Parku Narodowego oraz Chojnowskiego i Mazowieckiego Parku Krajobrazowego – sanctuaries located within the boundaries of Kampinoski National Park and Chojnowski and Mazowiecki Landscape Parks

Rejon aglomeracji warszawskiej nie jest silnie zanieczyszczony dwutlenkiem siarki. Sporządzane przez Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska w Warszawie roczne oceny jakości powietrza atmosferycznego (Stan Środowiska...2004, Roczna ocena...2005) wykazują, że ze względu na ochronę zdrowia obszar aglomeracji w 2004 roku należał do strefy klasy A (brak przekroczeń wartości dopuszczalnych) a w roku 2003 do klasy B (stężenie substancji przekracza wartość dopuszczalną maksymalnie o wartość tzw. marginesu tolerancji). Ze względu na ochronę roślin aglomeracja nie podlega klasyfikacji. Ponieważ na obszarze aglomeracji warszawskiej i przyległych powiatów występują liczne obszary chronione – rezerваты, parki krajobrazowe oraz Kampinoski Park Narodowy (rys. 1), a zagrożenie dla ekosystemów roślinnych stanowią nie tylko wysokie stężenia  $\text{SO}_2$ , ale może ono wnikać również z długotrwałego działania niskich stężeń zbadano narażenie obszarów chronionych na działanie imisji tego gazu.

#### MATERIAŁ I METODY

Teren badań leży w obrębie Niziny Środkowomazowieckiej. Jest to najniższej położona część nizin mazowiecko-podlaskich; cechuje ją zbieganie się dużych dolin dorzecza środkowej Wisły. Wysokości bezwzględne wynoszą od 60-140 m, a formy terenu powstały głównie w wyniku procesów fluwialnych, denudacyjnych i eolicznych. Gleby głównie bielice, w dnach dolin mady. Potencjalna roślinność naturalna to kontynentalne bory sosnowe i mieszane oraz subkontynentalne lasy liściaste (grądy), w dnach dolin łągi, natomiast na terenach zabagnionych olsy (Kondracki 2000). Teren badań położony jest wg rejonizacji klimatycznej Romera w obrębie klimatu Wielkich Dolin, a wg Gumińskiego w rolniczo-klimatycznej dzielnicy środkowej. Szczegółowe informacje o klimacie zawarte są w „Atlasie Warszawy” (1996) oraz w „Środowisku przyrodniczym Warszawy” (1990).

Ponieważ głównym źródłem emisji dwutlenku siarki w rejonie aglomeracji warszawskiej jest energetyka, narażenie obszarów chronionych na działanie tego gazu określono wyznaczając zasięgi oddziaływania głównych emitorów zlokalizowanych na terenie Warszawy. W tym celu posłużono się zaproponowanym przez Walczewskiego (2000) sposobem wykonywania wykresów sektorowych, który jest oparty na obliczeniach modelowych. Polecany jest klimatologiczny, gaussowski model smugi – jest on szeroko opisany w literaturze (Juda, Chróściel 1974; Zannetti 1990, Walczewski red. 2000) i zalecany jako referencyjna metodyka obliczania poziomów substancji w powietrzu („Rozporządzenie Ministra Środowiska w sprawie wartości odniesienia dla niektórych substancji”. Dz. U. 2003 nr 1, poz. 12). Omawianą formułę można stosować w warunkach, w których średnia prędkość wiatru jest większa od  $1,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (Markiewicz 2004), dla odległości emitor – receptor nie mniejszej niż 20 m (Wytyczne obliczania stanu zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego 1993). Warunki

meteorologiczne ujęte są statystycznie jako 6 stanów równowagi atmosfery: wybitnie chwiejna (A), chwiejna (B), lekko chwiejna (C), obojętna (D), stała (E) i wybitnie stała (F). W pierwszym kroku wyznacza się zależność długości smugi zanieczyszczeń od stanu równowagi atmosfery. W tym celu oblicza się współrzędną (x) „końca” smugi dla przyjętej (założonej) wartości stężenia S. Oznacza to, że jeśli przyjmiemy iż odległość od emitora do punktu określającego „koniec” smugi jest równa r, to zakreślając wokół emitora okrąg o promieniu r, otrzymujemy zasięg emitowanych przez niego zanieczyszczeń, ale do wartości założonego przez nas stężenia S. Z punktu określającego położenie emitora zakreślamy 6 (dla każdego stanu równowagi atmosfery) okręgów o promieniach równych długości smugi w każdym stanie równowagi atmosfery – w ten sposób, strefa o najmniejszym promieniu będzie strefą oddziaływania emitora we wszystkich stanach równowagi. Każdej strefie zostaje przypisana liczba godzin w roku, w których smuga przechodzi przez daną strefę – wyznaczoną na podstawie częstości występowania poszczególnych klas równowagi dla całego obszaru. Kolejny obszar wokół emitora jest następnie dzielony na segmenty kierunkowe, a każdemu sektorowi przypisana liczba godzin występowania wiatru wiejącego z przeciwległego sektora (Walczewski 2000).

Ponieważ rozpatrywana formuła pozwala na obliczenie wartości stężenia w przedziałach jednogodzinnych, a ze względu na ochronę roślin normowane są wartości dla dłuższych okresów, do metody wprowadzono pewną modyfikację. Polegała ona na obliczeniu wartości  $X_m$  tj. odległości występowania stężenia maksymalnego  $S_m$  i przyjęciu  $r = 2X_m$  co pozwoliło na prześledzenie smugi na znacznej jej długości. Obliczenia przeprowadzono wg wzoru:

$$X_m = C_2 \left( \frac{H}{B} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (1)$$

gdzie:  $X_m$  – odległość występowania stężenia maksymalnego (m),  $C_2$  – stała zależna od stanu równowagi atmosfery (–),  $b$  – stała zależna od stanu równowagi atmosfery (–),  $H$  – efektywna wysokość emisji (m),  $B$  – bezwymiarowy współczynnik określony wzorem:

$$B = 0,38 \cdot m^{1,3} \left( 8,7 - \ln \frac{H}{z_0} \right) \quad (2)$$

$z_0$  – współczynnik szorstkości aerodynamicznej podłoża (m),  $m$  – wykładnik meteorologiczny zależny od stanu równowagi atmosfery.

Zakreślone wokół emitora okręgi wyznaczają strefy jego oddziaływania, przy czym każdej strefie przypisano częstość występowania danego stanu równowagi atmosfery (k), posługując się danymi zawartymi w pracy Lorenc (1996). Otrzymane strefy podzielono na 12 sektorów różny wiatrów, którym przyporządkowano częstość wystę-

powania wiatru wiejącego z przeciwległego sektora ( $f$ ). Każde z otrzymanych w ten sposób pól można opisać współczynnikami  $k$  – częstość występowania stanu równowagi i  $f$  – częstość występowania wiatru z przeciwległego sektora. Iloczyn każdego  $k \cdot f$  obrazuje częstość występowania smugi nad rozpatrywanym polem (Walczewski 2000). Obliczenia takie wykonano dla 3 największych emitorów dwutlenku siarki w rejonie aglomeracji warszawskiej: EC Siekierki, EC Żerań i EC Kawęczyn, w dwóch wariantach – dla współczynnika szorstkości aerodynamicznej  $z_0 = 0,5$  m i  $z_0 = 5,0$  m. Współczynnik ten charakteryzuje aerodynamiczne właściwości terenu, a jego wartości podane są w zależności od rodzaju pokrycia terenu i wynoszą ok. 10% wysokości przeszkód terenowych (Markiewicz 2004). Ponieważ wokół rozpatrywanych emitorów występują obszary o bardzo zróżnicowanych wartościach  $z_0$ , przyjęto wartości skrajne dla dużego miasta, tj. dla zabudowy niskiej i zabudowy wysokiej.

## WYNIKI

Odległość występowania stężenia maksymalnego w zależności od stanu równowagi atmosfery podano w tabeli 1. Odległość występowania stężenia maksymalnego w każdym rozpatrywanym przypadku jest wyższa dla współczynnika szorstkości aerodynamicznej  $z_0 = 0,5$  m. Najmniejsze wartości  $X_m$  otrzymano dla stanu równowagi wybitnie chwiejnej, najwyższe zaś dla stanu równowagi wybitnie stałej. Największe odległości występowania stężenia maksymalnego obserwuje się najczęściej dla EC Kawęczyn.

**Tabela 1.** Odległości występowania stężenia maksymalnego  $X_m$  (km)

**Table 1.** Distances of maximum concentration  $X_m$  (km)

Źródło emisji Emission source	$z_0$ (m)	Odległość występowania stężenia maksymalnego $X_m$ (km) Distance of maximum concentration $X_m$ (km)					
		Stan równowagi atmosfery – Atmospheric stability class					
		Wybitnie chwiejna Extremely unstable	Chwiejna Moderately unstable	Lekko chwiejna Slightly unstable	Obojętna Neutral	Stoła Stable	Wybitnie stoła Extremely stable
EC Siekierki	0,5	4,5	7,7	4,9	12,4	51,4	275,0
	5,0	1,6	2,3	3,7	6,6	23,3	69,0
EC Żerań	0,5	1,6	2,4	4,0	10,0	40,0	170,0
	5,0	0,9	1,2	1,8	4,0	13,1	46,0
EC Kawęczyn	0,5	2,7	4,2	7,3	20,0	90,9	447,0
	5,0	1,3	1,8	2,9	7,0	25,7	102,0

W dalszej analizie pominięto stan równowagi wybitnie chwiejnej – ze względu na niewielką częstość jej występowania (tab. 2.), oraz stałej i wybitnie stałej, dla któ-

rych charakterystyczne jest występowanie zasięgów smugi znacznie wykraczających poza granice aglomeracji warszawskiej. W ten sposób, pod uwagę wzięto zasięgi oddziaływania emitorów w stanach równowagi chwiejnej (B), lekko chwiejnej (C) i obojętnej (D). Łączna częstość występowania tych trzech stanów równowagi wynosi prawie 80%. Zasięgi oddziaływania smugi wokół źródła emisji przedstawiono dla rozpatrywanych emitorów na rysunkach 2-4. Najmniejszy okrąg wokół emitora przedstawia zasięgi smugi w stanie równowagi chwiejnej (B), kolejny w stanie równowagi lekko chwiejnej (C) i ostatni w stanie równowagi obojętnej (D).

**Tabela 2.** Częstość (%) występowania stanów równowagi atmosfery dla Warszawy (Lorenc 1996)  
**Table 2.** Frequency of occurrence of stability classes in Warsaw

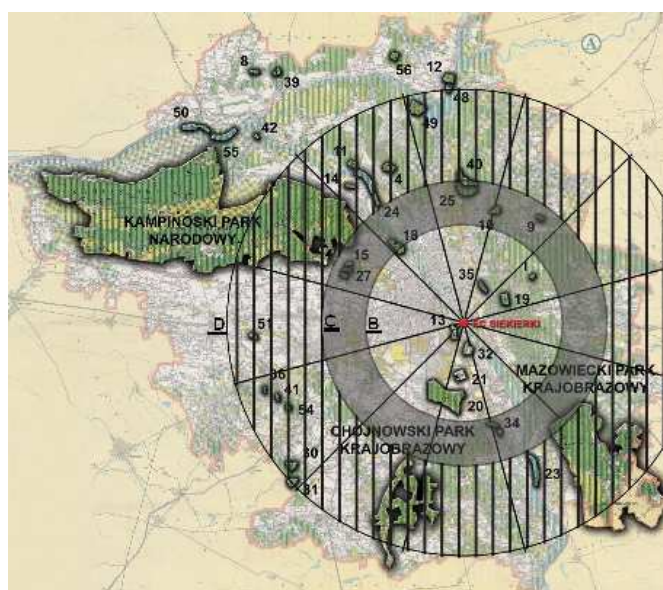
Stan równowagi atmosfery – Stability class	Częstość (%) – Frequency
Wybitnie chwiejna – Extremely unstable (A)	0,2
Chwiejna – Moderately unstable (B)	6,0
Lekko chwiejna – Slightly unstable (C)	20,6
Obojętna – Neutral (D)	52,5
Stoła – Stable (E)	6,7
Wybitnie stoła – Extremely stable (F)	14,0

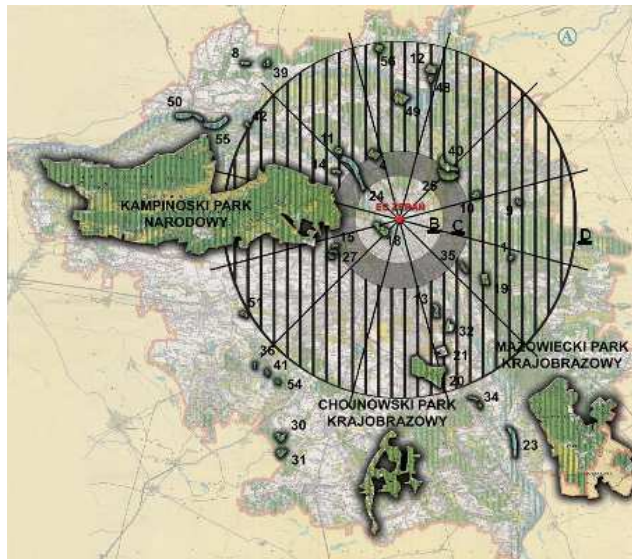
Wartości współczynnika k-f, obrazującego częstość występowania smugi nad danym polem wokół emitora przedstawiono w tabeli 3.

Na oddziaływanie zanieczyszczeń z EC Siekierki (rys. 2) najczęściej narażone są rezerwy Kalinowa Łąka i Łosiowe Błota, natomiast na oddziaływanie maksymalnych stężeń dwutlenku siarki narażone są: rezerwat Las Natoliński przy stanie równowagi chwiejnej, rezerwy Las Kabacki i Bagno Jacka przy stanie równowagi lekko chwiejnej oraz rezerwy Grabicz, Horowe Bagno, Łęgi Czarnej Strugi, Kalinowa Łąka, Łosiowe Błota i Olszynka Grochowska przy stanie równowagi obojętnej. W przypadku EC Żerań (rys. 3.) na najczęstsze oddziaływanie smugi zanieczyszczeń narażony jest rezerwat Bagno Jacka. Ponadto rezerwat Las Bielański narażony jest na oddziaływanie najwyższych wartości stężenia  $SO_2$ , przy występowaniu stanu równowagi chwiejnej, a rezerwy: Parów Sójek, Las im. Jana III Sobieskiego, Jeziorko Czerniakowskie, Jabłonna, Jeziorko Kiełbińskie oraz wschodnia część Kampinoskiego Parku Narodowego przy stanie równowagi obojętnej. Na najczęstsze działanie emisji dwutlenku siarki wokół EC Kawęczyn (rys. 4.) narażone są rezerwy: Bagno Jacka, Las Bielański i Ławice Kiełpińskie. Natomiast na stężenia maksymalne  $SO_2$  narażone są rezerwy: Łęgi Czarnej Strugi, im. Bolesława Hryniewieckiego, Grabicz, Horowe Bagno, Jeziorko Czerniakowskie, Morysin i Las Bielański przy stanie równowagi lekko chwiejnej oraz wschodnia część Kampinoskiego Parku Narodowego przy stanie równowagi obojętnej.

**Tabela 3.** Wartości współczynnika k-f (%)**Table 3.** Values of coefficient k-f (%)

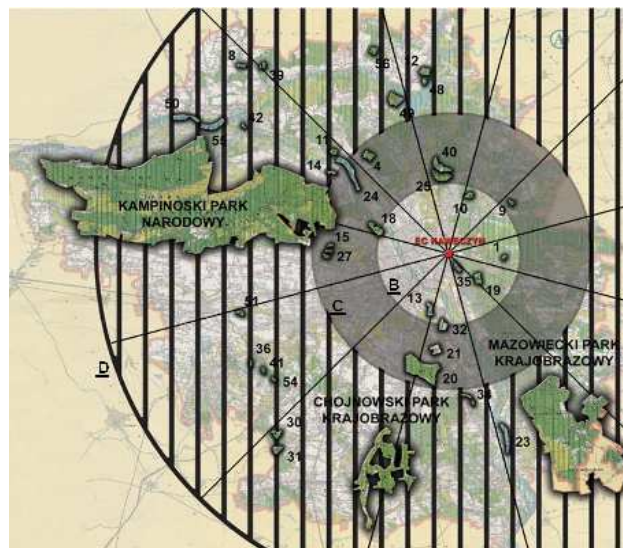
Sektor Sector	Stan równowagi atmosfery – Stability class					
	Wybitnie chwiejna Extremely unstable	Chwiejna Unstable	Lekko chwiejna Slightly unstable	Obojętna Neutral	Staća Stable	Wybitnie staća Extremely stable
0°	7,6	7,6	7,1	5,6	1,6	1,1
30°	6,8	6,8	6,4	5,0	1,4	1,0
60°	9,9	9,9	9,3	7,2	2,0	1,4
90°	17,7	17,7	16,6	13,0	3,7	2,5
120°	10,2	10,2	9,6	7,5	2,1	1,4
150°	6,2	6,2	5,8	4,5	1,3	0,9
180°	4,5	4,5	4,2	3,3	0,9	0,6
210°	4,2	4,2	3,9	3,1	0,9	0,6
240°	5	5,0	4,7	3,7	1,0	0,7
270°	7,6	7,6	7,1	5,6	1,6	1,1
300°	11,5	11,5	10,8	8,4	2,4	1,6
330°	8,8	8,8	8,3	6,4	1,8	1,2

**Rys. 2.** Zasięgi smugi dymów z EC Siekierki przy stanie równowagi chwiejnej (B), lekko chwiejnej (C) i obojętnej (D)**Fig. 2.** Distance of influence from power station Siekierki in unstable (B), slightly unstable (C) and neutral (D) stability class



**Rys. 3.** Zasięgi smugi dymów z EC Żerań przy stanie równowagi chwiejnej (B), lekko chwiejnej (C) i obojętnej (D)

**Fig. 3.** Distance of influence from power station Żerań in unstable (B), slightly unstable (C) and neutral (D) stability class



**Rys. 4.** Zasięgi smugi dymów z EC Kawęczyn przy stanie równowagi chwiejnej (B), lekko chwiejnej (C) i obojętnej (D)

**Fig. 4.** Distance of influence from power station Kawęczyn in unstable (B), slightly unstable (C) and neutral (D) stability class



## WNIOSKI

1. Największe wartości odległości występowania stężenia maksymalnego ( $X_m$ ) najczęściej obserwowano w przypadku EC Kawęczyn.
2. W przypadku każdego z rozpatrywanych emitorów najmniejsze wartości  $X_m$  otrzymano dla stanu równowagi wybitnie chwiejnej, najwyższe zaś dla stanu równowagi wybitnie stałej.
3. Szczególnie narażone na częste działanie dwutlenku siarki obszary chronione w rejonie aglomeracji warszawskiej to: w przypadku EC Żerań rezerwat Bagno Jacka, w przypadku EC Siekierki rezerwat Kalinowa Łąka i Łosiowe Błota, natomiast w przypadku EC Kawęczyn rezerwat: Bagno Jacka, Las Biełański i Ławice Kiełpińskie.

## PIŚMIENNICTWO

- Atlas Warszawy: Środowisko fizycznogeograficzne – niektóre zagadnienia, IGiPZ PAN, Warszawa, 1996.
- Bell J., Treshow M.: Zanieczyszczenie powietrza a życie roślin, WNT Warszawa, Academic Press, 2004.
- Juda J., Chróściel S.: Ochrona powietrza atmosferycznego, WNT, Warszawa, 1974.
- Kondracki J.: Geografia regionalna Polski, PWN Warszawa, 2000.
- Kozłowski S. (red.): Mapa ekologiczna województwa warszawskiego, PiG 1995.
- Lorenc H.: Struktura i zasoby energetyczne wiatru w Polsce, Materiały Badawcze IMGW, seria Meteorologia, z.25, 1996.
- Markiewicz M.T.: Podstawy modelowania rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym, Oficyna Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, 2004.
- Roczna Ocena Jakości Powietrza w województwie mazowieckim. Raport za rok 2004, Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska w Warszawie, 2005.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska w sprawie wartości odniesienia dla niektórych substancji. Dz. U. 2003 nr 1, poz. 12.
- Stan środowiska w województwie mazowieckim w 2003 roku, Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska w Warszawie, 2004.
- Środowisko przyrodnicze Warszawy, praca zbiorowa, PWN Warszawa, 1990.
- Walczewski J.(red.): Wykorzystanie danych meteorologicznych w monitoringu jakości powietrza, podstawy fizyczne i wskazówki metodyczne, IOŚ Warszawa, 2000.
- Walczewski J.: Metoda oceny strefy oddziaływania dużych źródeł emisji w promieniu ok. 100 km od emitora, Wiad. Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej, tomXXIII, z.3, 2000.
- WHO: Air Quality Guidelines for Europe, Second edition, Copenhagen, 2000.
- Wytyczne obliczenia stanu zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego opracowane w Zakładzie Ochrony Atmosfery IOŚ i Zakładzie Ochrony Atmosfery Instytutu Inżynierii Środowiska PW w Warszawie, maszynopis 1993.
- Zannetti P.: Air pollution modeling, Theories, computational methods, and available software. Van Nostrand Reynolds, New York, 1990.

AREAS ESPECIALLY EXPOSED TO SULPHUR DIOXIDE IMMISSION  
IN WARSAW URBAN AREA

*Małgorzata Kleniewska*

Division of Meteorology and Climatology,  
Faculty of Engineering and Environmental Science, Warsaw Agricultural University  
ul. Nowoursynowska 159, 02-787 Warszawa  
e-mail: malgorzata\_kleniewska@sggw.pl

**Abstract.** High level of sulphur dioxide concentration is not the only reason of negative effect on vegetation ecosystem. Another reason may be long time of exposure of the ecosystem to relatively low levels of concentration. There are many protected areas in the Warsaw urban area: wildlife sanctuaries, landscape parks and the Kampinoski National Park. The paper presents an analysis of the effect of main emission sources situated in the Warsaw region on sulphur dioxide immission as the distance of influence. The distance of influence is determined by the use of sectional graph modelling method. It gives the opportunity of defining the distance of influence from the largest sources of SO<sub>2</sub> emissions and the frequency of plume occurrence over these areas.

**Key words:** sulphur dioxide, Warsaw urban area, protected areas