



Krzysztof Jarzyna
Instytut Geografii
Akademia Świętokrzyska
ul. Świętokrzyska 15, 25-406 Kielce
jarzynak@pu.kielce.pl

Regionalne Studia Ekologiczno-Krajobrazowe
Problemy Ekologii Krajobrazu, tom XVI
Warszawa 2006

Metody określania warunków dyspersji zanieczyszczeń powietrza oraz przykłady ich zastosowania

Methods of determination of air pollution dispersion
and examples of its application

Abstract: The paper presents a short review of methods of determination of air pollution dispersion. Chosen methods of determination of ventilation intensity and atmospheric stability are described. Besides, chosen examples of its application are presented.

Key words: air pollution dispersion, ventilation, atmospheric stability

Słowa kluczowe: dyspersja zanieczyszczeń powietrza, wentylacja pozioma, równowaga atmosfery

Wprowadzenie

Poziom koncentracji zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym jest jednym z czynników decydujących o komforcie życia mieszkańców danego obszaru. Dlatego też sytuacja aerosanitarna jest przedmiotem zainteresowania przedstawicieli władz lokalnych.

Do głównych zadań instytucji związanych z ochroną atmosfery przed zanieczyszczeniem należą: bieżąca ocena warunków aerosanitarnych, diagnoza i prognoza tych warunków oraz wdrażanie programów naprawczych. Aby działania te były skuteczne, należy obok wielkości emisji i koncentracji zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym scharakteryzować warunki dyspersji zanieczyszczeń powietrza.

W wielu bowiem przypadkach warunki dyspersji zanieczyszczeń lepiej od zmian emisji tłumaczą zmienność poziomu koncentracji zanieczyszczeń (tab. 1).

Celem niniejszego opracowania jest przedstawienie głównych charakterystyk warunków dyspersji zanieczyszczeń powietrza, wybranych metod ich określania wraz z kilkoma przykładami ich zastosowania.

Tab. 1. Korelacja między średnimi dobowymi stężeniami pyłu w Nashville (USA) a wybranymi czynnikami (Bertljand 1975, za Sorbjan 1983)

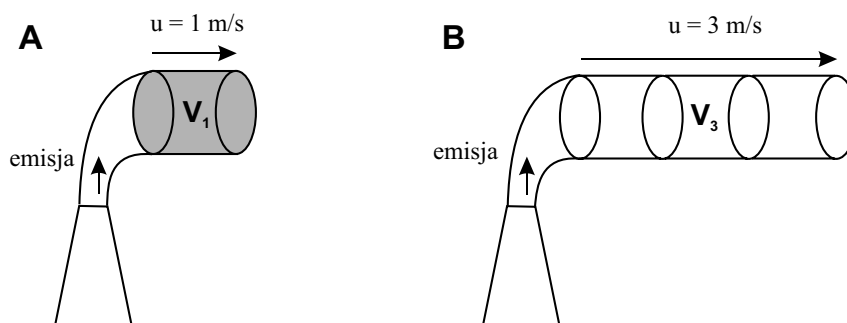
Tab. 1. Correlation between daily mean concentration of dust in Nashville (USA) and chosen factors (Bertljand 1975, following Sorbjan 1983)

Czynniki – factors	Współczynnik korelacji – correlation coefficient
uwarstwienie atmosfery – stratification of atmosphere	-0,60
prędkość wiatru – wind speed	-0,38
opady – precipitation	-0,38
emisja – emission	0,18

Charakterystyki warunków dyspersji zanieczyszczeń powietrza

Poziom koncentracji zanieczyszczeń w powietrzu atmosferycznym zależy od dwóch czynników: masy zanieczyszczeń, która została wyemitowana lub napłynęła nad dany obszar oraz od objętości powietrza, w której zanieczyszczenia te ulegają rozcieńczeniu. Ta zaś objętość jest funkcją ruchu powietrza atmosferycznego – im bardziej jest on intensywny, w tym większej objętości powietrza rozpraszają się zanieczyszczenia.

Najintensywniejszy, a co za tym idzie, najbardziej skuteczny w dyspersji zanieczyszczeń powietrza jest poziomy ruch powietrza. Intensywność usuwania wyemitowanych substancji z miejsca emisji przez poziomy ruch powietrza (wiatr) określa się jako wentylację poziomą (Walczewski 2000). Zależy ona przede wszystkim od prędkości wiatru (rys. 1).



Rys. 1. Schemat ilustrujący wpływ prędkości wiatru na rozcieńczanie zanieczyszczeń powietrza – u – prędkość wiatru, V – objętość powietrza: A – prędkość wiatru 1 m/s, B – prędkość wiatru 3 m/s (za Walczewski 2000)

Fig. 1. Scheme of an influence of wind speed on the air pollution dispersion – u – wind speed, V – air volume: A – wind speed 1 m/s, B – wind speed 3 m/s (following: Walczewski 2000)

W kształtowaniu warunków dyspersji zanieczyszczeń powietrza niebagatelne znaczenie ma również kierunek wiatru. Od niego zależy stopień czystości powietrza napływającego nad dany obszar, zaś w obszarach górskich od kierunku wiatru w znacznej mierze zależy też jego prędkość.

Nieco mniejszą intensywnością charakteryzuje się pionowy ruch powietrza, związany najczęściej z występowaniem uporządkowanej konwekcji. Najczęstsza przyczyna ruchów konwekcyjnych to nierównomierne nagrzanie powierzchni Ziemi w warunkach występowania chwiejnej równowagi atmosfery.

Skuteczność rozpraszania zanieczyszczeń powietrza zwiększa też obecność turbulencji, czyli zmiennych w czasie i przestrzeni fluktuacji prędkości i kierunku przepływu powietrza wokół ich wartości średnich. Towarzyszy ona uporządkowanym formom ruchu powietrza.

W związku z trudnością prostego pomiaru natężenia turbulencji i ruchów konwekcyjnych, często ocenia się ich intensywność i zasięg pośrednio – określając stan równowagi atmosfery oraz głębokość warstwy mieszania. W niniejszej pracy ograniczono się do zaprezentowania metod określania stanu równowagi atmosfery. Pod pojęciem tym można rozumieć zdolność atmosfery do promowania lub powstrzymywania rozwoju pionowych ruchów powietrza. Rozróżnia się trzy główne stany równowagi atmosfery: równowagę chwiejną – stymulującą ruchy pionowe, równowagę stałą – hamującą ruchy pionowe i neutralną pod tym względem równowagę obojętną. Najczęściej w klasyfikacji równowagi atmosferycznej stosuje się bardziej szczegółowy schemat zaproponowany przez Pasquille'a. Dzieli on spektrum równowagi atmosferycznej na sześć kategorii oznaczone literami od A do F, gdzie kategorie A, B i C oznaczają odpowiednio równowagę: wybitnie, umiarkowanie i słabo chwiejną, D równowagę obojętną, zaś E i F równowagę słabo i wybitnie stałą.

Metody określania intensywności wentylacji poziomej

Intensywność wentylacji poziomej określamy w oparciu o pomiar prędkości i kierunku wiatru. Pomiar ten jest względnie prosty w przyziemnej warstwie atmosfery – o wysokości do 30 m. Najczęściej wykorzystuje się w tym celu wiatromierze mechaniczne.

Dla oceny warunków dyspersji zanieczyszczeń powietrza pochodzących z wysokich emitatorów konieczny jest pomiar kierunku i prędkości wiatru górnego. Pomiar w warstwie przyziemnej nie musi odzwierciedlać warunków anemometrycznych na większej wysokości. W warstwie granicznej atmosfery z reguły obserwujemy skręt wiatru oraz wzrost prędkości wiatru wraz ze wzrostem wysokości.


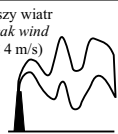
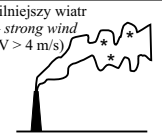
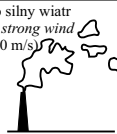
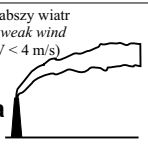
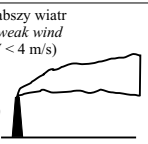
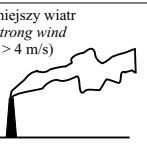
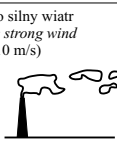


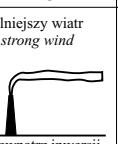



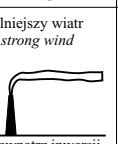

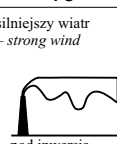
Standardowo w pomiarze wiatru górnego wykorzystywany jest radiosondaż. Głównym niedostatkiem tej metody jest niewielka liczba wykonywania sondaży. W kraju wykonuje je IMiGW tylko w trzech stacjach aerologicznych (Łeba, Wrocław i Legionowo) dwa razy na dobę.

Pod względem skuteczności określania warunków dyspersji zanieczyszczeń ponad przyziemną warstwę atmosfery najbardziej perspektywiczne są metody teledetekcyjne, rejestrujące efekt Dopplera. Najczęściej wykorzystywanym operacyjnie urządzeniem jest sodar dopplerowski. Jego działanie polega na wyemitowaniu w atmosferę sygnału dźwiękowego, a następnie na odbiorze części tego sygnału wstecznie rozproszonej przez niejednorodności ośrodka. Przemieszczanie się tych niejednorodności w polu wiatru powoduje przesunięcie częstotliwości sygnału akustycznego (efekt Dopplera). Porównanie częstotliwości sygnału wyemitowanego i powracającego pozwala określić kierunek i prędkość wiatru na różnych poziomach wysokościowych. Zaletą sodaru dopplerowskiego jest ciągły charakter pracy. Główną wadą są wysokie koszty zarówno instalacji, jak i eksploatacji.

W sytuacji, gdy nie ma możliwości pomiaru wiatru górnego, można – znając prędkość wiatru przy powierzchni ziemi – obliczyć jego prawdopodobną prędkość (Walczewski 2000).

Metody określania stanu równowagi atmosfery

Znajomość stanu równowagi atmosfery ma kluczowe znaczenie w wielu zadaniach, związanych z analizą dyspersji zanieczyszczeń powietrza. Stan równowagi atmosfery w kompleksowy sposób charakteryzuje warunki dyspersji

równowaga atmosfery – <i>atmospheric stability</i>	TYPY SMUG DYMU – <i>FORMS OF SMOKE PLUMES</i>							
	1	2		3				
chwijna – <i>unstable</i>	cisza – <i>calm</i> 	slabszy wiatr – <i>weak wind</i> ($V < 4$ m/s) 	silniejszy wiatr – <i>strong wind</i> ($V > 4$ m/s) 	bardzo silny wiatr – <i>very strong wind</i> ($V > 10$ m/s) 				
stała – <i>stable</i>	4 slabszy wiatr – <i>weak wind</i> ($V < 4$ m/s) 		5 slabszy wiatr – <i>weak wind</i> ($V < 4$ m/s) 		6 silniejszy wiatr – <i>strong wind</i> ($V > 4$ m/s) 		6 bardzo silny wiatr – <i>very strong wind</i> ($V > 10$ m/s) 	
	wybitnie stała – <i>extremely stable</i>	7 cisza – <i>calm</i> 		8 slaby wiatr – <i>weak wind</i> 		8 silniejszy wiatr – <i>strong wind</i> 		9 silniejszy wiatr – <i>strong wind</i> 
7 a 		7 b 		8 wewnątrz inwersji – <i>inside inversion</i> 		9 nad inwersją – <i>above inversion</i> 		
				10 pod inwersją – <i>below inversion</i> 				

Rys. 2. Klasyfikacja smug dymów przemysłowych wg W. Parczewskiego (1964)

Fig. 2. Industrial smoke plumes classification following W. Parczewski (1964)

zanieczyszczeń powietrza. Jedną z najprostszych metod, pozwalających określić stan równowagi atmosfery w sytuacji braku danych pomiarowych, jest obserwacja smug dymów przemysłowych. Typologię kształtu smugi dymu, uwzględniającą stan równowagi atmosfery oraz prędkość wiatru, opracował w latach 60. XX w. W. Parczewski (1964) (rys. 2).

Gdy dostępne są wyniki pomiarów i obserwacji naziemnych, można zastosować schemat autorstwa Pasquille'a. Wykorzystuje on dla określenia stanu równowagi atmosfery informacje o prędkości wiatru, zachmurzeniu i intensywności promieniowania słonecznego (tab. 2).

Główne wady powyższego schematu wynikają z nieprecyzyjnego określenia intensywności promieniowania słonecznego oraz z błędnego założenia, że równowaga stała nie może występować w ciągu dnia. Modyfikacje schematu Pasquille'a wprowadzone przez Turnera i Daganaud tylko do pewnego stopnia usunęły wspomniane wady (Walczewski 2000).

Najbardziej poprawną metodą określania stanu równowagi atmosfery wydaje się interpretacja pionowego profilu temperatury powietrza, który można uzyskać np. z radiosondażu. Pozwala to określić pionowy gradient temperatury powietrza. Jeśli spadek temperatury w warstwie 100 m przekracza 1°C , występuje równowaga chwiejna. Jeśli temperatura powietrza spada wolniej niż $1^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ lub gdy obserwujemy izotermię, czy inwersję termiczną, wskazuje to na występowanie równowagi stałej. W praktyce najczęściej stosuje się w Polsce regułę podaną przez W. Parczewskiego (za: Walczewski 2000):

$(dT/dz) < -1,0^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ – równowaga chwiejna,

$-1,0^{\circ}\text{C}/100\text{ m} \leq (dT/dz) \leq -0,2^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ – równowaga obojętna,

$(dT/dz) > -0,2^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ – równowaga stała.

Słabą stroną metody opartej o analizę pionowego profilu temperatury powietrza jest wspomniana już niewielka częstość wykonywania sondaży.

Tab. 2. Schemat Pasquille'a dla określania stanów równowagi atmosfery (za: Walczewski 2000)

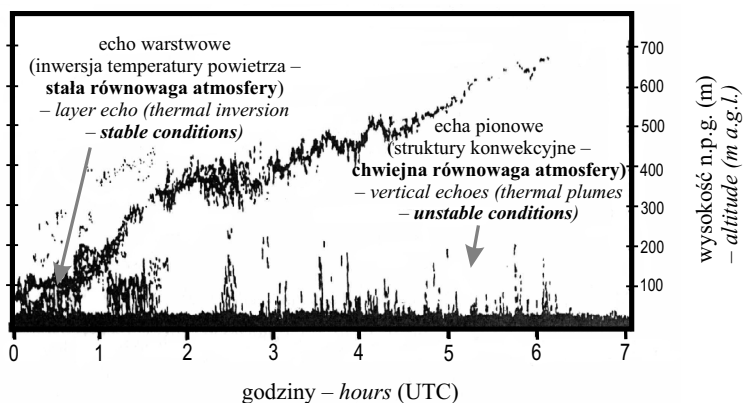
Tab. 2. Pasquille method for atmospheric stability determination (following Walczewski 2000)

prędkość wiatru – wind speed (m/s)	DZIEŃ – DAY intensywność promieniowania słonecznego – solar radiation intensity			NOC – NIGHT zachmurzenie – cloudiness (0–8)	
	silna – strong	umiarkowana – moderate	słaba – weak	4/8	3/8
< 2	A	A–B	B	E	F
2–3	A–B	B	C	E	F
3–5	B	B–C	C	D	E
5–6	C	C–D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

Lepszą czasową rozdzielczość w określaniu stanu równowagi atmosfery zapewnia zastosowanie metod teledetekcyjnych, takich, jak akustyczny sondaż atmosfery. Sondaż ten, prowadzony przy pomocy sodaru (radar soniczny) opiera się na tych samych zasadach, co sondaż wspomnianym sodarem dopplerowskim (pomijając rejestrację efektu Dopplera). Rozpraszanie fali dźwiękowej, rejestrowane przez sodar, jest efektem występowania w atmosferze nad przyrządem „objętości” powietrza atmosferycznego odpowiadających obszarom o podwyższonej turbulencji, generowanej przez termiczne niejednorodności atmosfery oraz niejednorodności w przepływie powietrza. Rejestrowane przez sodar formy echa (rys. 3) są wskaźnikiem występowania komórek konwekcyjnych i warstw inwersyjnych – struktur warstwy granicznej atmosfery, ważnych dla kształtowania warunków dyspersji zanieczyszczeń powietrza.

Doskonała czasowa rozdzielczość sondażu akustycznego pozwoliła wykorzystywać go w bieżącym określaniu stanu równowagi atmosfery. Dokonano tego dzięki klasyfikacji echa sodarowego, umożliwiającej przyporządkowanie typów echa atmosferycznego o określonej wysokości klasom stanu równowagi atmosfery. Przedstawiony poniżej schemat jest rozwinięciem koncepcji zaproponowanej przez zespół kierowany przez S.P. Singala (1985).

Zaprezentowanego schematu, stosowanego operacyjnie dla oceny warunków dyspersji zanieczyszczenia powietrza w Krakowie, nie należy jednak traktować jako uniwersalnego i ostatecznego. Posługując się sodarem o innych charakterystykach technicznych należy indywidualnie określić wysokościowe przedziały echa atmosfery charakteryzujące poszczególne klasy równowagi atmosferycznej.



Rys. 3. Zapis akustycznego echa atmosfery (sodarogram) i zasady interpretacji struktur echa sodarowego (rejestrogram za: Szarek 1993)

Fig. 3. Acoustic sounder facsimile (sodar-graph) and principles of interpretation of acoustic echo structures (sodar-graph following Szarek 1993)

Tab. 3. Schemat określania stanu równowagi atmosfery na podstawie echa sodarowego (Walczewski 2000)

Tab. 3. Scheme of atmospheric stability determination on the basis of a sodar echo (Walczewski 2000)

Klasy stanu równowagi atmosfery	Typ i wysokość echa sodarowego
A	Wyłącznie echa pionowe o wysokości powyżej 600 m – <i>Exclusively vertical echoes (height above 600 m)</i>
B	Wyłącznie echa pionowe o wysokości od 400 do 600 m – <i>Exclusively vertical echoes (height 400–600 m)</i> Echa pionowe pod warstwą wzniesioną (wysokość podstawy ponad 300 m) – <i>Vertical echoes below lifted inversion (base height above 300 m)</i>
C	Wyłącznie echa pionowe o wysokości od 50 do 400 m – <i>Exclusively vertical echoes (height 50–400 m)</i> Echa pionowe pod warstwą wzniesioną (wysokości podstawy do 300 m) – <i>Vertical echoes below lifted inversion (base height up to 300 m)</i> Warstwa wzniesiona nad strukturą bezechową w ciągu dnia – <i>Lifted inversion above echo-less structure (daytime)</i>
D	Struktura bezechowa – <i>Echo-less structure</i> Wyłącznie echa pionowe o wysokości do 50 m – <i>Exclusively vertical echoes (height up to 50 m)</i> Echa wiatrowe i deszczowe – <i>Wind and rain echoes</i>
E	Warstwa dolna o wysokości do 150 m z warstwą wzniesioną powyżej – <i>Ground-based inversion up to 150 m and lifted inversion above</i> Warstwa wzniesiona nad strukturą bezechową w ciągu nocy – <i>Lifted inversion above echo-less structure (night-time)</i>
F	Warstwa dolna bez warstwy wzniesionej powyżej – <i>Ground-based inversion and nolifted inversion above</i> Warstwa dolna o wysokości ponad 150 m z warstwą wzniesioną powyżej – <i>Ground-based inversion above 150 m and lifted inversion above</i>

Przykłady wykorzystania metod określania warunków dyspersji zanieczyszczeń powietrza

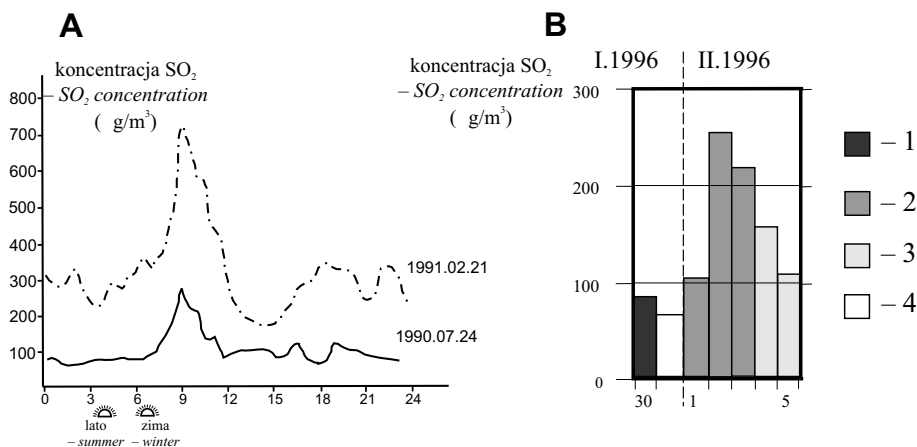
Przedstawione powyżej metody pozwoliły poszerzyć wiedzę o procesach rozpraszania zanieczyszczeń w warstwie granicznej atmosfery. Dostarczane przez nie informacje znalazły też wiele zastosowań praktycznych.

Jednym ze zjawisk, których interpretację ułatwiło wykorzystanie sondażu akustycznego, jest występowanie porannych maksimum emisji zanieczyszczeń powietrza (rys. 4A). Okazało się, że koincydują one ze zmianą struktury

warstwy granicznej atmosfery z inwersyjnej na konwekcyjną (rys. 3). Rozwijająca się pod wzniesioną warstwą inwersyjną konwekcja ściąga wyemitowane w nocy zanieczyszczenia ku powierzchni ziemi. Z racji nisko położonej wzniesionej warstwy inwersyjnej intensywne mieszanie konwekcyjne tych zanieczyszczeń ograniczone jest jednak do stosunkowo płytkiej warstwy (Walczewski 1994b).

Jeszcze mniej korzystne – gdyż długotrwałe – warunki aerosanitarne występowały zimą w sytuacjach, gdy sodar przez cały dzień rejestrował obecność płytkiej konwekcji ograniczonej przez wzniesioną inwersję temperatury powietrza (rys. 4B).

Najprostsza z metod charakterystyki wentylacji poziomej, jaką jest wykreślenie długookresowej róży wiatrów, znajduje wiele zastosowań praktycznych. Jednym z nich jest dobór optymalnej lokalizacji inwestycji pogarszających stan aerosanitarny. W. Parczewski (1964) proponował zastosowanie klimatologicznego rozstawu źródeł emisji. Umożliwia to zmniejszenie stężenia gazów toksycznych dzięki zlokalizowaniu projektowanych emitorów prostopadle do przeważającego kierunku wiatru.



Rys. 4. Przykłady porannych maksimów imisji SO₂ obserwowanych w Krakowie (A – za: Walczewski 1994b) oraz zależność średnich dobowych stężeń SO₂ w Krakowie od struktury warstwy granicznej atmosfery (B – Jarzyna 2003): 1 – przyziemna warstwa inwersyjna przez cały dzień, 2 – w ciągu dnia konwekcja przykryta wzniesioną warstwą inwersyjną, 3 – w ciągu dnia konwekcja, na której sodar nie rejestrował wzniesionej warstwy inwersyjnej, 4 – brak zapisu sodarowego

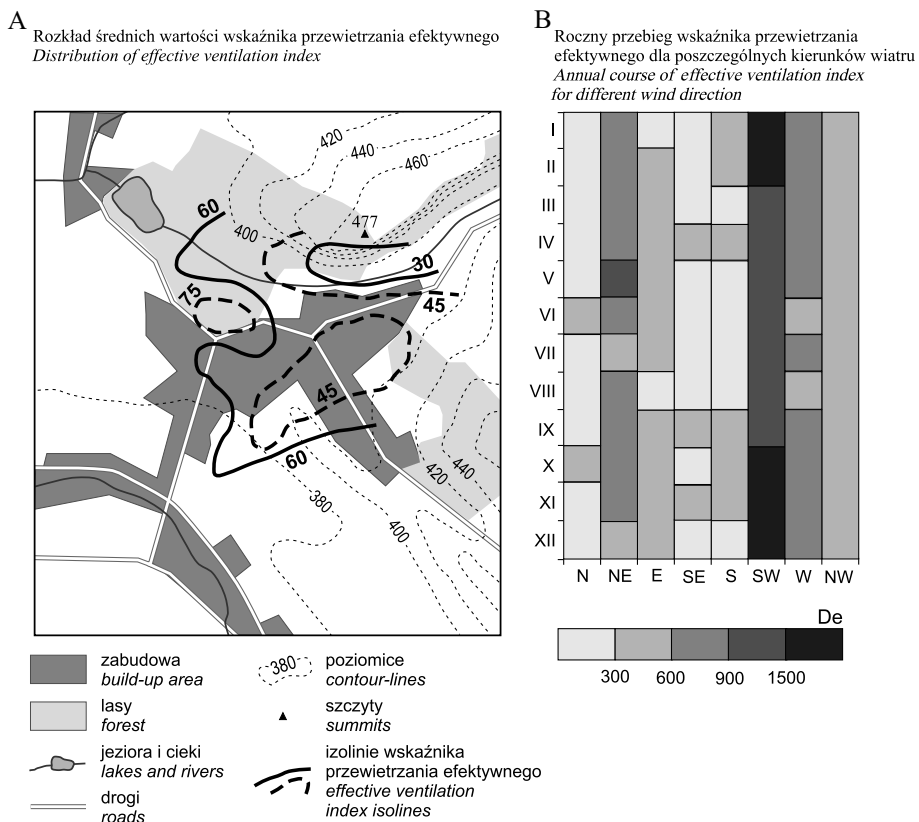
Fig. 4. Examples of morning SO₂ concentration maxima in Cracow (A – following Walczewski 1994b) and dependence of mean daily SO₂ concentrations in Cracow and the atmospheric boundary layer structures (B – Jarzyna 2003): 1 – ground-based inversion during the day, 2 – convection below lifted inversion during the day, 3 – convection and no lifted inversion detected by sodar during the day, 4 – lack of data

Informacje na temat prędkości i kierunku wiatru połączone z analizą morfometryczną mogą być podstawą dla wyznaczenia stopnia przewietrzania dolin w obszarach o urozmaiconej rzeźbie terenu (Błażejczyk 1975). Wyznaczenie wielkości przewietrzania dla szeregu przekrojów przez dolinę umożliwia analizę przestrzennego różnicowania stopnia przewietrzania w obrębie doliny (rys. 5A). Znajomość róży wiatrów umożliwia zaś analizę rocznego przebiegu intensywności przewietrzania (rys. 5B).

Wartości wskaźnika przewietrzania efektywnego, które są większe od 60, K. Błażejczyk uznał za wystarczające. Opisana metoda może być wykorzystana np. w planowaniu przestrzennym miejscowości uzdrowiskowych w obszarach górskich.

Zamiast podsumowania

Przedstawione powyżej metody stanowią oczywiście skrótowny i niepełny przegląd metodyki określania warunków dyspersji zanieczyszczeń powietrza.



Ryc. 5. Przewietrzanie efektywne w Dusznikach-Zdroju (Błażejczyk 1975)

Fig. 5. Effective ventilation in Duszniki-Zdrój (Błażejczyk 1975)

Każda z nich ma swoje zalety, ale i niedostatki. Pomiar i obserwacje naziemne – choć najprostsze – nie zawsze dają właściwy pogląd na warunki poza warstwą przyziemną, sondaż balonowy nie daje możliwości ciągłego określania warunków dyspersji, zaś techniki teledetekcyjne są kosztowne, a ich wyniki nie zawsze można jednoznacznie interpretować. Mimo to opisane metody znajdują wiele zastosowań praktycznych i ciągle są rozwijane.

Literatura

- Błażejczyk K., 1975: *Wyznaczanie stopnia przewietrzania dolin*. „Przegląd Geograficzny”, t. XLVII, z. 1: 153–160.
- Jarzyna K., 2003: *Wpływ lokalnej i wielkoskalowej sytuacji meteorologicznej na warunki dyspersji zanieczyszczeń powietrza w Krakowie*. Maszynopis rozprawy doktorskiej w Bibliotece Jagiellońskiej.
- Parczewski W., 1960: *Klasyfikacja przedziałów prędkości wiatru w zastosowaniu do opracowań klimatycznych i bioklimatycznych*. „Przegląd Geofizyczny”, R. V, z. 2: 117–122.
- Parczewski W., 1964: *Wpływ warunków meteorologicznych na rozprzestrzenianie się gazów toksycznych w dolnej warstwie atmosfery*. „Wiadomości Służby Hydrologicznej i Meteorologicznej”, z. 59: 5–19.
- Singal S.P. et al., 1985: *Stability studies with the help of acoustic sounding*. „Atmospheric Environment”, Vol. 19, No. 10: 221–228.
- Sorbjan Z., 1983: *Turbulencja i dyfuzja w dolnej atmosferze*. PWN, Warszawa.
- Szarek T., 1993: *Określenie głębokości warstwy mieszania metodą fotograficzną*. Praca dyplomowa Zakładu Klimatologii IGiGP UJ (manusc.).
- Walczewski J. (red.), 1994a: *Charakterystyka warstwy granicznej atmosfery nad miastem (na przykładzie Krakowa)*. Materiały Badawcze IMiGW, Seria: Meteorologia, nr 22, Warszawa.
- Walczewski J., 1994b: *Problem prognozowania porannej ewolucji warstwy granicznej przy prognozowaniu porannych maksimów imisji*. „Wiadomości IMiGW”, t. XVII, z. 3: 81–90.
- Walczewski J. (red.), 2000: *Wykorzystanie danych meteorologicznych w monitoringu jakości powietrza (podstawy fizyczne i wskazówki metodyczne)*. Biblioteka Monitoringu Środowiska, IOŚ, Warszawa.