

O DROGACH I KIERUNKACH ADWEKCJI MAS POWIETRZA NAD OBSZAR POLSKI

Wiatr geostroficzny stanowi prosty model ruchu mas powietrza, którego prędkość jest funkcją poziomego gradientu ciśnienia, przyspieszenia Coriolisa oraz gęstości powietrza. Model przyjmuje więc, że izobary są prostoliniowe, a lepkość oraz tarcie w atmosferze – zanedbywalnie małe.

Mimo tych uproszczeń, wektor wiatru geostroficznego reprezentuje dominującą składową rzeczywistego ruchu powietrza i może być wartościową charakterystyką cyrkulacji atmosferycznej – kierunku i intensywności adwekcji mas powietrza. W klimatologicznych badaniach cyrkulacji atmosfery wektor wiatru geostroficznego spełnia rolę wskaźnika cyrkulacji, względnie ściśle określającego zarówno jej kierunek, jak i prędkość w określonym czasie i miejscu nad powierzchnią ziemi. Można przyjąć, że składowa geostroficzna lepiej wyraża rzeczywisty kierunek adwekcji niż „zniekształcony” wskutek oddziaływań podłoża atmosfery wektor obserwowanego wiatru przyziemnego (geotryptycznego). Istotnym mankamentem tego wskaźnika cyrkulacji jest natomiast zaniechanie informacji o strukturze pola ciśnienia, decydującego o trajektoriach ruchu powietrza, a szczególnie – o jego cyklonicznym czy antycyklonicznym charakterze. Wektor wiatru geostroficznego jest zatem *par excellance* „lokalnym wskaźnikiem cyrkulacji” (por. Miętus 1996, 2001).

O możliwościach wykorzystania wektora wiatru geostroficznego jako wskaźnika warunków cyrkulacyjnych w klimatologii świadczą m.in. prace: Heino i in. (1999), Miętusa (1996, 1999, 2001), Degirmendźića i in. (2002), Kozuchowskiego i Żmudzkiej (2002), Degirmendźića i in. (2004).

Opis danych i metod

W trzech ostatnich pracach analizowaliśmy zmienność wektora wiatru geostroficznego, wyznaczonego na podstawie strefowych i południowych gradientów ciśnienia nad Europą Środkową – na obszarze między 45 i 60N równoleżnikiem i między południkami 15 i 30E. W niniejszym opracowaniu wiatr geostroficzny wyznaczono na podstawie gradientów ciśnienia, panujących w polu, ograniczonym do obszaru Polski i położonym w czworoboku o wierzchołkach Szczecin, Suwałki, Przemyśl i Wrocław. Otrzymany wypadkowy wektor wiatru geostroficznego ma więc punkt zaczepienia, leżący blisko geometrycznego środka Polski ($\phi = 52^\circ\text{N}$, $\lambda = 20^\circ\text{E}$).

Do określenia wektora wiatru geostroficznego nad Polską wykorzystano wzór na prędkość wiatru geostroficznego (Kopcewicz 1959):

$$V_g = K \times (\sin \phi)^{-1} \times PN$$

gdzie:

$K = 19 \times T \times p^{-1}$, T – temperatura bezwzględna, P – ciśnienie (hPa), PN – gradient poziomy ciśnienia (hPa/100 km), którego składową południową (PNS) i zachodnią (PNW) obliczono metodą przedstawioną przez Miętusa (2001):

$$PNS = \frac{(p_3 - p_2) - (y_3/y_2) \times (p_2 - p_1)}{x_3 - (y_3/y_2) \times x_2}$$

$$PNW = \frac{(p_2 - p_1) - PNS \times x_2}{y_2}$$

x i y są tu współrzędnymi prostokątnymi położenia trzech stacji (x_1, y_1 ; x_2, y_2 ; x_3, y_3), przy czym $x_1=0$ i $y_1=0$, p_1, p_2, p_3 – oznacza ciśnienie na poziomie morza odpowiednio w stacjach x_1, y_1 ; x_2, y_2 i x_3, y_3 .

Gradyenty ciśnienia wyznaczono dla czterech „trójkątnych obszarów”, położonych w polu, wyznaczonym przez stacje meteorologiczne: Szczecin, Wrocław, Przemyśl i Suwałki. Obliczono średni wektor gradientu ciśnienia i odpowiadający mu wektor wiatru geostroficznego na tym obszarze, reprezentującym terytorium Polski. Do obliczeń wykorzystano średnie dobowe wartości ciśnienia na poziomie morza, zmierzone w wymienionych stacjach (p_1, p_2, p_3, p_4) oraz w Łodzi (p) i średnie dobowe wartości temperatury powietrza (T) w okresie 50-lecia 1951–2000.

Za najsilniejsze adwekcje powietrza zostały uznane takie warunki cyrkulacyjne, w których średnia dobowa prędkość wiatru geostroficznego z określonego kierunku osiąga największe wartości bezwzględne. Ustalono szeregi rangowe prędkości dla każdego kierunku (N, NNE, NE, ENE itd.) i wybrano po 10 naj-

wyższych prędkości, określając w ten sposób zbiór najsilniejszych adwekcji, licząc łącznie $16 \times 10 = 160$ przypadków.

Dla każdego z tych przypadków wyznaczono trajektorie ruchu powietrza z 3-dobowego okresu, poprzedzającego dzień wystąpienia „najsilniejszej adwekcji”. Do wyznaczenia trajektorii wykorzystano model Hysplit wersję 4.7, udostępniony przez NOAA Air Resources Laboratory (Draxler, Rolph 2003). Obliczenia oparto na danych NCEP-NCAR Reanalysis (Kalnay i in. 1996). Aby wyróżnić główne typy trajektorii, zastosowano metodę hierarchicznego klasteringu według procedury Warda. Optymalną liczbę klastrów, równą 7, uzyskano w kroku poprzedzającym etap grupowania, w którym nastąpił znaczny wzrost całkowitej wariancji przestrzennej.

Szczególną uwagę zwrócono na miejsca, skąd dociera powietrze nad obszar Polski w ciągu przyjętego umownie 3-dobowego odcinka czasu. Określają one w przybliżeniu „pochodzenie” adwekcji, tj. geograficzne położenie masy powietrza przed jej napływem do Polski. Punkty początkowe trajektorii zgrupowano w klastry, aby wydzielić główne strefy zasilania wyróżnionych adwekcji. Wykorzystano do tego celu metodę k -średnich. Analizę klasteringu wykonano 500 razy z losowo wyznaczonymi w każdym powtórzeniu początkowymi centroidami. Wybrano to rozwiązanie, które charakteryzowało się minimalną średnią odległością obiektów od środków klas. Procedurę zastosowano dla k z przedziału 2–15. Aby wybrać optymalną liczbę klas, dla każdego k obliczono średnią wartość Indeksu Silhouette (S) według wzoru:

$$S_i = \frac{b-a}{\max(b,a)}$$

gdzie:

a oznacza średnią odległość między i -tym obiektem a każdym innym zaklasyfikowanym do tego samego klastra, b natomiast jest średnią odległością i -tego obiektu od każdego innego zgrupowanego w sąsiednim klastrze. Następnie obliczono średni Indeks Silhouette według formuły:

$$S_{ave} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i$$

gdzie:

N oznacza liczbę obiektów i wynosi 160. Optymalny parametr k związany jest z największą wartością S_{ave} (Pollard, Laan 2002). Określono w ten sposób 8 stref zasilania adwekcji.

W odniesieniu do 160 przypadków najsilniejszych adwekcji określono:

- 1.) relacje między kierunkiem adwekcji w Polsce (tzn. kierunkiem wiatru geostroficznego nad obszarem kraju) a kierunkiem pochodzenia masy powietrza,
- 2.) geograficzne rozmieszczenie miejsc pochodzenia powietrza (tzn. położenie początków 3-dobowych trajektorii),
- 3.) typy dominujących trajektorii.

Kierunek napływu mas powietrza nad Polskę a położenie strefy źródłowej adwekcji

Niezależnie od kierunku wiatru geostroficznego nad Polską, większość adwekcji reprezentuje zachodni sektor horyzontu – napływające masy powietrza pochodzą z obszaru znajdującego się między kierunkami SW i NW. Drugi

Tab. 1. Częstość „najsilniejszych” adwekcji mas powietrza nad Polskę z danego sektora, określona przez kierunek wektora wiatru geostroficznego (f_g) oraz częstość wystąpienia początkowego punktu trajektorii w danym sektorze róży wiatrów (f_p)

Tab. 1. Frequency of “the strongest” air masses advection over Poland from a given sector indicated by the direction of geostrophic wind vector (f_g) and the frequency of the occurrence of trajectory starting point within the given sector of the wind rose (f_p)

Sektory Sectors	f_g	f_p
N (NW–NE)	0,25	0,12
E (NE–SE)	0,25	0,29
S (SE–SW)	0,25	0,18
W (SW–NW)	0,25	0,41

pod względem częstości najsilniejszych adwekcji obszar należy do sektora wschodniego, trzeci – do południowego, reszta adwekcji ma pochodzenie północne (tab. 1). Statystyka ta wykazuje uprzywilejowanie równoleżnikowego, strefowego przenoszenia mas powietrza, docierającego nad obszar Polski: znaczna część powietrza napływającego z północy bądź z południa pochodzi z zachodu lub ze wschodu.

Adwekcje, reprezentowane przez zachodni kierunek wiatru geostroficznego nad Polską, tylko w 52% pochodzą z obszaru położonego na zachód od Polski, w 17% – z południa, w 24% – z północy i w 7% – ze wschodu. Zgodność północnego kierunku przepływu

Tab. 2. Częstość występowania strefy zasilania adwekcji (tzn. punktu początkowego trajektorii) w danym sektorze róży wiatrów, analizowana osobno dla czterech głównych kierunków napływu mas powietrza nad Polskę

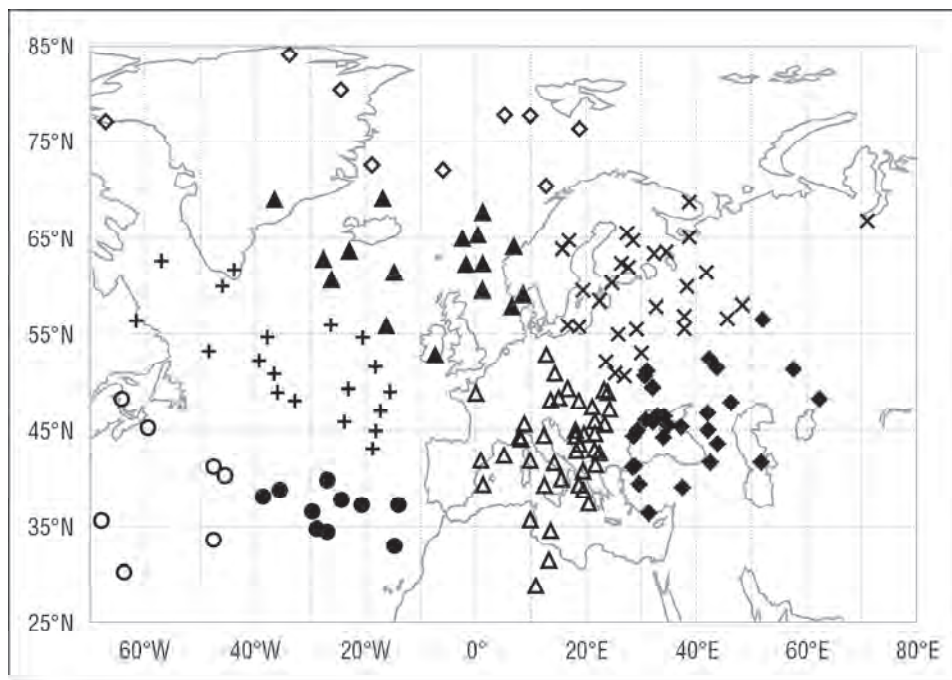
Tab. 2. Frequency the advection source region occurrence (i.e. the starting point of trajectories) within the given sector of the wind rose analysed separately for four main directions of air flow over Poland

	Kierunek napływu nad Polskę (wiatr geostroficzny) Direction of air flow over Poland (geostrophic wind)				
	sektor sector	N	E	S	W
Położenie początkowego punktu trajektorii Position of the trajectory starting point	N	0,61	0,22	0,03	0,24
	E	0,22	0,48	0,50	0,07
	S	0,04	0,29	0,45	0,17
	W	0,13	0,01	0,02	0,52

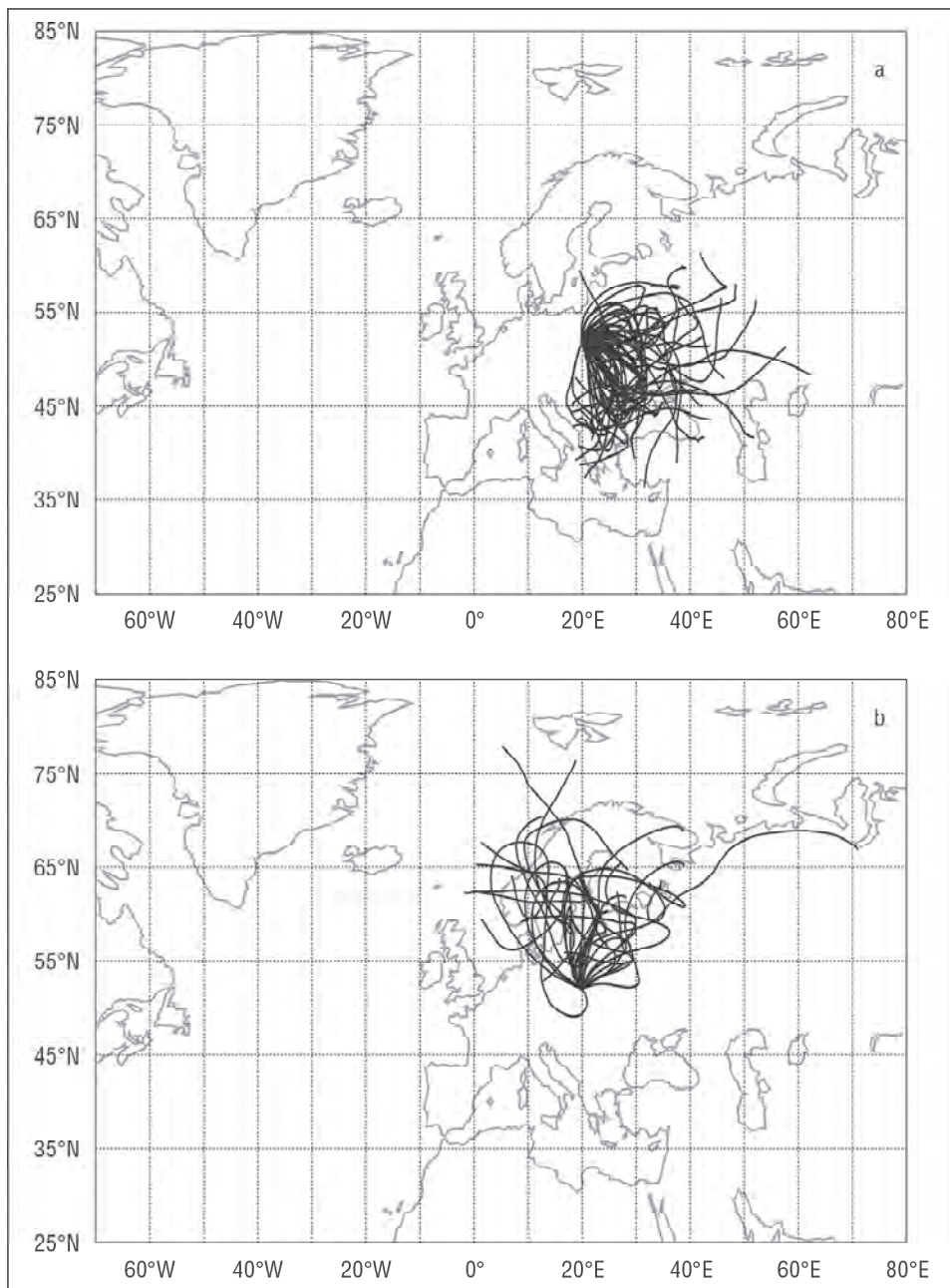
powietrza nad Polską z kierunkiem pochodzenia tego powietrza jest względnie wysoka (61%, tab. 2). W przypadku kierunków S i E – wynosi ona odpowiednio 45 i 48%; w przypadku południowego kierunku napływu powietrza nad obszarem Polski połowę częstości tych adwekcji stanowią masy pochodzące ze wschodu.

Główne strefy zasilania „najsilniejszych” adwekcji nad Polską

Trajektorie 72-godzinne mas powietrza przemieszczających się nad Polskę rozpościerają się nad rozległym obszarem położonym między 30 i 85N równoleżnikiem i między 70° długości zachodniej a 70° długości geograficznej wschodniej. Ponad 1/3 punktów, reprezentujących strefy zasilania najsilniejszych adwekcji powietrza nad Polską, znajduje się nad północnym Atlantykiem (włącznie z Wyspami Brytyjskimi i Morzem Północnym). Pozostała, przeważająca część leży nad kontynentem Eurazji i północną Afryką oraz Morzem Śródziemnym (ryc. 1).



Ryc. 1. Regiony zasilania „najsilniejszych” adwekcji mas powietrza nad Polską. Zaznaczono punkty początkowe 72-godzinnych trajektorii „wstecz”. Δ – region 1, \times – region 2, \blacklozenge – region 3, $+$ – region 4, \blacktriangle – region 5, \bullet – region 6, \blacklozenge – region 7, \circ – region 8
 Fig. 1. Source regions of the “strongest” air masses advections over Poland. Starting points of 72-hour backward trajectories are denoted Δ – region 1, \times – region 2, \blacklozenge – region 3, $+$ – region 4, \blacktriangle – region 5, \bullet – region 6, \blacklozenge – region 7, \circ – region 8



Ryc. 2. Pierwsza (a) i druga (b) klasa trajektorii. Średnią trajektorię w klastrze pogrubiono Fig. 2. The first (a) and the second (b) class of trajectories. Averaged trajectory within the cluster is given in bold

Wyróżniono 8 regionów odzwierciedlających rozmieszczenie „źródeł” adwekcji: najliczniejsze przypadki reprezentuje region położony na południowy zachód od Polski i obejmujący m.in. Bałkany i Morze Śródziemne. Z tego regionu pochodzi 1/4 analizowanych adwekcji. Drugim pod względem częstości jest region położony na północny wschód od Polski i rozciągający się od Bałtyku po Półwysep Tajmyr w północnej Rosji (prawie 1/5 adwekcji). Niewiele mniejszą częstość „źródeł” adwekcji reprezentuje region południowo-wschodni – od Ukrainy i Morza Czarnego po Jezioro Aralskie. Pozostałe adwekcje pochodzą z Atlantyku, Grenlandii i Morza Arktycznego; na tych rozległych obszarach wyróżnia się 5 regionów, reprezentujących po kilka – kilkanaście procent przypadków pochodzenia najsilniejszych adwekcji (ryc. 1).

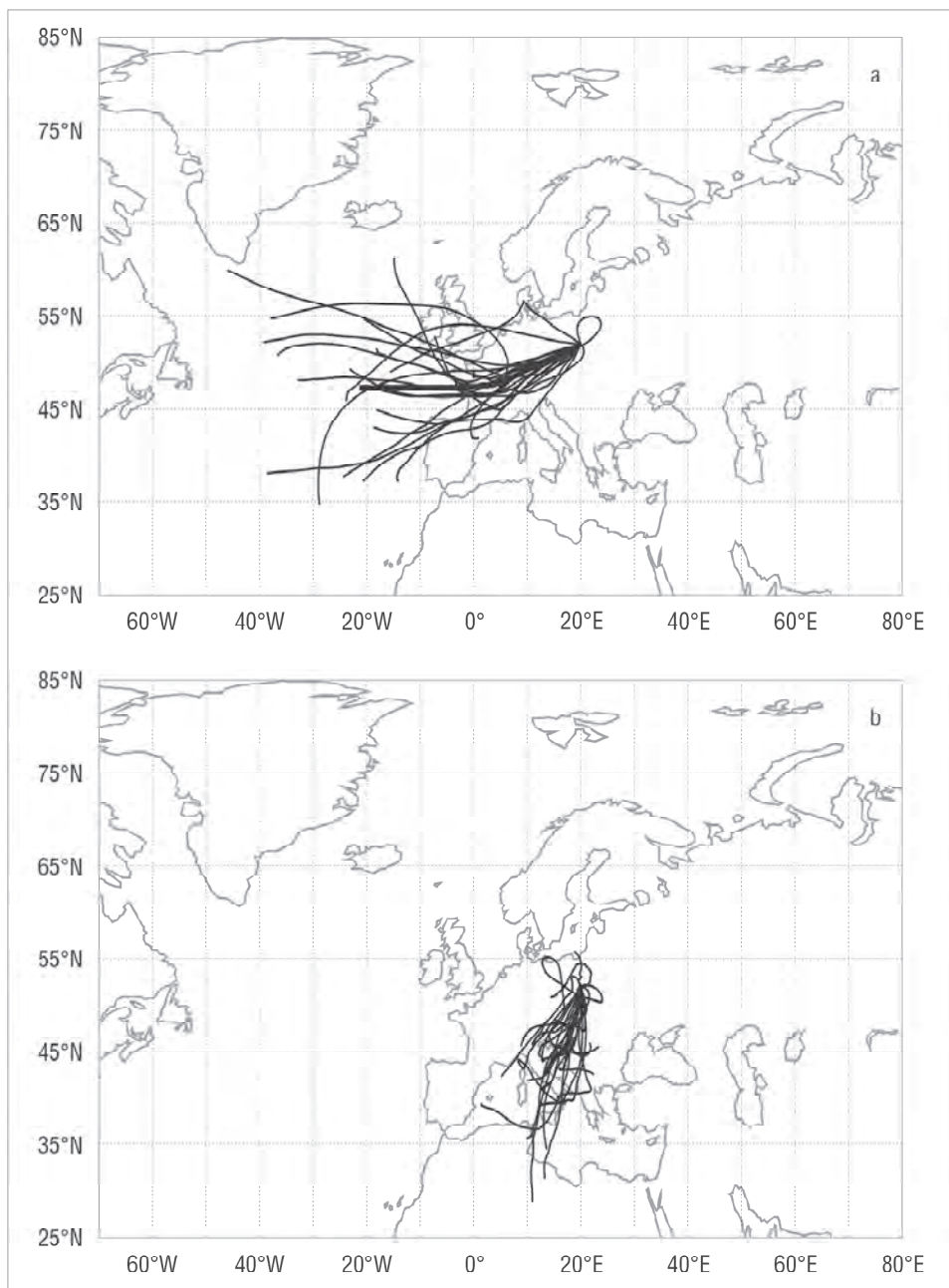
Główne typy trajektorii mas powietrza

Najliczniejszym typem trajektorii są względnie krótkie i zróżnicowane pod względem kształtu drogi adwekcji południowo-wschodnich (ryc. 2a). Grupa ta reprezentuje prawie 37% analizowanych adwekcji, przynoszących powietrze z Europy Wschodniej i rejonu Morza Czarnego. Drugi typ trajektorii stanowią adwekcje północne, sprowadzające powietrze z Skandynawii i północnej Rosji (prawie 16% analizowanych przypadków, ryc. 2b). Trzeci typ grupuje adwekcje zachodnie, z południowej części północnego Atlantyku (14%, ryc. 3a). Czwarty typ obejmuje względnie liczne adwekcje z Włoch, Adriatyku i Półwyspu Bałkańskiego (14%, ryc. 3b). Piąty typ stanowią adwekcje z części Atlantyku, położonej na południe od 50 równoleżnika (7%, ryc. 4a). Typ szósty stanowią adwekcje z części Atlantyku na północ od 55 równoleżnika i z Grenlandii (7%, ryc. 4b). Do typu siódmego zaliczają się bardzo długie trajektorie adwekcji z zachodniego Atlantyku, w tym z wybrzeży Kanady i Grenlandii (4%, ryc. 5).

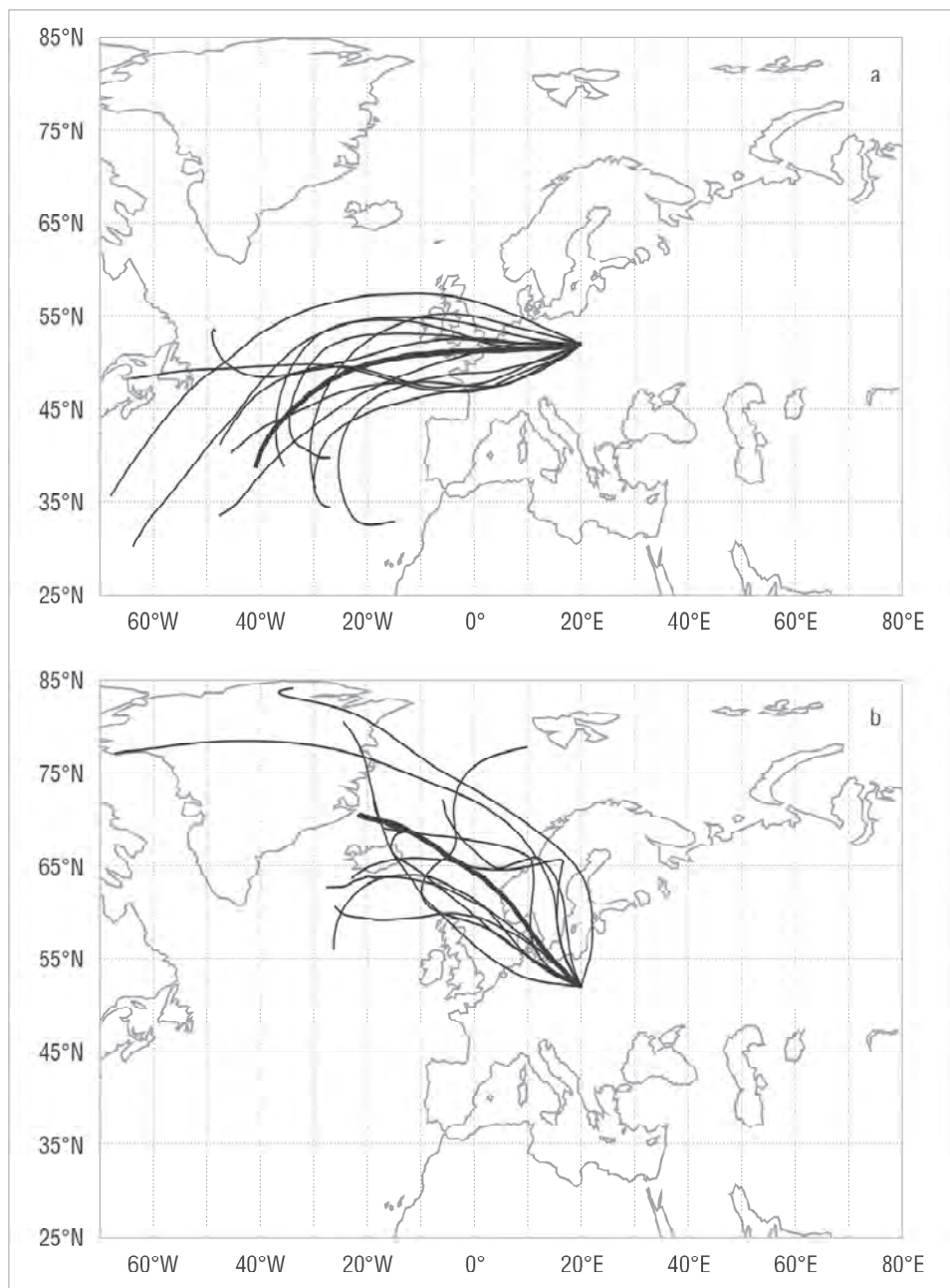
Podsumowanie

Przeprowadzona analiza statystyczna wykazuje, że kierunek ruchu mas powietrza nad Polską, uwarunkowany układem izobar nad obszarem kraju, tylko w połowie (45–61%) rozpatrywanych przypadków określa pochodzenie mas powietrznych. Trajektorie ruchu mas powietrza odznaczają się znaczną krzywizną, wskutek której kierunek wiatru nad Polską pozostaje w słabym związku z kierunkiem pochodzenia tych mas. Drogi przepływu powietrza odzwierciedlają strefowy charakter cyrkulacji nad Atlantykiem i Europą i znaczącą przewagę zachodniego przenoszenia mas powietrza – 3-dobowe trajektorie „wstecz” sięgają do obszarów położonych o 90 stopni na zachód od Polski i 40-50 stopni na wschód. Można także zauważyć przewagę częstości przenoszenia powietrza z południa nad przenoszeniem z północy.

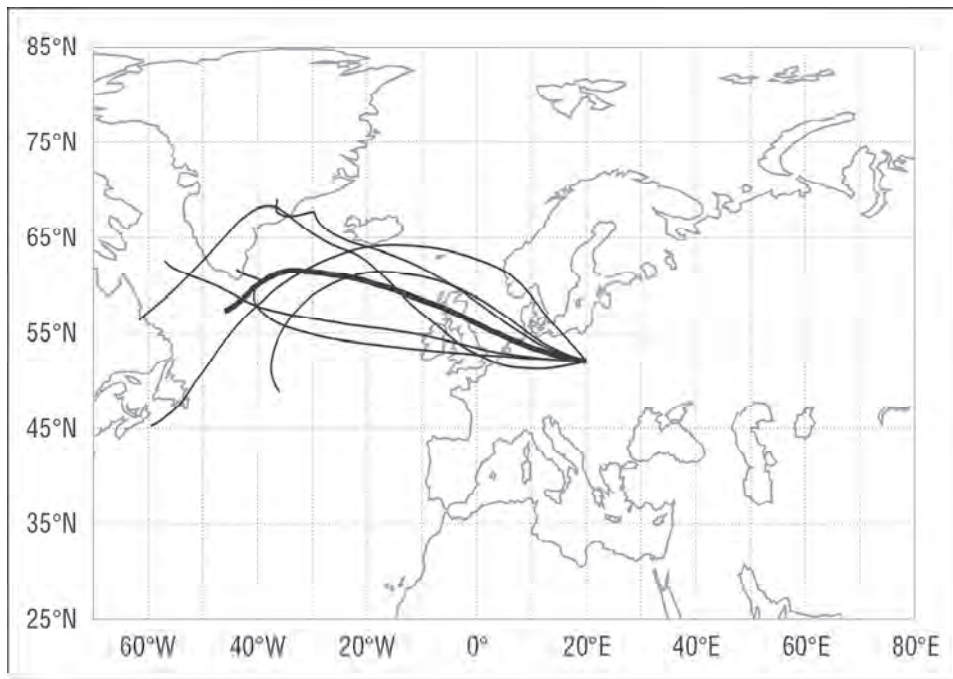
Zarówno regiony pochodzenia mas powietrznych, jak i nawiązujące do nich typy trajektorii mas powietrza posiadają szereg specyficznych cech. Zwraca m.in. uwagę znaczna frekwencja adwekcji z południowej Europy – wybrzeży



Ryc. 3. Trzecia (a) i czwarta (b) klasa trajektorii Średnią trajektorię w klastrze pogrubiono
Fig. 3. The third (a) and fourth (b) class of trajectories. Averaged trajectory within the cluster is given in bold



Rys. 4. Piąta (a) i szósta (b) klasa trajektorii. Średnią trajektorię w klastrze pogrubiono Fig. 4. The fifth (a) and sixth (b) class of trajectories. Averaged trajectory within the cluster is given in bold



Ryc. Siódma klasa trajektorii. Średnią trajektorię w klastrze pogrubiono

Fig. 5. The seventh class of trajectories. Averaged trajectory within the cluster is given in bold

Morza Śródziemnego i Morza Czarnego. Uśredniona trajektoria najczęstszych adwekcji z południowego wschodu wykazuje krzywiznę cyklonalną (ryc. 2a), podobnie jak trajektoria adwekcji zachodnich (ryc. 3a) i południowo-zachodnich (ryc. 3b). Trajektorie adwekcji północnych (ryc. 2b) i niektórych odmian adwekcji zachodnich (ryc. 4a, 4b, 5) mają krzywizny antycyklonalne.

Należy podkreślić, że przedstawione wyniki badania trajektorii napływu powietrza nad Polskę odzwierciedlają jedynie drogi wszystkich kierunków najsilniejszych adwekcji, bez względu na rzeczywistą, ogólną częstość tych kierunków. Badana próba, jak zaznaczono, obejmuje bowiem 160 przypadków najsilniejszych adwekcji. Mimo tych ograniczeń, zastosowane w niniejszym opracowaniu metody hierarchicznego grupowania trajektorii, jak również procedura *k*-średnich, wykorzystana do określenia głównych stref zasilania adwekcji, wydają się przynosić interesujące rezultaty i będą niewątpliwie dobrym narzędziem dalszych badań cyrkulacyjnych czynników klimatu Polski.

LITERATURA

- Degirmendžić J., Kozuchowski K., Żmudzka E., 2002, *Uwarunkowania cyrkulacyjne zmienności temperatury powietrza w Polsce w okresie 1951-2000*, *Przegląd Geofizyczny*, 47, 1-2, 93-98.
- Degirmendžić J., Kozuchowski K., Żmudzka E., 2004, *Changes of air temperature and precipitation in Poland in the period 1951-2000 and their relationship to atmospheric circulation*, *International Journal of Climatology*, 24, 291-310.
- Draxler R., Rolph G., 2003, *HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model access via NOAA ARL READY Website* (<http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>), NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.
- Heino R., Brazdil R., Forland E., Toumenvirta H., Alexandersson H., Beniston M., Pfister C., Rebetez M., Rosenhagen G., Roesner S., Wibig J., 1999, *Progress in the study of climatic extremes in Northern and Central Europe*, *Climatic Change*, 42, 151-181.
- Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K. C., Ropelewski C., Wang J., Leetmaa A., Reynolds E., Jenne R., Joseph D., 1996, *The NCEP/NCAR 4-Year Reanalysis Project*, *Bulletin of American Meteorological Society*, 77, 437-471.
- Kopcewicz T., 1959, *Fizyka atmosfery*, III, PWN, Warszawa.
- Kozuchowski K., Żmudzka E., 2002, *Cyrkulacja atmosferyczna i jej wpływ na zmienność temperatury powietrza w Polsce*, *Przegląd Geograficzny*, 74, 4, 591-604.
- Miętus M., 1996, *Zmienność lokalnej cyrkulacji atmosferycznej nad północną Polską i jej związek z elementami klimatu*, *Wiadomości Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej*, 19(40), 1, 9-30.
- Miętus M., 1999, *Rola cyrkulacji atmosferycznej w kształtowaniu warunków klimatycznych i oceanograficznych w polskiej strefie brzegowej Morza Bałtyckiego*, *Materiały Badawcze IMGW, seria Meteorologia*, 29.
- Miętus M., 2001, *Kalendarz lokalnego wskaźnika cyrkulacji atmosferycznej w rejonie Południowego Bałtyku. Wektor wiatru geostroficznego*, Oddział Morski IMGW, Gdynia (materiały niepublikowane).
- Pollard K. S., Laan M. J., 2002, *A method to identify significant clusters in gene expression data*, U.C. Berkeley Division of Biostatistics Working Paper Series, paper 107, The Berkeley Electronic Press, <http://www.bepress.com/ucbbiostat/paper107>.

ABOUT TRAJECTORIES AND DIRECTIONS OF AIR MASS ADVECTION OVER POLAND

SUMMARY

On the basis of daily mean values of geostrophic wind spanning the period of 1951-2000 ten highest values were selected for each out of 16 sectors of wind rose (N, NNE, NE, ENE etc.). Therefore, 160 (10 × 16) cases of "the strongest" advection were distinguished. For each case, 72-hour backward trajectory was constructed by means

of NOAA Hysplit model. After examining the relation between the direction of geostrophic wind over Poland and the location of the source regions of the selected advections it can be stated that: air flow associated with westerly geostrophic wind comes from the regions situated to the west of Poland only in 52% of cases, in 17% from the south, in 24% from the north and in 7% from the east. Northerly wind vectors over Poland are associated in 62% of cases with northern source regions. The next two sectors (E, S) of wind are even less indicative of source region position. In the next stage of the analysis, trajectory clustering was performed and 7 main categories were obtained. The largest size cluster consists of rather short-distance, south-easterly trajectories relatively differentiated with regard to their shape. Authors also applied non-hierarchical k -mean clustering in order to delimit the main source regions of advections over Poland. 8 regions were selected. "The strongest" advections originate most frequently over Balkan Peninsula and Mediterranean Sea, slightly less often over northern Russia and the region situated between the Black and the Aral Sea. The rest of advections comes from the Atlantic Ocean.

Translated by Author