

PRACE GEOGRAFICZNE

zeszyt 150, 2017, 61–78

doi: 10.4467/20833113PG.17.017.7321

Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ

Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego

ZMIENNOŚĆ WSKAŹNIKÓW CYRKULACJI ATMOSFERYCZNEJ NAD OBSZAREM LUBELSZCZYZNY I ZWIĄZEK TEMPERATURY POWIETRZA I OPADÓW ATMOSFERYCZNYCH Z TYMI WSKAŹNIKAMI

Krzysztof Bartoszek

Temporal variability of atmospheric circulation indices over the Lublin region and their relationships with air temperature and precipitation

Abstract: The objective of the study was the long-term and annual variability of atmospheric circulation indices over the Lublin region in the years 1951–2010. The zonal, meridional and cyclonicity indices were calculated based on the calendar of circulation types over East-Central Poland. Furthermore, the relationships between atmospheric circulation and thermal as well as precipitation conditions in the Lublin region were examined. In winter season, the strongest zonal circulation was noticed in the period from the second half of the 1980s to the end of the 20th century. In the last two decades of the analyzed period, a higher frequency of southern circulation in summer was observed. The characteristic features of atmospheric circulation in the study area include the prevalence of westerly circulation in autumn and winter, and easterly air flow in spring. The zonal circulation had an important role for monthly air temperature both in winter and in summer, whereas meridional air flow in spring and autumn. Compared to the air flow direction, the character of atmospheric circulation, expressed by anticyclonic and cyclonic circulation, had a weak influence on monthly air temperatures. The cyclonicity index most accurately reflects the variability of monthly precipitation totals in the Lublin region.

Keywords: atmospheric circulation, circulation indices, air temperature, precipitation, Lublin region

Zarys treści: W pracy scharakteryzowano przebieg roczny oraz wieloletnią zmienność wskaźników cyrkulacji atmosferycznej nad obszarem Lubelszczyzny w latach 1951–2010. Do tego celu wykorzystano kalendarz typów cyrkulacji nad środkowo-wschodnią Polską, na podstawie którego wyznaczono wskaźniki cyrkulacji strefowej, południkowej i cykloniczności. Ponadto oceniono związek między cyrkulacją atmosferyczną a warunkami termicznymi i opadowymi na Lubelszczyźnie. Badania wykazały, że największa intensywność cyrkulacji strefowej w zimie przypadała na okres od drugiej połowy lat 1980. do końca XX w., natomiast w okresie letnim w ostatnich latach stwierdzono większą częstość cyrkulacji o składowej południowej. Nad Lubelszczyzną w miesiącach jesiennych i zimowych dominuje zachodni przepływ powietrza, w okresie wiosennym przeważa zaś cyrkulacja wschodnia. Najbardziej istotny wpływ cyrkulacji strefowej powietrza na średnie miesięczne wartości temperatury powietrza na Lubelszczyźnie stwierdzono w okresie od grudnia do marca oraz w miesiącach letnich. Natomiast wiosną i jesienią większe oddziaływanie na temperaturę powietrza wykazywała cyrkulacja południkowa. Zmienność miesięcznych sum opadów atmosferycznych najlepiej opisywał wskaźnik cykloniczności.

Słowa kluczowe: cyrkulacja atmosferyczna, wskaźniki cyrkulacji atmosferycznej, temperatura powietrza, opad atmosferyczny, Lubelszczyzna

Wstęp

Cyrkulacja atmosferyczna jest procesem klimatotwórczym, który w znacznym stopniu determinuje zmienność czasową i przestrzenną elementów meteorologicznych w Europie Środkowej (Post i in. 2002; Sepp, Jaagus 2002). Masy powietrza napływające nad ten obszar mogą się znacznie różnić pod względem cech termiczno-wilgotnościowych, co jest uwarunkowane położeniem geograficznym ich obszarów źródłowych. W okresie zimowym na warunki atmosferyczne wpływ ma przede wszystkim współdziałanie dwóch centrów działania atmosfery znad północnego Atlantyku, tj. Niziny Islandzkiej i Wyżu Azorskiego, a ponadto położenie i intensywność Wyżu Syberyjskiego. O tej porze roku, w przeciwieństwie do okresu letniego, nad Europą Środkową występuje dość znaczna zmienność pola ciśnienia atmosferycznego, spowodowana zwiększoną aktywnością cyklonalną (Trigo 2006; Sienz i in. 2010). W skali wieloletniej charakterystyczne są natomiast zmiany m.in. intensywności cyrkulacji strefowej oraz częstości występowania układów niskiego i wysokiego ciśnienia (Bárdossy, Caspary 1990; Hurrell 1995; Slonosky i in. 2000; Kyselý, Huth 2006).

W literaturze klimatologicznej do opisu cyrkulacji atmosferycznej wykorzystuje się m.in. klasyfikacje typów cyrkulacji, które różnią się między sobą zastosowaną metodą (klasyfikacje automatyczne i subiektywne) oraz liczebnością wydzielonych typów (Huth i in. 2008). W klasyfikacjach subiektywnych analizowane są przede wszystkim mapy synoptyczne przedstawiające przestrzenną zmienność ciśnienia atmosferycznego (np. Osuchowska-Klein 1978; Niedźwiedź 1981). Z kolei w klasyfikacjach automa-

tycznych stosowane są formuły do obliczania np. prędkości wiatru geostroficznego i wirowości względnej (m.in. Jones 1993; Piotrowski 2009) oraz algorytmy wykorzystywane m.in. w sieciach neuronowych (Zhang i in. 1997), analizie głównych składowych (Huth 1996) czy też analizie skupień (Esteban i in. 2006). Warunki cyrkulacyjne można uogólnić za pomocą wskaźników, które zawierają najbardziej istotne informacje o zmianach intensywności cyrkulacji strefowej i południkowej nad badanym obszarem (Kozuchowski 1993; Kutiel i in. 1996; Jacobeit i in. 2001; Tomingas 2002; Nowosad 2011). W opracowaniach dotyczących obszaru Polski można wyróżnić wskaźniki (indeksy) cyrkulacji zaproponowane m.in. przez Lityńskiego (1969), Ustrnula (1997) i Niedźwiedzia (2000). Wskaźniki określone przez Niedźwiedzia stanowią modyfikację metody Murraya i Lewisa (1966), a na ich podstawie dokonywano oceny wpływu cyrkulacji atmosferycznej na zmienność czasową i przestrzenną wybranych elementów meteorologicznych na obszarze Polski (m.in. Falarz 2007; Niedźwiedź i in. 2009).

Głównym celem tej pracy jest przedstawienie czasowej zmienności cyrkulacji atmosferycznej nad obszarem Lubelszczyzny w latach 1951–2010 przy wykorzystaniu wskaźników cyrkulacji strefowej, południkowej i cykloniczności. Ponadto oceniono związki przyczynowo-skutkowe między cyrkulacją atmosferyczną a średnimi miesięcznymi wartościami temperatury powietrza i sumami opadów atmosferycznych na tym obszarze.

Metody badań

W tym opracowaniu wskaźniki cyrkulacji atmosferycznej wyznaczono na podstawie kalendarza typów cyrkulacji atmosferycznej nad obszarem Lubelszczyzny (Bartoszek 2015), w którym wyróżniono po 8 typów kierunkowych cyklonalnych, pośrednich i antycyklonalnych oraz po jednym typie bezadwekcyjnym cyklonalnym i antycyklonalnym oraz sytuację nieokreśloną (tab. 1). Kierunek cyrkulacji oraz jej charakter (cyklonalny, antycyklonalny lub nieokreślony) został w tej klasyfikacji ustalony na podstawie obliczeń z zastosowaniem formuł zaproponowanych przez Jenkinsona i Collisona (1977). Średnie dobowe wartości ciśnienia atmosferycznego na poziomie morza pochodziły z bazy danych The Twentieth Century Reanalysis (Compo i in. 2011) i odnosiły się do 32 punktów gridowych rozmieszczonych na obszarze Europy Środkowo-Wschodniej. Szczegółowy opis omówionej klasyfikacji typów cyrkulacji znajduje się w opracowaniu Bartoszka (2017).

Do opisu cyrkulacji atmosferycznej nad obszarem Lubelszczyzny i określenia jej wpływu na temperaturę powietrza oraz opady atmosferyczne zastosowano trzy wskaźniki zaproponowane przez Niedźwiedzia (2000), tj. wskaźnik cyrkulacji strefowej – zachodniej (W), cyrkulacji południkowej – południowej (S), oraz cykloniczności (C). Indeksy wyrażone zostały przez punkty wagowe w postaci liczb niemianowa-

Tab. 1. Typy cyrkulacji zastosowane w opracowaniu
 Table. 1. Circulation types applied in the study

Typy cyrkulacji Circulation types	Opis Description
Nc, NEc, Ec, SEc, Sc, SWc, Wc, NWC	Typy kierunkowe cyklonalne Directional cyclonic types
No, NEo, Eo, SEo, So, SWo, Wo, NWO	Typy kierunkowe pośrednie Directional transitional types
Na, NEa, Ea, SEa, Sa, SWa, Wa, NWA	Typy kierunkowe antycyklonalne Directional anticyclonic types
C	Typ bezadwekcyjny cyklonalny Cyclonic non-directional type
A	Typ bezadwekcyjny antycyklonalny Anticyclonic non-directional type
X	Sytuacja nieokreślona Undefined situation

nych, które można przypisać określonym typom cyrkulacji (tab. 2). Punkty wagowe zsumowano w poszczególnych miesiącach, porach roku (wiosna: marzec–maj, lato: czerwiec–sierpień, jesień: wrzesień–listopad, zima: grudzień–luty) i w całym roku. Wskaźnik W wyrażał intensywność cyrkulacji strefowej (wartości dodatnie oznaczały przewagę cyrkulacji zachodniej, a ujemne wschodniej), wskaźnik S – intensywność cyrkulacji południkowej (dodatnie wartości wskaźnik osiągał przy adwekcji powietrza z sektora południowego, ujemne zaś z sektora północnego), wskaźnik C natomiast przedstawiał przewagę cyrkulacji cyklonalnej (wartości dodatnie) lub antycyklonalnej (wartości ujemne).

Przedstawione w opracowaniu tendencje zmian wartości wskaźników cyrkulacji zanalizowano w kolejnych trzydziestoleciach badanego wielolecia (krok czasowy to 1 rok), tj. od lat 1951–1980 do 1981–2010, co łącznie stanowiło 31 okresów. Do oceny istotności statystycznej trendów zastosowano nieparametryczny test Mann-Kendalla, a wielkość zmian badanych zmiennych w czasie określono metodą Sena (Sen 1968; Kendall 1975). W celu wykazania siły współzależności między analizowanymi zmiennymi zastosowano korelację liniową Pearsona, a istotność statystyczną współczynnika korelacji sprawdzono testem t-Studenta.

W opracowaniu wykorzystano uśrednione z 5 stacji meteorologicznych miesięczne wartości temperatury powietrza oraz sum opadów atmosferycznych z okresu 1951–2010. Stacje były zlokalizowane na obszarze Lubelszczyzny lub w jej sąsiedztwie, tj. w Lublinie (51°14'N, 22°38'E, 216 n.p.m.), Włodawie (51°33'N, 23°32'E, 163 n.p.m.), Terespolu (52°04'N, 23°37'E, 133 n.p.m.), Siedlcach (52°11'N, 22°16'E,

Tab. 2. Punkty wagowe przypisane typom cyrkulacji nad obszarem Lubelszczyzny w celu obliczania wskaźników cyrkulacji strefowej i południkowej oraz wskaźnika cykloniczności
 Table 2. Weighted points assigned to circulation types for the Lublin region in order to calculate zonal and meridional circulation indices as well as the cyclonicity index

Wskaźnik cyrkulacji strefowej i południkowej Zonal and meridional circulation index													
Wskaźnik cyrkulacji Circulation index	Typy kierunkowe Directional types								Typy bezadwekcyjne Non-directional types				
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	C	A	x		
W	0	-1	-2	-1	0	1	2	1	0	0	0		
S	-2	-1	0	1	2	1	0	-1	0	0	0		
Wskaźnik cykloniczności Cyclonicity index													
Wskaźnik cyrkulacji Circulation index	Typy kierunkowe cyklonalne Directional cyclonic types		Typy kierunkowe pośrednie Directional transitional types		Typy kierunkowe antycyklonalne Directional anticyclonic types		Typy bezadwekcyjne Non-directional types						
	C		A		x								
C	1		0		-1		2					-2	0

146 n.p.m.) i Sandomierzu (50°42'N, 21°43'E, 217 n.p.m.). W przypadku Lublina wartości pochodziły z Obserwatorium Meteorologicznego Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej. W pozostałych przypadkach dane pozyskano ze stacji pomiarowych IMGW-PIB. Nie uwzględnienie w opracowaniu stacji meteorologicznej IMGW-PIB w Zamościu (południowo-wschodnia część regionu) co było związane z brakiem dostępności danych z pierwszego 10-lecia XXI w. Do oceny zależności między cyrkulacją atmosferyczną a temperaturą powietrza i opadami wykorzystano analizę regresji wielorakiej.

Wyniki i dyskusja

Wieloletnia zmienność wskaźników cyrkulacji

Na obszarze Lubelszczyzny wartości wskaźników cyrkulacji charakteryzowały się dość dużymi zmianami z roku na rok we wszystkich porach roku (ryc. 1–3). Jednakże można było wyróżnić okresy, w których zaznaczył się wyraźny wzrost lub spadek częstości dni z cyrkulacją cyklonalną (antycyklonalną) oraz cyrkulacją o składowej zachodniej (wschodniej) i południowej (północnej) (tab. 3).

Tab. 3. Istotne statystycznie tendencje zmian wartości wskaźników cyrkulacji nad obszarem Lubelszczyzny obliczone w kolejnych 30-letnich okresach między 1951 a 2010 r.

Table 3. Statistically significant trends in the circulation indices for the Lublin region in the 30-year moving periods between 1951 and 2010

Wskaźniki cyrkulacji Circulation indices	Charakterystyka trendów Characteristic of trends	Trendy rosnące / Upward trends					Trendy malejące / Downward trends				
		Zima Winter	Wiosna Spring	Lato Summer	Jesień Autumn	Rok Year	Zima Winter	Wiosna Spring	Lato Summer	Jesień Autumn	Rok Year
W	Okres Period	1966\95	.	.	1957\86	1963\92	.	.	1977\06	1977\06	1981\10
	Zmiana na 10 lat Change per 10 year	+15,0	.	.	+13,7	+22,0	.	.	-12,9	-12,5	-22,1
S	Okres Period	.	.	1973\02	.	.	1969\98	1981\10	1951\80	.	1963\92
	Zmiana na 10 lat Change per 10 year	.	.	+9,5	.	.	-12,9	-10,0	-14,3	.	-24,4
C	Okres Period	.	1952\81	1961\90	1975\04	1952\81	.	.	.	.	.
	Zmiana na 10 lat Change per 10 year	.	+10,8	+7,7	+7,2	+23,3	.	.	.	.	.

Objaśnienia: Wartości podkreślone i pogrubione – trend istotny statystycznie na poziomie $p < 0,01$; wartości pogrubione – trend istotny statystycznie na poziomie $p < 0,05$.

Explanations: Underlined and bold values – significant trend at the $p < 0.01$ level; bold – significant trend at the $p < 0.05$ level.

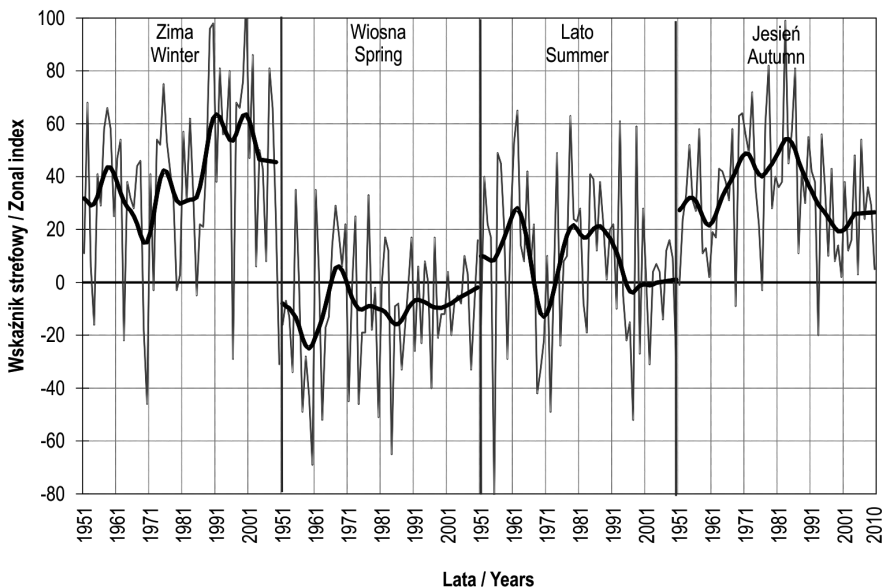
Między 1951 a 2010 r. najniższe wartości wskaźnika strefowego w okresie zimowym przypadały na koniec lat 60. XX w. (minimum w zimie 1969/1970; ryc. 1, tab. 4). Według Ustrnula (1997) oraz Degirmendżicia i in. (2000) okres ten wyróżniał się na tle minionego stulecia wyjątkowo osłabioną cyrkulacją strefową zachodnią nad większą częścią kontynentu europejskiego. Najwyższe wartości wskaźnika W występowały natomiast w sezonach zimowych, począwszy od końca lat 80. do przełomu XX i XXI w. (maksimum w zimie 1999/2000; tab. 4). Wzrost intensywności cyrkulacji zachodniej nad Europą w tych latach potwierdzają badania innych autorów (Niedźwiedź 1996; Werner i in. 2000; Kyselý, Huth 2006; Ustrnul 2007).

Większość okresów wiosennych na obszarze Lubelszczyzny charakteryzowała się przewagą adwekcji powietrza z sektora wschodniego (ujemne wartości wskaźnika W). Zwiększony udział napływu powietrza nad Polskę ze wschodu oraz południowo-wschodu w kwietniu i maju wykazał także Piotrowski (2009). O tej porze roku największą częstość cyrkulacji wschodniej stwierdzono w latach 50., a najmniejszą w latach 60. (ryc. 1).

W lecie zwiększonym udziałem cyrkulacji o składowej zachodniej wyróżniał się przede wszystkim okres od końca lat 70. do początku lat 90. (ryc. 1). Wyraźne osłabienie cyrkulacji zachodniej przypadało natomiast na ostatnie dwa 10-letnia badanego wielolecia oraz, podobnie jak w zimie, na koniec lat 60. i początek lat 70. Ujemne wartości wskaźnika strefowego na przełomie lat 60. i 70. były także nad Polską południową (Niedźwiedź 1995).

Jesienią, analogicznie do całego obszaru kraju (Piotrowski 2009), dominowała najczęściej cyrkulacja zachodnia, a największą jej intensywnością charakteryzowały się lata 1970–1985 (ryc. 1). Po tym okresie wystąpiła istotna statystycznie tendencja malejąca wartości wskaźnika strefowego (tab. 3).

Największe nasilenie cyrkulacji południowej (wysokie dodatnie wartości wskaźnika S) w okresie zimowym wystąpiło nad obszarem Lubelszczyzny na przełomie lat 60. i 70. (ryc. 2). W kolejnych latach zaznaczyła się tendencja malejąca wartości tego indeksu (tab. 3), a w ostatnich dwóch dekadach (1991–2010) o tej porze roku częstość napływu powietrza z południa i północy była zbliżona.



Ryc. 1. Wieloletni przebieg wskaźnika cyrkulacji strefowej w poszczególnych porach roku (1951–2010). Wartości wygładzono 13-elementowym filtrem Gaussa

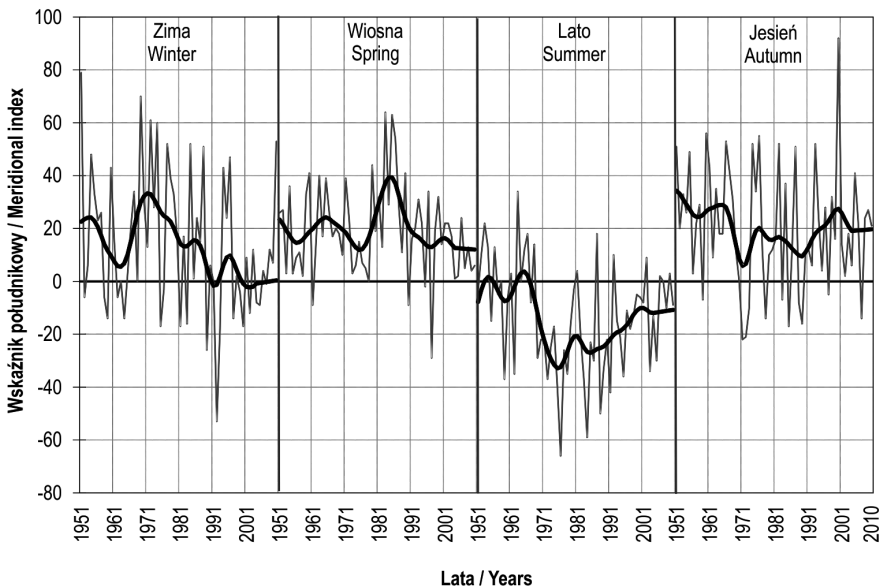
Fig. 1. Long-term variability of the westerly zonal index from 1951 to 2010 in particular seasons. Values smoothed by 13-element Gaussian filter

Wiosną na ogół przeważała cyrkulacja z sektora południowego (ryc. 2). Indeks S najwyższe dodatnie wartości osiągnął w latach 80., w późniejszym okresie wartości wskaźnika stopniowo malały.

Latem dominowała cyrkulacja o składowej północnej, przy czym jej największy udział (najniższe wartości wskaźnika S) przypadają na lata 70. Spadek częstości występowania cyrkulacji o składowej północnej zaznaczył się w okresie od lat 50. do połowy lat 60. oraz w ostatnich dwóch 10-letniach (ryc. 2; tab. 3).

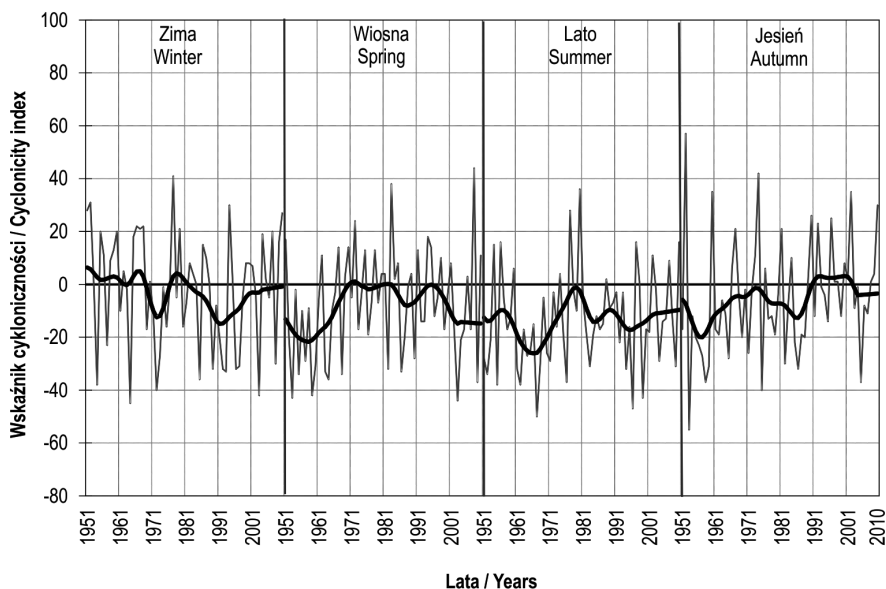
Jesienią przeważała adwekcja powietrza z sektora południowego, nie stwierdzono jednak występowania okresów z wyraźną tendencją rosnącą lub malejącą wartości wskaźnika cyrkulacji południkowej (ryc. 2).

W okresie zimowym największą przewagą cyrkulacji antycyklonalnej nad cyklonalną wyróżniał się przełom lat 60. i 70., a także lat 80. i 90. (ryc. 3). Większy natomiast niż przeciętnie udział cyrkulacji cyklonalnej stwierdzono w latach 50. i 70. oraz w pierwszym 10-leciu XXI w.



Ryc. 2. Wieloletni przebieg wskaźnika cyrkulacji południkowej w poszczególnych porach roku (1951–2010). Wartości wygładzono 13-elementowym filtrem Gaussa

Fig. 2. Long-term variability of the southerly meridional index from 1951 to 2010 in particular seasons. Values smoothed by 13-element Gaussian filter



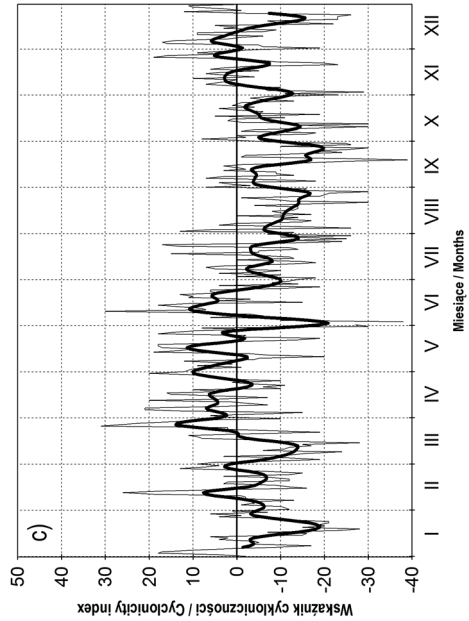
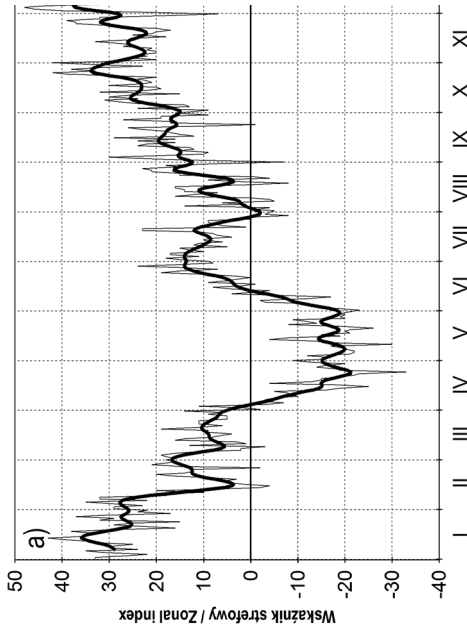
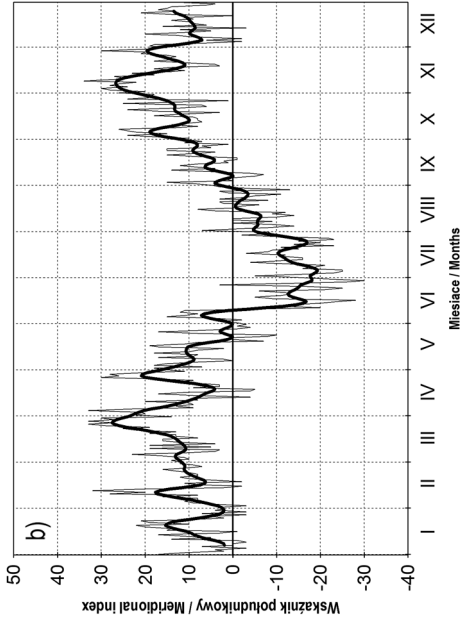
Ryc. 3. Wieloletni przebieg wskaźnika cykloniczności w poszczególnych porach roku (1951–2010). Wartości wygładzono 13-elementowym filtrem Gaussa

Fig. 3. Long-term variability of the cyclonicity index from 1951 to 2010 in particular seasons. Values smoothed by 13-element Gaussian filter

W pozostałych porach roku największa przewaga antycyklonalnych typów cyrkulacji nad typami cyklonalnymi zaznaczyła się na początku analizowanego okresu, tj. w latach 50. (wiosną i jesienią) i 60. (latem) (ryc. 3).

Przebieg roczny wartości wskaźników cyrkulacji

Największe nasilenie cyrkulacji zachodniej nad obszarem Lubelszczyzny przypada na miesiące jesienne i zimowe (ryc. 4a), a więc na okres występowania dużych poziomych gradientów ciśnienia nad północnym Atlantykiem. Pod koniec zimy, tj. od połowy lutego, jest zauważalne wyraźnie zmniejszanie się częstości napływu powietrza z sektora zachodniego. W kwietniu i maju zaznacza się już przewaga adwekcji powietrza z sektora wschodniego (ujemne wartości wskaźnika strefowego), podobnie jak w zachodniej i północnej części Europy (Chen 2000; Anagnostopoulou i in. 2004). Również wskaźnik strefowy nad Polską południową najwyższe wartości osiąga w zimie, a najniższe na wiosnę (Niedźwiedź 1995). Ponowną intensyfikację



Ryc. 4 a-c. Przebieg roczny wartości wskaźników cyrkulacji. Wartości wygładzono 13-elementowym filtrem Gaussa
 Ryc. 4 a-c. Annual variability of circulation indices. Values smoothed by 13-element Gaussian filter

cyrkulacji zachodniej nad Lubelszczyzną, tj. w okresie od początku czerwca do połowy lipca, można powiązać z występowaniem wówczas tzw. monsonu europejskiego. Według Kossowskiej-Cezak (1994) podczas jego trwania występuje zwiększona częstość napływu nad Europę mas powietrza polarnego morską z północnego Atlantyku. Po kolejnym okresie z mniejszą intensywnością cyrkulacji zachodniej (przełom lipca i sierpnia) następuje stopniowy wzrost jej częstości, który trwa aż do maksimum zimowego (ryc. 4a).

Nad obszarem Lubelszczyzny, z wyjątkiem okresu od czerwca do sierpnia, napływ powietrza z sektora południowego przeważa nad cyrkulacją z północy (ryc. 4b; tab. 4), co potwierdzają również odnoszące się do obszaru Polski wyniki badań Nowosada (2011). Większą częstość występowania w okresie letnim typów

Tab. 4. Charakterystyki statystyczne wskaźników cyrkulacji nad obszarem Lubelszczyzny w latach 1951–2010

Table 4. Statistical characteristics of circulation indices for the Lublin region from 1951 to 2010

Okres Period	Wskaźniki cyrkulacji Circulation indices	Średnia Mean	Odchylenie stan- dardowe Standard devia- tion	Maksimum (rok) Maximum (Year)	Minimum (rok) Minimum (Year)
Zima Winter	W	38,9	33,9	107 (1999/00)	-46 (1969/70)
	S	14,2	26,8	70 (1968/69)	-53 (1991/92)
	C	-1,9	21,3	41 (1976/77)	-45 (1963/64)
Wiosna Spring	W	-9,4	24,6	35 (1955)	-69 (1960)
	S	19,1	17,3	64 (1983)	-29 (1997)
	C	-7,4	19,9	44 (2008)	-44 (2003)
Lato Summer	W	8,5	31,1	65 (1962)	-81 (1955)
	S	-13,0	20,7	34 (1963)	-66 (1976)
	C	-14,0	18,1	36 (1980)	-50 (1967)
Jesień Autumn	W	34,1	23,9	99 (1983)	-20 (1993)
	S	20,1	23,3	92 (2000)	-22 (1971)
	C	-5,3	21,6	57 (1952)	-55 (1953)
Rok Year	W	72,3	53,8	176 (1990)	-63 (1996)
	S	39,5	43,3	126 (1966)	-63 (1997)
	C	-28,0	40,1	89 (2010)	-135 (1953)

Objaśnienia: W – wskaźnik cyrkulacji strefowej; S – wskaźnik cyrkulacji południkowej; C – wskaźnik cykloniczności

Explanations: W – zonal circulation index; S – meridional circulation index; C – cyclonicity index

cyrkulacji o składowej północnej wykazali również Niedźwiedź (1981) i Piotrowski (2009). W przebiegu rocznym wskaźnika S można wyróżnić dwa maksima częstości adwekcji powietrza ze składową południową, które przypadają na trzecią dekadę marca oraz na przełom października i listopada (ryc. 4b). W odniesieniu do pór roku i roku wartości odchylenia standardowego obliczone dla wskaźnika S były niższe w porównaniu z indeksem W (tab. 4).

W przebiegu rocznym wskaźnika cykloniczności trudno wykazać występowanie wyraźnego maksimum i minimum (ryc. 4c). Podobnie jak w południowej części Półwyspu Skandynawskiego (Linderson 2001) i w Europie Zachodniej (Anagnostopoulou i in. 2004), przewagą cyrkulacji antycyklonalnej nad cyklonalną odznacza się okres od lipca do października oraz grudzień-styczeń, natomiast odmienna sytuacja ma miejsce od kwietnia do maja.

Związek temperatury powietrza i opadów atmosferycznych z cyrkulacją atmosferyczną

Średnie miesięczne wartości temperatury powietrza w okresie listopad–marzec były na badanym obszarze silnie dodatnio skorelowane ze wskaźnikiem strefowym (tab. 5). Oznaczało to w tych miesiącach wzrost temperatury podczas wyraźnej przewagi napływu powietrza znad Oceanu Atlantyckiego oraz jej spadek przy nasilonej adwekcji znad wnętrza kontynentu eurazjatyckiego. O tym, że na kształtowanie temperatury powietrza w zimie największy wpływ ma cyrkulacja strefowa, potwierdziły wcześniejsze wyniki badań m.in. Niedźwiedzia (1995), Kożuchowskiego i Żmudzkiej (2002) oraz Ustrnula i Czekierdy (2007). Odmienną relację między warunkami termicznymi na Lubelszczyźnie a wskaźnikiem strefowym stwierdzono w okresie letnim (czerwiec-sierpień). Wówczas to chłodniejsze miesiące występowały przy zwiększonej częstości napływu powietrza z sektora zachodniego, a cieplejsze przy nasilonej cyrkulacji wschodniej (tab. 5). Niewielkimi wartościami współczynników korelacji charakteryzowały się natomiast miesiące, w których różnica temperatury powierzchni Oceanu Atlantyckiego i kontynentu europejskiego jest mniejsza (kwiecień, maj i wrzesień).

W rejonie badań istotna statystycznie dodatnia korelacja temperatury ze wskaźnikiem S występowała podczas miesięcy ciepłego półrocza (tab. 5). Większa częstość cyrkulacji o składowej południowej (północnej) najsilniej wpływała na wzrost (spadek) temperatury powietrza między kwietniem a czerwcem oraz od sierpnia do listopada.

Istotny wpływ charakteru cyrkulacji atmosferycznej na warunki termiczne zaznaczył się jedynie w czerwcu, lipcu i listopadzie (tab. 5). W pierwszych dwóch miesiącach okresu letniego większa częstość cyklonalnych (antycyklonalnych) typów

Tab. 5. Współczynniki korelacji między wskaźnikami cyrkulacji nad obszarem Lubelszczyzny a temperaturą powietrza i sumą opadów atmosferycznych w poszczególnych miesiącach
 Table 5. Coefficients of linear correlation between circulation indices for the Lublin region and air temperature as well as precipitation in particular months

Wskaźniki cyrkulacji Circulation indices	Miesiące / Months											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
	Temperatura powietrza / Air temperature											
W	<u>0,82</u>	<u>0,79</u>	<u>0,59</u>	-0,17	-0,08	<u>-0,47</u>	<u>-0,70</u>	<u>-0,32</u>	0,07	0,21	<u>0,30</u>	<u>0,65</u>
S	-0,07	-0,11	0,01	<u>0,54</u>	<u>0,56</u>	<u>0,57</u>	0,25	<u>0,41</u>	<u>0,56</u>	<u>0,36</u>	<u>0,29</u>	-0,02
C	0,21	0,23	-0,02	-0,01	-0,07	<u>-0,30</u>	<u>-0,31</u>	0,07	-0,22	-0,02	<u>0,45</u>	0,21
	Opady / Precipitation											
W	0,06	0,22	0,22	0,18	0,17	-0,04	0,09	0,14	-0,12	0,10	-0,01	0,11
S	-0,12	-0,10	-0,23	0,11	-0,01	0,00	0,18	0,12	0,01	-0,05	-0,14	0,11
C	<u>0,62</u>	<u>0,71</u>	<u>0,53</u>	<u>0,50</u>	<u>0,50</u>	<u>0,39</u>	<u>0,62</u>	<u>0,52</u>	<u>0,59</u>	<u>0,74</u>	<u>0,49</u>	<u>0,58</u>

Objaśnienia: Wartości podkreślone i pogrubione – korelacja istotna statystycznie na poziomie $p < 0,01$; wartości pogrubione – korelacja istotna statystycznie na poziomie $p < 0,05$

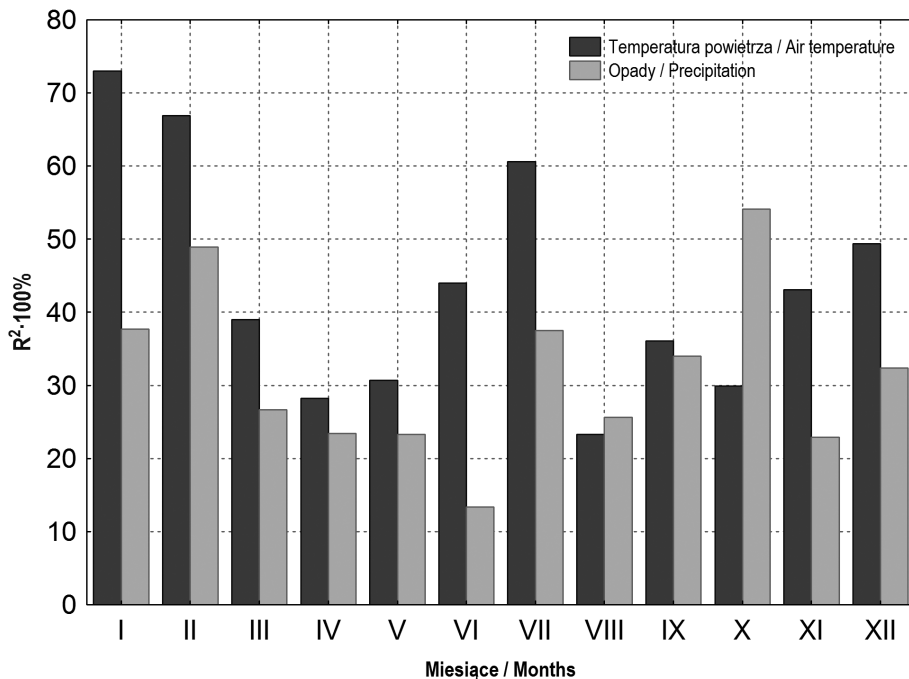
Explanations: Underlined and bold values – significant correlation at the $p < 0.01$ level; bold – significant correlation at the $p < 0.05$ level

cyrkulacji powodowała występowanie niższych (wyższych) wartości temperatury powietrza (w listopadzie – odwrotnie).

Cyrkulacja atmosferyczna, wyrażona łącznie przez trzy rozpatrywane wskaźniki (W, S i C), wyjaśniała ponad 50% wariacji średnich miesięcznych wartości temperatury powietrza w styczniu, lutym i lipcu (ryc. 5). Najniższe wartości współczynnika determinacji odnosiły się do kwietnia, maja i sierpnia (R^2 między 0,2 a 0,3).

Nie stwierdzono istotnych statystycznie związków korelacyjnych między miesięcznymi sumami opadów atmosferycznych na obszarze Lubelszczyzny a cyrkulacją strefową i południkową (tab. 5). Podobnie natomiast jak w Polsce południowej (Niedźwiedź 1995) zmienność opadów dobrze opisywał wskaźnik cykloniczności. Najwyższa dodatnia wartość współczynnika korelacji między sumą miesięczną opadów a częstością cyrkulacji cyklonalnej zaznaczyła się w październiku ($r=0,75$), a najniższa w czerwcu ($r=0,47$).

Cyrkulacja atmosferyczna wyjaśniała od około 15 do 40% wariacji miesięcznych sum opadów (ryc. 5). Najwyższe wartości współczynnika determinacji ($R^2 \approx 50\%$) dotyczyły października i lutego, najniższe zaś czerwca ($R^2 \approx 15\%$).



Ryc. 5. Miesięczne wartości współczynników determinacji (R^2) między cyrkulacją atmosferyczną a temperaturą powietrza oraz opadami atmosferycznymi

Fig. 5. Monthly coefficients of determination (R^2) between atmospheric circulation and air temperature as well as precipitation

Podsumowanie

Cyrkulacja atmosferyczna nad obszarem Lubelszczyzny, podobnie jak nad większą częścią kontynentu europejskiego, odznacza się dość dużą zmiennością zarówno z roku na rok, jak i w ujęciu długookresowym. W przypadku strefowego przepływu powietrza od drugiej połowy lat 80. do końca XX w. wystąpiła wyraźnie zwiększona intensywność cyrkulacji zachodniej w miesiącach zimowych. W ostatnich dwóch dekadach badanego wielolecia stwierdzono natomiast większą częstość cyrkulacji o składowej południowej w okresie letnim, a cyrkulacji północnej w zimie i wiosną.

W ciągu roku zachodni przepływ powietrza dominuje nad rozpatrywanym obszarem w miesiącach jesiennych i zimowych, cyrkulacja wschodnia przeważa zaś w okresie wiosennym. Większa częstość napływu powietrza z sektora południowego zaznacza się na początku wiosny i w drugiej połowie jesieni, cyrkulacja zaś północna wyróżnia się większą intensywnością w okresie letnim. W przebiegu rocznym sytuacje niżowe najczęściej występują wiosną, a wyżowe latem i jesienią.

Najbardziej istotny wpływ strefowej cyrkulacji powietrza na średnie miesięczne wartości temperatury powietrza na Lubelszczyźnie stwierdzono w okresie od grudnia do marca oraz w miesiącach letnich. Większa niż przeciętnie częstość dni z cyrkulacją zachodnią powodowała w zimie wyższe, a wzmóŜona cyrkulacja wschodnia niŜsze średnie miesięczne wartości temperatury powietrza (w okresie letnim występowała relacja odwrotna). Zdecydowanie mniejszy wpływ na warunki termiczne, niŜ na zmienność miesięcznych sum opadów atmosferycznych, wykazywał charakter cyklonalny/antycyklonalny cyrkulacji atmosferycznej.

Podziękowania

Autor pragnie podziękować anonimowym Recenzentom za wartościowe uwagi, które przyczyniły się do powstania ostatecznej wersji tekstu.

Literatura

- Anagnostopoulou C., Flocas H., Maheras P., Patrikas I., 2004, *Relationship between atmospheric circulation types over Greece and western-central Europe during the period 1958–97*, International Journal of Climatology, 24 (14), 1745–1758.
- Bárdossy A., Caspary H.J., 1990, *Detection of climate change in Europe by analyzing European atmospheric circulation patterns from 1881 to 1989*, Theoretical and Applied Climatology, 42 (3), 155–167.
- Bartoszek K., 2015, *Kalendarz typów cyrkulacji atmosferycznej dla obszaru Lubelszczyzny. Zbiór komputerowy*, Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie, Zakład Meteorologii i Klimatologii, Lublin, <http://serwisy.umcs.lublin.pl/k.bartoszek/wyniki.html> (15.02.2017).
- Bartoszek K., 2017, *The main characteristics of atmospheric circulation over East-Central Europe from 1871 to 2010*, Meteorology and Atmospheric Physics, 129 (2), 113–129.
- Chen D., 2000, *A monthly circulation climatology for Sweden and its application to a winter temperature case study*, International Journal of Climatology, 20 (10), 1067–1076.
- Compo G.P., Whitaker J.S., Sardeshmukh P.D., Matsui N., Allan R.J., Yin X., Worley S.J., 2011, *The Twentieth Century Reanalysis Project*, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 137, 1–28.

- Degirmendžić J., Kożuchowski K., Wibig J., 2000, *Epoki cyrkulacyjne XX wieku i zmienność typów cyrkulacji atmosferycznej w Polsce*, Przegląd Geofizyczny, 45 (3–4), 221–238.
- Falarz M., 2007, *Snow cover variability in Poland in relation to the macro- and mesoscale atmospheric circulation in the twentieth century*, International Journal of Climatology, 27 (15), 2069–2081.
- Hurrell J.W., 1995, *Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperature and precipitation*, Science, 269, 676–679.
- Huth R., 1996, *Properties of the circulation classification scheme based on the rotated principal component analysis*, Meteorology and Atmospheric Physics, 59 (3–4), 217–233.
- Huth R., Beck C., Andreas P., Demuzere M., Ustrnul Z., Cahynova M., Kyselý J., Tveito O.E., 2008, *Classifications of atmospheric circulation patterns: Recent advances and applications*, Annals of the New York Academy of Sciences, 1146, 105–152.
- Jacobeit J., Jönsson P., Bärring L., Beck C., Ekström M., 2001, *Zonal indices for Europe 1780–1995 and running correlations with temperature*, Climatic Change, 48, 219–241.
- Jenkinson A.F., Collinson F.P., 1977, *An initial climatology of gales over the North Sea*, Synoptic climatology branch memorandum, 62, Meteorological Office, Bracknell.
- Jones P.D., Hulme M., Briffa K.R., 1993, *A comparison of Lamb circulation types with an objective classification scheme*, International Journal of Climatology, 13 (6), 655–663.
- Kendall M.G., 1975, *Rank correlation measures*, Charles Griffin, London.
- Kossowska-Cezak U., 1994, *O 'monsunie europejskim'*, Przegląd Geofizyczny, 39 (1), 65–73.
- Kożuchowski K., 1993, *Variations in hemispheric zonal index since 1899 and its relationship with air temperature*, International Journal of Climatology, 13, 853–864.
- Kożuchowski K., Żmudzka E., 2002, *Cyrkulacja atmosferyczna i jej wpływ na zmienność temperatury powietrza w Polsce*, Przegląd Geograficzny, 74 (4), 591–604.
- Kutiel H., Maheras P., Guika S., 1996, *Circulation indices over the Mediterranean and Europe and their relationship with rainfall conditions across the Mediterranean*, Theoretical and Applied Climatology, 54 (3–4), 125–138.
- Kyselý J., Huth R., 2006, *Changes in atmospheric circulation over Europe detected by objective and subjective methods*, Theoretical and Applied Climatology, 85 (1–2), 19–36.
- Linderson M.J., 2001, *Objective classification of atmospheric circulation over Southern Scandinavia*, International Journal of Climatology, 21 (2), 155–169.
- Lityński J., 1969, *Liczbowa klasyfikacja typów cyrkulacji i typów pogody dla Polski*, Prace PIHM, 97, 3–15.
- Murray R., Lewis R.P., 1966, *Some aspects of the synoptic climatology of the British Isles as measured by simple indices*, Meteorological Magazine, 95, 193–203.
- Niedźwiedz T., 1981, *Sytuacje synoptyczne i ich wpływ na zróżnicowanie przestrzenne wybranych elementów klimatu w dorzeczu górnej Wisły*, Rozprawy habilitacyjne UJ, 58, Kraków.
- Niedźwiedz T., 2000, *Variability of the atmospheric circulation above Central Europe in the light of selected indices*, Zeszyty Naukowe UJ, Prace Geograficzne, 107, 379–389.

- Niedźwiedź T., 2013, *Kalendarz typów cyrkulacji atmosfery dla Polski południowej – zbiór komputerowy*, Uniwersytet Śląski, Katedra Klimatologii, Sosnowiec, <http://klimat.wnoz.us.edu.pl/osoby/tn/kalendarz.zip> (11.01.2017).
- Niedźwiedź T., 1995, *Wieloletnia zmienność wskaźników cyrkulacji atmosfery nad Polską południową*, [w:] *Współczesne badania klimatologów polskich w kraju i za granicą*, Materiały Konferencyjne IGiPZ PAN, Warszawa, 7–18.
- Niedźwiedź T., 1996, *Long-term variability of the zonal circulation index above the Central Europe*, *Zeszyty Naukowe UJ, Prace Geograficzne*, 102, 213–219.
- Niedźwiedź T., Twardosz R., Walanus A., 2009, *Long-term variability of precipitation series in East Central Europe in relation to circulation patterns*, *Theoretical and Applied Climatology*, 98, 337–350.
- Nowosad M., 2011, *Variability of the meridional circulation index over Poland according to the Lityński classification formula*, *Prace i Studia Geograficzne*, 47, 41–48.
- Osuchowska-Klein B., 1978, *Katalog typów cyrkulacji atmosferycznej*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- Piotrowski P., 2009, *Obiektywna metoda klasyfikacji cyrkulacji atmosferycznej dla Polski*, *Acta Universitatis Lodzianensis, Folia Geographica Physica*, 10, Łódź.
- Post P., Truija V., Tuulik J., 2002, *Circulation weather types and their influence on temperature and precipitation in Estonia*, *Boreal Environment Research*, 7, 281–289.
- Schädler G., Sasse R., 2006, *Analysis of the connection between precipitation and synoptic scale processes in the eastern Mediterranean using self-organizing maps*, *Meteorologische Zeitschrift*, 15 (3), 273–278.
- Sen P.K., 1968, *Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau*, *Journal of the American Statistical Association*, 63 (324), 1379–1389.
- Sepp M., Jaagus J., 2002, *Frequency of circulation patterns and air temperature variations in Europe*, *Boreal Environment Research*, 7, 273–279.
- Sienz F., Schneider A., Blender R., Fraedrich K., Lunkeit F., 2010, *Extreme value statistics for North Atlantic cyclones*, *Tellus A*, 62, 347–360.
- Slonosky V.C., Jones P.D., Davies T.D., 2000, *Variability of the surface atmospheric circulation over Europe, 1774–1995*, *International Journal of Climatology*, 20 (15), 1875–1897.
- Tomingas O., 2002, *Relationship between atmospheric circulation indices and climate variability in Estonia*, *Boreal Environment Research*, 7, 463–469.
- Trigo I.F., 2006, *Climatology and interannual variability of storm-tracks in the Euro-Atlantic sector: A comparison between ERA-40 and NCEP/NCAR reanalyses*, *Climate Dynamics*, 26, 127–143.
- Ustrnul Z., 1997, *Zmienność cyrkulacji atmosfery na półkuli północnej w XX wieku*, Materiały Badawcze IMGW, Seria Meteorologia, 27, Warszawa.
- Ustrnul Z., 2007, *Zmienność wskaźnika cyrkulacji zachodniej nad Europą w XX wieku*, [w:] K. Piotrowicz, R. Twardosz (red.), *Wahania klimatu w różnych skalach przestrzennych i czasowych*, IGiP UJ, Kraków, 55–63.

- Ustrnul Z., Czekierda D., 2007, *Wpływ wskaźnika Oscylacji Północnoatlantyckiej na średnią temperaturę powietrza w różnych skalach przestrzennych*, [w:] K. Piotrowicz, R. Twardosz (red.), *Wahania klimatu w różnych skalach przestrzennych i czasowych*, IGiGP UJ, Kraków, 75–84.
- Werner P.C., Gerstengarbe F.W., Fraedrich K., Oesterle H., 2000, *Recent climate change in the North Atlantic/European sector*, *International Journal of Climatology*, 20 (5), 463–471.
- Zhang X., Wang X.L., Corte-Real J., 1997, *On the relationships between daily circulation patterns and precipitation in Portugal*, *Journal of Geophysical Research*, 102 (D12), 13495–13507.

Krzysztof Bartoszek
Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie
Wydział Nauk o Ziemi i Gospodarki Przestrzennej
Al. Krasnicka 2D, 20-718 Lublin
k.bartoszek@umcs.pl