

Krzysztof KOŻUCHOWSKI, Jan DEGIRMENDŽIĆ
Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych*

**ZMIENNOŚĆ FORM CYRKULACJI ŚRODKOWO-
TROPOSFERYCZNEJ WEDŁUG KLASYFIKACJI
WANGENHEIMA-GIRSA I ICH RELACJE
Z POLEM CIŚNIENIA NA POZIOMIE MORZA**

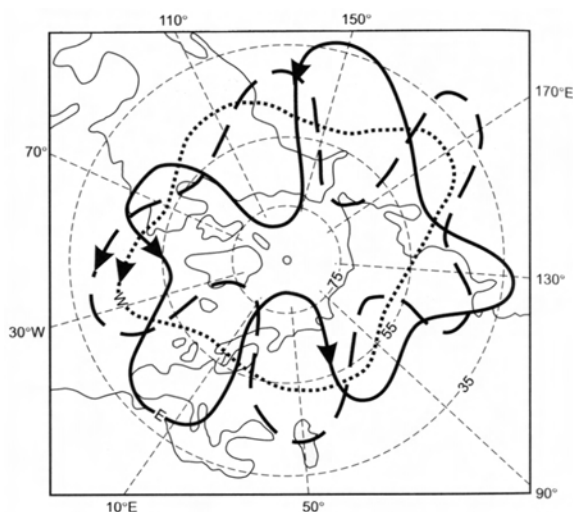
VARIABILITY OF MID-TROPOSPHERIC CIRCULATION FORMS
ACCORDING TO WANGENHEIM-GIRS CLASSIFICATION
AND THEIR RELATIONS TO SEA-LEVEL PRESSURE PATTERNS

Wstęp

Klasyfikacja Wangenheima-Girsa (Wangenheim 1935, 1946, 1952; Girs 1960, 1964, 1971, 1974, 1981) opisuje typy cyrkulacji w środkowej troposferze (w pobliżu wysokości geopotencjalnej powierzchni 500 hPa), w pozazwrotnikowych szerokościach geograficznych półkuli północnej ($>30^{\circ}\text{N}$). Nad atlantycko-euroazjatyckim sektorem tej strefy wyróżnia się trzy tzw. makroformy cyrkulacji (dalej: formy W-G): formę cyrkulacji strefowej W oraz dwie formy cyrkulacji południkowej E i C. Formy te różnią się amplitudą oraz położeniem fal Rossby'ego nad obszarem od Grenlandii do wschodniej Syberii. Ponadto, nad Pacyfikiem i Ameryką Północną Girs (1964) wyróżnił formę cyrkulacji strefowej Z i dwie formy cyrkulacji południkowej M1 i M2 (rys. 1).

Klasyfikacja Wangenheima-Girsa (W-G) jest od dawna stosowanym narzędziem badań klimatologii synoptycznej. Odniesienia do niej pojawiały się w pracach wielu autorów, m.in.: Degirmendžić i in. (2000), Sepp, Jaagus (2002), Aasa i in. (2004), Sepp (2005), Dimitriev, Balyazo (2006), Sidorenkov, Orlov (2008), Jacobeit i in. (2009), Marsz (2012, 2013, 2015), Hoy i in. (2013). Krótki przegląd tych badań zawiera m.in. artykuł Degirmendžića i Kożuchowskiego (2017b).

*Katedra Geografii Fizycznej



Rys. 1. Schemat układów wysokości powierzchni 500 hPa, określającej formy cyrkulacji W, E i C (wg Lamba 1972)

Fig. 1. Idealized contours of 500 hPa high defining circulation forms W, E and C (after Lamb 1972)

Wyjaśnienia procesów cyrkulacyjnych w umiarkowanych i wysokich szerokościach geograficznych nad Atlantykiem i Eurazją, w kontekście klasyfikacji W-G, przedstawił Marsz (2012, 2015).

W dotychczasowych badaniach klimatologicznych analizowano głównie zmienność frekwencji form W-G, określonej przez liczbę dni występowania poszczególnych form cyrkulacji w ciągu miesięcy i sezonów, w roku lub w wieloleciu (częstość *nd*).

Wykorzystaniu klasyfikacji W-G od początku towarzyszyła idea, według której zmienność występowania form cyrkulacji cechuje się regularnymi fluktuacjami, formującymi w wieloletnim przebiegu tzw. epoki cyrkulacyjne – kilku-, kilkunasto- lub kilkudziesięcioletnie okresy znaczącej dominacji określonych form cyrkulacyjnych.

Epoki cyrkulacyjne wydzielone przez różnych autorów na podstawie frekwencji form W-G lub innych wskaźników cyrkulacji wskazują, że od końca XIX wieku następowały po sobie kolejno okresy wzmożonej cyrkulacji strefowej (do około 1930 r.), następnie południkowej i ponownie, pod koniec XX stulecia, wzrosła częstość form cyrkulacji strefowej (Girs 1977; Sidorenkov, Svirenko 1983; Gorbacheva 1986; Kozuchowski 1993, 1995; Marsz 1999; Degirmendzić i in. 2000; Sepp 2011). W opracowaniu Degirmendzića i Kozuchowskiego (2017a) przedstawiono epoki cyrkulacyjne, określone na podstawie kumulowanych odchyleń rocznych częstości form cyrkulacji (*nd*) w okresie od 1891 do 2010 r. Wydzielono siedem epok cyrkulacyjnych o różnym czasie trwania

Tabela 1. Epoki cyrkulacyjne W-G od 1891 r.; średnie częstości form cyrkulacji W, E, C w epokach (*nd*) i ocena ich odchyień od średniej wieloletniej (1891-2010); (+/-) – odchylenia istotne na poziomie 0,05 (wg Degirmendžića, Kozuchowskiego 2017a)

Table 1. The W-G circulation epochs since 1891; average frequency of circulation forms W, E, C in each epoch (*nd*) and the assessment of its deviation from the long-term frequency (1891-2010); (+/-) – significant deviations at 0,05 level (after Degirmendžić, Kozuchowski 2017a)

Okres Period	Epoka Epoch	Częstość <i>nd</i> [%] Frequency <i>nd</i> [%]		
		W	E	C
1891-1902	W+C	42,6+	23,7-	33,7+
1903-1932	W	41,0+	36,8-	22,2-
1933-1938	E	30,2	49,6	20,2
1939-1949	C	30,5	35,8	33,7
1950-1969	E+C	25,4-	47,0+	27,6
1970-1991	E	24,1-	54,7+	21,2-
1992-2010	W	36,2	39,5	24,3
<i>nd</i> [%] 1891-2010		33,2	41,4	25,4

(6-30 lat). Różnice między średnimi częstościami form W, E i C w epokach są prawie dwukrotnie większe od średnich zmian częstości *nd* z roku na rok. W pięciu epokach występują średnie częstości roczne istotnie różne od średniej wieloletniej częstości z całego okresu 1891-2010 (tab. 1).

W pierwszej epoce (W+C), trwającej do 1902 r., dominują formy W i C, których częstości istotnie różnią się od częstości średnich wieloletnich ($p < 0,01$), przy czym częstości form W i C są wyjątkowo wyższe od częstości dominującej zwykle formy E.

W epoce W, trwającej od 1903 do 1932 r., panuje makroforma cyrkulacji strefowej W; jej częstość jest istotnie wyższa od średniej ($p < 0,01$). W epoce tej forma cyrkulacji strefowej (W) także występuje częściej od formy E.

W latach 1933-1938 (epoka E) ponadprzeciętną częstością odznacza się forma E, jednakże anomalia częstości formy E okazuje się mało istotna ($p = 0,08$).

Istotne anomalie pojawiają się w okresie 1939-1949, w którym znacząco wzrasta częstość formy cyrkulacji południkowej C, stając się wyższą od częstości formy strefowej W.

W latach 1950-1969 utrzymują się wysokie częstości C, znacząco wzrasta natomiast częstość formy E, której pozytywna anomalia w tym okresie wykazuje statystyczną istotność ($p < 0,05$). Jest to epoka E+C, podczas której forma cyrkulacji strefowej W wykazuje mniejszą częstość od form cyrkulacji południkowej E i C.

Od 1970 do 1991 r. rozwija się dominacja makroformy E. Anomalia częstości tej formy jest wysoce istotna ($p < 0,01$). W roku 1981 częstość E osiąga wieloletnie maksimum (71,8% dni w roku). Jest to trwająca dwadzieścia dwa lata epoka cyrkulacji południkowej E.

Od 1992 roku zwiększa się częstość formy cyrkulacji strefowej W, natomiast częstość formy E znacząco się zmniejsza. Pozytywna anomalia W nie jest jednak istotna ($p = 0,16$), a pozostałe częstości nieznacznie różnią się od średniej wieloletniej. Uznano ten okres za epokę umiarkowanego rozwoju cyrkulacji strefowej (W). Okazuje się, iż ponadprzeciętne częstości formy cyrkulacji strefowej utrzymują się także po 2010 r. Uznano więc, że epoka W trwa nadal, przynajmniej do 2015 r., być może powtarzając w ten sposób długotrwały okres panowania cyrkulacji strefowej z początku XX wieku.

Sekwencja wyróżnionych epok ukazuje wiekowy quasi-cykl wahań form cyrkulacji w środkowej troposferze, w atlantycko-euroazjatyckim sektorze strefy pozazwrotnikowej.

Każda z form W-G utrzymuje się nieprzerwanie w ciągu kilku do kilkunastu dni; okresy trwania danej formy (T) tworzą tzw. epizody cyrkulacyjne. Ich liczba pozwala określić drugą miarę frekwencji makroform cyrkulacji – liczbę epizodów w określonym czasie (częstość Ne), wyrażającą zarazem zmienność (częstotliwość zmian) form cyrkulacyjnych. Iloczyn frekwencji (Ne) i czasu trwania epizodów danej formy cyrkulacji (T) określa jej frekwencję nd . W pierwszej części opracowania przedstawiono wyniki analizy zmienności form cyrkulacyjnych, uwzględniającej zarówno częstości nd , jak i częstości Ne oraz średni czas trwania epizodów form cyrkulacji w trzech ostatnich epokach: E+C (1950-1969), E (1970-1991) i W (1992-2015).

Celem opracowania jest określenie skali i tendencji zmian wielkości nd , Ne i T w wieloleciu 1949-2015. Przede wszystkim podjęto próbę statystycznego opisu formowania się wieloletnich fluktuacji charakterystycznych dla frekwencji poszczególnych form W-G i określenia prawidłowości następstwa epizodów form W, E i C oraz relacji między ich frekwencją. Przedstawiono zarówno znalezione istotne statystycznie zmiany frekwencji form W-G w wieloleciu, jak i kilka faktów, świadczących o losowym charakterze zmienności form cyrkulacyjnych. Oceny tego rodzaju wynikają z zastosowania odpowiednich testów istotności, m.in. przyjęcia szeregu założeń, które powodują, iż *moc weryfikacji [testów] jest mniej rozstrzygająca, niż się na ogół sądzi* (Węglarczyk 2004, str. 12). O niejednoznacznym charakterze wniosków, określanych na podstawie testów statystycznych, wspominał już Michell (1966).

Zestawienie losowych i nielosowych aspektów pojawiania się form cyrkulacji znajduje także uzasadnienie w idei, wedle której ich przypadkowe zmiany prowadzą do formowania się nieprzypadkowych fluktuacji¹, określa-

¹ Wzmiankowana „idea” jest sparafrazowaną wersją koncepcji ewolucyjnej Dawkinsa: »zmieniają-

nych mianem epok cyrkulacyjnych, a także, w przypadku trwania epizodów form W-G, oznaczają kształtowanie jakościowych zmian układów ciśnienia – formowanie się układów wyżowych i niżowych, sterujących warunkami pogodowymi i klimatycznymi.

W końcowej części artykułu przedstawiono anomalie ciśnienia i układy ciśnienia na poziomie morza (*SLP*), stowarzyszone z panującymi formami cyrkulacji W-G. W szczególności – określono średnie położenie izobar *SLP* nad północnym Atlantykiem i częścią Eurazji w sezonie zimowym i letnim, odpowiadające występowaniu epizodów form W, E i C. Otrzymano średnie obrazy dolnego pola barycznego, związanego bezpośrednio z formami cyrkulacji środkowo-troposferycznej. Uściślono w ten sposób rezultaty dotychczasowych badań związków pola ciśnienia *SLP* z formami W-G, wykorzystujące korelację anomalii ciśnienia z miesięczną lub sezonową częstością występowania form W-G (*nd*).

Zróżnicowanie zobrazowanych układów ciśnienia dowodzi, że zmienność form W-G nie jest jedynie beładnym szumem w działalności atmosfery.

Dane i metody opracowania

Podstawową bazą danych dla niniejszego opracowania jest kalendarz występowania form cyrkulacji W-G w dniach od 1.01.1949 do 31.12.2015 r. Dane z okresu 1949-2005 pochodzą z publikacji Dimitriev i Belyazo (2006), natomiast dane z dziesięciolecia 2006-2015 otrzymano od dr V. E. Laguna z Instytutu Badawczego Arktyki i Antarktyki w Sankt Petersburgu, dzięki uprzejmej pomocy prof. Andrzeja Marsza. Niestety zabrakło w nich danych dobowych z okresu kwiecień-wrzesień 2006 r., dla którego podano tylko miesięczne częstości makroform W-G, tj. częstości *nd*. W sumie wykorzystany kalendarz obejmuje 24 290 dni.

Ponadto, w celu porównania form cyrkulacji środkowo-troposferycznej W-G z układami barycznymi w dolnej troposferze wykorzystano średnie dobowe wartości ciśnienia na poziomie morza (*SLP*) w okresie 1979-2010, pochodzące z Reanalysis-2 Database (Kalany i in. 1996; Harris 2014). Obszar porównawczy obejmuje strefę od 30° do 80°N, między 40°W i 90°E i odpowiada w przybliżeniu zasięgowi „atlantycko-euroazjatyckiego sektora strefy umiarkowanej” wg Wangenheima-Girsa. W latach 1979-2010 wystąpiło ogółem 1 699 epizodów cyrkulacyjnych, związanych z panowaniem form W, E i C. W artykule przedstawiono odpowiadające im średnie pola ciśnienia *SLP* w sezonie zimowym (XII-II) i letnim (VI-VIII).

Zmienność form cyrkulacyjnych W-G w 67-letnim okresie 1949-2015 analizowano wykorzystując określone wcześniej epoki cyrkulacyjne (Degirmendzić, Kożuchowski 2017b). Wykonano ocenę istotności różnic częstości Ne i nd oraz średniego czasu trwania epizodów cyrkulacyjnych T w epokach. Analizowano przebieg zmiennych Ne , nd i T w latach 1949-2015: oceniono inercję częstości poszczególnych form cyrkulacji, wielkość zmian z roku na rok oraz tendencje tych zmian w wieloleciu. Określono związki między zmianami frekwencji form W, E i C. Przedstawiono wyniki poszukiwania prawidłowości kształtowania się sekwencji epizodów cyrkulacyjnych, tj. czasowej kolejności pojawiania się form W, E i C. W pracy wykorzystano proste metody statystyczne, w tym test chi-kwadrat, test serii, współczynniki asocjacji (kontyngencji) i odchylenia kumulowane (Greń 1974; Kaczmarek 1976; Norcliffe 1986 i inne podręczniki statystyki).

Test serii posłużył do oceny bezwładności w szeregach czasowych; zastosowano współczynnik inercji:

$$i = (R - k) / (R - 2)$$

w którym R oznacza oczekiwaną liczbę serii w szeregu losowym, k – obserwowaną liczbę serii w analizowanym szeregu. Liczbę R określa wzór (Greń 1974):

$$R = [(2n_1 n_2)] / n + 1$$

gdzie n_1 i n_2 są liczebnościami elementów należących do kategorii „a” i „b” w szeregu n -elementowym (tu: wartościami większymi i mniejszymi od mediany).

Współczynnik i przyjmuje wartość 1 w przypadku najmniejszej liczby serii $k = 2$, czyli przy największej inercji w szeregu czasowym, zaś wartość 0 – gdy liczba serii równa się liczbie serii w szeregu losowym.

Korelacje między zmianami frekwencji Ne i nd oceniono za pomocą współczynnika asocjacji dwu zmiennych:

$$Q = (a d - b c) / [(a + b) (c + d) (a + c) (b + d)]^{1/2}$$

gdzie a i d oznaczają odpowiednio liczebność zgodnych co do znaku zmian dwóch zmiennych, b i c – liczebność zmian o przeciwnych znakach. Obliczono także współczynnik zbieżności zmian w wersji Yule (Yule-Kendall 1940):

$$Q' = (a d - b c) / (a d + b c)$$

Współczynnik kontyngencji Φ i standaryzowany współczynnik Cramera V_c zostały wykorzystane do oceny istotności różnic między częściami szeregu czasowego (tu: sub-seriami odpowiadającymi epokom cyrkulacyjnym):

$$\Phi = (\chi^2/N)^{1/2}$$

$$V_c = [\Phi^2 / \min.(j-1, k-1)]^{1/2}$$

N oznacza tu ogólną liczebność szeregu, j i k są liczbami kolumn i wierszy w tablicy korelacyjnej.

Do obliczenia współczynników wykorzystano liczebności odchyłeń od średniej i odchyłeń od mediany w poszczególnych częściach (subseriach) szeregu. Istotność współczynników badano testem chi-kwadrat, przyjmując na ogół poziom istotności $\alpha = 0,05$. Znaczące współczynniki oznaczają występowanie istotnych fluktuacji odchyłeń w szeregu czasowym.

Do oceny fluktuacji zmiennych Ne , nd i T wykorzystano także odchylenia kumulowane od średnich wieloletnich analizowanych wartości. Istotność fluktuacji kumulowanych odchyłeń $\Sigma\Delta_i$ oceniono na podstawie ich porównania z kumulowanymi odchyleniami standardowymi Σstd_i :

$$\Sigma std_i = std (i - i^2/N)^{1/2}$$

gdzie std jest odchyleniem standardowym zmiennej (Ne , nd lub T), i – numerem elementu w szeregu czasowym, N – liczbą elementów szeregu.

Obliczono współczynnik k , który na podstawie największej bezwzględnej wartości odchyłeń kumulowanych $\max \Sigma\Delta_i$ pozwala określić istotność analizowanych fluktuacji:

$$k = \max \Sigma\Delta_i / (z \Sigma std_i)$$

z – oznacza tu wartość standaryzowanego odchylenia $\max \Sigma\Delta_i$ na przyjętym poziomie istotności (Norcliffe 1986, tab. F).

Współczynniki $k > 1$ oznaczają, że skala fluktuacji wykracza poza zakres fluktuacji losowych. Z kolei znak największego odchylenia $\max \Sigma\Delta_i$ pokazuje dominującą tendencję wieloletniego przebiegu badanej zmiennej: jej ujemna wartość określa przewagę tendencji rosnącej, dodatnia – przewagę tendencji malejącej w szeregu czasowym. W tym przypadku znaczące jest także położenie $\max \Sigma\Delta_i$ w ciągu czasowym – wskazuje ono na termin (rok) początku lub końca okresu przewagi dodatnich bądź ujemnych odchyłeń danej zmiennej.

W przypadku badania zbieżności (asocjacji) zmian z roku na rok rocznych frekwencji nd (badano je ze względu na znak zmiany $+/-$) uwzględniono poprawki, wprowadzone z uwagi na stałość sumy frekwencji nd : $nd(W) + nd(E) + nd(C) = 365$, z której wynika, że znaki zmian trzech form muszą się różnić. Oznacza to więc, że liczebność zmian niezgodnych (b, c) jest „arytmetycznie zawyżona” – jest ich o $1/3$ „za dużo”. Przy równomiernym (prostokątnym) rozkładzie zmian ($a=b=c=d=1/4N$) poprawka powinna zatem wynosić

Tabela 2. Oczekiwany rozkład zrównoważonego następstwa epizodów cyrkulacji – roczne liczby zmian form cyrkulacji W, E i C według średniej częstości epizodów ΣNe w okresie 1949-2015

Table 2. Superposed distribution of balanced succession of circulation episodes – annual numbers of changes of circulation forms W, E and C according to averages of episodes frequency ΣNe in the period 1949-2015

Formy W-G W-G forms	Ne/rok Ne/year			
	W↓	E↓	C↓	ΣNe
W→	-	9,90	7,18	17,07
E→	9,90	-	8,78	18,67
C→	7,18	8,78	-	15,96
ΣNe	17,07	18,67	15,96	51,70

$\pm 0,0833N = \pm 1/12N$, odpowiednio „+” dla zmian a i d i „-” dla zmian b i c (oznaczenia jak wyżej – zob. wzór definiujący współczynnik asocjacji Q).

Analizując zmiany z roku na rok określono ich średnią bezwzględną wartość oraz zbadano liczbę serii w szeregach utworzonych ze znaków zmian (+/-). Obserwowaną liczbę serii porównano z liczbą serii znaków zmian w szeregu liczb losowych (w szeregu 67-elementowym oczekiwana liczba serii $R \approx 43$, Kaczmarek 1970, tab. XI).

Badając wzajemne następstwo form cyrkulacyjnych określono częstość występowania zmian epizodów formy W na epizody formy E i epizody formy C, częstość zmian formy E na formy W i C oraz zmian formy C na formy W i E. Wykorzystując obserwowaną częstość epizodów form W, E i C (w tab. 1 – ΣNe) i zakładając symetryczny charakter badanych zmian (równą częstość zmian $W \rightarrow E$ i $E \rightarrow W$, $W \rightarrow C$ i $C \rightarrow W$, $E \rightarrow C$ i $E \rightarrow W$) otrzymano rozkład oczekiwanych częstości zmian form cyrkulacyjnych (tab. 2.) Rozkład ten porównano z obserwowaną częstością pojawiania się kolejnych epizodów cyrkulacyjnych. Różnice rozkładów powinny wskazać, czy obserwowane w wieloleciu następstwo epizodów cyrkulacyjnych odznacza się nieprzypadkowymi tendencjami.

Zmienność form cyrkulacji w okresie 1949-2015

Frekwencja form cyrkulacji w epokach E+C, E i W

W okresie 1949-2015 najczęściej pojawiała się forma cyrkulacji południkowej E. Jej dominacja ujawnia się zarówno w wartościach częstości nd (46,9% dni w tym okresie), jak i częstości Ne , tj. liczby epizodów występowania formy

E (36,2% epizodów wszystkich form). Warto zauważyć, że zróżnicowanie częstości Ne trzech form cyrkulacji nie jest tak wielkie, jak różnice między częstościami nd (tab. 3). Średnie roczne liczby epizodów form W, E i C są zbliżone (po ok. 16-19 epizodów), w przeciwieństwie do liczby dni trwania tych form cyrkulacyjnych, różniących się znacznie (87-171 dni, zob. tab. 4). Wynika stąd, że średni czas trwania epizodów cyrkulacyjnych W, E i C jest różny – najdłużej trwają epizody formy E (średnio ponad 9 dni), krótsze są epizody form W i C (około 6-dniowe). Średnio w roku obserwuje się 52 epizody form cyrkulacji W, E i C; przeciętny czas ich trwania wynosi nieco ponad 7 dni (tab. 4).

Tabela 3. Średnie częstości epizodów (Ne) i liczby dni z formami W, E, C (nd) w epokach cyrkulacyjnych E+C, E i W oraz w okresie 1949-2015 [%]

Table 3. The average values of frequency of circulation episodes (Ne) and numbers of days with circulation forms W, E, C (nd) in the circulation epochs E+C, E, W and throughout the period 1949-2015 [in percent]

Epoka Epoch	Częstość Ne Frequency Ne			Częstość nd Frequency nd		
	W	E	C	W	E	C
E+C 1950-1969	30,6	36,7	33,7	25,4	47,0	27,6
E 1970-1991	31,8	38,4	29,8	24,1	54,7	21,2
W 1992-2015	36,2	34,0	29,8	35,9	40,2	23,9
1949-2015	33,1	36,2	30,7	28,9	46,9	24,2

Tabela 4. Częstość epizodów cyrkulacyjnych (Ne), częstość form cyrkulacji (nd) i czas trwania epizodów cyrkulacyjnych (T); wartości standaryzowanego odchylenia (z) w ocenie różnic między średnimi epokowymi E+C (1950-69), E (1970-91) i W (1992-2015) a średnią z okresu 1949-2015

Table 4. The frequency of circulation episodes (Ne), frequency of circulation forms (nd) and duration of episodes (T); the values of the standardized deviation (z) in the assessment of differences between mean values from circulation epochs E+C (1950-1969), E (1970-1991), W (1992-2015) and the mean value from the period 1949-2015

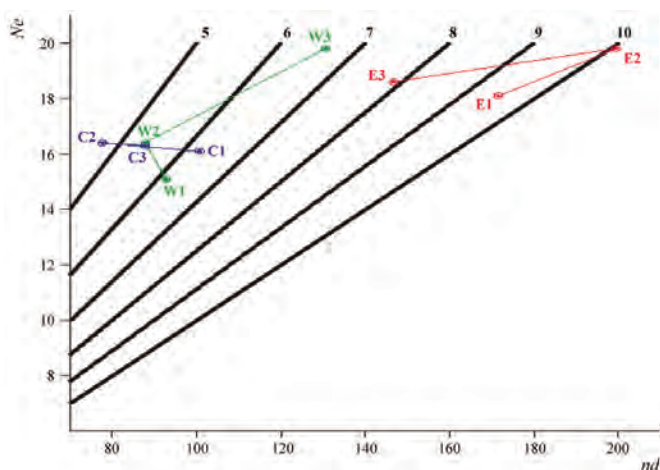
Epoka Epoch	Ne /rok Ne per year				nd /rok nd per year			T [dni] T [days]			
	W	E	C	ΣWEC	W	E	C	W	E	C	ΣWEC
E+C	-2,27*	-1,03	0,29	-1,62	-1,83	0,03	3,06*	-0,15	0,81	2,78*	1,52
E	-0,72	1,62	-0,75	-0,20	-2,69*	3,76*	-2,34*	-2,34*	2,17*	-2,36*	0,03
W	4,25*	-0,32	0,63	1,92	3,93*	-3,32*	0,10	1,48	-2,77*	0,42	-1,57
1949-2015	17,1	18,8	15,9	51,9	105,3	171,3	87,4	6,15	9,11	5,47	7,04

* różnice istotne na poziomie 0,05

* significant differences at 0,05 level

Dane w tabeli 3 pokazują charakterystyczne zmiany częstości Ne i nd w epokach cyrkulacyjnych począwszy od 1950 r. W przypadku formy W najwyższe częstości Ne i nd przypadają na lata 1992-2015 (epoka W), forma E ma największe częstości w latach 1970-1991 (epoka E), natomiast forma C wykazuje najwyższe częstości w okresie 1950-1969 (epoka E+C).

W tabeli 4 zamieszczono wyniki oceny różnic między średnimi częstościami Ne i nd w epokach cyrkulacyjnych i średnią wieloletnią wartością Ne i nd (1949-2015). Okazuje się, że znaczące różnice częstości Ne dotyczą jedynie formy cyrkulacji strefowej W. W epoce E+C częstość Ne formy W była znacząco niższa, a w epoce W znacząco wyższa od średniej. Częstość nd (tj. roczne liczby dni występowania form cyrkulacyjnych) wykazała „epokowe” zróżnicowanie w przypadku wszystkich trzech form cyrkulacji. Częstość nd formy W w epoce E była znacząco niższa od średniej częstości w okresie 1949-2015, w epoce W – istotnie wyższa. Odwrotne zmiany zaobserwowano w odniesieniu do formy E – nadwyżkę częstości w epoce E i niedobór w epoce W. Forma C wykazała znacząco wysokie wartości nd w epoce E+C, a niskie w epoce E (tab. 4). Porównując średnie czasy trwania epizodów cyrkulacyjnych (T) z częstościami Ne i nd w epokach cyrkulacyjnych można zauważyć, iż rozwój



Rys. 2. Zmiany rocznych częstości form cyrkulacji W, E i C w okresie 1950-2015:

- 1 – średnie w epoce E+C (1950-1969), 2 – średnie w epoce E (1970-1991),
3 – średnie w epoce W (1992-2015); Ne – roczna liczba epizodów cyrkulacyjnych,
 nd – roczna liczba dni z formami cyrkulacji, 5, 6, 7..., 10 – średni czas trwania
epizodów cyrkulacyjnych (liczba dni)

Fig. 2. Changes in the annual frequency of circulation forms W, E and C in the period 1950-2015: 1 – averages in the epoch E+C (1950-1969), 2 – averages in the epoch E (1970-1991), 3 – averages in the epoch W (1992-2015); Ne – annual number of circulation episodes, nd – annual number of days with circulation forms, 5, 6, 7..., 10 – average duration of circulation episodes (in days)

Tabela 5. Częstości form cyrkulacji W, E, C (Ne i nd) oraz czas trwania epizodów cyrkulacyjnych (T): udział pozytywnych odchyłeń od średniej z okresu 1949-2015 w epokach cyrkulacyjnych, współczynnik kontyngencji Cramera (Vc) według rozkładu pozytywnych i negatywnych odchyłeń od średniej oraz współczynnik inercji (i) według liczby serii w szeregu odchyłeń od mediany w okresie 1949-2015

Table 5. The frequency of circulation forms W, E, C (Ne , nd) and duration of circulation episodes (T): relative frequency of the positive deviations from the mean of the period 1949-2015 in the circulation epochs, Cramer's coefficient of contingency (Vc) according to the numbers of positive and negative deviations and the coefficient of persistence (i) according to the number of runs in the series of deviation from the median in the period 1949-2015

Epoka Epoch	Częstość Ne Ne frequency				Częstość nd nd frequency			Czas trwania epizodów T Episode duration T			
	W	E	C	ΣWEC	W	E	C	W	E	C	ΣWEC
E+C	0,15	0,60	0,45	0,30	0,25	0,40	0,75	0,45	0,55	0,80	0,70
E	0,45	0,73	0,55	0,50	0,27	0,73	0,27	0,27	0,59	0,32	0,50
W	0,67	0,54	0,63	0,67	0,88	0,08	0,58	0,58	0,17	0,50	0,33
1949-2015	0,44	0,62	0,53	0,50	0,48	0,39	0,53	0,44	0,42	0,53	0,50
Vc	0,42*	0,16	0,14	0,30	0,60*	0,55*	0,39*	0,26	0,40*	0,39*	0,30
i	0,25	-0,00	0,06	0,06	0,50*	0,37*	0,12	0,31*	0,12	0,25	-0,00

* współczynniki istotne na poziomie 0,05

* coefficients significant at 0,05 level

epoki W (1992-2015), w której częstość nd (W) stała się względnie wysoka, wynikał z istotnego przyrostu liczby epizodów formy W w tym okresie. Natomiast rozwój epoki E powstał głównie wskutek znaczącego przyrostu czasu trwania epizodów formy E. Zmiany czasu trwania stanowiły także główną przyczynę formowania się zmian częstości nd w przypadku formy C. Można w tym kontekście przypuszczać, że epoki cyrkulacji strefowej (W) wiążą się z przyrostami liczby epizodów cyrkulacji strefowej, natomiast epoki z dominującą cyrkulacją południkową (E, C) formują się pod wpływem wydłużania się czasu trwania epizodów cyrkulacji południkowej.

Prawidłowość ta została zobrazowana na rys. 2, który pokazuje zmiany częstości Ne i nd oraz czasu trwania epizodów (T) między trzema epokami. Widać, że w przypadku formy W zmiany te dotyczą przede wszystkim liczby epizodów Ne , natomiast w przypadku form E i C znacznie zmienia się czas trwania epizodów tych form, a w konsekwencji także ich częstość nd .

Zróznicowanie średnich częstości form cyrkulacji w epokach znajduje potwierdzenie w liczebności dodatnich odchyłeń od średniej częstości w całym okresie 1949-2015. Współczynniki kontyngencji dowodzą, że udział pozytywnych odchyłeń zarówno częstości Ne , jak i częstości nd w przypadku formy W zmieniał się znacząco. Zróznicowanie odchyłeń T wskazuje natomiast, że

czas trwania epizodów formy W pozostawał dość stabilny (tab. 5). Z kolei odchylenia czasu trwania epizodów form E i C wykazały jego znaczące zróżnicowanie w epokach cyrkulacyjnych, powodujące, że odchylenia częstości *nd* tych form także znacząco się zmieniały. Analiza serii odchyleń od mediany badanych zmiennych wykazuje ponadto, że odchylenia częstości *nd* form W i E, a także odchylenia czasu trwania epizodów formy W wyróżniają się istotną bezwładnością, tzn. wykazują tendencję do utrzymywania stałego znaku z roku na rok. Największą inercją wyróżnia się częstość *nd* oraz czas trwania epizodów formy cyrkulacji strefowej W (odpowiednio $i = 0,50$ oraz $i = 0,31$, zob. tab. 5).

Tendencje zmian wieloletnich

Forma W cechuje się największym zakresem zmienności w wieloleciu 1949-2015. Roczne liczby epizodów wystąpienia tej formy zmieniały się od 8 w latach 1976 i 1984 do 30 w roku 2008. Znacznie mniejsza była amplituda zmian częstości *Ne* w przypadku form E i C. Roczne liczby dni występowania formy W odznaczały się również największym zakresem zmian w wieloleciu (*nd* od 37 do 179 dni/rok) i największym współczynnikiem zmienności (stosunek odchylenia standardowego do średniej $V = 0,29$). Całkowita roczna liczba epizodów form cyrkulacji (ΣWEC), jak i średni roczny czas ich trwania charakteryzują się natomiast względnie małymi zmianami w porównaniu ze

Tabela 6. Największe (max.) i najmniejsze (min.) roczne liczby epizodów (*Ne*), liczby dni (*nd*), średnie roczne czasy trwania epizodów (*T*) form cyrkulacji W, E i C, lata ich wystąpienia w okresie 1949-2015 oraz współczynniki zmienności (*V*)

Table 6. The highest (max) and lowest (min) values of annual numbers of circulation episodes (*Ne*), annual sums of days with circulation forms (*nd*), annual averages of episode duration (*T*), the years of their occurrence throughout the period 1949-2015 and coefficients of variability (*V*)

Miara Value	<i>Ne</i> /rok <i>Ne</i> /year				<i>nd</i> /rok <i>nd</i> /year			<i>T</i> [dni] <i>T</i> [days]			
	W	E	C	ΣWEC	W	E	C	W	E	C	ΣWEC
max.	30	24	22	69	179	262	134	10,2	15,3	8,4	10,4
Lata Years	2008	1981 1999 2014	1962 1971 1995	2008	2008	1981	1965	1949	1984	1997	1984
min.	8	12	8	35	37	112	45	4,1	5,7	3,5	5,3
Lata Years	1976 1984	1957 1997	1981	1984	1978	1997	1981	1977	2008	1986	2008
<i>V</i>	0,23	0,16	0,20	0,14	0,29	0,20	0,22	0,24	0,24	0,23	0,16

zmianami statystycznych charakterystyk poszczególnych form. Współczynniki zmienności ΣWEC są najmniejsze (tab. 6). Można przy tym jednak zauważyć, że w okresie 1949-2015 liczba epizodów, czyli zarazem częstotliwość zmian form cyrkulacji stopniowo wzrastała. Świadczą o tym dane z tab. 4 i 5. Z epoki na epokę wzrastała częstość (Ne ΣWEC) i malał średni czas trwania jednego epizodu (T ΣWEC). Ocena tych zmian pozwala uznać je za znaczące jedynie na poziomie $\alpha = 0,10$.

Analiza zmiennych Ne , nd i T , przeprowadzona metodą odchyłeń kumulowanych pozwala na pełniejszą ocenę fluktuacji tych charakterystyk form cyrkulacyjnych w latach 1949-2015 (rys. 3, 4). W tym ujęciu można stwierdzić m.in., że liczba epizodów form cyrkulacyjnych w okresie 1949-2015 znacząco wzrosła; wzrost ten nastąpił przede wszystkim w końcowej części okresu, tj. po 2003 r. Fluktuacje Ne (ΣWEC) można uznać za istotne na poziomie $\alpha = 0,01$ (tab. 7). Istotne są także zmiany liczby epizodów form W i E, które wskazują na ich dominującą tendencję rosnącą. Natomiast kumulowane częstości nd tylko w przypadku formy W wskazują na wzrost frekwencji tej formy

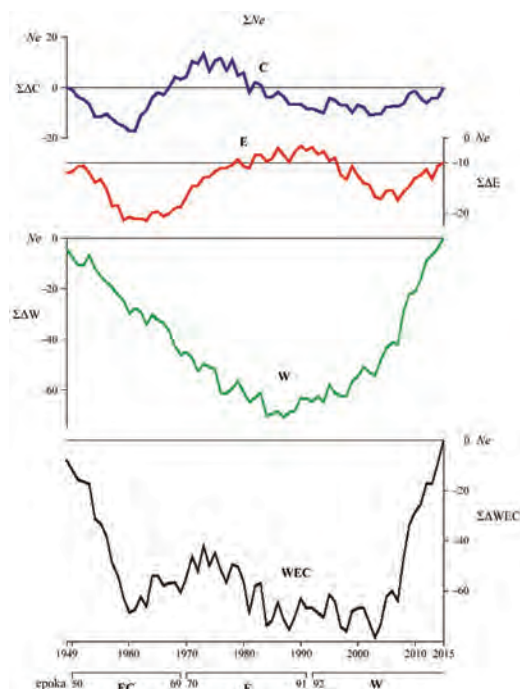
Tabela 7. Ocena fluktuacji rocznych częstości form cyrkulacji (Ne i nd) oraz średniego czasu trwania epizodów cyrkulacyjnych (T) w okresie 1949-2015 na podstawie kumulowanych odchyłeń od średniej

Table 7. The assessment of fluctuations in annual frequencies of circulation forms (Ne and nd) and durations of circulation episodes (T) in the period 1949-2015, on the basis on cumulative deviations from mean values

Zmienne Variables	Częstość Ne Ne frequency				Częstość nd nd frequency			Czas trwania epizodu T Episode duration T		
Formy W-G W-G forms	W	E	C	WEC	W	E	C	W	E	C
$\max \Sigma \Delta_i$	-68,9	-23,0	-16,9	-79,5	-636,8	631,0	279,8	-12,85	40,70	17,12
i	1987	1963	1959	2003	1981	1989	1971	1983	1988	1969
Σstd_i	15,8	10,0	9,4	22,1	123,0	139,6	75,4	6,09	8,59	5,20
$k_{0,05}$	2,23*	1,17*	0,91	1,83*	2,64*	2,31*	1,89*	1,08*	4,38*	1,68*
$k_{0,01}$	1,70*	0,89	0,70	1,40*	2,01*	1,89*	1,44*	0,82	3,34*	1,28*
+/-	+	+	.	+	+	-	-	+	-	-

Objaśnienia: $\max \Sigma \Delta_i$ – największa bezwzględna wartość odchyłeń kumulowanych; i – rok wystąpienia wartości $\max \Sigma \Delta_i$; Σstd_i – kumulowane odchylenie standardowe w roku i ; $k = \max \Sigma \Delta_i / (z \Sigma std_i)$ – ocena istotności fluktuacji; $k > 1$ oznacza fluktuacje istotne na poziomie 0,05 ($z = 1,96$) i na poziomie 0,01 ($z = 2,58$); +/- – dominująca rosnąca/malejąca tendencja zmian w okresie 1949-2015 według istotnych fluktuacji na poziomie 0,05 (w tab. znak „**“)

Symbols: $\max \Sigma \Delta_i$ – the highest absolute value of the cumulative deviations; i – timeline of $\max \Sigma \Delta_i$ (year); Σstd_i – cumulative standard deviation for the i -year; $k = \max \Sigma \Delta_i / (z \Sigma std_i)$ – coefficient of assessment of fluctuations significance; $k > 1$ means significant fluctuations at the 0,05 level ($z = 1,96$) or at the 0,01 level ($z = 2,58$); +/- – predominant growing/falling tendency in changes throughout the period 1949-2015, after significance at 0,05 level (in the table marked by “**“)

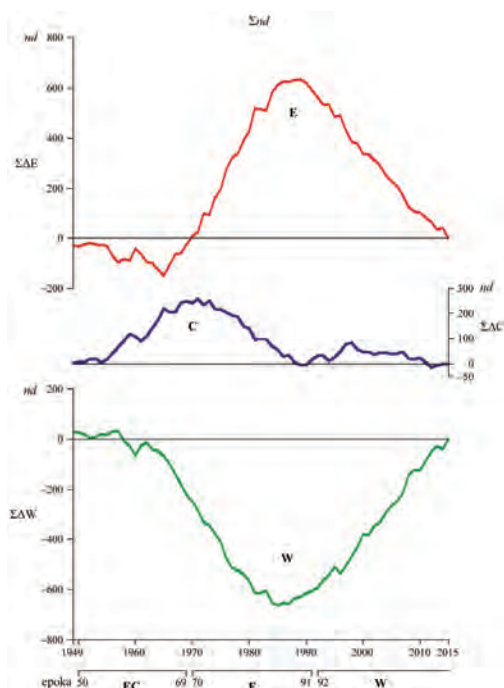


Rys. 3. Odchylenia kumulowane ($\Sigma\Delta$) rocznej liczby epizodów cyrkulacyjnych (Ne) od średnich z okresu 1949-2015; epizody formy C, E, W oraz łączna liczba epizodów W, E i C; zaznaczono trwanie epok cyrkulacyjnych E+C, E i W

Fig. 3. Cumulative deviations ($\Sigma\Delta$) of the annual numbers of circulation episodes (Ne) from the mean numbers in the period 1949-2015; episodes of form C, E and W and the sum of episodes W, E and C; sub-periods of circulation epochs E+C, E and W are marked

cyrkulacji, podczas gdy formy E i C charakteryzują się malejącą tendencją. Potwierdzają się wnioski o względnie stabilnej liczbie epizodów form E i C oraz o malejącej tendencji czasu trwania epizodów formy W i formy E. Zwłaszcza spadek czasu trwania epizodów formy E okazuje się wysoce istotny ($k = 4,38$, tab. 7). Był on przyczyną znaczącego spadku frekwencji (nd) tej formy od 1989 r.

Dominujące w całym wieloleciu tendencje zmian frekwencji Ne , nd oraz czasu trwania epizodów cyrkulacyjnych T określono na podstawie maksimów bądź minimów w przebiegu odchyłeń kumulowanych, czyli zarazem na podstawie sum odchyłeń obserwowanych przed terminem wystąpienia ekstremów (tab. 7) Ujemny znak ekstremum oznacza dominację ujemnych odchyłeń od średniej przed tym terminem, a dodatnich – po nim, co można interpretować jako rosnącą tendencję badanej zmiennej. I odwrotnie – dodatni znak ekstremum kumulowanych odchyłeń oznacza tendencję malejącą. Obraz zmian analizowanych wielkości wskazuje jednak, że w ich przebiegu pojawia się kilka minimów i maksimów, typowych dla fluktuacji klimatycznych (rys. 3). Trend (systema-



Rys. 4. Odchylenia kumulowane ($\Sigma\Delta$) rocznej liczby dni z formami cyrkulacji E, C i W (nd) od średnich z okresu 1949-2015; zaznaczono trwanie epok cyrkulacyjnych E+C, E i W

Fig. 4. Cumulative deviations ($\Sigma\Delta$) of the annual numbers of days with circulation form E, C and W (nd) from the mean numbers in the period 1949-2015; sub-periods of circulation epochs E+C, E and W are marked

tyczne, jednokierunkowe zmiany) można dostrzec w przypadku frekwencji formy cyrkulacji strefowej W, która w ciągu lat 1949-2015 dość konsekwentnie wzrastała. Trend liniowy frekwencji nd (W) charakteryzował się współczynnikiem $+7,8$ dni/10 lat, trend frekwencji Ne (W) – współczynnikiem $1,1$ epizodów W/10 lat. Frekwencja nd (E) wykazuje malejący trend $-5,3$ dni/10 lat. Dodatnim współczynnikiem trendu wyróżnia się także całkowita liczba epizodów cyrkulacyjnych Ne (WEC) – $+1,5$ epizodów/10 lat. Krzywa kumulowanych odchyłeń pokazuje jednak, że trend liniowy nie jest tu najlepszą aproksymacją zmian tej wielkości (rys. 3).

Zmiany z roku na rok

Składnikiem wieloletnich fluktuacji częstości form cyrkulacji są jej zmiany z roku na rok; ich średnia wielkość stanowi około 20% średnich wieloletnich wartości Ne i nd (tab. 8). Zmiany rocznej liczby epizodów formy W były naj-

większe, a przyrosty z roku na rok zdarzały się nieco częściej niż spadki Ne (W), co potwierdza istnienie tendencji rosnącej liczby epizodów cyrkulacji strefowej w wieloleciu. Kierunki zmian z roku na rok (tj. znaki zmian) w szeregach czasowych frekwencji Ne i nd wykazywały w przybliżeniu losowe rozmieszczenie w czasie. Świadczy o tym znaczna, bliska oczekiwanej w szeregu losowym, liczba serii znaków zmian. W najczęściej obserwowanych sekwencjach występowały po sobie kolejno przyrosty i spadki frekwencji. Zbadano autokorelację znaków zmian w szeregach czasowych Ne i nd , porównując częstości zgodnych i niezgodnych znaków zmian z roku na rok wartości Ne_i i Ne_{i+1} oraz odpowiednio nd_i i nd_{i+1} . Obliczono współczynniki zbieżności zmian Yule'a (Q') i współczynniki asocjacji Cramera (Φ , tab. 8). Ujemne, istotne statystycznie współczynniki wskazują, że po przyrostach danej zmiennej w następnym roku

Tabela 8. Zmiany z roku na rok częstości rocznej Ne i nd : średnia bezwzględna wielkość zmian (Δ), jej stosunek do średniej wieloletniej (Δ/m), iloraz liczby przyrostów i spadków w szeregu czasowym (+/-), liczba serii w szeregu czasowym przyrostów i spadków (k), bezwładność znaku zmian z roku na rok (autokorelacja dla przesunięcia +1 rok) – współczynnik zbieżności Yule'a (Q'_1), test chi-kwadrat (χ^2), współczynnik kontyngencji Cramera (Φ_1)

Table 8. Year-to-year changes of annual frequencies Ne and nd : the average of absolute range of changes (Δ), ratio of the range of changes to the average value of Ne and nd (Δ/m), ratio of the number of increases to the number of decreases in time series (+/-), number of runs in the series (k), persistence in character of year-to-year changes (autocorrelation with lag = +1 year) – Yule's association coefficient (Q'_1), chi-square test (χ^2), Cramer's coefficient of contingency (Φ_1)

Częstości roczne Annual frequencies	Częstości Ne Ne frequencies			Częstości nd nd frequencies		
Formy W-G W-G forms	W	E	C	W	E	C
Δ	3,91	3,56	3,64	22,07	27,45	18,41
Δ/m	0,23	0,19	0,23	0,21	0,16	0,21
+/-	1,13	0,94	0,94	0,89	0,78	1,06
k^*	41	46	44	44	44	44
Bezwładność Persistence						
Q'_1	-0,64	-0,70	-0,72	-0,59	-0,63	-0,59
χ^{2**}	7,02	10,44	9,82	5,12	6,91	6,93
Φ_1	-0,36	-0,41	-0,42	-0,28	-0,34	-0,33

* oczekiwana liczba serii w szeregu losowym ≈ 43

* the expected number of runs in random series ≈ 43

** istotność na poziomie 0,05 według testu chi-kwadrat $\chi^2_{0,05} > 3,84$

** significance at 0,05 level acc. to chi-square test: $\chi^2_{0,05} > 3,84$

najczęściej pojawiały się jej spadki. I tak na przykład współczynnikowi zbieżności $Q' = -0,70$ odpowiada około 70% przeciwnych znaków zmian z roku na rok zmiennej Ne (E) (tab. 8). Można zauważyć, że negatywna autokorelacja frekwencji nd jest nieco słabsza od autokorelacji Ne – przyrosty po przyrostach i spadki po spadkach frekwencji nd pojawiały się nieco częściej. Niemniej, analiza zmian frekwencji form cyrkulacji w ujęciu „rok do roku” wskazuje wyraźnie na stochastyczny charakter tej zmienności.

Korelacja form cyrkulacji

O znacznym udziale czynnika losowego w kształtowaniu się zmian frekwencji Ne i nd z roku na rok świadczy także analiza współzmienności trzech analizowanych form cyrkulacji. Wprawdzie występuje znacząca (negatywna) zbieżność obserwowanych zmian rocznej frekwencji $nd(W)$ i $nd(E)$, $nd(W)$ i $nd(C)$ oraz $nd(E)$ i $nd(C)$, ale zbieżność ta pochodzi przede wszystkim z „wymuszenia” znaków zmian frekwencji wskutek zachodzącej każdego roku równości $nd(W) + nd(E) + nd(C) = 365$ dni (por. uwagi na ten temat w części metodycznej artykułu). Po skorygowaniu współczynniki zbieżności stają się nieistotne, bliskie zera. Można oczywiście zauważyć, że słaba pozytywna zbieżność wystąpiła między zmianami frekwencji form W i C , a słaba negatywna zbieżność między frekwencjami form W i E (tab. 9).

Zbieżność zmian liczby epizodów cyrkulacji W , E i C także nie jest zbyt silna. O istotnym związku, ale tylko na poziomie $\alpha = 0,10$, można mówić w odniesieniu do zmian frekwencji Ne (E) i Ne (C) – przyrosty i spadki liczby epizodów południkowych form cyrkulacji dość często zbiegają się w czasie. Współczynnikowi $\Phi = 0,22$ odpowiada 61% zgodnych zmian Ne (E)

Tabela 9. Zbieżność zmian z roku na rok częstości form cyrkulacji Ne i nd w latach 1949-2015; współczynniki asocjacji Φ ; kursywą oznaczono poprawione współczynniki Φ

Table 9. The correspondence between year-to-year changes in frequencies of circulation forms in the period 1949-2015; coefficients of association Φ , the corrected coefficients Φ in italics

Częstość Frequency	Częstości Ne <i>Ne frequencies</i>			Częstości nd <i>nd frequencies</i>		
Formy W-G W-G forms	W	E	C	W	E	C
W	-	0,04	0,16	-	-0,41*	-0,29*
E		-	0,22*	-0,07	-	-0,35*
C			-	+0,05	-0,01	-

* współczynniki – istotne na poziomie 0,10

* significant coefficients at the 0,10 level

i Ne (C). Zmiany Ne (W) i zmiany Ne (C) także są w pewnym stopniu zbieżne ($\Phi = 0,16$, tab. 9).

Statystyki przemawiają za tym, że być może formy cyrkulacji W i C są wzajemnie, choć raczej słabo, powiązane. Podobnie związane są formy cyrkulacji południkowej E i C, natomiast formy W i E pozostają w pewnym „antagonizmie”, o którym pisał m.in. Marsz (2015).

Związki między formami cyrkulacji ujawniają się w wyraźniejszej postaci po uwzględnieniu wieloletnich zmian w relacjach między częstościami nd form cyrkulacyjnych. Dla każdego roku (1949-2015) wyznaczono ilorazy częstości nd (W) / nd (E), nd (W) / nd (C) i nd (E) / nd (C). Ilorazy te porównano ze średnimi wartościami stosunków nd (W) / nd (E), nd (W) / nd (C) i nd (E) / nd (C) w analizowanym okresie. Średnie te wynoszą odpowiednio 0,60, 1,17 i 1,96.

Do każdego roku przypisano stosowny indeks, który odzwierciedla odchylenie od średniej stosunków rocznych częstości form W i E, W i C oraz E i C. Na przykład, indeks WWC oznacza, że ilorazy częstości nd (W) / nd (E), nd (W) / nd (C) i nd (E) / nd (C) są większe od średnich wartości tych ilorazów, indeks ECC oznacza, że wartości te są mniejsze od średnich (pierwsza litera indeksu odzwierciedla odchylenie ilorazu częstości nd (W) i nd (E), druga – nd (W) i nd (C), trzecia – nd (C) i nd (E). „Kalendarz” skonstruowanych w ten sposób indeksów cyrkulacyjnych prezentuje tab. 10.

Okazuje się, że częstości form W i C wykazują ewidentną zbieżność: lata opisane indeksami WWC i WCC, czyli takie, w których częstości form W i C wykazują względną dominację nad częstością formy E, reprezentują blisko połowę analizowanego wielolecia (trzydzieści jeden przypadków). Można zauważyć, że występują głównie w końcowej części okresu, tj. w epoce W. W ciągu dwudziestu jeden lat pojawiały się w analizowanym okresie relacje częstości nd , opisane indeksami ECE i ECC, co dowodzi współwystępowania względnie wysokich częstości form cyrkulacji południkowej E i C. Pojawiały się one najczęściej w epoce E. Kolejnym epokom cyrkulacyjnym jako całości można przypisać następując indeksy: epokę E+C (1950-1969) charakteryzuje indeks ECC, epokę E (1970-1991) – indeks ECE, epokę W (1992-2015) – indeks WWC.

Relacje między częstościami form cyrkulacyjnych, opisane indeksem WWC wyróżniają się największą frekwencją w wieloleciu (dwadzieścia przypadków), najrzadziej (cztery przypadki) pojawiają się relacje, opisane indeksem EWE (tab. 10). Obserwowane w okresie 1949-2015 liczebności indeksów istotnie różnią się od równomiernego (prostokątnego) rozkładu, w którym każdy typ relacji stanowi 1/6 przypadków w 67-letniej serii. Otrzymana wartość testu chi-kwadrat ($\chi^2 = 11,8$) dowodzi, że różnica rozkładów jest istotna na poziomie $\alpha = 0,01$. Potwierdza się znana już teza, iż w latach z dominacją formy cyrkulacji strefowej W, także forma cyrkulacji południkowej C wykazuje względną dominację nad formą E (indeks WWC). Do rzadkości należą natomiast przy-

Tabela 10. Indeksy cyrkulacyjne lat 1949-2015 według średnich rocznych wartości ilorazów częstości form cyrkulacji (*nd*): W/E, W/C i E/C*

Table 10. Circulation indexes of the years in the period of 1949-2015 according to ratios of annual frequencies of circulation forms (*nd*): W/E, W/C and E/C*

Rok Year	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1940									WWC	WCC
1950	ECE	ECC	WWC	WWE	WCC	WCC	WCC	ECC	ECC	ECE
1960	WWE	WCC	ECC	WCC	ECC	ECE	ECE	ECC	ECE	ECE
1970	ECC	ECE	ECC	EWE	ECC	ECE	EWE	WCC	WWE	ECE
1980	EWE	WWC	WWC	ECE	EWE	WWE	WCC	WWE	WWE	WWC
1990	WCC	WCC	WWC	WWE	WWC	ECC	WCC	WWC	WWE	WWC
2000	WWC	WWC	WWC	WWC	WWC	WWC	WWC	WWE	WWC	WWC
2010	WWE	WWE	WWC	ECC	WWC					

* średnie ilorazy: W/E = 0,60; W/C = 1,17; E/C = 1,96

* average ratios: W/E = 0,60; W/C = 1,17; E/C = 1,96

padki lat, w których względnie wysokim częstościom formy E towarzyszą wysokie częstości formy W (indeks EWE). Ogólniejszy wniosek, płynący z przytoczonych statystyk pokazuje, że nieistotne korelacje, jak te przytoczone w tab. 9, prowadzić mogą do znaczących związków, ujawniających się w postaci skutków tych pozornie nieznaczących korelacji.

Sekwencje epizodów cyrkulacyjnych

Kolejną próbę sprawdzenia relacji między formami cyrkulacji W, E i C stanowi ocena statystyczna kolejności zmian epizodów trwania form cyrkulacji. Sprawdzono w tym celu, czy po epizodach formy W częściej następują epizody formy E czy epizody formy C, czy po epizodach formy E częściej następują epizody formy W czy C itd.

Obliczono częstości zmian epizodów form cyrkulacji $W \rightarrow E$, $W \rightarrow C$, $E \rightarrow W$, $E \rightarrow C$, $C \rightarrow W$, $C \rightarrow E$. Okazuje się, że częstości te nieznacznie tylko różnią się od oczekiwanych częstości zmian, wynikających ze średniej frekwencji $Ne(W)$, $Ne(E)$ i $Ne(C)$ (por. tab. 1). Obserwowane częstości zamieszczono w tab. 11. Można m.in. dostrzec, że przemiana formy E w formę W następuje częściej niż przemiana formy W w formę E. Różnica tych częstości jest niewielka i podobnie jak pozostałe różnice dotyczące innych sekwencji form cyrkulacji, według testu chi-kwadrat, oceniającego różnicę rozkładów zaprezentowanych w tab. 1 i w tab. 11, nie jest statystycznie znacząca.

Tabela 11. Następstwo epizodów cyrkulacyjnych w okresie 1949-2015:
rozkład obserwowanych częstości zmian epizodów form W-G:

W→E, W→C, E→W, E→C, C→W i C→E*

Table 11. Succession of circulation episodes in the period of 1949-2015:
distribution of the observed frequencies of episode changes of W-G form:

W→E, W→C, E→W, E→C, C→W and C→E*

Formy W-G W-G forms	Częstość Ne /rok Frequency Ne per year				Częstość Ne [%] Frequency Ne in percent			
	W	E	C	ΣNe	W	E	C	ΣNe
W→	-	9,76	7,31	17,07	-	18,88	14,15	33,03
E→	10,03	-	8,64	18,67	19,40	-	16,71	36,11
C→	7,04	8,91	-	15,96	13,63	17,23	-	30,86
Σ	17,07	18,67	15,96	51,70	33,03	36,11	30,86	100

* według testu χ^2 obserwowane częstości nie różnią się istotnie od częstości oczekiwanych (tab. 2)

* according to the value of χ^2 the difference between observed frequencies and expected frequencies (tab. 2) is insignificant

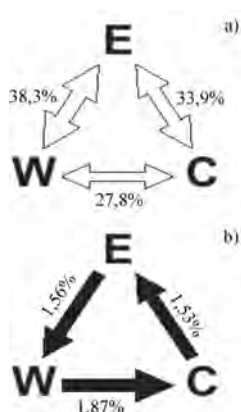
Jednakże, pamiętając o zastrzeżeniach dotyczących testów, warto zauważyć, że w badanym okresie 1949-2015 po epizodach formy E częściej pojawiały się epizody formy W niż po epizodach formy W – epizody formy E, a po epizodach formy C częściej pojawiały się epizody E niż epizody C po epizodach E itd. (tab. 10). Różnice tych „wymian” (Δ) wynoszą zaledwie 0,27 Ne /rok, czyli w ciągu całego 67-letniego okresu około osiemnaście epizodów cyrkulacyjnych określało „niesymetryczny” charakter następstwa form cyrkulacji.

Abstrahując od tej zapewne mało znaczącej statystyki (i przywołując poczynione już wyżej spostrzeżenia oraz treść z przypisu „1”), skonstruowano hipotetyczny model wymiany epizodów form cyrkulacyjnych (rys. 5).

W części „5a” przedstawionej ryciny zobrazowano obserwowane częstości występowania „obok siebie” epizodów form E i W (tj. E po W i W po E), epizodów W i C oraz epizodów C i E. Częstości te związane są przede wszystkim z całkowitą frekwencją Ne poszczególnych form cyrkulacji w wielolecu (por. tab. 3). Suma częstości zmian epizodów formy E na epizody formy W i zmian epizodów formy W na epizody formy E ($W \leftrightarrow E$) jest największa (38,3%), odpowiednio do największych częstości Ne (E) i Ne (W).

W części „5b” ryciny pokazano udział liczby niezrównoważonych zmian epizodów (Δ) w całkowitej liczbie wymiany epizodów cyrkulacyjnych; w tym przypadku następstwo epizodów formy C po epizodach formy W wykazuje największą względną „nadwyżkę” ($\Delta/[W \leftrightarrow C] = 1,87\%$). Udziały niesymetrycznych zmian epizodów $\Delta/[E \leftrightarrow W]$ i $\Delta/[C \leftrightarrow E]$ są nieco mniejsze i wynoszą odpowiednio 1,56 i 1,53%.

Jak widać, następstwo epizodów przejawia skłonność do pewnej „cyrkulacji epizodów cyrkulacyjnych”: po formie E powstają z pewnym nadmiarem



Rys. 5. Następowstwo zmian epizodów form cyrkulacyjnych W, E i C:

a) łączna częstość zmian form $E \leftrightarrow W$, $W \leftrightarrow C$ i $C \leftrightarrow E$, b) względna różnica zmian $E \rightarrow W$ i $W \rightarrow E$, $W \rightarrow C$ i $C \rightarrow W$ oraz $C \rightarrow E$ i $E \rightarrow C$

Fig. 5. Succession in the changes of circulation episodes of W, E and C forms:

a) total frequency of the circulation form changes $E \leftrightarrow W$, $W \leftrightarrow C$ i $C \leftrightarrow E$, b) relative difference between changes $E \rightarrow W$ and $W \rightarrow E$, $W \rightarrow C$ and $C \rightarrow W$, $C \rightarrow E$ and $E \rightarrow C$

formy W, po epizodach formy W obserwujemy „nadwyżkę” epizodów C, a po formie C powstają w nadmiarze epizody formy E. Natężenie tej „cyrkulacji epizodów” ($E \rightarrow W \rightarrow C \rightarrow E \dots$) określa wyszczególniona już wyżej wartość $\Delta = 0,27 \text{ Ne/rok}$. Niewielka skala tej „cyrkulacji” nie wyklucza możliwości, by pod wpływem równoległej zmienności czasu trwania epizodów (T) zmieniały się bardziej znacząco wartości frekwencji nd form W-G.

Opisana tu prawidłowość jest być może jedynie efektem stochastycznego charakteru zmienności form cyrkulacyjnych, tj. losowego kształtowania się różnicy Δ . Z drugiej jednak strony – następstwo pewnej „dodatkowej” liczby epizodów formy E po formie C czy też liczby epizodów formy C po formie W zdaje się mieć pewne uzasadnienie, które wiąże się z opisanymi już wyżej cechami współmienności form E i C oraz W i C. Nie bez przyczyny w poszczególnych latach analizowanego okresu dominowały relacje frekwencji nd , opisywane przez indeksy WWC bądź ECC i ECE (tab. 10).

Średnie ciśnienie SLP w Europie i nad północnym Atlantykiem a formy cyrkulacji W-G

Związek pola ciśnienia na poziomie morza z formami cyrkulacji środkowotroposferycznej obrazują izobary SLP oraz odchylenia (anomalie) ciśnienia od wartości średnich z okresu 1979-2010, które wyznaczono na podstawie średniego dobowego ciśnienia w dniach panowania formy W, formy E i formy

C. Przedstawiono izobary i izanomale dla sezonu zimowego (XII-II) i letniego (VI-VIII) (rys. 6-11). Pominęto zobrazowania dla sezonu wiosennego i jesienno z uwagi na brak w nich wyróżniających się cech, nieobecnych w polu ciśnienia w wybranych sezonach.

W odróżnieniu od analiz Seppa i Jaagusa (2002) oraz Marsza (2013), dotyczących korelacji między ciśnieniem i frekwencją form cyrkulacji (*nd*), pokazano układy średniego ciśnienia *SLP*, synchronicznie odpowiadające poszczególnym formom cyrkulacji W-G, tj. średnie *SLP* w okresach występowania form cyrkulacji W, E i C.

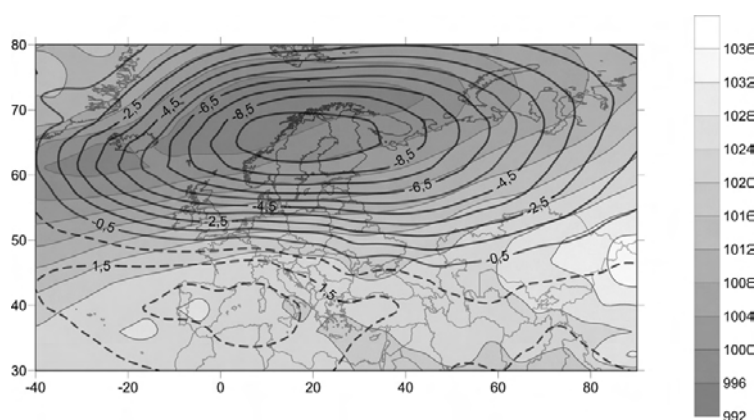
Forma W

Z formą cyrkulacji strefowej W wiąże się rozległa strefa ujemnych anomalii ciśnienia położona w pobliżu szerokości 60° i 70°N (rys. 6 i 7). Ośrodek najgłębszych anomalii leży nad Skandynawią. W polu średniego ciśnienia, kształtującym się pod wpływem formy W widoczna jest strefowo ułożona depresja, rozciągająca się od Islandii do północnej części Syberii Zachodniej. Ta subarktyczna depresja sprawia, że w umiarkowanych szerokościach geograficznych nad północnym Atlantykiem, Europą i na obszarach na wschód od Uralu izobary mają równoleżnikowy przebieg, co sprzyja rozwojowi strefowej, zachodniej cyrkulacji w dolnej atmosferze. W zimie (rys. 6) anomalie ciśnienia nad północną Europą są znacznie głębsze, a subarktyczna depresja sięga dalej na północ niż w okresie letnim (rys. 7). Także cyrkulacja strefowa w okresach panowania formy W osiąga zimą większe nasilenie niż latem.

Obraz anomalii ciśnienia związanych z formą cyrkulacji W w sezonie zimowym nawiązuje w ogólnym zarysie do układu izokorelat według Seepa i Jaagusa (2002), Seppa (2005) oraz Marsza (2013), którzy analizowali związki ciśnienia *SLP* z frekwencją (*nd*) tej formy cyrkulacji.

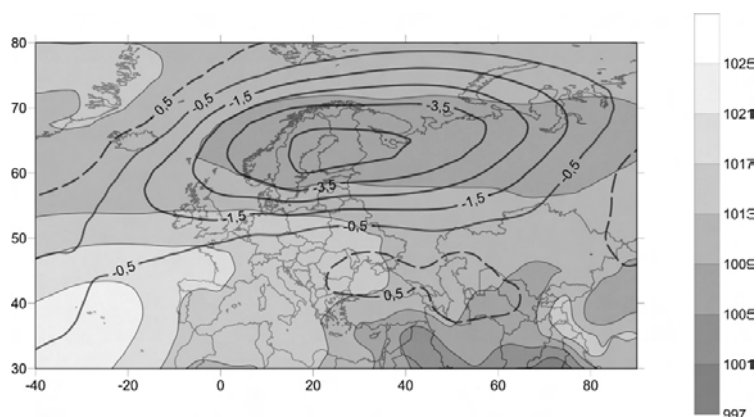
Korelacja nie decyduje jednak o wielkości anomalii ciśnienia, w związku z czym przedstawione na rys. 6 izanomale i izobary nie w pełni pokrywają się z izokorelatami na mapach cytowanych tu autorów. Założenie, że pozytywna korelacja ciśnienia z frekwencją form W-G oznacza kształtowanie się wyżu, a negatywna – niżu (Sepp, Jaagus 2002, str. 275) nie zawsze się sprawdza. W szczególności można zauważyć, że skorelowany z frekwencją formy W wzrost ciśnienia nad Morzem Śródziemnym, jak i rozbudowa w kierunku zachodnim Wyżu Syberyjskiego nie są zbyt wielkie. Przeciwnie – na całym analizowanym obszarze podczas panowania cyrkulacji W przeważają spadki ciśnienia, a niewielkie wzrosty w strefie wokół 40°N sięgają zaledwie do 2 hPa (przy spadkach ciśnienia nad Skandynawią o prawie 10 hPa).

Na podstawie układu izobar, opisujących średnie pole ciśnienia podczas występowania formy W można wnioskować, że przy strefowej formie cyрку-



Rys. 6. Średnie pole ciśnienia na poziomie morza (SLP) w dniach występowania formy W w okresie zimowym (XII-II, okres 1979-2010, SLP w hPa, skala barwna); anomalie ciśnienia: pozytywne – linie przerywane, negatywne – linie ciągłe (na podstawie Reanalysis-2 data base)

Fig. 6. Mean sea level pressure field on the days with circulation form W in winter (D, J, F of 1979-2010 period, SLP in hPa, shaded, color scale); positive pressure anomalies – dashed line, negative anomalies – continuous line (based on the Reanalysis-2 data base)



Rys. 7. Forma W w okresie letnim (VI-VIII), inne objaśnienia jak na rys. 6

Fig. 7. As in fig. 6, but in the summer time (J, J, A)

lacji środkowo-troposferycznej niżę znad Atlantyku przemieszczają się daleko na wschód, nawet poza Ural, szlakami prowadzącymi przez północną Europę, a w zimie głównie nad Morzem Norweskim i Morzem Barentsa, aż do Nowej Ziemi (czyli torami I i II wg van Bebbera). Według Seppa (2005) w Europie przez południk 20°E na wschód przemieszcza się średnio w roku osiemdziesiąt niżów barycznych, z których około 40% wędruje szlakami położonymi na północ od 65°N. Do południka 50°E dociera ponad siedemdziesiąt niżów.

Ich liczba pozostaje w istotnym związku z frekwencją formy cyrkulacji strefowej (W). Najsilniejsza korelacja liczby niżów i częstości formy W pojawia się w zimie i na wiosnę i dotyczy niżów wędrujących w strefie na północ od 55°N.

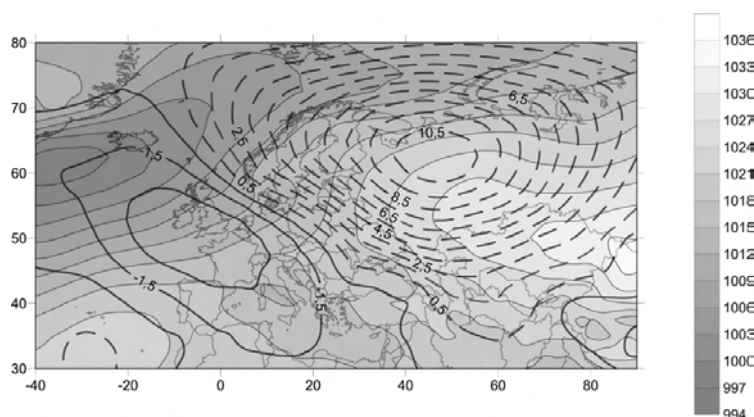
Z badań Marsza (2005, 2012) i Kożuchowskiego (1993, 1994) wynika, że podczas panowania formy W nad Polską występują najczęściej zachodnie (A), północno-zachodnie (CB) i południowo-zachodnie (D) typy cyrkulacji cyklonicznej oraz zachodnie (C2D), południowo-zachodnie i południowe (D2C) typy cyrkulacji antycyklonicznej (według klasyfikacji Osuchowskiej-Klein 1978, 1991). Współczynniki korelacji między frekwencją typów cyklonicznych (A+CB+D) i częstością (*nd*) formy cyrkulacji strefowej (W) są wysokie: w zimie $r = 0,70$, w lecie $r = 0,73$ (Kożuchowski 1994).

Forma W powoduje, że w okresie zimowym nad większą częścią Europy, z wyjątkiem jej południowych peryferii, rozwijają się adwekcje „ciepła atlantyckiego”. W zimie najintensywniejsze fale ciepła w Polsce związane są z formą cyrkulacji strefowej W (Degirmendzić, Kożuchowski 2017a). Najsilniejsza korelacja temperatury powietrza w zimie i frekwencji formy W dotyczy Polski, obszarów Białorusi i europejskiej części Rosji (Kożuchowski, Marciniak 1988, 1990; Sepp 2005).

Forma E

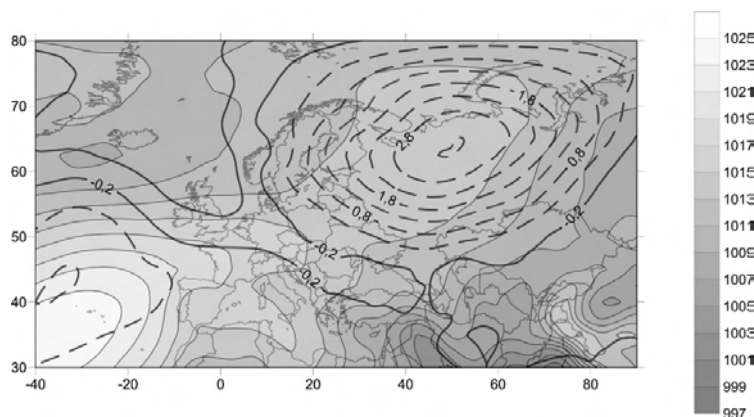
Formie cyrkulacji południkowej E odpowiada znaczny przyrost ciśnienia w północno-wschodniej Europie. Nad północną częścią Rosji sięga on w zimie do 11 hPa (rys. 8). Lokalizacja maksimum tej anomalii (w pobliżu 60°N, 50°E, podobnie jak w opracowaniu Marsza 2013) związana jest z położeniem klina na powierzchni 500 hPa (por. rys. 1). Anomalia „60°N, 50°E” nie określa jednak ukształtowanego centrum układu wyżowego, jak to zasugerowano na rys. 3 w opracowaniu Aasa i in. (2004). Średnie pole ciśnienia związane z formą E wskazuje raczej, że nad wschodnią i północno-wschodnią Europę sięga rozległy klin Wyżu Azjatyckiego (Syberyjskiego). Natomiast w południowo-zachodniej części Europy i nad znaczną częścią północnego Atlantyku ciśnienie SLP jest niższe od normy, a w miejsce depresji subarktycznej w północnej Europie, którą generowała forma W, pojawia się pogłębiona depresja, odpowiadająca Niżowi Islandzkiemu. Układ izobar sugeruje, że podczas panowania formy E nad większą częścią Europy w dolnej atmosferze dominuje wpływ powietrza z sektora SW-S-SE.

W sezonie letnim rozkład anomalii ciśnienia, jednak o znacznie mniejszych bezwzględnych wartościach, jest podobny do układu zimowego. Modyfikacja średniego pola ciśnienia w sezonie letnim nie jest wielka, amplituda anomalii SLP wynosi zaledwie około 3 hPa. Izobary ilustrujące ciśnienie, panujące podczas występowania formy E, wskazują na istnienie rozbudowanego układu



Rys. 8. Forma E w okresie zimy, inne objaśnienia jak na rys. 6

Fig. 8. As in fig. 6, but circulation form E – winter



Rys. 9. Forma E w okresie lata, inne objaśnienia jak na rys. 6

Fig. 9. As in fig. 6, but circulation form E – summer

podwyższonego ciśnienia, rozciągającego się od Wyżu Azorskiego, przecinającego Europę Zachodnią i Środkową i sięgającego aż do północnego Urалу i Nowej Ziemi za kołem polarnym (rys. 9). Pole ciśnienia w sezonie letnim nad Europą Środkową nie wskazuje wyraźnie określonego kierunku napływu powietrza w dolnej atmosferze. Uśrednione gradienty ciśnienia są niewielkie i być może wskazują jedynie na dużą zmienność układów barycznych w tym regionie.

Układ ciśnienia, związany z formą E blokuje przemieszczanie się na wschód niżów znad Atlantyku po szlakach leżących na północ od 45°N. Według Seppa (2005) liczba niżów przechodzących przez południk 20°E jest ujemnie skorelowana z częstością formy E. Wzrasta za to częstość wędrówki niżów wzdłuż basenu Morza Śródziemnego: „tak jak niże przemieszczające się przez Bałtyk są

liczne przy panowaniu formy W, tak też niżę śródziemnomorskie są liczne przy formie E" (Sepp 2005, str. 66). Niżę śródziemnomorskie niekiedy aktywizują się i przemieszczają się na północ szlakiem zbliżonym do toru Vb van Bebbra, docierając do Europy Środkowej, niekiedy nawet do Finlandii. Wędrówka niżów śródziemnomorskich tym szlakiem odbywa się w przeważającej liczbie przypadków (ponad 2/3 niżów) podczas panowania formy E (Degirmendzić, Kożuchowski 2016).

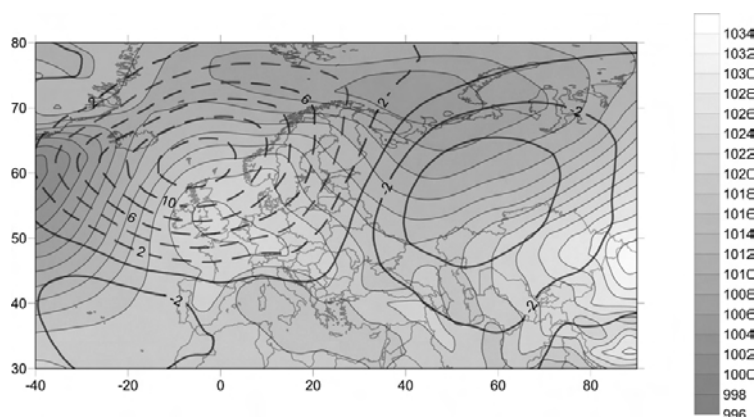
Formie E odpowiadają występujące nad Polską typy cyrkulacji antycyklonicznej, wschodniej i południowo-wschodniej (E1) oraz typy cyrkulacji cyklonicznej – północno-wschodniej i wschodniej (E0) i południowo-wschodniej (F). W zimie korelację częstości formy E i typu cyrkulacji E1 (jego modelowy obraz oddają izobary na rys. 8) określa istotny współczynnik $r = 0,73$ (Kożuchowski 1994).

Rozmieszczenie anomalii ciśnienia związanych z formą E jest do pewnego stopnia „odwróceniem” układu anomalii, odpowiadających formie W. W ten sposób potwierdza się spostrzeżenie Marsza, który relacje między formami W i E nazywa „huśtawką ciśnienia atmosferycznego nad obszarem Eurazji” (Marsz 2013, str. 14). Można jednakowoż dodać, że średnie pole ciśnienia, ukształtowane w związku z panowaniem formy E jedynie różni się znacznie od pola, związanego z formą W. Układ tych różnic daleki jest od pełnego „odwrócenia” układów barycznych w dolnej atmosferze – nie spełnia warunków obrazu „negatywu-pozytyw”.

Forma C

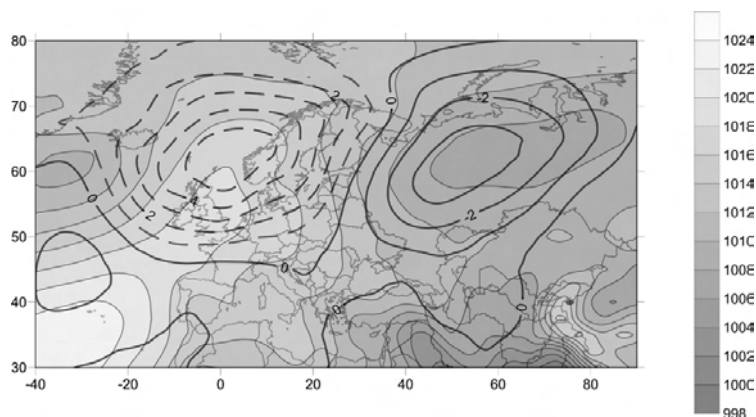
Najistotniejszą, charakterystyczną cechą zmian ciśnienia SLP, towarzyszących występowaniu formy cyrkulacji południkowej C jest znaczny przyrost ciśnienia w północno-zachodniej części Europy i wschodnią częścią północnego Atlantyku. Ośrodek dodatnich anomalii znajduje się w rejonie Wysp Szeztlandzkich (około 60°N, 0°E) i leży w pobliżu osi klina na powierzchni 500 hPa. Nad północno-wschodnią Europą, inaczej niż w przypadku formy E, ciśnienie obniża się o kilka hPa. Anomalie ciśnienia w zimie i w lecie nie różnią się tak znacznie, jak w przypadku anomalii, związanych z formą E (rys. 10 i 11).

W zimie anomalie ciśnienia z centrum położonego nad Szeztlandami, sygnalizują powstawanie układu wyżowego, obejmującego Wyspy Brytyjskie wraz ze znaczną częścią Europy Zachodniej (rys. 10). Nad Europą Środkową układ ten steruje spływem mas powietrza z północy i z północno-zachodu. Zarazem zablokowana jest wędrówka niżów atlantyckich nad Europę. Depresja widoczna za kręgiem polarnym sugeruje, że niżę atlantyckie mogą przemieszczać się najbardziej na północ odsuniętymi torami, m.in. od Wyspy Niedźwiedziej do Nowej Ziemi. Sepp (2005) podaje, że liczba niżów przemieszczających się na wschód



Rys. 10. Forma C w okresie zimy, inne objaśnienia jak na rys. 6

Fig. 10. As in fig. 6, but circulation form C – winter



Rys. 11. Forma C w okresie lata, inne objaśnienia jak na rys. 6

Fig. 11. As in fig. 6, but circulation form C – summer

i przechodzących przez południk 20°E poza kręgiem polarnym jest pozytywnie (ale dość słabo) skorelowana z częstością występowania formy C. W niższych szerokościach geograficznych korelacje te są nieistotne lub negatywne.

W sezonie letnim subarktyczna depresja związana z panowaniem formy C umiejscawia się nad kontynentem, nad północnym Uralem i Zachodnią Syberią, natomiast wyż nad Wielką Brytanią uzyskuje połączenie z Wyżem Azorskim (rys. 11). Nad Europą Środkową utrzymuje się cyrkulacja północna. Zarówno w okresie letnim, jak i w zimie gradienty ciśnienia SLP kształtowane pod wpływem formy C oznaczają adwekcję chłodu nad Bałtykiem i w środkowo-wschodniej Europie. W Polsce, spośród trzech analizowanych form W-G „najwyraźniejszą rolę w odniesieniu do fal chłodu spełnia makroforma C” (Degirmendzić, Kożuchowski 2017a).

Z formą C najsilniej skorelowany jest typ północno-wschodniej cyrkulacji antycyklonicznej E, któremu odpowiada wyż nad Skandynawią. W sezonie letnim współczynnik korelacji częstości formy C i typu E osiąga wartość 0,70. Z formą C skorelowane są także typ cyrkulacji antycyklonicznej północno-zachodniej (E2C) oraz typ cyrkulacji antycyklonicznej G, z ośrodkiem wysokiego ciśnienia nad Polską (Kożuchowski 1994; Marsz 2012).

Podsumowanie

W okresie 1949-2015 formy cyrkulacji W-G zmieniały się ze średnią częstotliwością pięćdziesięciu dwóch zmian formy w ciągu roku (tj. jedna zmiana w ciągu około siedmiu dni).

Określenie frekwencji epizodów cyrkulacyjnych (Ne) pozwoliło stwierdzić, że formy cyrkulacji W, E i C powstają z podobną częstością – od 31% (forma C) do 36% (forma E). Epizody różnią się czasem trwania: forma E utrzymuje się średnio ponad dziewięć dni, formy W i C – pięć do sześciu dni (tab. 3 i 4).

Roczna liczba dni z formami cyrkulacji (częstość nd) w okresie 1949-2015 zmieniała się istotnie. Przede wszystkim znacząco wzrastała częstość nd formy W, częstość formy E zmniejszała się po maksimum w 1981 roku, częstość formy C spadała po 1965 roku (tab. 6 i 7). Stwierdzono istotne statystycznie różnice między frekwencją form cyrkulacji w trzech wyróżnionych podokresach – tzw. epokach cyrkulacyjnych (tab. 4). Największą zmienność można przypisać formom W i C. Największą inercją zmian czasowych wyróżnia się częstość formy W (tab. 5 i 6).

Rosnąca częstość (nd) formy W w okresie 1949-2015 wynikała z przyrostu rocznej liczby jej epizodów oraz z wydłużenia czasu ich trwania. Skróceniu uległy natomiast epizody form E i C (rys. 2). Do charakterystycznych cech analizowanego 67-letniego okresu można zaliczyć rosnącą tendencję rocznej liczby epizodów trzech form cyrkulacji Ne (W+E+C, rys. 3, tab. 7). Częstotliwość zmian form cyrkulacyjnych wzrosła szczególnie w końcu tego okresu, po roku 2003.

Zmiany z roku na rok frekwencji form cyrkulacyjnych wykazują stochastyczny charakter krótkookresowej zmienności Ne i nd . Liczba serii w szeregach zmian z roku na rok nie różni się znacząco od liczby serii w szeregu losowym. Nieistotne okazują się także związki między zmianami poszczególnych form cyrkulacji. Niemniej, w analizowanej próbie sześćdziesięciu sześciu zmian z roku na rok frekwencji nd i Ne znaleziono słabą zbieżność zmian częstości form W i C oraz E i C (tab. 9). Podobnie, analizując kolejność występowania epizodów form W, E i C znaleziono śladowo zaznaczoną tendencję, zgodnie z którą po epizodach formy E następują ze względным nadmiarem epizody formy W, po epizodach W – epizody C, a po epizodach C – epizody E (rys. 5).

Przedstawiono hipotezę, że tego rodzaju statystycznie mało znaczące prawidłowości stanowią przyczynę formowania się w poszczególnych latach określonych relacji między frekwencją form W, E i C. W przeważającej liczbie przypadków (około 2/3 lat analizowanej serii) stwierdzono zbieżność względnej dominacji form W i C lub zbieżność dominacji form E i C (lata te oznaczono indeksami WWC, ECC i ECE, zob. tab. 10).

Poszczególnym formom cyrkulacji środkowo-troposferycznej odpowiadają odmienne układy baryczne w polu ciśnienia SLP (rys. 6-11). Formie W odpowiada silnie pogłębiona depresja w strefie wysokich szerokości geograficznych nad Europą. Formom cyrkulacji południkowej E i C odpowiadają dodatnie anomalie ciśnienia, położone w pobliżu osi klinów na powierzchni 500 hPa (odpowiednio w pobliżu południków 50°E i 10°E). W związku z tym, podczas panowania formy E nad północno-wschodnią Europą kształtują się układy wyżowe; w zimie przybierające postać rozległego klina Wyżu Azjatyckiego. Podczas epizodów formy C wyż kształtuje się nad Europą Zachodnią; w sezonie letnim ma on postać klina Wyżu Azorskiego. Układy ciśnienia związane z formami W-G wskazują, że formy cyrkulacji wyróżnione w klasyfikacji Wangenheima-Girsa stanowią znaczący czynnik, formujący typy cyrkulacji w dolnej atmosferze nad obszarem od Północnego Atlantyku do Zachodniej Syberii.

Niektóre aspekty krótkookresowej zmienności form cyrkulacji wskazują na jej stochastyczny charakter. Nie można wykluczyć, że obserwowane wieloletnie fluktuacje frekwencji form cyrkulacyjnych są także przejawem losowego błędzenia wartości zmiennych, charakteryzujących ich frekwencję. Z drugiej strony trzeba jednak zauważyć śladową obecność systematycznych cech w krótkookresowej zmienności form W-G. Formy W i C oraz formy południkowe E i C „sklejają się”, a zmiany ich frekwencji w skali wieloletniej kształtują istotnie wyróżniające się „epoki cyrkulacyjne”, skutkujące m.in. jakościowymi przemianami pola ciśnienia i rozmieszczenia układów barycznych.

Współwystępowanie losowych i nielosowych, statystycznie znaczących aspektów zmienności form W-G może stanowić potwierdzenie idei zawartej na wstępie niniejszego opracowania (zob. przypis „1”). Krótkookresowa, stochastyczna zmienność generuje znaczące długookresowe fluktuacje częstości występowania form cyrkulacji. Fluktuacje te można określić terminem *vacillation* (Michell 1966). Są to wahania przejawiające tendencję do formowania bimodalnych rozkładów wartości w seriach czasowych.

P o d z i ę k o w a n i a

Składamy podziękowanie Panu Profesorowi Andrzejowi Marszowi (Oddział Bałtycki PTGeof) za udostępnienie aktualnych danych z kalendarza form cyrkulacji wg klasyfikacji Wangenheima-Girsa. Anonimowym Recenzentom dziękujemy za Ich opinie o przedstawionej tu pracy.

L i t e r a t u r a

- Aasa A., Jaagus A., Ahas R., Sepp M., 2004, The influence of atmospheric circulation on plant phenological phases in Central and Eastern Europe, *International Journal of Climatology*, 24 (12), 1551-1564, DOI: 10.1002/joc.1066
- Degirmendzić J., Kozuchowski K., 2016, Nizze śródziemnomorskie jako czynnik klimatu Polski, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź, 165 s.
- Degirmendzić J., Kozuchowski K., 2017a, Epoki cyrkulacyjne w okresie 1891-2010 na podstawie klasyfikacji Wangenheima-Girsa, [w:] *Nadzwyczajne zdarzenia meteorologiczne i hydrologiczne na ziemiach polskich*, Materiały Konferencji Jubileuszowej z okazji 70-lecia Polskiego Towarzystwa Geofizycznego, 25-26.09.2017, Łódź, 72-73
- Degirmendzić J., Kozuchowski K., 2017b, Makrocyrkulacyjne uwarunkowania długotrwałych fal termicznych w Polsce, *Przegląd Geofizyczny*, 62 (1-2), 3-28
- Degirmendzić J., Kozuchowski K., Wibig J., 2000, Epoki cyrkulacyjne w XX wieku i zmienność typów cyrkulacji w Polsce, *Przegląd Geofizyczny*, 45 (3-4), 221-239
- Dimitriev A.A., Belyazov V.A., 2006, *Kalendarij katalog atmosferykh processov po cirkumpolarnoj zonie severnogo polusharja i ikh kharakteristiki za period s 1949 po 2005 g*, [w:] *Kosmos, planetarnaja klimaticheskaja izmenchivost' i atmosfera poljarnykh regionov*, Gidrometeoizdat, St.Petersburg
- Girs A.A., 1960, *Osnovy dolgosrochnykh prognozov pogody*, Gidrometeoizdat, Leningrad, 560 s.
- Girs A.A., 1964, O sozdanii edinoj klassifikacii makrosinopticheskikh prosessov severnogo polusharija, *Meteorol. i Gidrol.*, 4, 43-47
- Girs A.A., 1971, *Mnogoletnie kolebanija atmosfernoj cirkulacii i dolgosrochnye gidrometeorologicheskie prognozy*, Gidrometeoizdat, Leningrad, 280 s.
- Girs A.A., 1974, *Makrocirkulacionnyj metod dolgosrochnykh meteorologicheskikh prognozov*, Gidrometeoizdat, Leningrad, 488 s.
- Girs A.A., 1977, *Mnogoletnie preobrazowanija form atmosfernoj cirkulacii i kolebanija klimatov razlicnykh rajonov severnogo polusharija*, [w:] *Klimatologija i sverkh-dologosrochnyj prognoz*, Gidrometeoizdat, Leningrad, 39-46
- Girs A.A., 1981, K voprosu o formakh atmosfernoj cirkulacii i ikh prognosticheskomy ispolzovanii, *Trudy AANII*, 374, 4-13
- Gorbacheva N.A., 1986, K voprosu ob obektivnykh pokazateljach klassifikacii G.Ja. Wangenheima – A.A. Girsa, *Trudy V.N.I.I.*, Gidrometeorol. Inform., 129, 28-36
- Greń J., 1974, *Statystyka matematyczna. Modele i zadania*, PWN, Warszawa, 362 s.
- Griffiths S. (red.), 2006, *Prognozy. Trzydziestu myślicieli o przyszłości*, Zys i S-ka Wydawnictwo, Poznań, 347 s.
- Harris I., 2014, NCEP/NCAR Reanalysis. Climatic Research Unit, University of East Anglia, dostęp online: <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/ncp/> (29.03.2018)
- Hoy A., Jaagus J., Sepp M., Matschullat J., 2013, Spatial response of two European atmospheric classifications (data 1901-2010), *Theoretical and Applied Climatology*, 112 (1-2), 73-88, DOI: 10.1007/s00704-012-0707-x

- Jacobeit J., Rathmann J., Philips A., 2009, Central European temperature and precipitation extremes in relation to large-scale atmospheric circulation types, *Meteorologische Zeitschrift*, 18 (4), 396-410, DOI: 10.1127/0941-2948/2009/0390
- Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds R., Chelliah M., Ebisuzaki W., Higgins W., Janowiak J., Mo K.C., Ropelewski C., Wang J., Jenne R., Joseph D., 1996, The NCEP/NCAR 40 Year Reanalysis Project Bulletin of the American Meteorological Society, 77, 437-471
- Kaczmarek Z., 1970, *Metody statystyczne w hydrologii i meteorologii*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa, 312 s.
- Koźuchowski K., 1993, Makrotypy ogólnej cyrkulacji atmosfery a główne typy cyrkulacji nad Polską, *Przegląd Geofizyczny*, 38 (3-4), 241-247
- Koźuchowski K., 1994, Temperatura powietrza i typy cyrkulacji w Polsce na tle charakterystyk ogólnej cyrkulacji atmosfery, *Rozprawy i Studia Uniwersytetu Szczecińskiego*, 226 (152), 47-72
- Koźuchowski K., 1995, Głębokie cyklony, antycyklony i cyrkulacja strefowa nad Europą (1900-1990), *Przegląd Geofizyczny*, 40, 3, 231-246
- Koźuchowski K., Marciniak K., 1988, Variability of mean monthly temperatures and semi-annual precipitation totals in Europe in relation to hemispheric circulation patterns, *International Journal of Climatology*, 8 (2), 191-199, DOI: 10.1002/joc.3370080206
- Koźuchowski K., Marciniak K., 1990, The influence of global circulation patterns on interannual temperature changes in Europe, *Meteorologische Zeitschrift*, 40 (4), 237-240
- Lamb H.H., 1972, *Climate: present, past and future*, tom I, Methuen, London, 647 s.
- Marsz A.A., 1999, Oscylacja Północnoatlantycka a reżim termiczny zim na obszarze północno-zachodniej Polski i polskim wybrzeżu Bałtyku, *Przegląd Geograficzny*, 71 (3), 225-245
- Marsz A.A., 2005, Czy cyrkulacja atmosferyczna jest zdeterminowana i przewidywalna?, [w:] *Ekstremalne zjawiska hydrologiczne i meteorologiczne*, E. Bogdanowicz, U. Kossowska-Cezak, J. Sekutnicki J. (red.), Polskie Towarzystwo Geofizyczne, IMGW, Warszawa, 32-52
- Marsz A.A., 2012, Cyrkulacja atmosferyczna w atlantycko-euroazjatyckim sektorze cyrkulacyjnym – schemat uwarunkowań i mechanizm działania, [w:] *Rola cyrkulacji atmosfery w kształtowaniu klimatu*, Prace Wydziału Nauk o Ziemi UŚ, 74, 101-118
- Marsz A.A., 2013, Frekwencja makrotypów cyrkulacji środkowotroposferycznej według klasyfikacji Wengenheima-Girsa w okresie zimowym a pole ciśnienia atmosferycznego nad Europą i północną Azją, *Przegląd Geofizyczny*, 58 (1-2), 3-22
- Marsz A.A., 2015, Cyrkulacja termohalinowa na Atlantyku Północnym a temperatura powietrza w Polsce (1961-2010), *Przegląd Geofizyczny*, 60 (3-4), 109-131
- Michell J., 1966, *Climatic change*, WMO Technical Note No 79, WMO, Geneva, 79 s.
- Norcliffe G.B., 1986, *Statystyka dla geografów*, PWN, Warszawa, 258 s.
- Osuchowska-Klein B., 1978, *Katalog typów cyrkulacji atmosferycznej*, IMGW, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 192 s.

- Osuchowska-Klein B., 1991, Katalog typów cyrkulacji atmosferycznej (1976-1990), IMGW, Warszawa, 50 s.
- Sepp M., 2005, Influence of atmospheric circulation on environmental variables in Estonia, *Dissertationes Geographicae Universitatis Tartunensis*, 25, 279 s.
- Sepp M., 2011, Regime shift in atmospheric circulation in the Baltic Sea region (w j.es-ton.), *Publicationes Instituti Geographici Universitatis Tartuniensis*, 109, 72-89
- Sepp M., Jaagus J., 2002, Frequency of circulation patterns and air temperature variations in Europe, *Boreal Environment Research*, 7 (3), 273-279
- Sidorenkov N.S., Orlov I.A., 2008, Atmospheric circulation epochs and climate changes, *Russian Meteorology and Hydrology*, 33 (9), 553-559, DOI: 10.3103/S1068373908090021
- Sidorenkov N.S., Svirenko P.I., 1983, K voprosu o mnogoletnikh kolebanijakh atmosferycznej cirkulacii, *Meteorol. i Gidrol.*, 11, 20-25
- Wangenheim G.Ja., 1935, Opyt primenenija sinopticheskikh metodov k izucheniju i kharakteristike klimata, *Gidrometeocentr Rossii*, Moskwa, 109 s.
- Wangenheim G.Ja., 1946, O kolebanijakh atmosferycznej cirkulacii nad severnym polushariem, *Izvestiia Akademii Nauk SSSR*, 10 (5), 407-416
- Wangenheim G.Ja., 1952, Osnovy makrocirkulacionnogo metoda dolgosrochnykh meteorologicheskikh prognozov dlja Arktiki, *Trudy AANII*, 34, 11-66
- Węglarczyk S., 2004, Wybrane problemy stosowania metod statystycznych, [w:] *Zastosowanie wybranych metod statystycznych w klimatologii*, A. Bokwa, Z. Ustrnul (red.), Wydawnictwo IGiPZ UJ, Kraków, 11-20
- Youle G.U., Kendall M.G., 1940, *An introduction to the theory of Statistics*, Hafner, New York, 676 s.

S t r e s z c z e n i e

Opracowanie przedstawia wyniki statystycznej analizy zmienności form cyrkulacji atmosferycznej na podstawie klasyfikacji Wangenheima-Girsa. W analizie wykorzystano dwie miary frekwencji form cyrkulacji: 1. roczne liczby dni z formami cyrkulacji W, E i C (częstość *nd*), 2. roczne liczby epizodów poszczególnych form (*Ne*), tj. liczby okresów, w których przez kolejne dni w roku utrzymuje się dana forma. Wykonano ocenę wieloletnich zmian frekwencji form cyrkulacji na podstawie kumulowanych odchyleń częstości *nd* i *Ne* od średnich z okresu 1949-2015 oraz porównano frekwencję form cyrkulacji w trzech tzw. epokach cyrkulacyjnych: E+C (1950-1969), E (1970-1991) i W (1992-2015). Ponadto, analizowano zmiany frekwencji *nd* i *Ne* z roku na rok oraz następstwo występowania epizodów form W, E i C.

W okresie 1949-2015 wydzielono 3476 epizodów cyrkulacyjnych o średnim czasie trwania około siedmiu dni. W analizowanym okresie wzrastała znacząco częstość *nd* formy W, głównie wskutek wzrostu liczby epizodów (*Ne*). Skróceniu uległy natomiast epizody form E i C. Stwierdzono istotną, rosnącą tendencję rocznej liczby epizodów trzech form cyrkulacji *Ne* (W+E+C). Częstotliwość zmian form cyrkulacyjnych wzro-

sła szczególnie po roku 2003 (rys. 3). Istotne statystycznie różnice wystąpiły między frekwencją form cyrkulacji w trzech wyróżnionych podokresach – tzw. epokach cyrkulacyjnych. Największą zmienność można przypisać formom W i C. Największą inercją zmian czasowych wyróżnia się częstość formy W (tab. 3, 4, 5).

Zmiany z roku na rok frekwencji form cyrkulacyjnych, jak i związki między zmianami rocznych częstości poszczególnych form wykazują stochastyczny charakter krótkookresowej zmienności form cyrkulacji atmosferycznej. Niemniej, w analizowanej próbie sześćdziesięciu sześciu zmian z roku na rok frekwencji *nd* i *Ne* znaleziono słabą zbieżność zmian częstości form W i C oraz E i C. Znaleziono także śladowo zaznaczoną tendencję, zgodnie z którą po epizodach formy E następują ze względny nadmiarem epizody formy W, po epizodach W – epizody C, a po epizodach C – epizody E (rys. 4). W przeważającej liczbie przypadków (około 2/3 lat analizowanej serii) stwierdzono zbieżność względnej dominacji form W i C lub zbieżność dominacji form E i C (lata te oznaczono indeksami WWC, ECC i ECE, zob. tab. 10).

Przedstawiono hipotezę, według której losowe zmiany form cyrkulacji mogą powodować powstawanie znaczących fluktuacji, obserwowanych w przebiegu częstości poszczególnych form (forma W nieznacznie sprzyja powstawaniu formy C, forma C sprzyja formie E itd., zob. rys. 8).

Pole średniego ciśnienia, odpowiadające formom cyrkulacji W, E i C (rys. 6-11) wskazuje, że formie W odpowiada silnie pogłębiona depresja w strefie wysokich szerokości geograficznych nad Europą. Formom cyrkulacji południkowej E i C odpowiadają dodatnie anomalie ciśnienia, położone w pobliżu osi klinów na powierzchni 500 hPa (odpowiednio w pobliżu południków 40-50°E i 0-10°E). Podczas panowania formy E nad północno-wschodnią Europą kształtują się układy wyżowe; w zimie przybierające postać rozległego klina Wyżu Azjatyckiego. Podczas epizodów formy C wyż kształtuje się nad Europą Zachodnią; w sezonie letnim ma on postać klina Wyżu Azorskiego.

Słowa kluczowe: klasyfikacja Wangenheima-Girsa, formy cyrkulacji, epizody cyrkulacyjne, zmienność form cyrkulacji, pola ciśnienia na poziomie morza, Europa i Atlantyk Północny.

S u m m a r y

The paper presents the results of a statistical analysis of the temporal variations in the occurrence of atmospheric circulation forms based on the Wangenheim-Girs classification. Two statistical measures of the occurrence of circulation forms are used: 1) annual frequency of circulation forms, i.e. the number of days with individual forms (*nd*); 2) annual frequency of circulation episodes (*Ne*). An episode denotes a period in which a sole form in successive days occurs. An assessment of long-term changes in frequencies of circulation forms is provided on the basis of cumulative deviations from averages of the period 1949-2015, and so in the comparison of the frequency of circulation forms

in three so-called circulation epochs: E+C (1950-1969), E (1970-1991) and W (1992-2015). Moreover, the year to year changes in *nd* and *Ne* frequencies, and the succession of the circulation episodes of W, E and C forms were analyzed.

In the 1949-2015 period 3476 circulation episodes with average duration of ca. 7 days were identified. In the analyzed period, the *nd* frequency of the form W was significantly growing, mostly due to the rise of the number of W episodes. In contrast, the episodes of the E and C forms shortened. A remarkable rising tendency in the number of episodes of the three forms *Ne* (W+E+C) was also identified. The changeability of circulation form rose particularly after 2003 (fig. 3). Statistically significant differences were observed between the frequency of circulation forms in three identified sub-periods – the so called circulation epochs. The greatest variability may be attributed to the W and C forms. The greatest persistence in temporal changes characterizes the frequency of the W form (tab. 3, 4, 5).

Year to year changes in frequencies of circulation forms, and relations between changes in yearly frequencies of particular forms demonstrate stochastic character of short-term variability of circulation patterns. However, in the analyzed sample of 66 year to year changes in *nd* and *Ne* frequencies a slight association in frequency changes of the W and C forms, and E and C forms was identified. Moreover, a detectable tendency was observed for the W form episodes to succeed with relative higher frequency the E form episodes, as the C form episodes succeed the W form episodes, and the E form episodes succeed the C form episodes (F=fig. 4). The majority of the analyzed cases (about 2/3 of the years in question) were characterized by the association of relatively dominant W and C forms, or the association of the E and C forms prevalence (these years were marked with WWC, ECC, and ECE indexes, see tab. 10).

According to the hypothesis presented random changes in circulation forms may cause significant frequency fluctuations of particular forms (the C form occurs slightly frequently after the W form, and the E form after the C one, etc., see fig. 8).

The average sea level pressure field, related to the W, E and C circulation forms (fig. 6-11) indicates that zonal W form is related to a deep depression in high latitudes over Europe. Meridional circulation forms E and C are related to the positive pressure anomalies located near the axes of ridges at the 500 hPa level (near to the 40-50°E and 0-10°E meridians respectively). During the prevalence of the E form over North-Eastern Europe highs are being formed, which take the shape of the spacious ridge of the Asian high in winter. During the C form episodes the high is being formed over Western Europe, and it takes shape of the ridge of the Azorian high in summer.

Key words: Wangenheim-Girs classification, circulation forms, circulation episodes, variability of circulation forms, sea level pressure, Europe and Northern Atlantic.