



**Jerzy Boryczka, Maria Stopa-Boryczka**  
Wydział Geografii i Studiów Regionalnych UW  
ul. Krakowskie Przedmieście 30, 00-927 Warszawa

Regionalne Studia Ekologiczno-Krajobrazowe  
Problemy Ekologii Krajobrazu, tom XVI

## **Zmiany klimatu Polski w XIX–XXI wieku ze szczególnym uwzględnieniem Wyżyny Małopolskiej**

### **Changes in the Poland's climate during 19<sup>th</sup> – 21<sup>th</sup> centuries with particular consideration of Małopolska Upland**

**Abstract:** The aim of this research is to determine the range of air temperature fluctuations in Warsaw and Cracow, in the last two centuries. Past analyses of long-term surveys (Warsaw 1779–1998, and Cracow 1826–1998) suggest several air temperature cycles of significant amplitudes. They are ca. 3–5, 7–8, 10–13 and 73–113 years long. Spectres and cycles of air temperature, and NAO indicator, and sun activity in the 1951–2000 years were calculated based on the "regression sine" method. Prevailing regularity in Poland, there are 8 year periods of large amplitude of air temperature. The range of these fluctuations evaluated on the example of Kielce in winter reaches 2.3°C for the period of 8.1 years. During winter the dominating period length in the spectrum indicators of the North Atlantic Oscillation (NAO) is 8.1 years.

**Key words:** air temperature, Sun activity, North Atlantic Oscillation, spectrum, forecast

**Słowa kluczowe:** temperatura powietrza, aktywność Słońca, wskaźnik NAO, widmo, prognoza

Celem pracy jest określenie zmian klimatu Polski w ostatnich dwóch stuleciach na przykładzie Warszawy, Krakowa i Kielc. Jest nim też wykazanie synchroniczności cykli temperatury powietrza, opadów atmosferycznych, Oscylacji Północnoatlantycznej (NAO) i aktywności Słońca oraz prognoza zmian klimatu w XXI wieku.

Wykrycie analogicznych okresów klimatycznych i astronomicznych (tj. okresów „skutków” i domniemanych „przyczyn”) umożliwi identyfikację naturalnych czynników warunkujących wahania klimatu Polski (przy udziale prądów oceanicznych i cyrkulacji atmosferycznej) oraz prognozowanie.

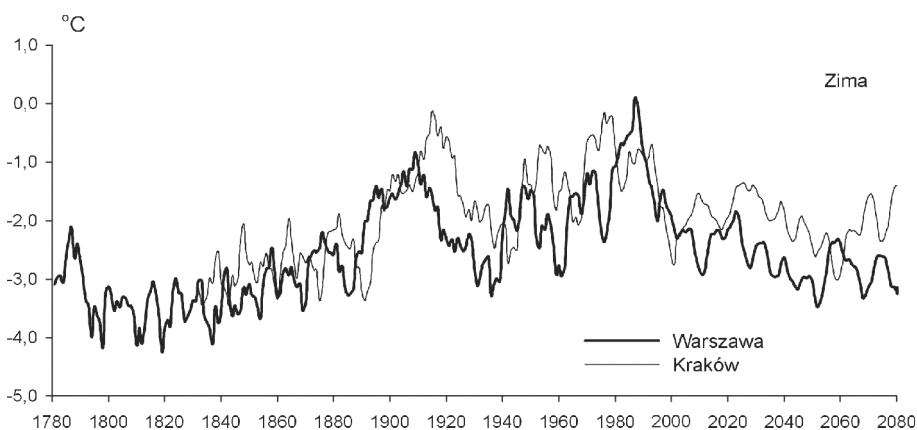
Z dotychczasowych badań długich ciągów pomiarów wynika, że w Polsce w latach 1827–2000 występowało kilka cykli temperatury powietrza o znaczących amplitudach. Cykle zimowe (Warszawa – 3,3, 4,2, 7,7, 11,3, 15,6, 18,6, 43,5, 95,4 lat; Kraków – 3,3, 7,0, 15,6, 18,5, 58,5, 90,1 lat) mało różnią się od cykli letnich (Warszawa – 3,9, 7,1, 11,2, 15,6, 19,1, 73,4 lat; Kraków – 3,9, 7,0, 11,4, 20,6, 88,6, 168,3 lat). Największą amplitudą 1–1,5°C cechuje się cykl 7–8-letni.

Na klimat Polski dominujący wpływ mają dwa główne centra pola ciśnienia atmosferycznego: Wyż Azorski i Niż Islandzki. Te dwa centra ciśnienia, związane z różnicą temperatury między wodą Atlantyku Północnego a lądem, są ze sobą ujemnie skorelowane. Jeżeli ciśnienie w Wyżu Azorskim rośnie, to ciśnienie w Niżu Islandzkim – maleje i przeciwnie. Jest to tzw. Oscylacja Północnoatlantycka (North Atlantic Oscillation, NAO).

Przy dużej południkowej różnicy ciśnienia, tj. dużym gradiencie ciśnienia skierowanym na północ, powietrze znad Atlantyku przemieszcza się wzdłuż równoleżników z zachodu na wschód – nad obszar Polski. Natomiast podczas spadku ciśnienia w Wyżu Azorskim (i jednocześnie wzroście ciśnienia w Niżu Islandzkim) poziomy gradient ciśnienia może być skierowany na wschód lub zachód. Wtedy powietrze przemieszcza się wzdłuż południków (cyrkulacja południkowa) na południe lub północ. Wówczas nad obszar Polski napływa powietrze z północy lub południa.

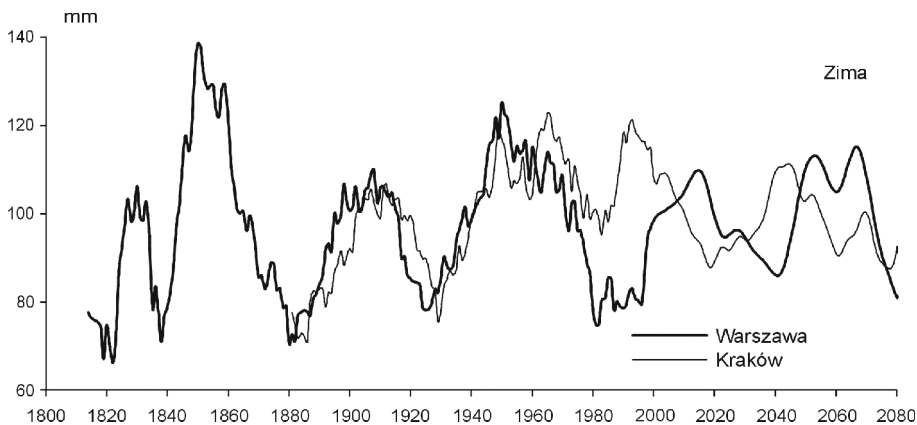
W widmie wskaźnika NAO w zimie, podobnie jak w widmach temperatury powietrza w Warszawie (1779–1998) i Krakowie (1826–1995) dominuje cykl około 8-letni. Jest to jednocześnie cykl aktywności Słońca (8,1 lat).

Interesujące są wykresy czasowych zmian: temperatury powietrza i opadów atmosferycznych w Warszawie i Krakowie (rys. 1, 2) oraz wskaźnika Oscylacji Północnoatlantyckiej NAO (rys. 3) wraz z prognozami sięgającymi po rok 2100.



Rys. 1. Zmiany temperatury powietrza podczas zim w Warszawie i Krakowie z prognozą po rok 2080

Fig. 1. Changes of air temperature in Warsaw and Cracow during winters. Forecast until 2080



Rys. 2. Zmiany opadów atmosferycznych podczas zim w Warszawie i Krakowie z prognozą po rok 2080

Fig. 2. Changes of precipitation sums in Warsaw and Cracow during winters. Forecast until 2080

Prognozy otrzymano na podstawie interferencji wykrytych cykli: temperatury powietrza, opadów atmosferycznych i wskaźnika NAO:

$$y = a_0 + b_j \sin(2 \pi t / T_j + c_j)$$

gdzie:  $T_j, b_j, c_j$  – to parametry istotnych statystycznie cykli (na poziomie istotności 0,05). W prognozach przyjęto założenie, że ekstrema wyznaczonych cykli o dość dużych amplitudach (istotnych) będą się powtarzać nadal, tak jak w XVIII–XX wieku. Do takiego założenia upoważnia synchroniczność cykli zmiennych klimatologicznych i aktywności Słońca.

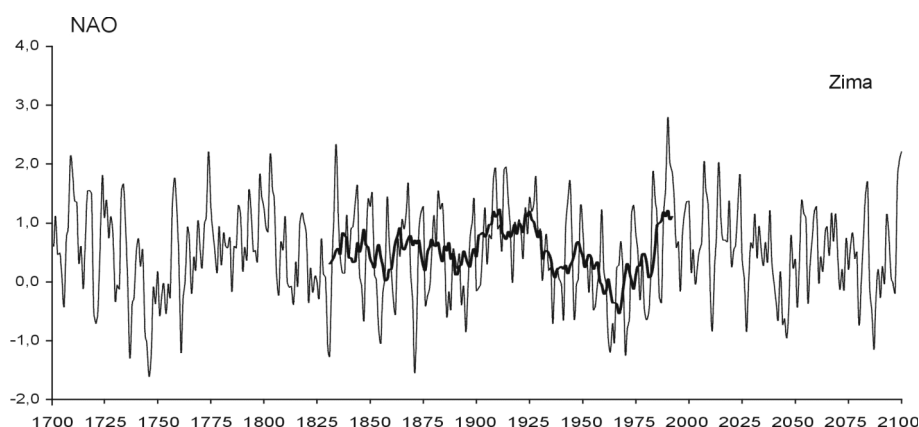
Najmroźniejsze zimy w Warszawie i Krakowie (średnie konsekwentne 11-letnie wartości temperatury około  $-4^{\circ}\text{C}$ ) wystąpią około roku 2050. Będą one nieco łagodniejsze niż na początku XIX wieku, ze względu na coraz większy udział czynników antropogenicznych.

Natomiast lata chłodniejsze (średnie konsekwentne 11-letnie około  $17,5\text{--}18,0^{\circ}\text{C}$ ) wystąpią wcześniej, w drugiej dekadzie XXI wieku.

Zimowe sumy opadów atmosferycznych w Warszawie i Krakowie będą w pierwszej połowie XXI wieku oscylować wokół średniej wiekowej. Letnie zaś sumy opadów w Warszawie będą zbliżone do sumy średniej, a w Krakowie – znacznie większe.

Prognozę Oscylacji Północnoatlantyckiej (NAO) w zimie w XXI wieku otrzymano na podstawie wyznaczonych okresów w latach 1826–1997: 2,4; 5,0; 5,8; 7,8; 8,3; 15,5; 21,5; 37,1; 71,5; 105,1 lat.

Z nakładania się tych cykli wynika, że podczas zim 2001–2100 można oczekiwać spadku wskaźnika NAO, tj. zmniejszenia cyrkulacji strefowej, a więc osłabienia ocieplającego oddziaływania Oceanu Atlantyckiego w zimie



Rys. 3. Zmiany wskaźnika Oscylacji Północnoatlantyckiej (NAO) podczas zim z prognozą po rok 2100

Fig. 3. Changes of the North Atlantic Oscillation index (NAO) during winters. Forecast until 2100

na klimat Polski. Prognozy wskaźnika NAO w XXI wieku już przekonują o zbliżającym się naturalnym ochłodzeniu klimatu Polski.

Istotnym elementem wyników badań jest logiczna zbieżność prognozowanych w XXI wieku tendencji spadkowej wskaźnika NAO, warunkującego łagodność czy też mroźność zim w Polsce, z prognozą samej temperatury powietrza (ochłodzenie w XXI wieku).

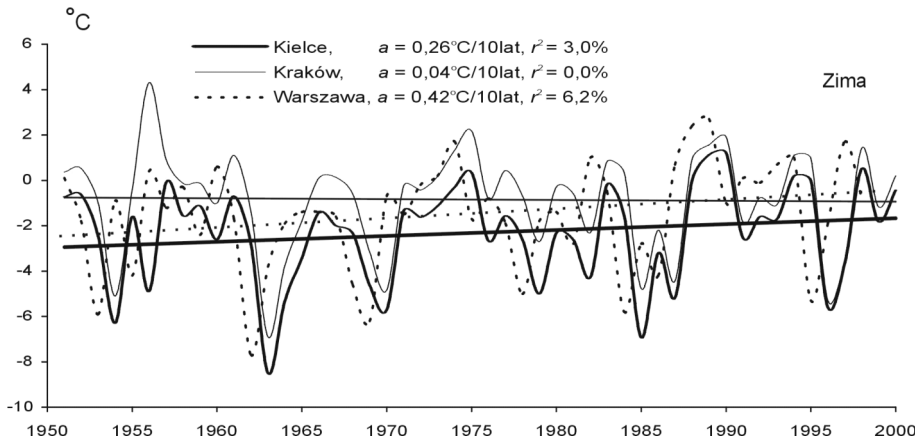
Tendencje temperatury powietrza w zimie w Polsce w latach 1951–2000 są na ogół rosnące (rys. 4): Kielce – o  $0,26^{\circ}\text{C}/10$  lat, Kraków – o  $0,04^{\circ}\text{C}/10$  lat (prawie zerowa), Warszawa – o  $0,42^{\circ}\text{C}/10$  lat. Współczynniki determinacji  $r^2$  są bardzo małe – wynoszą odpowiednio 3,0%, 0,0%, 6,2%.

O zasadniczym wpływie Oscylacji Północnoatlantyckiej (NAO) na temperaturę powietrza w zimie w Kielcach i Krakowie w latach 1951–2000 świadczą synchroniczne wahania standaryzowanych wartości  $(y - y_{\text{sr}}) \cdot s^{-1}$ , gdzie  $s$  – to odchylenie standardowe (rys. 5).

Średnie wartości temperatury powietrza i wskaźnika NAO są dodatnio skorelowane: Kielce –  $r = 0,62$ , Kraków –  $r = 0,55$ . Świadczą o tym również proste regresji temperatury powietrza w Kielcach i Krakowie względem wskaźnika NAO i ich równania  $T = a \text{ NAO} + b$  (rys. 6).

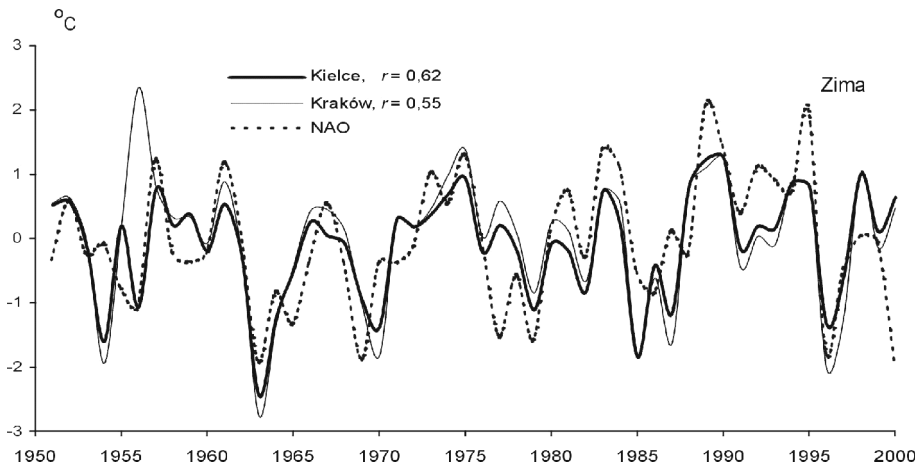
Na uwagę zasługują zbliżone widma temperatury powietrza w Kielcach i Krakowie oraz wskaźnika NAO w latach 1951–2000 – z dominującym 8-letnim okresem (rys. 7).

Okresowość temperatury powietrza w południowej Polsce (na przykładzie Kielc i Krakowa) w drugiej połowie XX wieku i jej uwarunkowania charakteryzują tabele 1 i 2.



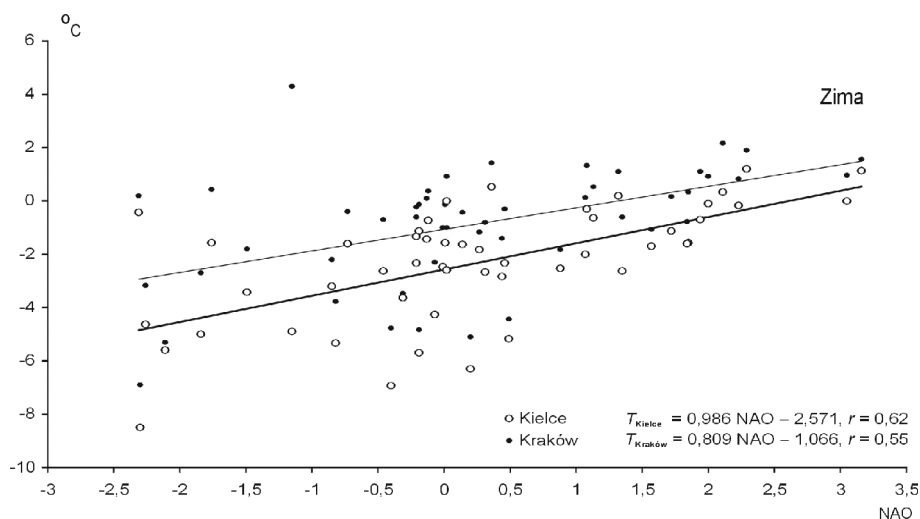
Rys. 4. Zmiany temperatury powietrza zimą w Kielcach, Warszawie i Krakowie w latach 1951–2000 ( $a$  – tendencja zmian,  $r^2$  – współczynnik determinacji)

Fig. 4. Changes of air temperature in Kielce and Warsaw and Cracow during winters in the years 1951–2000 ( $a$  – the tendency of secular,  $r^2$  – determination coefficient)



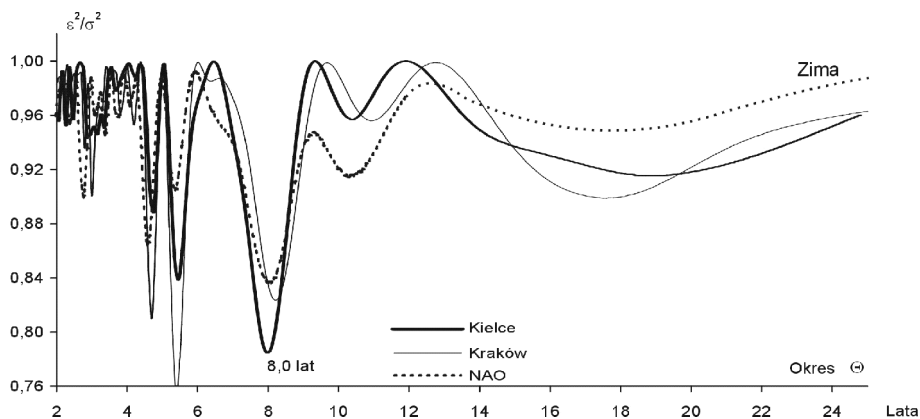
Rys. 5. Zmiany temperatury powietrza w Kielcach i Krakowie oraz wskaźnika NAO w zimie w latach 1951–2000 ( $r$  – współczynnik korelacji)

Fig. 5. Changes of air temperature in Kielce and Cracow, and NAO indicator, during winters in years 1951–2000 ( $r$  – correlation coefficient)



Rys. 6. Zależność temperatury powietrza podczas zim w Kielcach i Krakowie od wskaźnika NAO w latach 1951–2000 (proste regresji i ich równania)

Fig. 6. Dependence of air temperature in Kielce and Cracow upon the NAO indicator during winters in the years 1951–2000 (the simple regression equations)



Rys. 7. Widma temperatury powietrza w Kielcach i Krakowie oraz wskaźnika Oscylacji Północnoatlantyckiej (NAO) podczas zim w latach 1951–2000

Fig. 7. Spectra of air temperature in Kielce and Cracow, and the North Atlantic Oscillation index (NAO), during winters in the years 1951–2000

Tab. 1. Okresowe zmiany temperatury powietrza w Kielcach i Krakowie w latach 1951–2000 ( – okres,  $T$  – amplituda,  $R$  – współczynnik korelacji)Tab. 1. The periods of air temperature in Kielce and Cracow during winters in the years 1951–2000 ( – period,  $T$  – amplitude,  $R$  – correlation coefficient)

Kielce						Kraków					
Zima			Lato			Zima			Lato		
	$T$	$R$		$T$	$R$		$T$	$R$		$T$	$R$
3,1	2,08	0,29	<b>4,0</b>	<b>0,93</b>	0,36	3,0	2,08	0,32	<b>4,0</b>	<b>0,62</b>	0,29
4,8	1,34	0,27	5,9	0,75	0,32	<b>4,7</b>	<b>2,04</b>	0,44	5,9	0,56	0,28
<b>5,5</b>	<b>2,85</b>	0,39	7,9	0,44	0,16	5,4	2,68	0,49	<b>8,1</b>	<b>0,56</b>	<b>0,23</b>
<b>8,1</b>	<b>2,34</b>	0,28	<b>10,1</b>	<b>0,52</b>	0,23	<b>8,2</b>	<b>2,48</b>	0,42	<b>10,0</b>	<b>0,78</b>	<b>0,39</b>
<b>11,2</b>	<b>0,41</b>	0,14	14	0,71	0,25	<b>10,9</b>	<b>0,42</b>	0,21	14	0,62	0,28
18,8	2,94	0,34	21,3	0,64	0,27	17,6	2,32	0,32	25,5	0,24	0,23

Tab. 2. Okresowe zmiany Oscylacji Północnoatlantyckiej (NAO) i aktywności Słońca w latach 1951–2000 (  $T$  – amplituda,  $R$  – współczynnik korelacji)Tab. 2. The periods of the North Atlantic Oscillation index (NAO) and solar activity in the years 1951–2000 (  $T$  – amplitude,  $R$  – correlation coefficient)

North Atlantic Oscillation (NAO)						Aktywność Słońca					
Zima			Lato			Zima			Lato		
	$T$	$R$		$T$	$R$		$T$	$R$		$T$	$R$
2,7	1,13	0,32	2,9	0,69	0,29	3,3	11,4	0,07	3,9	14,0	0,11
<b>4,7</b>	1,16	<b>0,36</b>	5,9	0,82	0,36	5,3	26,8	0,18	5,3	17,2	0,14
6,8	1,08	0,25	<b>7,6</b>	0,65	<b>0,30</b>	<b>8,1</b>	38,6	<b>0,36</b>	<b>8,1</b>	41,0	<b>0,42</b>
<b>8,1</b>	1,38	<b>0,40</b>	<b>10,5</b>	0,67	<b>0,33</b>	<b>10,8</b>	141,0	<b>0,92</b>	<b>10,6</b>	121,8	<b>0,89</b>
<b>10,0</b>	1,13	<b>0,27</b>	15,3	0,57	0,30	15,8	5,8	0,25	15,3	14,2	0,30
15,0	0,96	0,20	22,3	0,17	0,12	25,5	27,2	0,26	25,6	29,6	0,27

Na uwagę zasługują zbliżone okresy: temperatury powietrza, Oscylacji Północnoatlantyckiej (NAO) i aktywności Słońca (liczb Wolfa) w latach 1951–2000. Wyróżnia się zimowy około 8-letni cykl temperatury powietrza w Kielcach ( lat i Krakowie ( = 8,2 lat) o największej amplitudzie

$T_{\max} - T_{\min} : 2,3^{\circ}\text{C}$  i  $2,5^{\circ}\text{C}$ . Jest to jednocześnie najsilniejszy cykl wskaźnika NAO ( = 8,1 lat) i aktywności Słońca ( = 8,1 lat) o współczynnikach korelacji  $R = 0,40$  i  $R = 0,36$ . Najsilniejszemu, około 11-letniemu cyklowi aktywności Słońca ( lat,  $R = 0,92$ ) – w latach 1951–2000, odpowiadają znacznie słabsze cykle: temperatury powietrza w Kielcach ( lat,  $T = 0,41^{\circ}\text{C}$ ) i Krakowie ( lat  $T$  C oraz wskaźnika NAO ( = 10,0 lat,  $R = 0,27$ ).

Okresy opadów atmosferycznych w Kielcach i Krakowie w latach 1951–2000 oraz amplitudy i współczynniki korelacji podano w tab. 3.

Tab. 3. Okresy opadów atmosferycznych w Kielcach i Krakowie w latach 1951–2000 (  $P$  – amplituda,  $R$  – współczynnik korelacji)

Tab. 3. The periods of precipitations in Kielce and Cracow in the years 1951–2000 (  $P$  – *amplituda*,  $R$  – *correlation coefficient*)

Kielce						Kraków					
Zima			Lato			Zima			Lato		
	$P$	$R$		$P$	$R$		$P$	$R$		$P$	$R$
2,2	19,1	0,32	2,5	35,0	0,28	2,2	12,9	0,34	2,8	23,8	0,21
2,5	17,9	0,28	3,3	24,1	0,28	2,5	7,6	0,27	3,2	10,2	0,22
<b>3,1</b>	<b>24,0</b>	<b>0,43</b>	3,6	19,4	0,21	3,0	19,9	0,38	3,9	25,6	0,28
4,0	11,1	0,22	4,0	24,3	0,25	5,1	16,4	0,37	5,2	18,6	0,24
<b>5,4</b>	<b>16,8</b>	<b>0,31</b>	6,4	25,7	0,24	5,9	3,6	0,21	<b>6,1</b>	<b>31,6</b>	<b>0,32</b>
6,6	14,2	0,26	7,6	21,7	0,24	6,8	6,0	0,28	8,2	18,9	0,21
8,2	7,4	0,15	<b>9,9</b>	<b>44,3</b>	<b>0,47</b>	8,3	9,9	0,31	<b>10,3</b>	<b>36,7</b>	<b>0,46</b>
12,2	12,4	0,26	13,3	14,9	0,26	11,9	10,6	0,25	<b>14,1</b>	<b>26,8</b>	<b>0,34</b>
<b>18,0</b>	<b>16,4</b>	<b>0,30</b>	18,9	15,9	0,24	17,9	9,7	0,21	19,8	9,1	0,18

Opady atmosferyczne w Kielcach i Krakowie cechują się również zbliżoną okresowością. Największe amplitudy mają cykle: Kielce – zima 18,0 lat (  $P = 16,4$  mm), lato 9,9 lat (  $P = 44$  mm), Kraków – zima 14,1 lat (  $P = 26,8$  mm).

O istnieniu realnych (deterministycznych) okresów temperatury powietrza i opadów atmosferycznych – o poprawności modeli statystycznych – świadczy sprawdzalność prognoz zmian klimatu Polski w XX wieku. Sprawdziły się prognozy tendencji temperatury powietrza w Warszawie na lata 1980–1996, na podstawie danych z lat 1779–1979, przedstawione w publikacji „Naturalne i antropogeniczne zmiany klimatu Ziemi w XVII–XXI wieku” (Boryczka 1993). Prognozowane na rok 1980 minimum wiekowe temperatury powietrza wystąpiło w roku 1980. Średnia roczna temperatura 6,6°C w roku 1980, wg pomiarów ze stacji Warszawa–Okęcie, jest najmniejszą wartością w 30-leciu 1966–1996. W roku 1991 wystąpiło drugorzędne prognozowane minimum temperatury, zgodnie z wynikami pomiarów w latach 1982–1992 (1987 – 9,2, 1990 – 9,4, 1991 – 8,0, 1992 – 8,8°C). Dobra jest też zgodność z wynikami pomiarów (na Okęciu) prognozowanych rocznych sum opadów atmosferycznych w Warszawie (1813–1980) przedstawionych w tej samej publikacji (Boryczka 1993). Wykresowi sum rocznych opadów o tendencji malejącej w latach 1981–1990 odpowiada spadek zmierzonych sum opadów: od 656 mm – w roku 1981 do 456 mm – w roku 1990, a następnie wzrost do 652 mm w 1993 r. Sprawdzanie prognoz temperatury powietrza czy też opadów at-



mosferycznych, na podstawie interferencji wykrytych okresów (istotnych statystycznie) – obliczonych wartości z funkcji aproksymujących  $y = f(t)$  ( $t$  – czas) powinno polegać na porównaniu tendencji zmian – dodatniej  $f' t > 0$  lub ujemnej  $f' t < 0$ . Nie można oczekiwać zgodności prognozowanych i zmierzonych wartości w poszczególnych latach (porównań w tabelach), ze względu na składnik losowy ( $y_i = f(t_i) + \epsilon_i$ ).

## Literatura

- Boryczka J., 1998: *Zmiany klimatu Ziemi*. Wyd. Akademickie „Dialog”, Warszawa.
- Boryczka J., Stopa-Boryczka M., Kicińska B., Żmudzka E., 1992: *Atlas współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce, Zmiany wiekowe klimatu Polski*. cz. VII, Warszawa.
- Boryczka J., Stopa-Boryczka M., Błażek E., Skrzypczuk J., 1999: *Atlas współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce, Cykliczne zmiany klimatu miast w Europie*. cz. XIII, Warszawa.
- Boryczka J., Stopa-Boryczka M., Błażek E., Skrzypczuk J., 2000: *Atlas współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce, Prognoza zmian klimatu Warszawy w XXI wieku*, cz. XIV, Wyd. UW, Warszawa.
- Jones P.D., Jonsson T., Wheeler D., 1997: *Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gíblartar and South-West Iceland*. „Int. J. Climatol.”, 17: 1433–1450.
- Marsz A.A., (red.), 1999: *Wpływ stanu termicznego powierzchni oceanu na modyfikacje cyrkulacji atmosferycznej w wymiarze klimatologicznym*. Materiały konferencji, Gdynia 6.V.1999.
- Michalska A., 1998: *Długookresowe zmiany opadów atmosferycznych w Polsce w latach 1881–1990* (Zakład Klimatologii Uniwersytetu Warszawskiego, maszynopis pracy doktorskiej).
- Trepińska J., 1988: *Wieloletni przebieg ciśnienia i temperatury powietrza w Krakowie na tle ich zmienności w Europie*. Rozprawy habilitacyjne, UJ, 140.
- Żmudzka E., 1998: *Cykliczne zmiany temperatury powietrza w Polsce*. (Zakład Klimatologii Uniwersytetu Warszawskiego, maszynopis pracy doktorskiej).

