

OCHŁODZENIA I OCIEPLENIA KLIMATU EUROPY W XVIII-XXI WIEKU I ICH PRZYCZYNY

Jerzy Boryczka, Maria Stopa-Boryczka

Zakład Klimatologii, Uniwersytet Warszawski
ul. Krakowskie Przedmieście 30, 00-927 Warszawa
e-mail: jkborycz@uw.edu.pl

Streszczenie. Celem pracy jest określenie zakresu zmian temperatury powietrza w Europie w XVIII-XX wieku i ich przyczyn. Wykazano wpływ aktywności Słońca na klimat Europy przy dominującym udziale dwóch centrów pola ciśnienia – Niżu Islandzkiego i Wyżu Azorskiego. O dużej zależności pola temperatury powietrza w Europie od Oscylacji Północnoatlantyckiej w miesiącach zimowych świadczą zarówno duże wartości współczynnika korelacji jak i zbliżone okresy. Wyróżnia się zimowy około 8-letni najsilniejszy cykl wskaźnika North Atlantic Oscillation ($\Theta = 8,1$ lat), aktywności Słońca ($\Theta = 8,1$ lat) i temperatury powietrza. Większą rolę odgrywają długie cykle: 102-letni i 187-letni aktywności Słońca. Analogiczne okresy są obecne w seriach pomiarowych temperatury powietrza. W Europie (i Polsce) zimy są na ogół coraz cieplejsze: w Warszawie w latach 1779-1998 – o $1,1^{\circ}\text{C}/100$ lat, w Krakowie – o $1,5^{\circ}\text{C}/100$ lat i Moskwie – $1,6^{\circ}\text{C}/100$ lat. Interesujące są zmiany temperatury powietrza w zimie i w lecie w: Paryżu, Berlinie, Warszawie i Moskwie w XVIII-XXI wieku (z prognozą do roku 2100). Są to wypadkowe z nakładania się (interferencji) cykli temperatury powietrza, obecnych w ciągach chronologicznych wyników pomiarów. Najmroźniejsze zimy w Warszawie, o średniej temperaturze od -4 do -7°C wystąpią prawdopodobnie w połowie tego stulecia – około roku 2050.

Słowa kluczowe: temperatura, Europa, aktywność Słońca, NAO, okres, prognoza

WSTĘP

Rekonstrukcje temperatury powietrza w warstwie przyziemnej w różnych miejscach Ziemi wskazują zasadnicze przedziały czasu ocieplenia i ochłodzenia klimatu: 500 p.n.e.-500 n.e. – epoka ciepła (optimum czasów rzymskich), 500-800 n.e. – epoka chłodna, 800-1200 – epoka ciepła (optimum średniowieczne), 1400-1900 (mała epoka lodowa) i od 1900 roku – współczesne ocieplenie.

W ostatnich 400 latach wystąpiły trzy główne ochłodzenia klimatu Ziemi, o najmniejszej średniej globalnej temperaturze powietrza na półkuli północnej w pobliżu dat: 1600, 1700, 1830. Najbardziej poznane (na podstawie danych instrumentalnych) jest to ostatnie, największe ochłodzenie w Europie i Polsce. Trzeba zauważyć, że wystąpiło ono podczas trzech najsłabszych, wydłużonych (12-13-letnich) cykli aktywności Słońca (1798-1833). Ochłodzenie to pojawiło się po najsłabszym 13-letnim cyklu plam słonecznych (1811-1823), po absolutnym minimum wiekowym (od 1700 r.). To ostatnie ochłodzenie klimatu Europy wystąpiło przy wzmożonej aktywności wulkanicznej, po największych wybuchach wulkanów: 1803 – Cotopaxi, 1815 – Tambora, 1835 – Cosiguina. Rok 1811 był szczególny pod względem stanu Układu Słonecznego, kiedy to odległość Słońca od środka masy Układu była najmniejsza (0,14 część promienia Słońca), a przyspieszenie Słońca – największe (Boryczka, 1998).

Ochłodzenia i ocieplenia klimatu są kształtowane wahaniem dopływu energii słonecznej do powierzchni Ziemi, zależnej od stałej słonecznej i zawartości pyłów wulkanicznych w atmosferze – pochłaniających i rozpraszających promieniowanie słoneczne.

Na Słońcu obserwuje się wiele zjawisk o natężeniu okresowym m.in. plamy słoneczne od których zależy dopływ energii słonecznej do Ziemi.

Ciągi chronologiczne liczb Wolfa (liczb plam słonecznych) i temperatury powietrza wskazują, że podczas maksimum aktywności Słońca w cyklu 11-letnim jest cieplej niż w czasie minimum. Jest to wynikiem zależności dystrybucji ciepła na powierzchni Ziemi od aktywności Słońca.

Cyrkulacja atmosferyczna i prądy morskie warunkują transport magazynowanej głównie w strefie międzyzwrotnikowej, energii słonecznej w stronę biegunów.

Celem pracy jest określenie zakresu zmian temperatury powietrza w Europie w XVIII-XX wieku. Jest nim też wykazanie wpływu Oscylacji Północnoatlantycznej na klimat Europy oraz prognoza zmian klimatu w XXI wieku.

Wpływ Oscylacji Północnoatlantycznej na klimat Europy w latach 1825-2000

Na klimat Europy (i Polski) dominujący wpływ mają dwa główne centra pola ciśnienia atmosferycznego: Niż Islandzki i Wyż Azorski. W zimie decydujący wpływ na kształtowanie pogody w Polsce ma Niż Islandzki, który cechuje się najniższym ciśnieniem. Wtedy w centrum Wyżu Azorskiego ciśnienie jest bardzo duże. W lecie Niż Islandzki słabnie, a uaktywnia się Wyż Azorski. Wyż ten często wnika w głąb Europy, wzmagając napływ powietrza wilgotnego z Atlantyku (tzw. monsun europejski).

Te dwa centra ciśnienia związane z różnicą temperatury między wodą Atlantyku Północnego i lądem są w ciągu roku ze sobą ujemnie skorelowane. Jeżeli ciśnienie w Wyżu Azorskim maleje, to ciśnienie w Niżu Islandzkim – rośnie i przeciwnie (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 Europy i 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.

Kierunek i prędkość wiatru są deformowane przez pole temperatury powietrza – o poziomym gradiencie skierowanym ku biegunowi północnemu – przez wiatr tzw. termiczny (więcej wzdłuż izoterm, a więc też wzdłuż równoleżników z zachodu na wschód).

Tabela 1. Współczynniki korelacji (*r*) temperatury powietrza i wskaźnika NAO

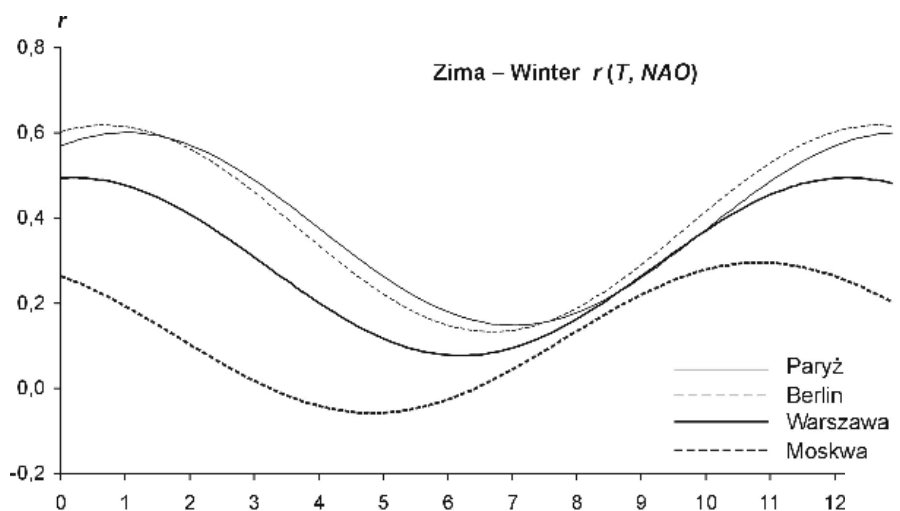
Table 1. Coefficients of correlation (*r*) of air temperature in Europe and NAO index

Stacje Stations	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Paryż	0,60	0,63	0,60	0,35	0,28	0,12	0,19	0,22	0,21	0,30	0,53	0,48
Berlin	0,65	0,66	0,60	0,25	0,27	0,12	0,15	0,20	0,33	0,25	0,50	0,54
Warszawa	0,57	0,55	0,49	0,12	0,13	0,13	0,13	0,08	0,27	0,25	0,30	0,41
Moskwa	0,36	0,45	0,40	-0,02	-0,04	-0,02	0,12	-0,04	0,11	0,20	-0,03	-0,07
Kraków	0,52	0,38	0,44	0,11	0,16	0,12	0,12	0,10	0,30	0,19	0,31	0,38
Wrocław	0,61	0,59	0,48	0,17	0,21	0,09	0,11	0,20	0,34	0,20	0,41	0,50
Lwów	0,49	0,44	0,40	0,12	-0,02	0,05	0,15	0,16	0,22	0,05	0,20	0,33
Wilno	0,53	0,55	0,48	0,08	0,07	0,03	0,02	0,05	0,29	0,24	0,34	0,40

Klimat Zachodniej i Środkowej Europy (także Polski) jest kształtowany przez cyrkulację strefową, uwarunkowaną południkowym gradientem ciśnienia atmosferycznego. Szczególnie w zimie cyrkulacja strefowa zależy od temperatury wody Północnego Atlantyku. Jako miarę południkowego gradientu ciśnienia przyjęto wskaźnik NAO, zdefiniowany przez Jonesa i in. (1997). Jest to standaryzowana różnica ciśnienia atmosferycznego na poziomie morza między Gibraltarem i Południowo-Zachodnią Islandią. Wartości wskaźnika NAO określają równoleżnikowy transport mas powietrza: w kierunku wschodnim – NAO > 0 i południkowym – NAO < 0.

O dużej zależności pola temperatury powietrza w Europie od Oscylacji Północnoatlantyckiej w miesiącach zimowych świadczą duże wartości współczynnika korelacji między temperaturą powietrza a wskaźnikiem NAO. Temperatura powietrza w Europie w latach 1825-2000 jest na ogół skorelowana dodatnio ($r > 0$) ze zmianami Oscylacji Północnoatlantyckiej (NAO) (tab. 1).

Przebiegi roczne współczynników korelacji r między temperaturą powietrza (T) i wskaźnikiem NAO w: Paryżu (1825-1995), Berlinie (1825-1990), Warszawie (1825-2000) i Moskwie (1825-2000) przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Przebieg roczny współczynnika korelacji temperatury powietrza w Paryżu, Berlinie, Warszawie i Moskwie od wskaźnika NAO

Fig. 1. Annual course of coefficient of correlation of air temperature in Paris, Berlin, Warsaw, Moscow and NAO index

Są to wykresy sinusoid regresji o równaniach ($t = 1$ rok):

$$\begin{array}{ll}
 \text{Paryż} & r = 0,374 + 0,226 \sin(2\pi t + 1,0378), \quad R = 0,953 \\
 \text{Berlin} & r = 0,375 + 0,243 \sin(2\pi t + 1,2120), \quad R = 0,941 \\
 \text{Warszawa} & r = 0,286 + 0,208 \sin(2\pi t + 1,4636), \quad R = 0,928 \\
 \text{Moskwa} & r = 0,119 + 0,177 \sin(2\pi t + 2,1810), \quad R = 0,837
 \end{array} \quad (1)$$

Dodatnie wartości współczynnika korelacji ($r > 0$) świadczą, że zimy są cieplejsze przy większych gradientach południkowych ciśnienia, a chłodniejsze – przy mniejszych. Podczas intensywniejszej cyrkulacji strefowej (zachodniej) więcej ciepła zakumulowanego w wodach Północnego Atlantyku jest przekazywana atmosferze.

Pionowy strumień ciepła z oceanu do atmosfery deformuje globalną cyrkulację atmosferyczną. Zimowe wychłodzenie wód Północnego Atlantyku przy dużych południkowych gradientach ciśnienia (wskaźnika *NAO*) utrzymuje się nawet podczas całego lata.

Okresowe zmiany Oscylacji Północnoatlantyckiej w latach 1825–2000

Okresowość Oscylacji Północnoatlantyckiej określono na podstawie średnich miesięcznych i rocznych wartości wskaźnika *NAO* w latach 1825–2000.

Parametry cykli: okresy Θ , amplitudy b , fazy c , wyznaczono metodą „sinusoid regresji” Boryczki (1998), zmieniając okres z odstępem $\Delta\Theta = 0,1$ roku w przedziale 2,0–200 lat:

$$y = a + b \sin(2\pi t/\Theta + c) \tag{2}$$

Okresy (Θ) – to minima lokalne ciągu wariancji resztkowej ϵ^2 (maksima lokalne współczynnika korelacji R).

Wskaźnik *NAO* w latach 1825–2000 cechuje się okresowością kilku, kilkunastoletnią i około100–letnią. Okresy (Θ) wskaźnika *NAO* w poszczególnych porach roku charakteryzuje tabela 2.

Tabela 2. Okresy Oscylacji Północnoatlantyckiej (*NAO*) w latach 1825–2000

Table 2. Periods of North Atlantic Oscillation index (*NAO*) in the years 1825–2000

Wiosna Spring		Lato Summer		Jesień Autumn		Zima Winter		Rok Year	
Θ	R	Θ	R	Θ	R	Θ	R	Θ	R
6,5	0,22	7,8	0,17	7,3	0,22	7,8	0,27	5,0	0,22
11,1	0,13	10,3	0,20	8,8	0,17	8,3	0,24	7,8	0,29
13,4	0,21	11,1	0,09	16,6	0,24	11,3	0,13	11,2	0,18
23,9	0,19	13,8	0,14	24,2	0,20	15,5	0,17	13,1	0,20
45,5	0,16	39,5	0,14	29,9	0,20	37,1	0,16	29,3	0,14
106,3	0,09	83,2	0,17	75,3	0,16	105,1	0,17	119,9	0,12

Interesujące jest porównanie dat maksimów zimowych cykli około 8–letnich *NAO* z zimowymi cyklami aktywności Słońca (liczb Wolfa W) w latach 1825–1998:

$$\begin{aligned} \text{NAO} &= 0,131 + 0,478 \sin(2\pi t/7,8 - 0,127), \quad R = 0,27 \\ W &= 51,93 + 10,40 \sin(2\pi t/8,1 + 2,866), \quad R = 0,17 \end{aligned} \tag{3}$$

Trzeba podkreślić, że w widmie przyspieszenia Słońca (\dot{s} w jego ruchu dookoła środka masy Układu Słonecznego w latach 1749–1980 dominuje cykl 7,8–letni:

$$\dot{s} = 0,667 + 1,13 \sin(2\pi t/7,75 + 1,21), \quad R = 0,245 \tag{4}$$

Mało prawdopodobne jest, by ta zbieżność okresów i synchroniczność ekstremów w tych około 8-letnich cyklach: wskaźnika *NAO*, aktywności Słońca i przyspieszenia Słońca była przypadkowa. W ciągach czasowych: wskaźnika *NAO* (zima – 11,3 lat, $R = 0,14$, lato – 10,3 lat, $R = 0,20$) występuje również cykliczność około 11-letnia synchroniczna z cyklem 11-letnim plam słonecznych:

$$\begin{aligned} \text{NAO} &= 0,135 + 0,238 \sin(2\pi t/11,3 + 2,2315), & R &= 0,135 \\ \text{W} &= 51,68 + 29,89 \sin(2\pi t/11,0 + 0,9238), & R &= 0,488 \end{aligned} \quad (5)$$

Maksima *NAO* i liczb Wolfa (*W*) występują prawie w tych samych latach: *NAO* – 1926, 1937, 1948, 1959, 1971, 1982, 1993, 2005; liczby Wolfa – 1926, 1937, 1948, 1959, 1970, 1981, 1992, 2003.

Na uwagę zasługują zbliżone okresy Oscylacji Północnoatlantyckiej (*NAO*) i aktywności Słońca (liczb Wolfa) w latach 1951–2000. Wyróżnia się zimowy około 8-letni najsilniejszy cykl wskaźnika *NAO* ($\Theta = 8,1$ lat) i aktywności Słońca ($\Theta = 8,1$ lat) o współczynnikach korelacji $R = 0,40$ i $R = 0,36$ (tab. 3). Podkreślono okresy Θ i współczynniki korelacji R cykli istotnych statystycznie na poziomie 0,05.

Tabela 3. Okresy zmian Oscylacji Północnoatlantyckiej (*NAO*) i aktywności Słońca w latach 1951–2000
Table 3. Periods of North Atlantic Oscillation index (*NAO*) and solar activity in the years 1951–2000

Oscylacja Północnoatlantycka (<i>NAO</i>) North Atlantic Oscillation (<i>NAO</i>)						Aktywność Słońca Solar activity					
Zima – Winter			Lato – Summer			Zima – Winter			Lato – Summer		
Θ	$2b$	R	Θ	$2b$	R	Θ	$2b$	R	Θ	$2b$	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
<u>4,7</u>	1,6	<u>0,36</u>	5,9	0,82	0,36	5,3	26,8	0,18	5,3	17,2	0,14
<u>6,8</u>	1,08	<u>0,25</u>	<u>7,6</u>	0,65	<u>0,30</u>	<u>8,1</u>	38,6	<u>0,36</u>	<u>8,1</u>	41,0	<u>0,42</u>
<u>8,1</u>	1,38	<u>0,40</u>	<u>10,5</u>	0,67	<u>0,33</u>	<u>10,8</u>	141,0	<u>0,92</u>	<u>10,6</u>	121,8	<u>0,89</u>
<u>10,0</u>	1,13	<u>0,27</u>	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

Okresowe zmiany temperatury powietrza w Europie w XVIII–XX wieku

Temperatura powietrza w Europie (i Polsce) cechuje się cyklicznością około 8-, 11-, 100- i 180-letnią (Boryczka., Stopa-Boryczka i in., 2005). Temperatura powietrza podczas zim w Warszawie i wskaźnik *NAO* cechuje analogiczna cykliczność z dominującym okresem 7, 8-letnim. Podobieństwo tych cykli świadczy, iż zimy w Warszawie są kształtowane przez okresowe wahania Oscylacji Północnoatlantyckiej *NAO* (cyrkulacji strefowej).

W Europie (i w Polsce) dominują około 8-letnie okresy temperatury powietrza o dużych amplitudach $\Delta T = 2b = T_{\max} - T_{\min}$ (tab. 4).

Oto zimowe okresy około 8-letnie temperatury powietrza na innych stacjach w Europie i ich amplitudy: Kraków – 8,3 (1,87°C), Wrocław – 8,3 (1,53°C), Lwów – 8,3 (1,30°C), Praga – 8,3 (1,06°C), Berlin – 7,7 (1,54°C), Genewa – 7,7 (0,62°C), Wiedeń – 8,3 (0,87°C), Rzym – 7,9 (0,30°C), Sztokholm – 7,8 (1,33°C), Kopenhaga – 7,8 (1,24°C), Moskwa – 7,9 (0,76°C). W lecie okresowość jest zbliżona, amplitudy są prawie o połowę mniejsze.

Tabela 4. Okresy około 8-letnie temperatury powietrza w Europie
Table 4. The close-to-8-year long periods of air temperature in Europe

Stacje Stations	Zima Winter		Lato Summer		Stacje Stations	Zima Winter		Lato Summer	
	Θ	ΔT	Θ	ΔT		Θ	ΔT	Θ	ΔT
Warszawa	8,3	1,59	7,1	0,66	Genewa	7,7	0,62	7,8	0,40
Kraków	8,3	1,87	7,8	0,33	Wiedeń	8,3	0,87	8,4	0,38
Wrocław	8,3	1,53	7,8	0,27	Rzym	7,9	0,30	8,4	0,32
Lwów	8,3	1,30	7,9	0,56	Sztokholm	7,8	1,33	7,8	0,40
Praga	8,3	1,06	7,8	0,44	Kopenhaga	7,8	1,24	8,3	0,51
Berlin	7,7	1,54	7,8	0,55	Moskwa	7,9	0,76	8,3	0,60

Zakres wahań temperatury powietrza np. w Warszawie w zimie w cyklu 8,3-letnim wynosi $\Delta T = 1,5^\circ\text{C}$, a średniej rocznej (okres 7,7 lat) – $0,6^\circ\text{C}$. Od dawna znana jest cykliczność około 11-letnia temperatury powietrza, związana z cyklem 11-letnim plam słonecznych. Okresy około 11-letnie temperatury powietrza i amplitudy ΔT ($^\circ\text{C}$) w wybranych miejscowościach w zimie, lecie i roku zestawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Okresy około 11-letnie temperatury powietrza w Europie
Table 5. The close-to-11-year long periods of air temperature in Europe

Stacje Stations	Zima Winter		Lato Summer		Stacje Stations	Zima Winter		Lato Summer	
	Θ	ΔT	Θ	ΔT		Θ	ΔT	Θ	ΔT
Warszawa	11,6	0,53	11,3	0,22	Genewa	11,0	0,40	11,3	0,28
Kraków	11,3	0,84	11,4	0,26	Wiedeń	11,0	0,44	11,0	0,12
Wrocław	11,4	0,74	11,5	0,42	Rzym	11,8	0,44	10,7	0,39
Lwów	11,2	1,11	10,7	0,06	Sztokholm	11,3	0,29	11,6	0,38
Praga	11,0	0,42	11,1	0,19	Kopenhaga	11,1	0,26	11,5	0,48
Berlin	11,0	0,42	11,6	0,18	Moskwa	11,4	1,62	11,3	0,30

Zakres wahań temperatury powietrza w tym około 11-letnim cyklu jest na ogół ponad dwukrotnie większy w zimie niż w lecie.

Krótkookresowe zmiany aktywności Słońca (stałej słonecznej, Kondratiev i Nikolski., 1970) nie odgrywają istotnej roli w kształtowaniu klimatu Ziemi, ze względu na bardzo powolne przenikanie ciepła do głębszych warstw Ziemi. Większą rolę odgrywają długie cykle: 102 i 187 lat aktywności Słońca (tab. 6).

Tabela 6. Okresy około 100- i 180-letnie aktywności Słońca i stałej słonecznej

Table 6. 100 and 180-year periods of solar activity

Okres-Period)		
Aktywność Słońca (1700–2000 Solar activity	102,0	187,3
Stała słoneczna Solar constant	102,0	187,0

W otoczeniu maksimum plam słonecznych w tych cyklach kumulowane są duże ilości energii w głębszych warstwach lądów i oceanów. Energia magazynowana w oceanach wywiera wpływ na cyrkulację atmosferyczną. Analo-

giczne okresy są obecne w seriach pomiarowych temperatury powietrza w Europie (tab. 7 i 8, $\Delta T=2b$, b – amplituda cyklu)

Tabela 7. Okresy około 100-letnie temperatury powietrza w Europie

Table 7. The close-to-100-year long periods of air temperature in Europe

Stacje Stations	Zima Winter		Lato Summer		Stacje Stations	Zima Winter		Lato Summer	
	Θ	ΔT	Θ	ΔT		Θ	ΔT	Θ	ΔT
Warszawa	113,4	1,22	75,0	0,88	Bazylea	85,5	0,14	87,6	0,64
Kraków	90,0	0,48	88,0	0,67	Kopenhaga	80,5	0,22	89,6	0,27
Wrocław	123,3	1,66	75,0	0,50	Anglia Śr.	99,3	0,44	102,5	0,20
Lwów	108,8	1,30	74,1	1,33	Sztokholm	86,3	0,55	89,4	0,51
Praga	116,3	1,44	118,3	0,68	Uppsala	102,7	1,48	94,0	0,79
Wiedeń	89,8	0,79	96,1	0,58	Insbruck	69,9	0,80	84,6	0,50

Tabela 8. Okresy około 180-letnie temperatury powietrza w Europie

Table 8. The close-to-180-year long periods of air temperature in Europe

Stacje Stations	Zima Winter		Lato Summer		Stacje Stations	Zima Winter		Lato Summer	
	Θ	ΔT	Θ	ΔT		Θ	ΔT	Θ	ΔT
Warszawa	218,3	0,44	208,2	0,66	Bazylea	–	–	227,4	0,26
Kraków	168,3	0,43	–	–	Kopenhaga	–	–	211,6	1,19
Lwów	–	–	195,3	1,00	Anglia	166,9	0,48	204,6	0,34
Genewa	144,1	–	248,3	1,09	Sztokholm	184,6	0,49	–	–
Berlin	212,8	1,18	–	–	Uppsala	182,3	2,50	192,8	0,39
Rzym	–	–	224,9	1,40	Insbruck	169,8	1,45	–	–

**Tendencje zmian temperatury powietrza w Europie w XVIII–XX wieku.
Prognozy w XXI wieku**

To ostatnie globalne ochłodzenie klimatu na początku XIX wieku cechuje się dużym zimowym spadkiem temperatury powietrza w Europie. Średnia temperatura w zimie w 1830 roku wynosiła: 10,4 Lwów, –10,3 Kraków, –10,3 Wrocław, –10,1 Kijów, –9,7 Warszawa, –9,7 Wilno, –6,7 Wiedeń, –6,6 Berlin, –6,1 Praga, –5,4 Bazylea, –5,0 Budapeszt, –4,5 Kopenhaga, –3,5 Genewa.

Do mroźnych okresów w drugiej połowie XX wieku można zaliczyć także zimę z 1963 r. – –9,7 Mińsk, –9,5 Warszawa, –8,4 Wrocław, –8,4 Lwów, –7,8 Oslo, –6,9 Praga, –6,9 Kraków, –5,7 Poczdam, –5,7 Innsbruck, –3,6 Zagrzeb (tab. 4).

Najłagodniejsze zimy wystąpiły w ostatniej dekadzie XX wieku: 1990 Berlin (4,3), 1990 Kijów (0,9), 1990 Lwów (1,0), 1990 Marsylia (9,7), 1990 Mińsk (0,0), 1990 Odessa (2,9), 1990 Poczdam (4,0), 1990 Warszawa (2,3), 1990 Wrocław (3,2), 1998 Innsbruck (2,5), 1998 Wiedeń (3,6), 2001 Zagrzeb (5,2).

Najcieplejsze pory letnie wystąpiły: w 1811 Budapeszt (24,1), Monachium (18,9), Warszawa (21,4), Wiedeń (22,4), Wilno (20,6), w 1992 – Wrocław (20,3), Wiedeń (21,7), Poczdam (20,1), Mińsk (19,2), Kraków(20,1), Kijów (21,4), w 1999 Ateny (28,9), Kijów (21,5), Mińsk (20,0), Odessa (23,5).

Tabela 9. Mroźne zimy i gorące lata w Warszawie w latach 1779–1998

Table 9. Frosty winters and hot summers in Warsaw (1779–1998)

Zima – Winter				Lato – Summer			
Mroźna – Frostiest	Ciepła – Mildest			Ciepłe – Warmest		Chłodne – Coldest	
1830	–9,7	1990	2,3	1811	21,4	1821	14,6
1799	–9,5	1989	1,9	1834	20,6	1844	15,5
1963	–9,5	1843	1,2	1781	20,5	1810	15,6
1838	–8,8	1975	1,1	1992	20,0	1923	15,6
1789	–8,5	1991	1,1	1826	20,0	1978	15,9
1823	–8,4	1998	1,1	1783	19,8	1785	16,0
1871	–8,3	1925	0,8	2002	19,8	1818	16,0
1820	–8,3	1910	0,8	1807	19,7	1902	16,0
1970	–8,1	1994	0,7	1859	19,5	1832	16,0
1929	–7,9	1899	0,7	1868	19,5	1980	16,1

Tendencje temperatury powietrza w Europie tj. współczynniki regresji A w °C/100 lat, określone według równań prostych regresji temperatury powietrza

T względem czasu t : $T = A_0 + At$ (A_0 – wyraz wolny) podano w tabeli 10. Charakteryzują one średnie przyrosty temperatury powietrza na 100 lat w odpowiednich przedziałach czasowych. Na ogół tendencje temperatury powietrza w miastach europejskich w zimie są rosnące ($A > 0$), a w lecie malejące ($A < 0$).

Tabela 10. Tendencje zmian temperatury powietrza w Europie ($^{\circ}\text{C}/100$ lat)

Table 10. Secular tendencies of air temperature in Europe ($^{\circ}\text{C}/100$ years)

Stacje Stations	Okres Period	Styczeń January	Zima Winter	Lipiec July	Lato Summer	Rok Year
Warszawa	1779–1998	1,36	1,12	0,15	–0,06	0,58
Kraków	1827–1997	1,71	1,48	0,33	0,31	0,82
Wrocław	1792–2002	1,10	0,69	0,34	0,25	0,52
Lwów	1824–2002	0,53	0,53	0,20	–0,22	0,20
Praga	1771–1990	0,04	0,25	–1,13	–0,25	–0,025
Berlin	1769–1990	1,12	0,32	0,33	–0,39	0,13
Genewa	1769–1980	1,23	0,51	0,08	–0,40	0,51
Wiedeń	1775–2002	0,84	0,69	0,02	–0,08	0,27
Rzym	1811–1989	0,36	0,04	0,08	–0,10	0,09
Sztokholm	1756–1994	1,12	0,86	0,11	–0,08	0,46
Kopenhaga	1768–1991	1,13	0,94	0,01	0,05	0,55
Moskwa	1881–2002	3,54	1,65	0,92	–0,15	0,68

W Europie (i Polsce) przede wszystkim zimy są coraz cieplejsze. Na przykład w Warszawie w latach 1779–1998 zimy są coraz cieplejsze – o $1,1^{\circ}\text{C}$ na 100 lat, a lata chłodniejsze prawie o $0,1^{\circ}\text{C}$. Jeszcze większy wzrost temperatury powietrza podczas zimy występuje w Krakowie – $1,5^{\circ}\text{C}/100$ lat i Moskwie – $1,6^{\circ}\text{C}/100$ lat. Średnia roczna temperatura powietrza wzrasta w: Warszawie – o $0,6$, Krakowie – o $0,8$, Moskwie – o $0,7^{\circ}\text{C}$ na 100 lat. Nie wiadomo, jaka część postępującego ocieplenia klimatu jest efektem oddziaływania czynników naturalnych, a jaka – czynników antropogenicznych.

Ocieplenie klimatu w XIX–XX wieku jest wywołane wzrostem aktywności Słońca, spadkiem aktywności wulkanicznej na Ziemi oraz wzrostem efektu cieplarnianego atmosfery.

W prognozach zmian klimatu przyjęto założenie, że ekstrema wykrytych cykli temperatury powietrza będą się powtarzać nadal, tak jak w XVIII–XX wieku. Do przyjęcia takiego założenia upoważnia obecność analogicznych cykli w ciągach czasowych: aktywności Słońca (stałej słonecznej) i parametrów Układu Słonecznego.

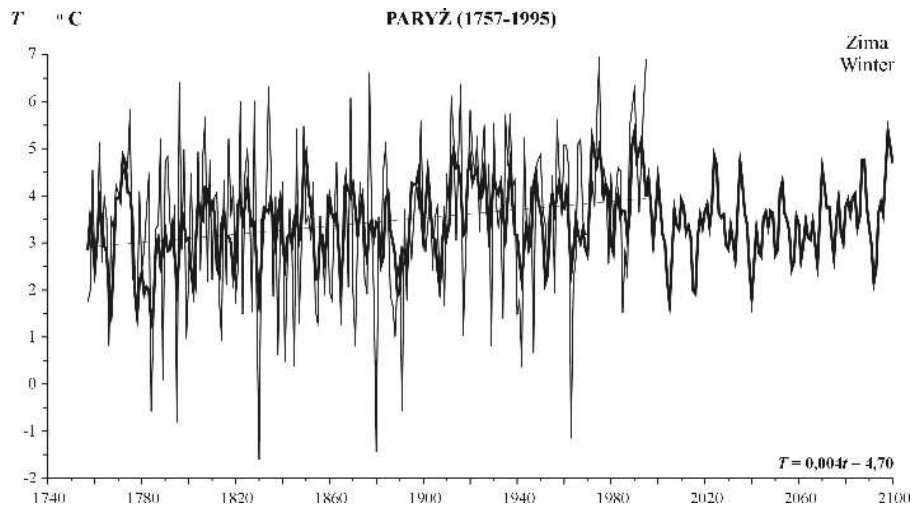
Zmiany temperatury powietrza w zimie i w lecie w: Paryżu, Berlinie, Warszawie i Moskwie w XVIII–XX wieku, z prognozą w XXI wieku przedstawiają zamieszczone niżej wykresy (rys. 2–9). Są to wypadkowe z nakładania się (interferencji) cykli temperatury powietrza, wykrytych w ciągach chronologicznych wyników pomiarów.

Najmroźniejsze zimy w Warszawie, o średniej temperaturze -4 – -7°C wystąpią prawdopodobnie w połowie tego stulecia – około roku 2050. Według wypadkowej letnich cykli temperatury powietrza chłodne lata wystąpią w pierwszych dwóch dekadach XXI wieku.

W przedziale obserwacji są to wartości obliczone na podstawie superpozycji cykli tj. funkcji (6)

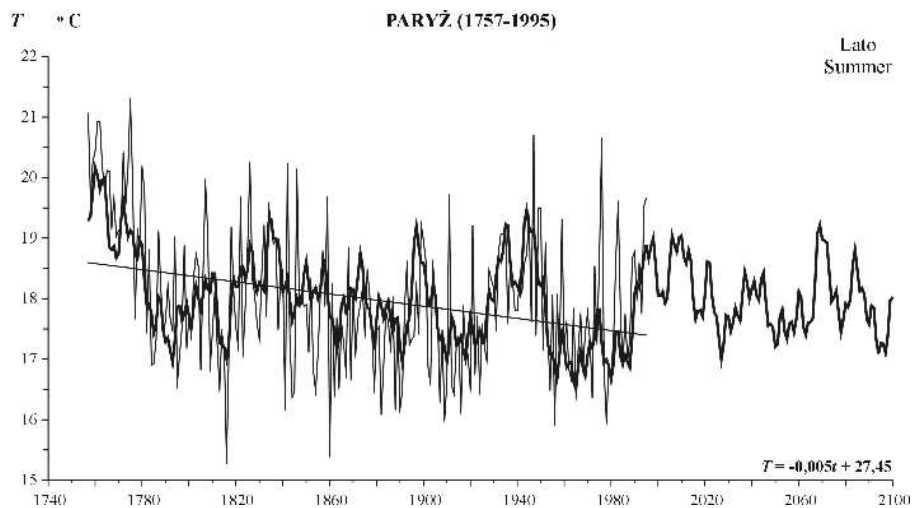
$$T = f(t) = a_0 + \sum b_j \sin(2\pi t + c_j) \quad (6)$$

a poza przedziałem pomiarów – wartości prognozowane $T = f(t)$ oraz z uwzględnieniem składnika liniowego at . Na wykresach tych przedstawiono również zmierzane wartości temperatury powietrza T_i .



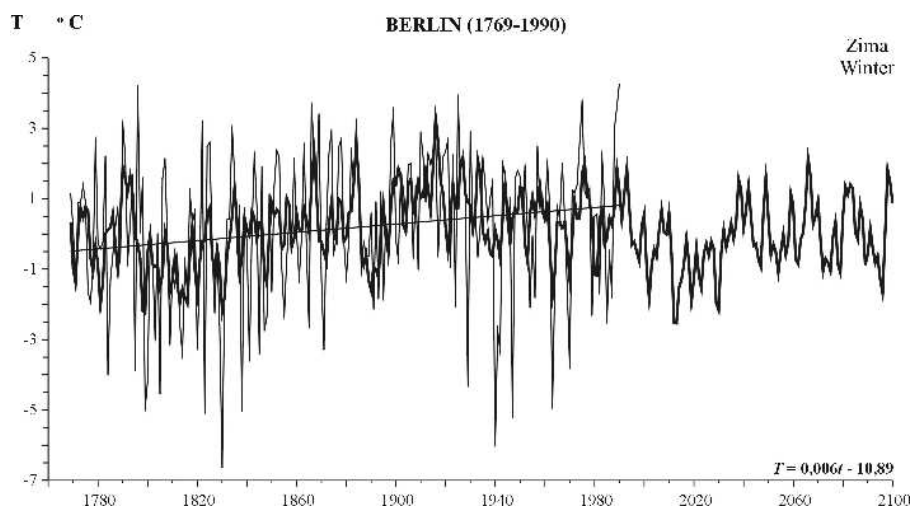
Rys. 2. Zmiany temperatury powietrza w Paryżu w latach 1757–1995 – prognoza w latach 1996–2100 – zima

Fig. 2. Changes of air temperature in Paris in 1757–1995 – forecast in the years 1996–2100 – winter



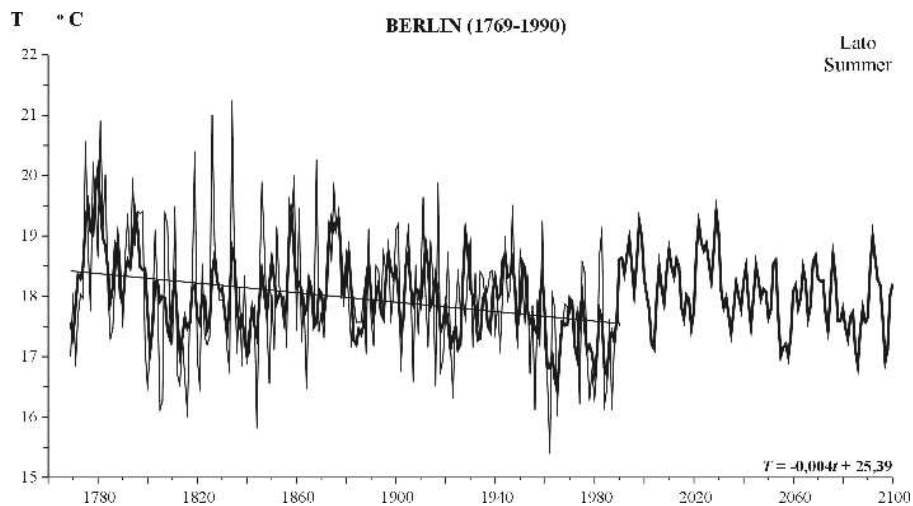
Rys. 3 Zmiany temperatury powietrza w Paryżu w latach 1757–1995 – prognoza w latach 1996–2100 – lato

Fig. 3. Changes of air temperature in Paris in 1757–1995 – forecast in the years 1996–2100 – summer



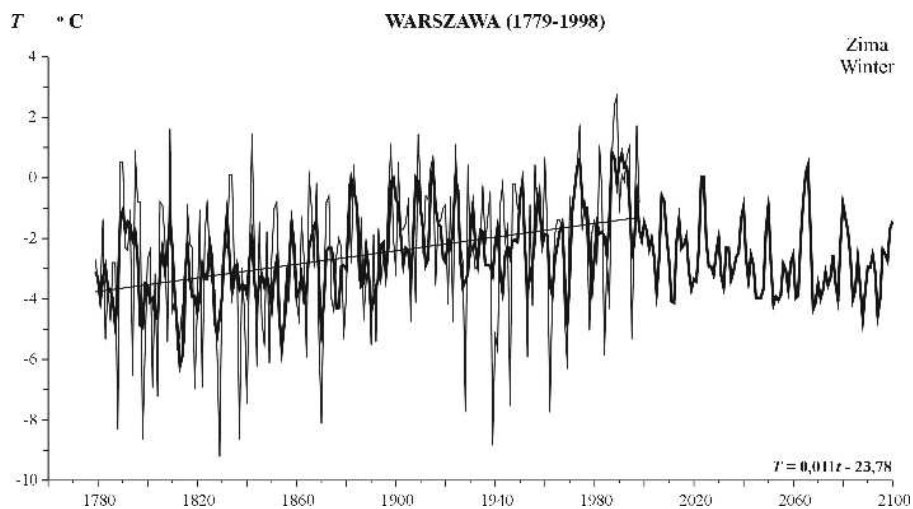
Rys. 4 Zmiany temperatury powietrza w Berlinie w latach 1769–1990 – prognoza w latach 1991–2100 – zima

Fig. 4. Changes of air temperature in Berlin in 1769–1990 – forecast in the years 1991–2100 – winter



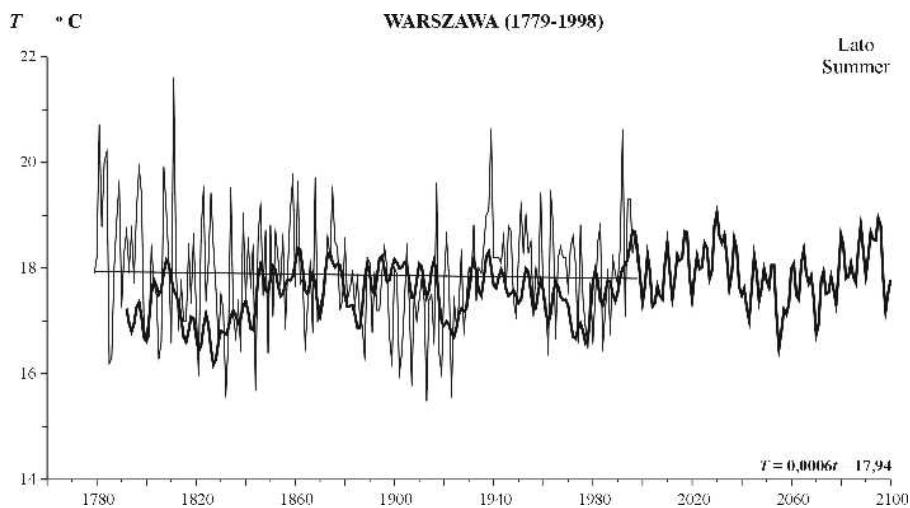
Rys. 5. Zmiany temperatury powietrza w Berlinie w latach 1769–1990 – prognoza w latach 1991–2100 – lato

Fig. 5. Changes of air temperature in Berlin in 1757–1995 – forecast in the years 1991–2100 – summer



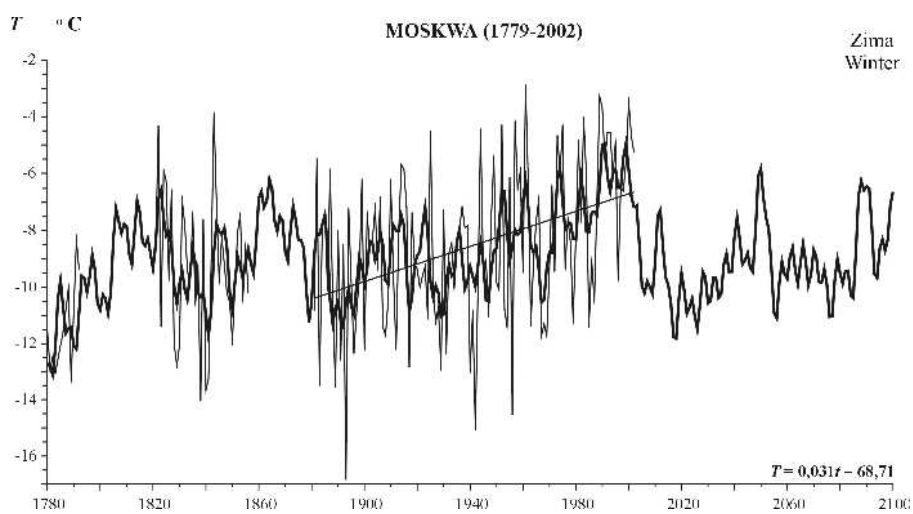
Rys. 6. Zmiany temperatury powietrza w Warszawie w latach 1779–1998 – prognoza w latach 1999–2100 – zima

Fig. 6. Changes of air temperature in Warsaw in 1779–1998 – forecast in the years 1999–2100 – winter



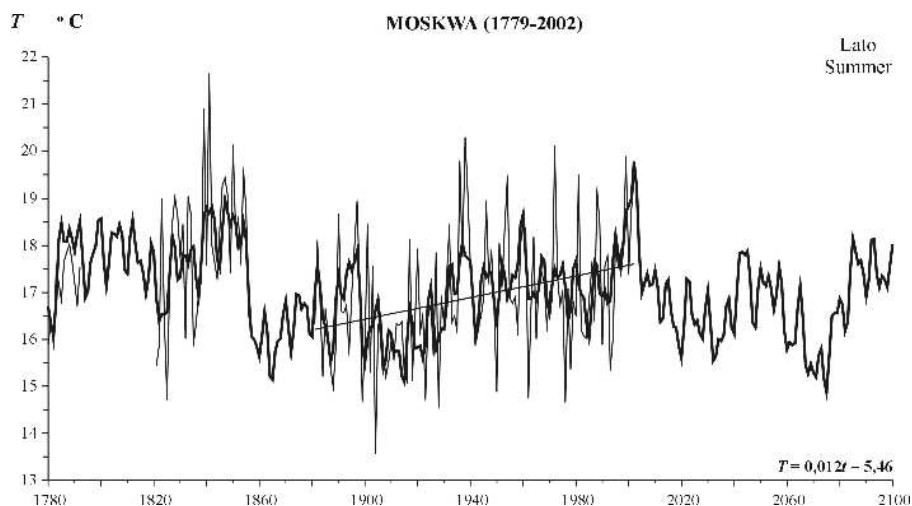
Rys. 7. Zmiany temperatury powietrza w Warszawie w latach 1779–1998 – prognoza w latach 1999–2100 – lato

Fig. 7. Changes of air temperature in Warsaw in 1779–1998 – forecast in the years 1999–2100 – summer



Rys. 8. Zmiany temperatury powietrza w Moskwie w latach 1779–2002 – prognoza w latach 2003–2100 – zima

Fig. 8. Changes of air temperature in Moscow in 1779–2002 – forecast in the years 1996–2100 – winter



Rys. 9 Zmiany temperatury powietrza w Moskwie w latach 1779–2002 – prognoza w latach 2003–2100 – zima

Fig. 9. Changes of air temperature in Moscow in 1779–2002 – forecast in the years 2003–2100 – winter

PIŚMIENNICTWO

- Boryczka J., 1998: Zmiany klimatu Ziemi. Wyd. Akademickie „Dialog”, Warszawa.
- Boryczka J., Stopa–Boryczka M., Baranowski B., Kirschenstein M., Błażek E., Skrzypczuk J., 2003: Atlas współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce, t. XVII, Mroźne zimy i upalne lata w Polsce, Wyd. UW, Warszawa.
- Boryczka J., Stopa–Boryczka M., Pietras K., Bijak Sz., Błażek E., Skrzypczuk J., 2005: Atlas współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce, t. XIX, Cechy termiczne klimatu Europy, Wyd. UW, Warszawa.
- Jones P.D., Jonsson T., Wheeler D., 1997: Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and South–West Iceland, *Ins J. Climatol.*, 17, s.1433–1450.
- Kondratiev K.J., Nikolski G.A., 1970: Solar radiation and solar activity. *Quart. J. Royal. Meteor. Soc.*, no 96.
- Trepińska B., 2001: Fluktuacje termiczne w Europie od małej epoki lodowej do końca XX wieku, *Postęp badań zmian klimatu i ich znaczenie dla życia i gospodarczej działalności człowieka*, Wyd. WGRS UW, Warszawa.

COOLINGS AND WARMINGS OF EUROPE'S CLIMATE
IN 18TH–21ST CENTURIES

Jerzy Boryczka, Maria Stopa-Boryczka

Institute of Climatology, Warsaw University
ul. Krakowskie Przedmieście 30, 00-927 Warszawa
e-mail: jkborycz@uw.edu.pl

Abstract. The objective of the work was to determine the periodicity and trends of change in air temperature in Europe in the time period of the 18th–20th centuries, together with the forecast for the 21st century. Past analyses of long-term surveys (Paris, Berlin, Warsaw, Moscow) suggest several air temperature cycles of significant amplitudes. They are ca. 8 and 100 years long, and the planetary cycle lasts for 178.9 years. Spectra and cycles of air temperatures, precipitations, NAO index, and solar activity were calculated based on the “regression sine” method. The dominating period length in the NAO index spectrum, during winter, as well as in the air temperature spectra for Europe, is ca. 8 years. It correlates with cycles of solar activity (8.1 years). The changes of the air temperature in winter and in summer in Paris, Berlin, Warsaw and Moscow in 18th–21st centuries are shown in Figures. 2–9. The coldest winters in Warsaw, with the average temperature from –4°C to –7°C, will occur most likely in the middle of this century: around the year 2050.

Keywords: Air temperature, Europe, North Atlantic Oscillation, period, forecast, Solar activity