

**Jerzy Boryczka, Maria Stopa-Boryczka, Urszula Kossowska-Cezak,  
Jolanta Wawer**

Uniwersytet Warszawski, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych,  
Zakład Klimatologii  
e-mail: jkborycz@uw.edu.pl

**ZALEŻNOŚĆ NAJNIŻSZYCH I NAJWYŻSZYCH ŚREDNICH DOBO-  
WYCH WARTOŚCI TEMPERATURY POWIETRZA OD AKTYWNOŚCI  
SŁOŃCA (NA PRZYKŁADZIE WARSZAWY, 1951-2010)**

**The dependency of minimum and maximum average daily air temperature  
on solar activity (Warsaw, 1951-2010)**

**Słowa kluczowe:** temperatura powietrza, fale chłodu i ciepła, Oscylacja  
Północnoatlantycka, aktywność Słońca, liczby Wolfa, ekstrema dobowe, sinusoida  
regresji, okres

**Key words:** air temperature, cold and warm waves, North Atlantic Oscillation, solar  
activity, Wolf numbers, daily extreme, sinusoid regression, period

**WPROWADZENIE**

Temperatura powietrza jest elementem meteorologicznym bardzo zmiennym w czasie. Są to zmiany cykliczne, związane z ruchem kuli ziemskiej – dobowe i roczne, ale również zmiany wieloletnie, jak też krótkotrwałe różnego rodzaju zmiany nieokresowe, w tym zmiany z dnia na dzień, uwarunkowane cyrkulacją atmosferyczną. Dlatego też przebieg roczny temperatury przedstawiony za pomocą wartości średnich z kolejnych 365 dni roku na podstawie danych nawet z kilkudziesięciu lat przedstawia linię łamaną, której „ząbki” (wzrosty i spadki) wskazują na okresy kilkudniowych ociepleń i ochłodzeń w ciągu roku. Poszukiwanie przyczyn tych okresów cieplejszych i chłodniejszych, niż wynikałoby to z wygładzonego w postaci sinusoidy przebiegu rocznego temperatury powietrza, było już tematem opracowania zespołu autorów (Stopa-Boryczka i in. 2011a, 2011b, 2012).

Duża zmienność temperatury w czasie sprawia, że w danym dniu roku w poszczególnych latach jej wartość może się bardzo różnić, na przykład 15 stycznia (środkowy dzień zimy) w latach 1951-2010 wahała się od  $-18,9^{\circ}\text{C}$  (1972) do  $5,2^{\circ}\text{C}$  (1951), a 15 lipca (środkowy dzień lata) od  $12,9^{\circ}\text{C}$  (1977) do  $25,1^{\circ}\text{C}$  (1951). Przedmiotem tego opracowania są zatem – poza codziennymi wartościami średnimi

wieloletnimi ( $T$ ) – również te najniższe wartości średnie dobowe, jakie pojawiły się w danym dniu roku ( $T_{mn}$ ) w 60-leciu, jak i wartości najwyższe ( $T_{mx}$ ). Celem pracy jest określenie zależności tych najniższych ( $T_{mn}$ ) i najwyższych ( $T_{mx}$ ) średnich dobowych w 60-leciu 1951-2010 wartości temperatury powietrza od aktywności Słońca w kolejnych dniach roku na przykładzie Warszawy (Okęcia). Celem jest zatem wykazanie synchronicznych zmian (istotnej korelacji) średniej temperatury powietrza:

$T$  – średniej 60-letniej w kolejnych dniach roku,

$T_{mn}$  – najniższej w kolejnych dniach roku w 60-leciu,

$T_{mx}$  – najwyższej w kolejnych dniach roku w 60-leciu

i aktywności Słońca (liczb Wolfa):

$W$  – średniej 60-letniej dobowej liczby Wolfa w kolejnych dniach roku,

$W_{max}$  – liczby maksymalnej w kolejnych dniach roku.

Problem polega na sprawdzeniu, czy okresy zmian temperatury powietrza w Warszawie i aktywności Słońca mają zbliżoną długość, a ekstrema sinusoid regresji i wielomianów regresji (ich pierwiastki) przypadają w przybliżeniu na te same dni. Ważna jest też ocena wiarygodności współczynników korelacji temperatury powietrza:  $T$ ,  $T_{mn}$ ,  $T_{mx}$  z liczbami Wolfa  $W$ ,  $W_{max}$  (z zastosowaniem testów statystycznych).

Duże znaczenie ma też poznanie cyrkulacyjnych uwarunkowań tej zależności, tj. wykazanie fazowej zgodności (synchroniczności) wahań aktywności Słońca i Oscylacji Północnoatlantyckiej:

$NAO$  – średniej 60-letniej dobowej w kolejnych dniach roku,

$NAO_{min}$  – dobowej najniższej w kolejnych dniach roku w 60-leciu,

$NAO_{max}$  – dobowej najwyższej w kolejnych dniach roku w 60-leciu.

Materiały źródłowe obejmują: codzienne wartości temperatury powietrza w Warszawie w latach 1951-2010 – z archiwum PIHM i Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej oraz z bazy danych ze strony internetowej *European Climate Assessment and Dataset* (ECA&D), codzienne liczby Wolfa z kolejnych dni 1951-2013 – z internetu <http://sidc.oma.be/data/index.html>; <http://sidc.oma.be/sunspot-data/dailyssn.php>; daily total sunspot number, . daysn\_import.txt; średnie roczne liczby Wolfa z lat 1700-1748 – z publikacji (Reznikov 1982) oraz codzienne wartości wskaźnika Oscylacji Północnoatlantyckiej z lat 1951-2012) [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip CWlink/pna/month\\_ao\\_index.html](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/month_ao_index.html).

Zmiany promieniowania krótkofalowego Słońca i pola magnetycznego plam słonecznych mają duży wpływ na klimat Ziemi. Warunkują one (poprzez jonosferę) ruch cyklonów i antycyklonów, głównie w początkowej fazie ich rozwoju (Rakipowa 1960). O wpływie aktywności Słońca na cyrkulację atmosferyczną (na dystrybucję ciepła na Ziemi) świadczą analogiczne cykle cyrkulacji (wschodniej, zachodniej, południkowej) i liczb Wolfa. W rozważaniach szczególną rolę odgrywa cykl roczny aktywności Słońca (i krótsze), związane z ruchem obiegowym Ziemi dookoła Słońca (365,25 dni) i ruchem obrotowym Słońca wokół jego osi, nachylonej pod kątem  $82^{\circ}45'$  do płaszczyzny ekliptyki (o nachyleniu równika  $7^{\circ}15'$ ).

Okres obrotu Słońca wynosi 25,04 dni na równiku i 31 dni w pobliżu biegunów. W ciągu 365,25 dni występuje 14,587 obrotów Słońca (na równiku) i 11,782 obrotów (w pobliżu biegunów). Przyczyną cyklu rocznego aktywności Słońca (liczby plam na Słońcu) są więc zarówno zmiany aktywności Słońca spowodowane procesami fizycznymi zachodzącymi na jego powierzchni (cyklem 11- i 22-letnim), jak też wynikające z przesuwałej się coraz innej części powierzchni Słońca (tarczy) widocznej z Ziemi w kolejnych dniach roku.

Nie można też wykluczyć udziału w zmianach rocznych liczb Wolfa najbliższych Słońca planet o okresach obiegu: Merkury – 88,025 dni, Wenus – 224,629 dni (o nachyleniu równików  $7^{\circ}0'$  i  $3^{\circ}24'$  do płaszczyzny ekliptyki), obiegu planet dalszych. Na liczbę plam słonecznych mogą wpływać planetoidy obiegające Słońce w czasie 3,3 - 6 lat po orbitach o nachyleniu  $9^{\circ}54'$  (Reznikov 1982).

Okresy badanych zmiennych ( $y$ ) wyznaczono metodą J. Boryczki sinusoid regresji (2010):

$$y(t) = a_0 + b \sin\left(\frac{2\pi}{\Theta} t + c\right)$$

gdzie:  $t$  – czas,  $\Theta$  – okres,  $a_0$  – wyraz wolny,  $b$  – amplituda,  $c$  – faza.

Zmieniając okres sinusoidy  $\Theta$  z odstępem czasu  $\Delta\Theta = 0,1$  dnia, otrzymano ciągi liczbowe

$$\varepsilon^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2$$

wariancji resztkowej, gdzie  $\varepsilon_i = y_i - y(t_i)$  – odchylenie  $i$ -tego punktu empirycznego ( $t_i, y_i$ ) od sinusoidy  $y(t_i)$ .

Okresy  $\Theta$  – to minima lokalne ciągu wariancji resztkowych  $\varepsilon_1^2, \dots, \varepsilon_k^2$  (widma). Są to jednocześnie maksima lokalne ciągów liczbowych: współczynnika determinacji  $R_1^2, \dots, R_k^2$  (współczynnika korelacji wielokrotnej  $R$ ). Istotność statystyczną współczynników korelacji zwykłej i korelacji wielokrotnej  $R$  oceniono z zastosowaniem testów  $t$  Studenta i  $F_{obl}$  Fishera-Snedecora, gdzie:  $s^2$  – wariancja zmiennej  $y$ :

$$R^2 = 1 - \frac{\varepsilon^2}{s^2}, \quad R = \sqrt{R^2}, \quad F_{obl} = \frac{n-3}{2} \frac{R^2}{1-R^2}$$

W porównaniach przebiegów rocznych (ekstremów – minimów i maksimów) temperatury powietrza, wskaźnika  $NAO$  i aktywności Słońca zastosowano także wielomiany regresji 2. i 3. stopnia zmiennej  $y$  względem czasu  $t$ .

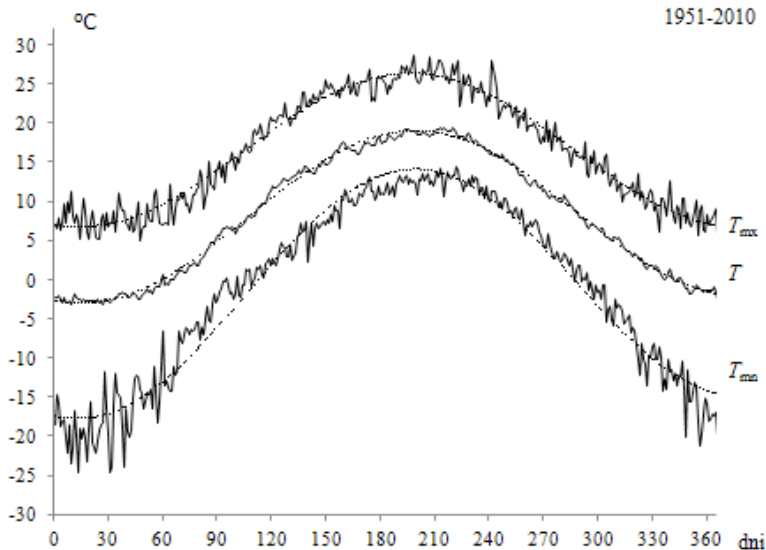
## NAJNIŻSZE I NAJWYŻSZE ŚREDNIE DOBOWE WARTOŚCI TEMPERATURY POWIETRZA W WARSZAWIE (FALE CHŁODU I CIEPŁA, 1951-2010)

Na klimat Europy (i Polski) dominujący wpływ mają dwa główne centra pola ciśnienia atmosferycznego nad Atlantykiem: Niż Islandzki i Wyż Azorski, które są w ciągu roku ze sobą ujemnie skorelowane. Przy dużej południko-

wej różnicy ciśnienia, tj. dużym gradientie ciśnienia skierowanym na północ, powietrze nad Atlantyku napływa z zachodu na wschód – nad obszar Europy (i Polskę). 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 występuje południkowy ruch powietrza na południe lub północ (cyrkulacja południkowa). Wówczas nad obszar Europy napływa powietrze z północy lub południa.

Klimat zachodniej i środkowej Europy jest kształtowany przez cyrkulację strefową, uwarunkowaną składową południkową ( $-\frac{\partial p}{\partial \varphi}$ ) gradientu ciśnienia atmosferycznego ( $p$ ). Jako miarę południkowego gradientu ciśnienia przyjęto wskaźnik *NAO*, zdefiniowany przez Jonesa i in. (1997), tj. standaryzowaną różnicę 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 –  $NAO < 0$  (Marsz 1999).

Przebiegi roczne temperatury powietrza średniej wieloletniej dobowej ( $T$ ) oraz średnich dobowych najniższych ( $T_{mn}$ ) i najwyższych ( $T_{mx}$ ) wybranych spośród kolejnych dni roku z 60 lat 1951-2010 przedstawione na wykresie (zbliżone do sinusoid o okresie 365,25 dni), jak wspomniano, mają liczne „wzrosty i spadki” (ryc. 1).



**Ryc. 1.** Przebieg roczny temperatury powietrza w Warszawie (1951-2010),  $T$  – średnia dobowo-60-letnia,  $T_{mn}$  – średnia dobowo-najniższa,  $T_{mx}$  – średnia dobowo-najwyższa w okresie 60 lat

**Fig. 1.** Annual course of air temperature in Warsaw (1951 – 2010),  $T$  60-year – daily mean,  $T_{mn}$  – lowest,  $T_{mx}$  – highest in the 60-year period

Fale chłodu i ciepła zdefiniowano, stosując przekształcenie algebraiczne codziennych 60-letnich średnich dobowych wartości temperatury powietrza:

$$\Delta T = \varepsilon_i = T_i - f(t_i)$$

gdzie:  $\varepsilon_i$  – reszty,  $T_i$  – średnie dobowe wartości zmierzone,  $f(t_i)$  – wartości obliczone z równania sinusoidy regresji o okresie  $\Theta = 365,25$  dni.

Przebieg roczny codziennych 60-letnich wartości temperatury powietrza: średnich wieloletnich ( $T$ ) oraz średnich dobowych najniższych ( $T_{mn}$ ) i najwyższych ( $T_{mx}$ ) w Warszawie w latach 1951-2010 dobrze opisują sinusoidy regresji o okresie  $\Theta = 365,25$  dni (ryc. 1):

$$\begin{aligned} T &= f(t) = 7,6773 + 0,002239t + 10,767682 \sin(2\pi t/365,25 - 1,845735), \\ T_{mn} &= f1(t) = -2,7659 + 0,007865t + 15,190194 \sin(2\pi t/365,25 - 1,825587), \\ T_{mx} &= f2(t) = 16,4562 - 0,000200t + 9,807196 \sin(2\pi t/365,25 - 1,810522) \end{aligned}$$

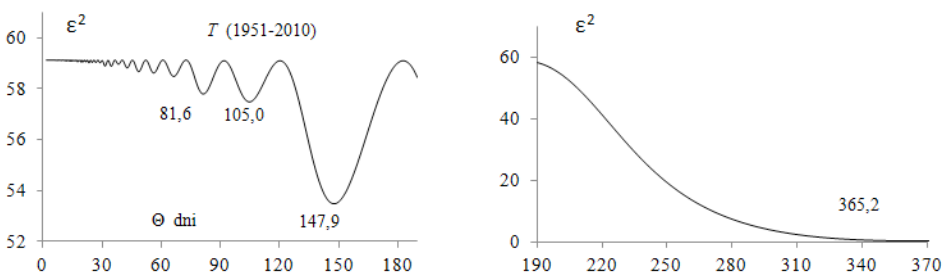
Współczynniki determinacji  $R^2$  osiągają wyjątkowo duże wartości:  $R^2 = 0,994$ ,  $R^2 = 0,958$ ,  $R^2 = 0,960$ ). Współczynniki i korelacji wielokrotnej  $R = 0,997$ ,  $R = 0,979$ ,  $R = 0,980$  są istotne na poziomie  $< 0,01$ .

Zakres wahań w cyklu  $\Theta = 365,25$  dni wynosi: średniej wieloletniej dobowej temperatury powietrza ( $T$ )  $21,54^\circ\text{C}$ , temperatury dobowej najniższej ( $T_{mn}$ )  $30,38^\circ\text{C}$  i najwyższej ( $T_{mx}$ )  $19,61^\circ\text{C}$ .

W widmie średniej wieloletniej dobowej temperatury powietrza ( $T$ ) w Warszawie są obecne okresy  $\Theta$  krótsze 147,9, 105,0 i 81,6 dni od cyklu rocznego  $\Theta = 365,25$  dni (ryc. 2).

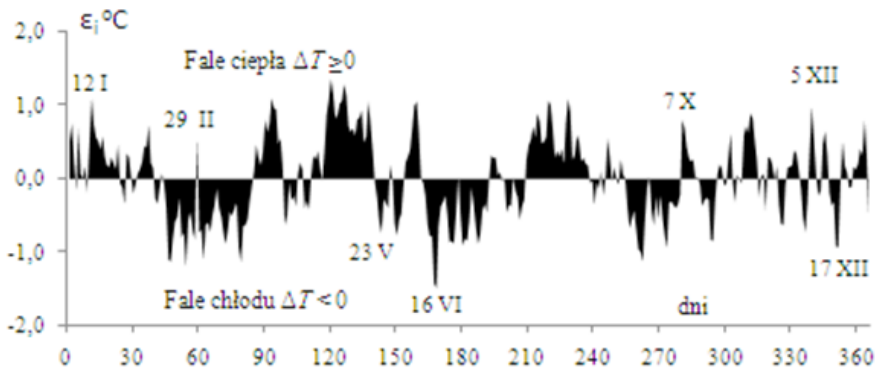
Fale chłodu ( $\Delta T < 0$ ) i ciepła ( $\Delta T \geq 0$ ) dobrze charakteryzują odchylenia  $\Delta T_i$  (reszty  $\varepsilon_i$ ) średnich wartości zmierzonej temperatury powietrza  $T_i$  od odpowiednich punktów sinusoidy regresji  $f(t_i)$  (ryc. 3).

Te wzrosty i spadki temperatury w różnych odstępach czasu, które powtarzają się z większą lub mniejszą regularnością, wykazują kilkudniowe ocieplenia i ochłodzenia. W literaturze klimatologicznej zyskały one nazwę osobliwości



**Ryc. 2.** Widmo średniej dobowej wieloletniej temperatury powietrza ( $T$ ) w Warszawie (1951-2010)

**Fig. 2.** Spectrum of daily meant air temperature ( $T$ ) in Warsaw (1951-2010)



**Ryc. 3.** Fale ciepła i chłodu w Warszawie (1951-2010),  $\Delta T = T - f(t)$  – odchylenia średniej wieloletniej dobowej temperatury ( $T$ ) od sinusoidy regresji  $f(t)$  – w przebiegu rocznym

**Fig. 3.** Warm and cold waves in Warsaw (1951-2010),  $\Delta T = T - f(t)$  – deviations of daily mean air temperature ( $T$ ) from regression sinusoid  $f(t)$  – in the annual course

kalendaryzowanych klimatu lub po prostu dni osobliwych. Są one znane w wielu krajach: angielskie *singularity*, francuskie *singularité*, niemieckie *Singularität*, rosyjskie *kalendarnyje osobiennosti klimata* (*Glossary of Meteorology* 2000; *Słownik meteorologiczny* 2003; Chromov, Mamontova 1963).

Najbardziej znaną falą chłodu z 12-14 maja są *zimni ogrodnicy* (Pankracy, Serwacy, Bonifacy), czy też z 15 maja – *zimna Zośka*. Ochłodzenie to znane jest od dawna (Romer 1894). W Polsce największe ochłodzenie występuje na południu Polski, a najmniejsze na północo-wschodzie (Stopa-Boryczka i in. 2006). Te duże spadki temperatury przynoszą masy powietrza arktycznego, napływające z wyżu rozbudowanego nad Skandynawią.

Charakterystyczny jest wzrost temperatury średniej 60-letniej od 2 do 8 czerwca o  $1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$  (od  $15,7$  do  $17,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), a następnie spadek do 16 czerwca o  $1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  (od  $17,6$  do  $15,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) (ryc. 1-2). Fale chłodu lub ciepła w lecie wskazuje znak ( $\Delta T < 0$  lub  $\Delta T \geq 0$ ) odchylenia  $\Delta T = T - f(t)$  zmierzonych wartości temperatury powietrza  $T$  od sinusoidy regresji o okresie 365,25 dni (ryc. 2). W czerwcu i lipcu, a także w sierpniu występuje średnio jeszcze kilka fal ochłodzeń, są one jednak słabsze niż ta z 8-16 czerwca i nie przekraczają  $1^{\circ}\text{C}$ ; należy tu wymienić: z 27 na 29 czerwca o  $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  i od 3 do 6 lipca o  $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , od 16 do 19 lipca o  $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , od 22 do 25 lipca o  $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  i od 7 do 10 sierpnia o  $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

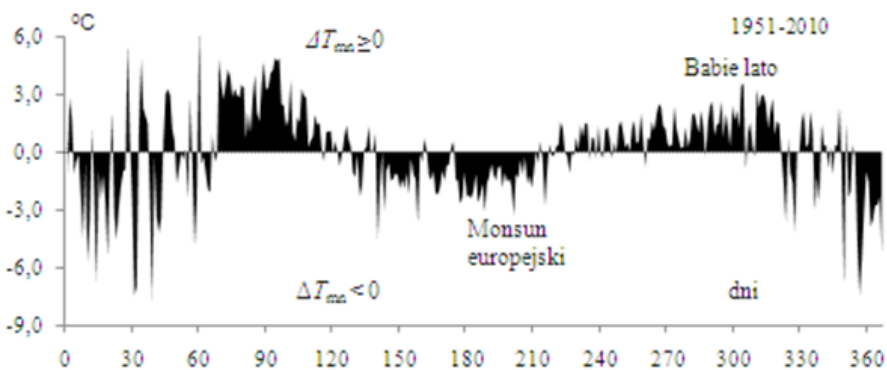
Letnie fale chłodu i towarzyszące im opady są związane z adwekcją powietrza polarnego morskiego wraz z cyrkulacją zachodnią i północo-zachodnią (Kossowska-Cezak 1994). Znajduje to pełne potwierdzenie w tym, że fale chłodu latem występują przeważnie przy dodatnich wartościach wskaźnika *NAO* (tj. równoleżnikowej adwekcji powietrza znad Atlantyku) bądź też przy niewielkich ujemnych wartościach wskaźnika *NAO*, odpowiadających napływowi powietrza z północo-zachodu. Czerwiec odznacza się okresowymi spadkami temperatury, którym

towarzyszą wzmożone opady atmosferyczne. Występują one nie tylko w Polsce; klimatolodzy niemieccy najlepiej opisali to zjawisko i nadali mu nazwę *monsun europejski* już w XIX wieku (Flohn 1942, 1954).

W środkowej Europie pod koniec września i w pierwszej połowie października charakterystyczne są okresy ociepleń, którym towarzyszy słoneczna i bezwietrzna pogoda (wyżowa), z unoszącymi się nitkami pajęczyny – *babie lato*. Fale ciepła dobrze opisują odchylenia dodatnie ( $\Delta T \geq 0$ ) średnich dobowych wartości temperatury  $T$  od obliczonych z równania sinusoidy regresji  $f(t)$  o okresie 365,25 dni. Największe ocieplenia przypadają średnio na dni 7 i 21 października (rys. 3). Jesienne fale ciepła w niektórych latach mogą wpłynąć na duży wzrost temperatury średniej miesięcznej. Grudniowe fale ciepła i chłodu znalazły odbicie w przysłowiu Święta Barbara po wodzie (4 XII), Boże Narodzenie po lodzie (25 XII) lub w jego odwrotności (Gumiński 1948; Tońska 2006). Na przykład, od 5 do 8 grudnia średnia temperatura spada o 1,6 °C (od 1,3 do -0,3 °C), a od 10 do 12 stycznia wzrasta o 1,3 °C (od -3,2 do -1,9 °C). Podobnie jest w lecie – od 1 do 8 czerwca temperatura wzrasta o 2,4 °C (od 15,2 do 17,6 °C). Nieco mniejsze wahania temperatury uwidaczniają się w porach przejściowych, ze względu na dużą tendencję wzrostową na wiosnę (1,9 °C/10 dni) i spadkową w jesieni (-1,7 °C/10 dni).

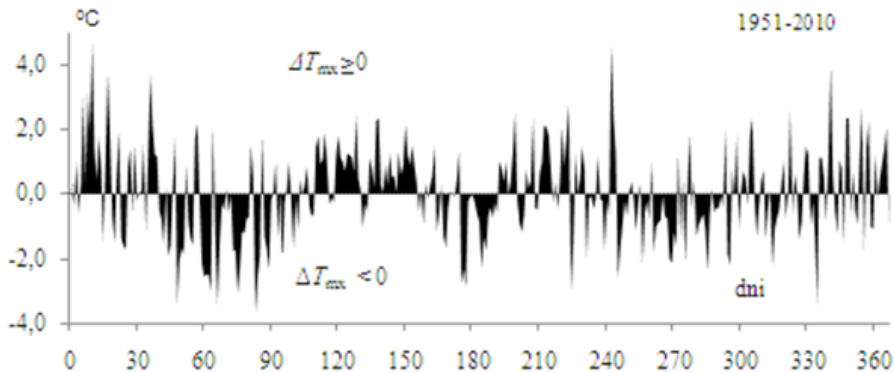
Odchylenie najniższych średnich dobowych wartości temperatury powietrza  $\Delta T_{mn} = T_{mn} - f_1(t)$  i najwyższych  $\Delta T_{mx} = T_{mx} - f_2(t)$  od sinusoid regresji o okresie  $\Theta = 365,25$  dni przedstawiono na ryc. 4-5.

Najwyższe średnie dobowe wartości temperatury  $T_{mx}$  z kolejnych dni (z 60 lat 1951-2010) są silnie skorelowane z wartościami najniższymi  $T_{mn}$ . Współczynnik korelacji  $r = 0,951$ , a prosta regresji ma równanie  $T_{mx} = 0,602T_{mn} + 17,21$ .



**Ryc. 4.** Przebieg roczny odchyleń ( $\Delta T_{mn}$ ) najniższych średnich dobowych wartości temperatury powietrza ( $T_{mn}$ ) od sinusoidy  $f_1(t)$  w Warszawie (1951-2010)

**Fig. 4.** Annual course of deviations ( $\Delta T_{mn}$ ) of the lowest air temperature ( $T_{mn}$ ) from sinusoid  $f_1(t)$  in Warsaw (1951- 2010)



**Ryc. 5.** Przebieg roczny odchyień ( $\Delta T_{mx}$ ) najwyższych średnich dobowych wartości temperatury powietrza ( $T_{mx}$ ) od sinusoidy  $f_2(t)$  w Warszawie (1951-2010)

**Fig. 5.** Annual course of deviations ( $\Delta T_{mx}$ ) of the highest air temperature ( $T_{mx}$ ) from sinusoid  $f_2(t)$  in Warsaw (1951-2010)

#### NAJNIŻSZE I NAJWYŻSZE ŚREDNIE DOBOWE WARTOŚCI WSKAŹNIKA OSCYLACJI PÓLNOCNATLANTYCKIEJ (1951-2010)

Zmiany roczne codziennych wartości temperatury powietrza w Warszawie w latach 1951-2010, tj. średniej dobowej ( $T$ ) oraz średnich dobowych najniższych ( $T_{mn}$ ) i najwyższych ( $T_{mx}$ ) z kolejnych 365 dni w ciągu 60 lat są podobne do zmian rocznych wskaźnika Oscylacji Północnoatlantycznej – średniej dobowej ( $NAO$ ) oraz najniższych ( $NAO_{min}$ ) i najwyższych ( $NAO_{max}$ ) wartości codziennych w wielolecu (ryc. 6).

Świadczą o tym przebiegi roczne wskaźników  $NAO$ , opisane równaniami sinusoid regresji o okresie  $\Theta=365,25d$ , wyznaczone z kolejnych dni (z okresu 60 lat) – o amplitudach  $2b$  odpowiednio 0,077, 3,862, 3,558:

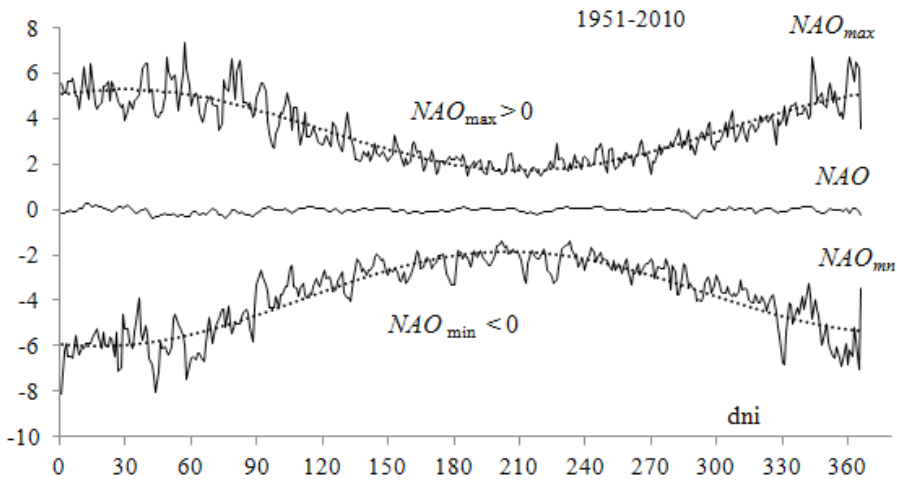
$$\begin{aligned} NAO &= F(t) = -0,033666 - 0,000052t + 0,03856591 \sin(2\pi t/365,25 - 2,848821) \\ NAO_{min} &= F1(t) = -4,085093 + 0,001626t + 1,931304 \sin(2\pi t/365,25 - 1,910102) \\ NAO_{max} &= F2(t) = 3,5043 - 0,000052t + 1,778929 \sin(2\pi t/365,25 + 1,067360) \end{aligned}$$

Współczynniki korelacji wielokrotnej (między wartościami obliczonymi i zmierzonymi) wynoszą odpowiednio:  $R = 0,207$ ;  $R = 0,466$ ;  $R = 0,345$ . Są one istotne na poziomie 0,01, ponieważ statystyki testu Fishera-Snedecora:  $F_{obl} = 8,100$ ;  $F_{obl} = 50,21$ ;  $F_{obl} = 24,45$  są większe od wartości krytycznej  $F_k = 4,67$ .

Fale ciepła ( $\Delta T \geq 0$ ) i chłodu ( $\Delta T < 0$ ) w Warszawie, czyli odchylenia ( $\Delta T$ ) średniej dobowej temperatury powietrza ( $T$ ) od sinusoidy  $f(t)$  o okresie  $\Theta = 365,25$  dni, oraz przebieg roczny średnich dobowych wartości wskaźnika  $NAO$  (1951-2010) przedstawiono na ryc. 7.

Średnie roczne ( $T_m$ ) oraz najniższe spośród  $T_{mn}$  ( $T_{inf}$ ) i najwyższe spośród  $T_{max}$  ( $T_{sup}$ ) średnie dobowe wartości temperatury powietrza w Warszawie w kolejnych

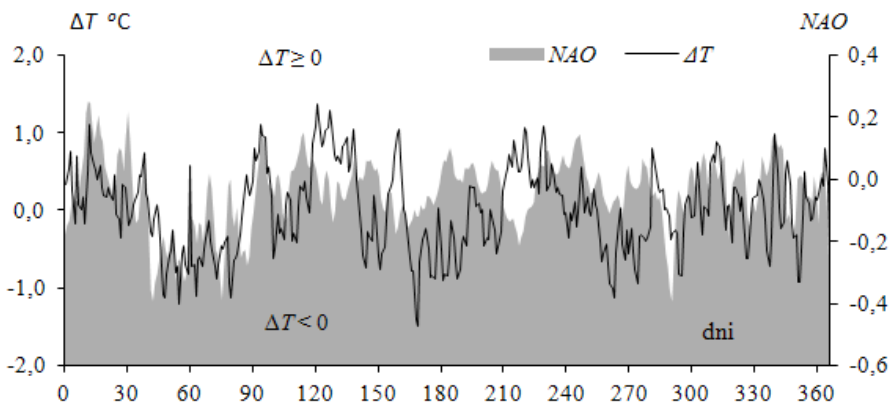




**Ryc. 6** Przebieg roczny wskaźnika Oscylacji Północnoatlantyckiej (1951-2010),  $NAO$  – średnia dobowa,  $NAO_{min}$  – najniższa i  $NAO_{max}$  – najwyższa w okresie 60 lat

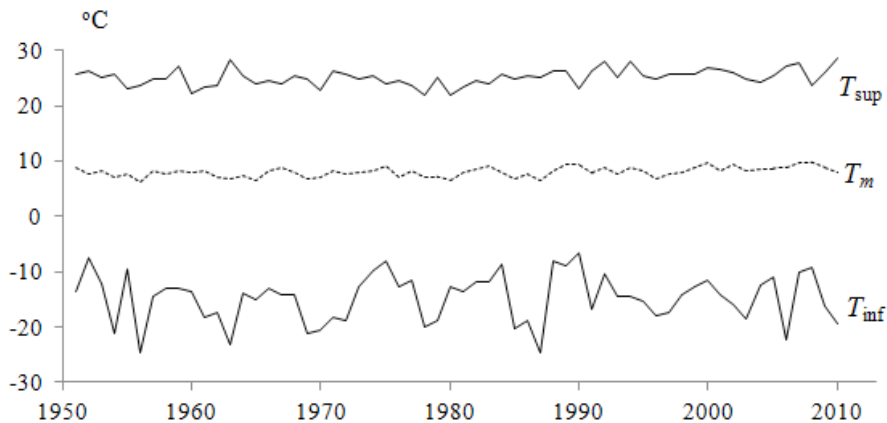
**Fig. 6.** Annual course of North Atlantic Oscillation index (1951 – 2010),  $NAO$  – daily mean,  $NAO_{min}$  – the lowest and  $NAO_{max}$  – the highest in the 60-year period

latach 1951, 1952, ..., 2010 przedstawiono na ryc. 8. Zakres wahań najniższych średnich dobowych wartości ujemnych ( $T_{inf} < 0$ ) temperatury powietrza w roku jest także znacznie większy niż wartości najwyższych dodatnich ( $T_{sup} > 0$ ) – podobnie jak  $NAO_{inf}$  i  $NAO_{sup}$ .



**Ryc. 7.** Fale ciepła ( $\Delta T \geq 0$ ) i chłodu ( $\Delta T < 0$ ) w Warszawie i przebieg roczny średniej dobowej wartości wskaźnika Oscylacji Północnoatlantyckiej ( $NAO$ ) (1951-2010)

**Fig. 7.** Warm ( $\Delta T \geq 0$ ) and cold ( $\Delta T < 0$ ) waves in Warsaw and yearly course of North Atlantic Oscillation daily mean index ( $NAO$ ) (1951-2010)

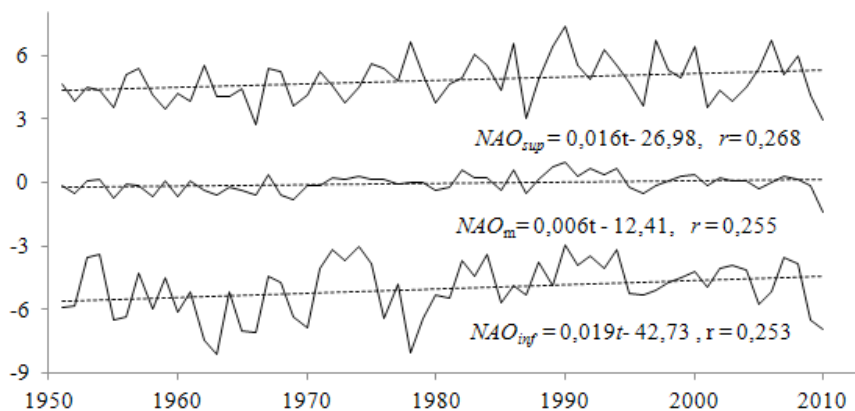


**Ryc. 8.** Zmiany temperatury powietrza w Warszawie w latach 1951-2010,  $T_m$  – średnia roczna,  $T_{inf}$  – najniższa w roku i  $T_{sup}$  – najwyższa w roku

**Fig. 8.** Changes of air temperature in Warsaw in years 1951-2010,  $T_m$  – annual mean,  $T_{inf}$  – the lowest in the year and the  $T_{sup}$  – the highest in the year

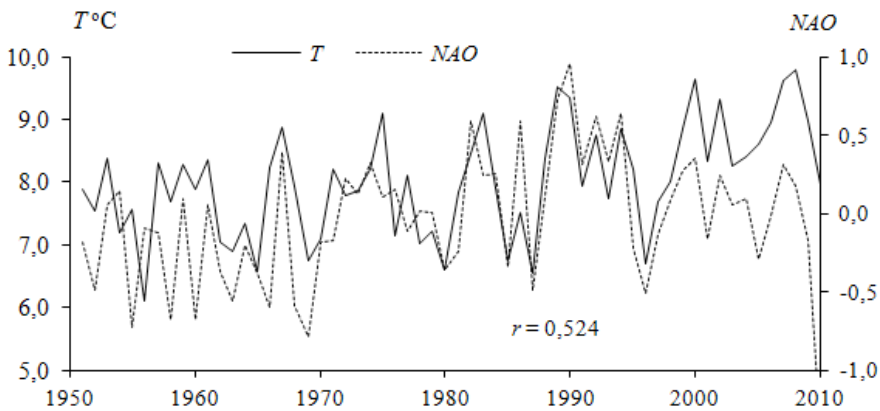
Średnie roczne ( $NAO_m$ ) oraz najniższe ( $NAO_{inf}$ ) i najwyższe ( $NAO_{sup}$ ) średnie dobowe wartości wskaźnika Oscylacji Północnoatlantyckiej w kolejnych latach 1951, 1952, ..., 2010 charakteryzuje wykres na ryc. 9. Zakres wahań najniższych średnich dobowych wartości ujemnych ( $NAO_{inf} < 0$ ) w roku jest na ogół większy niż wartości najwyższych dodatnich ( $NAO_{sup} > 0$ ).

O dużej zależności klimatu Polski od Oscylacji Północnoatlantyckiej w latach 1951-2010 świadczy istotny statystycznie współczynnik korelacji  $r = 0,524$  średniej



**Ryc. 9.** Zmiany wskaźnika Oscylacji Północnoatlantyckiej w latach 1951-2010,  $NAO_m$  – średnie dobowe,  $NAO_{inf}$  – najniższe,  $NAO_{sup}$  – najwyższe

**Fig. 9.** Changes of North Atlantic Oscillation index in years 1951-2010,  $NAO$  – daily mean,  $NAO_{inf}$  – lowest,  $NAO_{sup}$  – highest



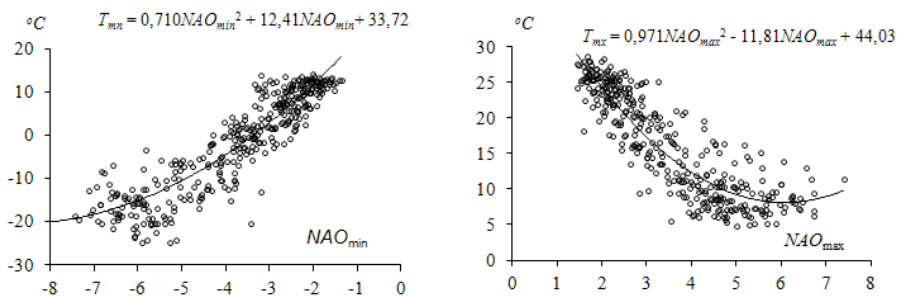
**Ryc. 10.** Zmiany temperatury powietrza ( $T$ ) w Warszawie i wskaźnika Oscylacji Północnoatlantyckiej ( $NAO$ ) – średnich rocznych wartości (1951-2010)

**Fig. 10.** Changes of air temperature in Warsaw ( $T$ ) and North Atlantic Oscillation index ( $NAO$ ) – yerly mean values (1951-2010)

rocznej temperatury powietrza ( $T$ ) w Warszawie z średnim rocznym wskaźnikiem ( $NAO$ ) (większy od wartości krytycznej  $r_{0,05} = 0,255$ )(ryc. 10).

Najniższe ( $T_{mn}$ ) i najwyższe ( $T_{mx}$ ) średnie dobowe wartości temperatury powietrza w Warszawie w przebiegu rocznym od 1 do 365,25 dni (1951-2010) są silnie skorelowane z najniższymi ( $NAO_{min}$ ) i najwyższymi ( $NAO_{max}$ ) wartościami wskaźnika Oscylacji Północnoatlantyckiej. Świadczą o tym parabole regresji na ryc. 11 o dużych wartościach współczynnika korelacji wielokrotnej  $R = 0,911$  i  $R = 0,897$ .

Po prostu, wynika to z silnej korelacji średniej dobowej temperatury  $T$  z wskaźnikiem  $NAO$  w kolejnych dniach w latach 1951, 1952, ..., 2010.



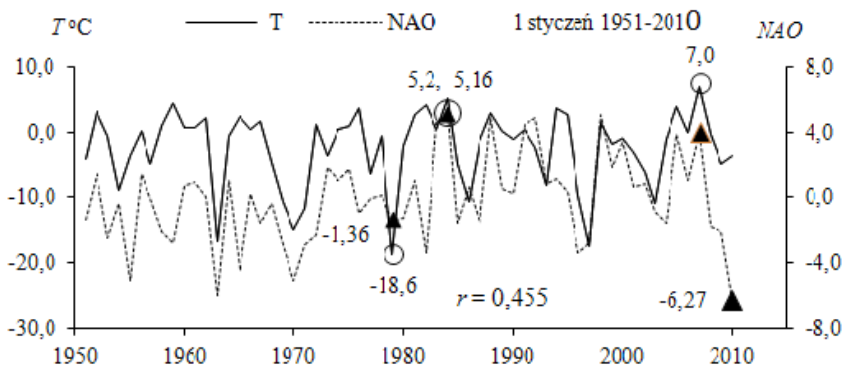
**Ryc. 11.** Regresja wartości temperatury powietrza ( $T_{mn}$  – najmniejszych,  $T_{mx}$  – największych w okresie 60 lat) w Warszawie względem wskaźnika  $NAO$  ( $NAO_{min}$ ,  $NAO_{max}$ )(1951-2010)

**Fig. 11.** Regression of air temperature ( $T_{mn}$  – the lowest,  $T_{mx}$  – the highest in the 60-year period) in Warsaw in relation to  $NAO$  index ( $NAO_{min}$ ,  $NAO_{max}$ )(1951-2010)

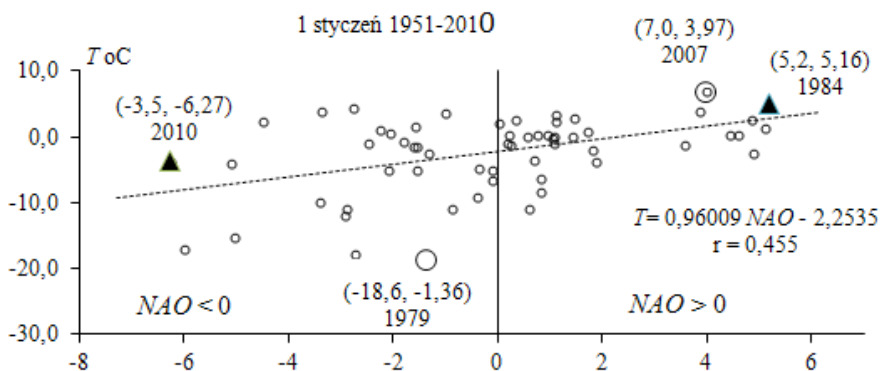
Przykładowo przedstawiono przebiegi średniej dobowej temperatury powietrza ( $T$ ) w Warszawie i wskaźnika  $NAO$  np. w dniu 1 stycznia w kolejnych latach 1951, 1952, ..., 2010 (ryc. 12a i 12b). Zmiany  $T$  i  $NAO$  w przebiegu wieloletnim – w latach 1951-2010 w dniu 1 stycznia są w przybliżeniu synchroniczne (współczynnik korelacji wynosi  $r = 0,455$ ).

Dlatego też ekstrema temperatury powietrza w Warszawie ( $T_{mn}, T_{mx}$ ) są skorelowane z ekstremami wskaźnika Oscylacji Północnoatlantyckiej ( $NAO_{min}, NAO_{max}$ ),

a)



b)



**Ryc. 12.** Zmiany średniej dobowej temperatury powietrza w Warszawie ( $T$ ) i wskaźnika  $NAO$  (a) oraz zależność tej temperatury od wskaźnika  $NAO$  (b) w latach 1951-2010, 1 stycznia

**Fig. 12.** Changes of mean daily air temperature in Warsaw ( $T$ ) and  $NAO$  index (a) as well as dependence of such temperature on the  $NAO$  (b) in years 1951-2010, 1 January

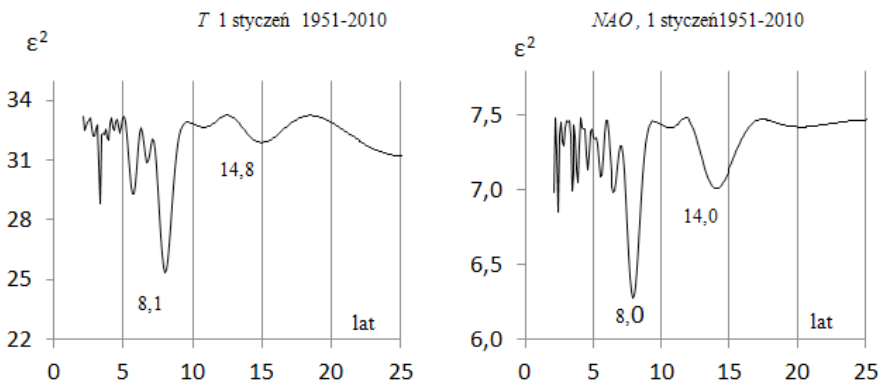
gdyż występują w latach, w których wskaźnik *NAO* ma ten sam znak dodatni ( $NAO > 0$ ) lub ujemny ( $NAO < 0$ ):

	<i>T</i> °C	<i>NAO</i>
1979	-18,6	-1,36
2007	7,0	3,97
2010	-3,5	-6,27
1984	5,2	5,16

Po prostu przebieg roczny temperatury powietrza w Polsce w kolejnych latach 1951-2010 jest uwarunkowany zmianami rocznymi Oscylacji Północnoatlantycznej. Temperatura powietrza (*T*) i wskaźnik (*NAO*) w dniu 1 stycznia w kolejnych latach 1951, 1952, ..., 2010 charakteryzują się zbliżoną cyklicznością 8-letnią (i ok. 14-letnią) (ryc. 13).

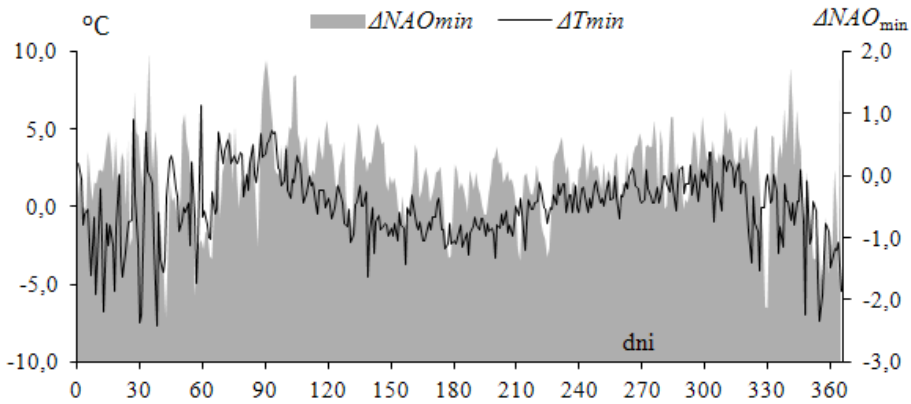
Przebiegi roczne odchyień najniższych średnich dobowych wartości temperatury powietrza ( $\Delta T_{mn}$ ) są podobne do najniższych średnich dobowych wartości wskaźnika Oscylacji Północnoatlantycznej ( $NAO_{min}$ ) (ryc. 14). Natomiast przebiegi roczne odchyień najwyższych średnich dobowych wartości temperatury  $\Delta T_{mx}$  są skorelowane ujemnie z wskaźnikiem  $NAO_{max}$  (tzn. dodatnio z  $-NAO_{max}$ ) (ryc. 15).

Widma najniższych średnich dobowych wartości temperatury powietrza ( $T_{mn}$ ) w Warszawie i najniższych średnich dobowych wartości wskaźnika Oscylacji Północnoatlantycznej ( $NAO_{min}$ ) są bardzo podobne (ryc. 16). W tych widmach (bez cyklu rocznego) są obecne prawie te same okresy. Najdłuższe cykle 151,8 i 152,6 dni cechują się znacznymi amplitudami (2b):  $T_{mn} - 11,84$  °C i  $NAO_{min} - 1,644$  i współczynnikami korelacji wielokrotnej  $R = 0,453$  i  $R = 0,491$  – istotnymi na poziomie 0,01 (wg testu  $F$ :  $F_{obl} = 46,733$  i  $F_{obl} = 57,497$ ,  $F_k = 4,67$ ). Istnieje też duże podo-



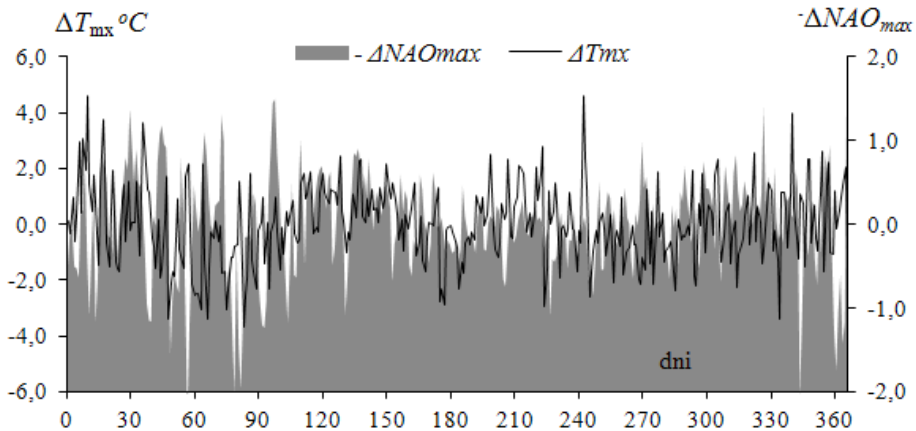
**Ryc. 13.** Widma średnich dobowych wartości: temperatury powietrza (*T*) w Warszawie i wskaźnika *NAO* (1 stycznia, 1951-2010)

**Fig. 13.** Spectra of air temperature's daily mean values (*T*) in Warsaw and *NAO* index (1 January, 1951-2010)



**Ryc. 14.** Przebieg roczny odchyłeń ( $\Delta T_{mn}$ ) najniższej średniej dobowej temperatury powietrza w Warszawie (1951-2010) i najniższej wartości wskaźnika Oscylacji Północnoatlantyckiej ( $\Delta NAO_{min}$ ) od sinusoid  $\Theta = 365,25$  dni

**Fig. 14.** Annual course of deviation ( $\Delta T_{mn}$ ) of air temperature's daily mean lowest in Warsaw (1951-2010) and North Atlantic Oscillation ( $\Delta NAO_{min}$ ) from sinusoids of  $\Theta = 365,25$  day period



**Ryc. 15.** Przebieg roczny odchyłeń ( $\Delta T_{mx}$ ) najwyższej średniej dobowej temperatury powietrza w Warszawie (1951-2010) i wskaźnika Oscylacji Północnoatlantyckiej ( $-\Delta NAO_{max}$ ) od sinusoid  $\Theta = 365,25$  dni

**Fig. 15.** Annual course of deviation ( $\Delta T_{mx}$ ) of air temperature's daily mean highest in Warsaw (1951-2010) and North Atlantic Oscillation ( $-\Delta NAO_{max}$ ) from sinusoids of  $\Theta = 365,25$  days period

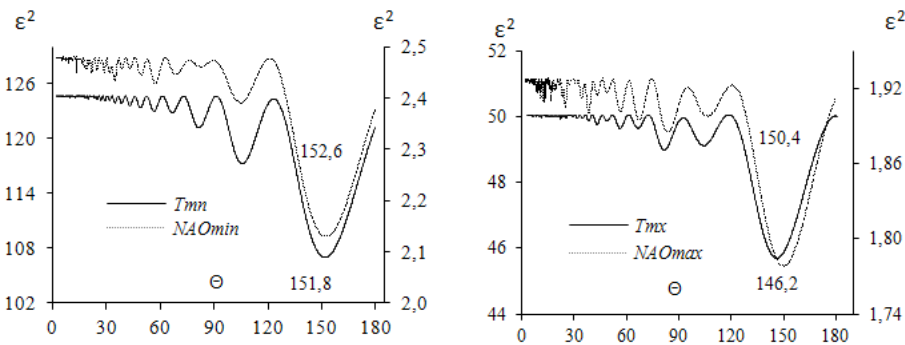
bieństwo między widmami największych średnich dobowych wartości temperatury  $T_{mx}$  i wskaźnika  $NAO_{max}$ . Najdłuższe cykle 146,2 i 150,4 dni o amplitudach 6,03 °C i 1,08 cechują współczynnikami korelacji  $R=0,340$  i  $R=0,428$ , także istotnymi na poziomie 0,01 ( $F_{obl} = 23,66$ ,  $F_{obl} = 40,59$ ).

Przebiegi roczne odchyłek najniższych średnich dobowych wartości temperatury powietrza  $\Delta T_{mn}$  (od cyklu rocznego o okresie 365,25 dni) i wskaźnika  $NAO_{min}$  dobrze opisują sinusoidy regresji o okresach 151,8 i 152,6 dni i współczynnikach korelacji  $R=0,449$  i  $R=0,491$  (istotnych na poziomie 0,01,  $F_{obl} = 40,837$  i  $F_{obl} = 50,089$ ) (ryc. 17).

$$\Delta T_{mn} = 0,172562 + 1,429831 \sin(2\pi t / 151,8 - 2,786798)$$

$$NAO_{min} = -4,55782 + 0,004717t + 0,821807 \sin(2\pi t / 152,6 + 3,115565)$$

Zmiany odchyłek  $\Delta T_{mn}$  i wskaźnika  $NAO_{min}$  w tych cyklach są synchroniczne – ekstrema sinusoid przypadają w przybliżeniu na te same dni.



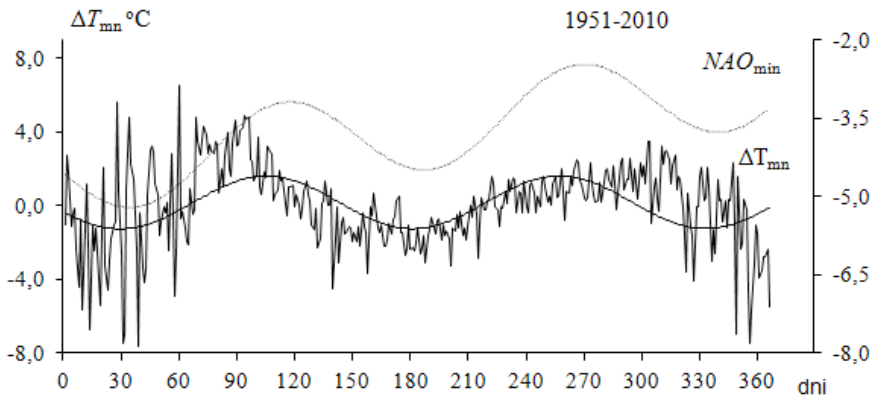
**Ryc. 16.** Widma najniższych i najwyższych średnich dobowych wartości temperatury powietrza ( $T_{mn}$ ,  $T_{mx}$ ) w Warszawie i wskaźnika  $NAO$  ( $NAO_{min}$ ,  $NAO_{max}$ ) (1951-2010)

**Fig. 16.** Spectra of air temperature's daily mean values the lowest and highest ( $T_{mn}$ ,  $T_{mx}$ ) in Warsaw and  $NAO$  index ( $NAO_{min}$ ,  $NAO_{max}$ ) (1951-2010)

## WPLYW AKTYWNOŚCI SŁOŃCA NA TEMPERATURĘ POWIETRZA

Aktywność Słońca w latach 1700-2010 cechuje się cyklicznymi wahaniami od kilku lat do około 180 lat. W widmie średnich rocznych liczb Wolfa wykryto metodą sinusoid regresji istotne statystycznie cykle. Okresy  $\Theta_j$ , amplitudy  $b_j$  i fazy  $c_j$  wyznaczonych cykli w latach 1749-2010 wraz z współczynnikiem korelacji wielokrotnej  $R$  i wartością  $F_{obl}$  testu Fishera-Snedecora zawiera tab. 1.

Największą rolę w kształtowaniu klimatu odgrywa cykl 11-letni aktywności Słońca (najpierw zauważony w przypadku szerokości słoju drzew) o największej



**Ryc. 17.** Synchroniczne zmiany odchyłeń temperatury powietrza  $\Delta T_{mn}$  – cykl 151,8 dni i Oscylacji Północnoatlantyckiej  $\Delta NAO_{min}$  – cykl 152,6 dni

**Fig. 17.** Synchronic changes of deviations of air temperature  $\Delta T_{mn}$  – 151.8 day period and North Atlantic Oscillation  $\Delta NAO_{min}$  – 152.6 day period

amplitudzie  $b = 30,237$  ( $R = 0,500$ ) oraz istotne (na poziomie  $< 0,05$ ) cykle najdłuższe: 103,3 lat i 184,1 lat o amplitudach  $b = 16,334$  ( $R = 0,279$ ) i  $b = 7,398$  ( $R = 0,217$ ).

Interferencję tych 12 cykli aktywności Słońca ( $\Theta$ ) ze składnikiem liniowym  $a_0 + at$  opisuje wzór empiryczny (o współczynniku korelacji wielokrotnej  $R = 0,876$ ):

$$\begin{aligned}
 W(t) = & -108,276943 + 0,083769 t + \\
 & + 11,013533 \sin(0,248425 + 2\pi t/8,5) + 24,122916 \sin(2,393189 + 2\pi t/10,0) + 30,317089 \sin(1,019944 + 2\pi t/11,0) + \\
 & + 17,976641 \sin(-2,665808 + 2\pi t/11,8) + 6,466740 \sin(1,957786 + 2\pi t/14,1) + 6,939187 \sin(-0,541929 + 2\pi t/21,2) + \\
 & + 4,717930 \sin(1,588642 + 2\pi t/30,1) + 7,342614 \sin(-1,613581 + 2\pi t/41,1) + 8,928971 \sin(-1,479890 + 2\pi t/51,8) + \\
 & + 7,468712 \sin(2,626765 + 2\pi t/66,4) + 17,290691 \sin(1,528724 + 2\pi t/103,3) + 9,405199 \sin(-2,733355 + 2\pi t/184,1)
 \end{aligned}$$

**Tabela 1.** Okresy  $\Theta$ , amplitudy  $b$  i fazy  $c$  cykli liczb Wolfa w latach 1749-2010 i \*1700-2010

**Table 1.** Periods  $\Theta$ , amplitudes  $b$  and phases  $c$  of Wolf number cycles in the years 1749-2010 and \*1700-2010

$\Theta$	$b$	$c$	$R$	$F_{obl}$	$\Theta$	$b$	$c$	$R$	$F_{obl}$
8,5	11,02	0,2389	0,189	4,775	30,1	4,572	1,6251	0,098	1,254
10,0	24,158	2,3963	0,399	24,451	41,1	7,131	-1,5085	0,158	3,299
11,0	30,237	1,0218	0,500	43,089	51,8	8,819	-1,4532	0,170	3,865
11,8	17,859	-2,6703	0,273	10,399	66,4	7,792	2,6537	0,164	3,580
14,1	6,411	1,9267	0,142	2,654	103,3	16,334	1,6550	0,279	10,972
21,2	7,001	-0,4033	0,133	2,336	*184,1	7,398	-2,7499	0,217	7,589



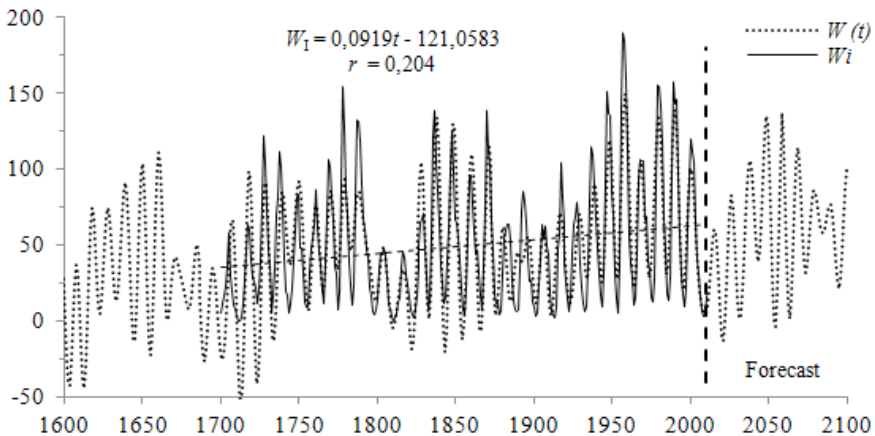
Zmiany aktywności Słońca w latach 1600-2100 – o tendencji rosnącej 9,19/100 lat w przedziale 1700-2010 przedstawiono na ryc. 18.

Przedstawiono też średnie roczne ( $W$ ) i największe dobowe ( $W_{max}$ ) liczby Wolfa w latach 1951-2013 (ryc.19).

Aktywność Słońca ma duży udział w zmianach klimatu Ziemi w XIX-XXI wieku. Świadczą o tym np. zbliżone zmiany średnich rocznych (ruchomych 11-letnich) średniej temperatury powietrza w Europie w latach 1840-1994 z 10 miast europejskich (Paryż, Berlin, Sztokholm, Warszawa, Kraków, Praga, Wiedeń, Tallin, Bazylea i Oksford) i liczb Wolfa (ryc. 20). Tendencje średniej rocznej temperatury powietrza ( $0,713^{\circ}\text{C}/100$  lat) i średnich rocznych liczb Wolfa ( $26,2/100$  lat) i określone równaniami prostych regresji są rosnące, a współczynniki korelacji  $r=0,913$  i  $r=0,612$  są istotne według testu  $t$  Studenta na poziomie  $0,01$ ,  $t_{obl}=29,069$ ,  $t_{obl}=27,298$ :

$$W = 0,262018t - 445,6094$$

$$T = 0,007131t - 5,16899$$



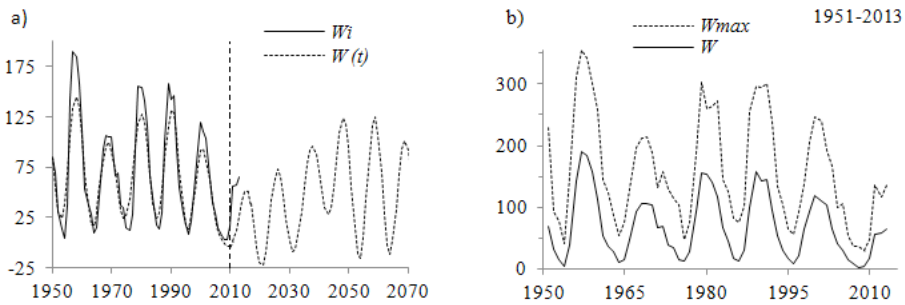
**Ryc. 18.** Zmiany aktywności Słońca  $W$  (liczb Wolfa) w latach 1600-2100 – z rekonstrukcją w latach 1600-1748 i prognozą na lata 2011-2100

**Fig. 18.** Changes of solar activity  $W$  (Wolf number) between 1600 and 2100, with a reconstruction for the period 1600-1748 and a forecast for 2011-2100

Oczywiście także współczynnik korelacji średnich ruchomych 11-letnich wartości temperatury powietrza z tych 10 miejscowości w Europie ( $T_i$ ) i aktywności Słońca ( $W$ )  $r = 0,628$  jest istotny na poziomie  $0,01$ .

Druga połowa XX wieku cechuje się dużym ociepleniem z minimum lokalnym w latach sześćdziesiątych, zbliżonym do minimum lokalnego aktywność Słońca.

O wpływie aktywności Słońca na klimat Europy (i Polski) świadczą również np. synchroniczne wahania średniej szerokości słoików ( $d$ ) pięciu drzew (1 sosna, 3 świerki i 1 modrzew) rosnących w Europie i liczb Wolfa ( $W$ ) w latach 1700-2013 (ryc. 21a). W tym przypadku są to drzewa: *Pinus silvestris* (Fortfjordalen, Norwegia, 1877-1994); *Picea abies* (Falkenstein, Niemcy, 1540-1995; *Fodara Vedla*,



**Ryc. 19.** Zmiany aktywności Słońca (liczb Wolfa) w latach 1950-2067, a)  $W_i$  – zmierzone,  $W(t)$  – prognozy, b)  $W$  – średnie dobowe i  $W_{max}$

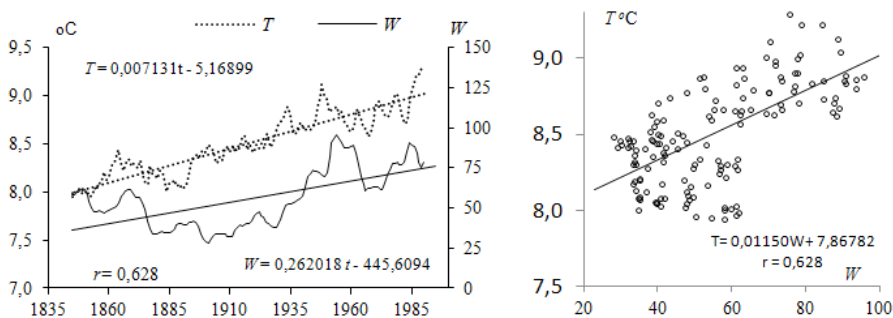
**Fig. 19.** Changes in solar activity (Wolf numbers) in the years 1950-2067, a)  $W_i$  – measured,  $W(t)$  – forecast, b)  $W$  – daily mean and  $W_{max}$

Włochy, 1598-1990; Stonnglandes, Norwegia, 1403-1997) and *Larix decidua* (Pinea, Rosja, 1578-1990. Współczynnik korelacji  $r = 0,236$  między średnią szerokością słoików drzew ( $d$ ) i liczbami Wolfa ( $W$ ) jest istotny na poziomie 0,01 ( $r > r_{0,01}$ ).

Współczynnik korelacji szerokości słoików sosny *Pinus silvestris* (Fortfjordalen, Norwegia, 1877-1994) z liczbami Wolfa jest równy  $r = 0,397$  (ryc. 21b).

### ZALEŻNOŚĆ FAL CHŁODU I CIEPŁA W WARSZAWIE OD MAKSYMÓW DOBOWYCH AKTYWNOŚCI SŁOŃCA (1951-2010)

Posłużenie się wartościami codziennymi z kolejnych 60 lat umożliwia wyznaczenie cykli zmian aktywności Słońca o długościach w przedziale 1-365 dni.

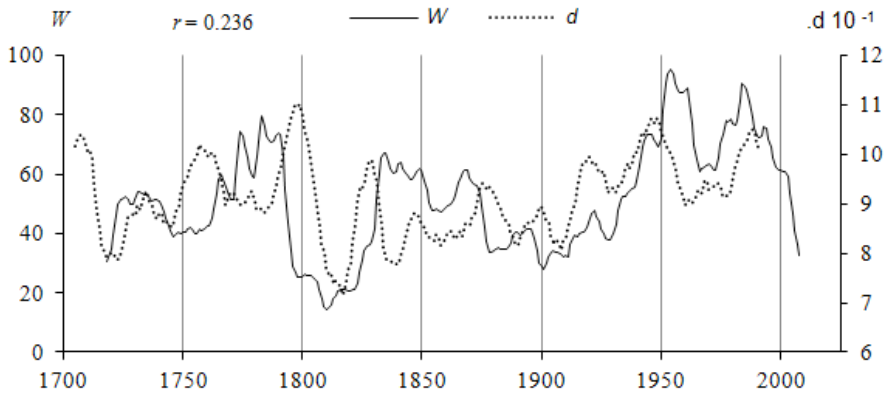


**Ryc. 20.** Zmiany średniej rocznej temperatury powietrza w Europie ( $T$ ) i aktywności Słońca (liczb Wolfa  $W$ ) w latach 1840-1994 (średnie ruchome 11-letnie)

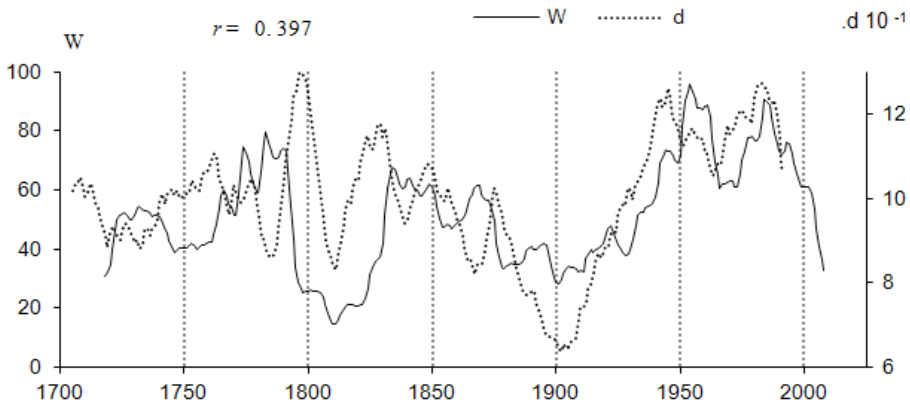
**Fig. 20.** Changes of annual mean air temperature ( $T$ ) in Europe and solar activity (Wolf numbers) in years 1840-1994 (11 year running means)

W widmach średnich dobowych ( $W$ ) i maksimów dobowych liczb Wolfa ( $W_{max}$ ) są obecne najsilniejsze cykle zbliżone do cyklu rocznego (ryc. 22).

a)

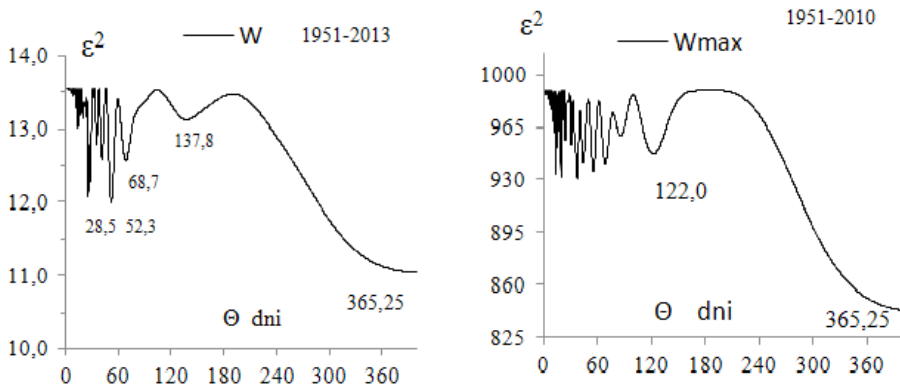


b)



**Ryc. 21.** Synchroniczne wahania szerokości słoików 5 drzew rosnących w Europie i liczb Wolfa w latach 1700-2013 (średnie ruchome 11-letnie), współczynnik korelacji  $r = 0,236$  (a) i szerokości słoików sosny *Pinus silvestris* (Fortfjordalen, Norwegia, 1877-1994) i liczb Wolfa w latach 1700-2013 (średnie ruchome 11-letnie), współczynnik korelacji  $r = 0,397$  (b)

**Fig. 21.** Synchronous fluctuations of the average tree ring widths of 5 trees growing in Europe and Wolf numbers in the years 1700-2010 (11 year running means) correlation coefficient  $r = 0.236$  (a) and tree ring widths of *Pinus silvestris* (Fortfjordalen, Norwegia, 1877-1994) and Wolf numbers in the years 1700-2010 (11 year running means) correlation coefficient  $r = 0.397$  (b)



**Ryc. 22.** Widma dobowych liczb Wolfa ( $W$ , 1951-2013) i  $W_{max}$ , 1951-2010)  
**Fig. 22.** Spectra of daily Wolf numbers ( $W$ , 1951-2013) and  $W_{max}$ , 1951-2010)

Równania sinusoid regresji liczb Wolfa  $W$  1951-2013 (1951-2013) i  $W_{max}$  (1951-2010) o okresie  $\Theta = 365,25$  dni:

$$W_{1951-2013} = 66,832 + 0,00466t + 1,776792 \sin(2\pi t/365,25 - 2,431845)$$

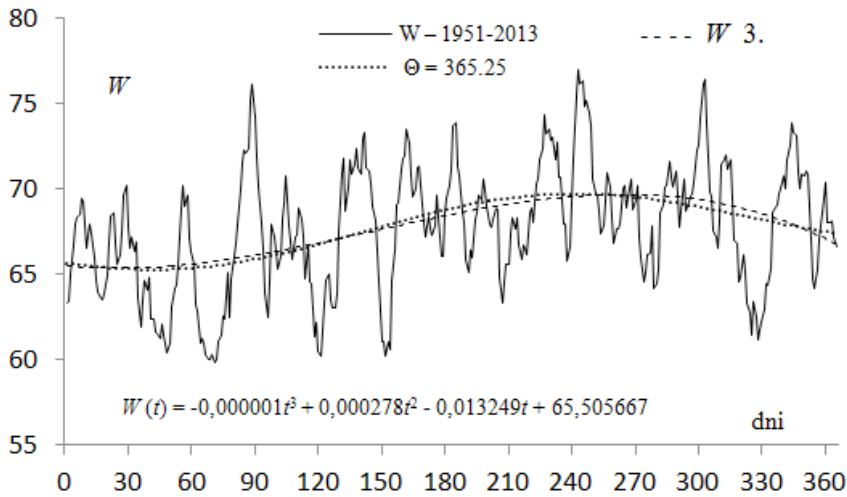
$$W_{max} = 237,2007 + 0,037789t + 12,604851 \sin(2\pi t/365,25 - 2,737850)$$

charakteryzują się istotnymi (na poziomie 0,01,  $F_{kr} = 4,67$ ) współczynnikami korelacji:  $R = 0,433$  i  $R = 0,385$  (wartościach testu Fishera-Snedecora  $F_{obl} = 41,65$  i  $F_{obl} = 29,059$ )

Cykle roczne średnich 60-letnich ( $W$ ) i maksimum dobowych liczb Wolfa ( $W_{max}$ ) są spowodowane ruchem obiegowym Ziemi dookoła Słońca i ruchem obrotowym Słońca. Przyczyną są zarówno zmiany samej aktywności Słońca (w cyklu 11-letnim), jak też wynikają z różnej powierzchni Słońca (tarczy Słońca) skierowanej ku Ziemi.

Ekstrema sinusoidy cyklu rocznego średnich dobowych liczb Wolfa ( $W$ ) w latach 1951-2013 mają minimum (65,268) – w końcu zimy, a maksimum (69,714) – w końcu lata. O przebiegu rocznym liczb Wolfa ( $W$ ) świadczy również wielomian regresji 3. stopnia względem czasu  $t$ , aproksymujący wyniki pomiarów (o istotnym współczynniku korelacji  $R = 0,420$  na poziomie 0,01,  $F_{obl} = 92,05$ ). Ekstrema tego wielomianu – minimum  $W_{min}$  i maksimum  $W_{max}$  prawie pokrywają się z ekstremami sinusoidy regresji ( $\Theta = 365,25$  dni) (ryc. 23).

Przebieg roczny maksimum dobowych liczb Wolfa (obserwowanych z Ziemi), z minimum wiosennym i maksimum jesiennym, można także stwierdzić, aproksymując wyniki pomiarów  $W_{max}$  wielomianem regresji 3. stopnia względem czasu  $t$ . Ekstrema wielomianu  $W_{max}$  i sinusoidy regresji o okresie  $\Theta = 365,25$  dni prawie pokrywają się. Współczynnik korelacji wielokrotnej  $R = 0,387$  – istotny na poziomie 0,01 świadczy o znacznych wahaniami rocznych maksimum liczb Wolfa  $W_{max}$  (ryc. 24).



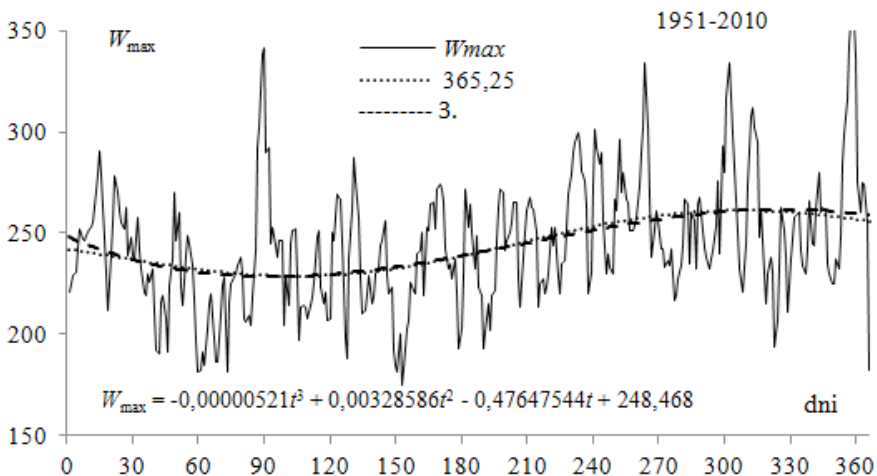
**Ryc. 23.** Przebieg roczny średnich dobowych liczb Wolfa ( $W$ ) w latach 1951-2013

**Fig. 23.** Annual course of daily mean Wolf numbers ( $W$ ) in 1951-2013 years

W widmie średnich dobowych wieloletnich liczb Wolfa jest obecny cykl 28,4 dni:

$$W = 66,630695 + 0,0088075t + 1,865905 \sin(2\pi t/28,5 + 1,847776)$$

o współczynniku korelacji  $R = 0,409$  i zakresie wahań  $2b = 3,732$ . Jest on prawdopodobnie także wywołany ruchem obrotowym Słońca wokół jego osi (od 25,04 do 31 dni).



**Ryc. 24.** Przebieg roczny aktywności Słońca – maksimum dobowych liczb Wolfa ( $W_{max}$ ) (1951-2010)

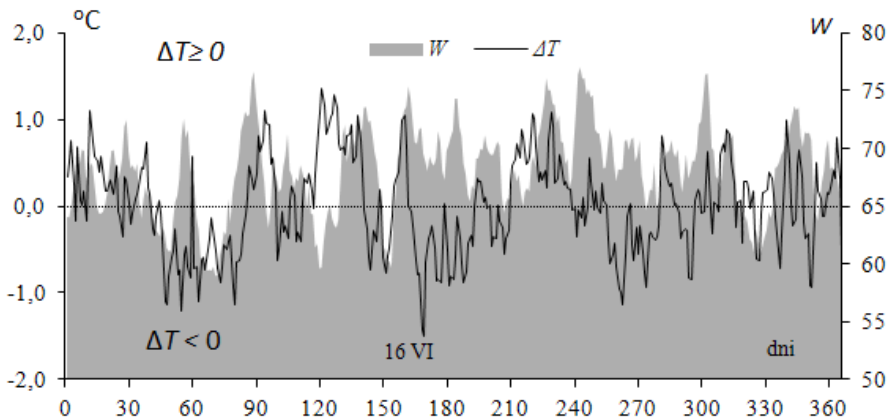
**Fig. 24.** Annual course of solar activity, daily maximum Wolf numbers ( $W_{max}$ ) (1951-2010)

Informacji o dużym wpływie aktywności Słońca na klimat Europy dostarczają porównania przebiegów rocznych odchyień ( $\Delta T$ ) średnich dobowych wartości temperatury powietrza w Warszawie (z 60 lat) od sinusoidy  $f(t)$  o okresie  $\Theta=365,25$  dni z codziennymi zmianami liczb Wolfa – po uśrednieniu w kolejnych dniach 1, 2, ..., 365 (ryc. 25).

Fale chłodu ( $\Delta T < 0$ ) na ogół występują przy małej średniej dobowej (60-letniej) aktywności Słońca ( $W$ ), a fale ciepła ( $\Delta T \geq 0$ ) – przy dużych wartościach dobowych liczb Wolfa ( $W$ ) (ryc. 25).

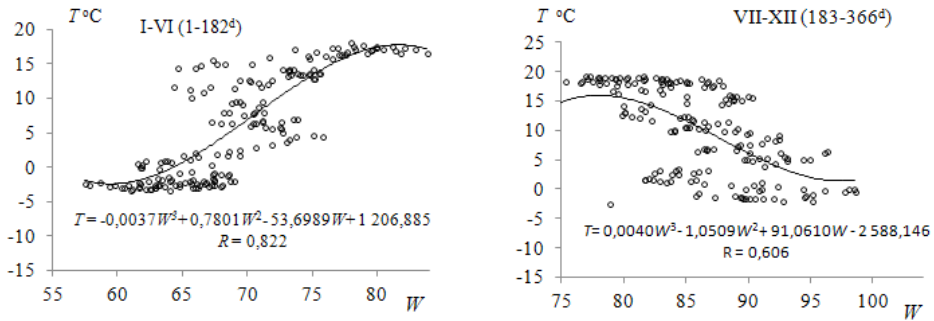
Trzeba zauważyć, że w cyklu rocznym (spowodowanym ruchem obiegowym Ziemi dookoła Słońca) wzrost średniej dobowej temperatury powietrza  $T$  w miesiącach od stycznia do czerwca jest dodatkowo wywołany wzrostem aktywności Słońca (dobowych liczb Wolfa  $W$ ), a spadek od lipca do grudnia – mniejszą aktywnością Słońca  $W$ . Zależność tę opisują dobrze wielomiany regresji 3. stopnia o współczynnikach korelacji wielokrotnej  $R = 0,822$  i  $R = 0,606$  (rys. 26).

W celu wykazania dużej zależności temperatury powietrza w Warszawie od liczb Wolfa w latach 1951-2010 wyznaczono równania i porównano sinusoidy regresji o okresach najdłuższych występujących w widmach oscylacji (bez cyklu rocznego o długości  $\Theta = 365,25$  dni):  $T - 147,9$  dni ;  $W - 133,2$  dn;  $T_{mn} - 151,8$  dn;  $T_{mx} - 146,2$  dni i  $W_{max} = 122,0$  dni. Cykle te charakteryzują się istotnymi współczynnikami korelacji wielokrotnej ( $R$ ) – odpowiednio 0,386, 0,283, 0,453, 0,340 i 0,384 (na poziomie 0,01,  $F_{kr} = 4,67$ ).



**Ryc. 25.** Fale ciepła i chłodu w Warszawie i liczby Wolfa ( $W$ ) w latach 1951-2010,  $\Delta T = T - f(t)$

**Fig. 25.** Warm and cold waves in Warsaw and Wolf numbers ( $W$ ) in years 1951-2010),  $\Delta T = T - f(t)$  deviations of daily mean values ( $T$ )



**Ryc. 26.** Korelacja średniej dobowej temperatury powietrza ( $T$ ) w Warszawie i średnich dobowych liczb Wolfa ( $W$ ) w latach 1951-2010

**Fig. 26.** Correlation of air temperature's daily mean values ( $T$ ) in Warsaw and Wolf numbers ( $W$ ) in years 1951-2010

	$R$	$F_{obl}$
$T = 5,4431 + 0,016665t + 3,4193586\sin(2\pi t/147,9 + 3,064770)$ ,	0,386	31,49
$T_{min} = -5,4719 + 0,026545t + 5,929996\sin(2\pi t/151,8 - 2,916341)$ ,	0,453	46,73
$T_{max} = 14,6991 + 0,011321t + 3,017739\sin(2\pi t/146,2 + 2,916286)$ ,	0,340	23,66
$W = 66,58299 + 0,008651t + 0,971094\sin(2\pi t/133,2 + 1,9481450)$ ,	0,283	15,76
$W_{max} = 225,7675 + 0,100149t + 8,766014\sin(2\pi t/122,0 + 1,430669)$ ,	0,384	31,31

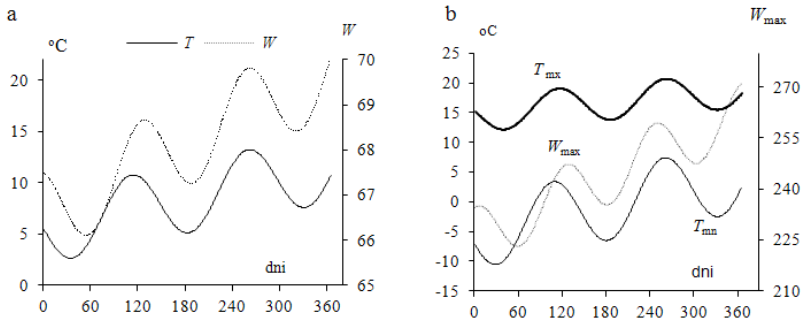
Na uwagę zasługują synchroniczne wahania i tendencje rosnące średniej dobowej temperatury powietrza ( $T$ ) w Warszawie – w cyklu 147,9 dni i średnich dobowych liczb Wolfa ( $W$ ) – w cyklu 133,2 dni (ryc. 27a). Analogiczny wniosek o zależności najniższych ( $T_{mn}$ ) i najwyższych ( $T_{mx}$ ) średnich dobowych wartości temperatury powietrza w Warszawie od maksimum dobowych liczb Wolfa ( $W_{max}$ ) wynika z porównania sinusoid o okresach  $T_{mn}$  – 151,8 dni,  $T_{mx}$  – 146,2 dni i  $W_{max}$  – 122,0 dni (ryc. 27b).

Dużą zależnością od liczb Wolfa wyróżniają się fale ciepła i chłodu ( $\Delta T$ ) w miesiącach zimowych i w marcu (XII-III), w których współczynnik między codziennymi wartościami  $\Delta T$  i  $W_{max}$  wynosi  $r = 0,408$  (ryc. 28).

Interesująca jest „równoległość” zmian odchyleń najniższych średnich dobowych wartości temperatury powietrza  $\Delta T_{mn} = T - f_1(t)$  i maksimum ( $W_{ma}$ ) liczb Wolfa (ryc. 29).

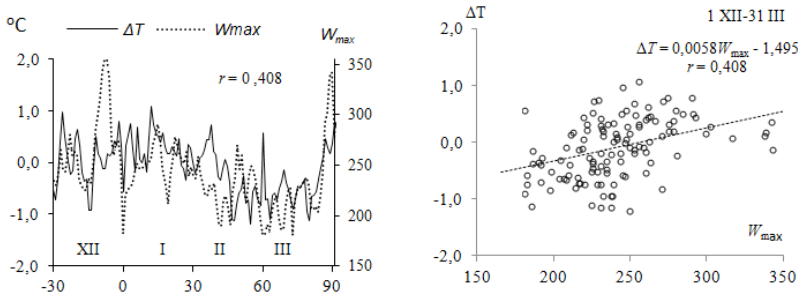
O zależności odchyleń najniższych ( $\Delta T_{Mn}$ ) średnich dobowych wartości temperatury powietrza w Warszawie od maksimum liczb Wolfa ( $W_{max}$ ) w dniach 90-366 (IV-XII) świadczy „równoległość” wykresów – koincydencja ekstremów wielomianów regresji 3. stopnia  $\Delta T_{mn}$  i  $W_{max}$  względem czasu  $t$  (o istotnych statystycznie współczynnikach korelacji wielokrotnej  $R = 0,761$  i  $R = 0,408$ ) (ryc. 30).

Synchroniczne (na ogół) są zmiany odchyleń najwyższych średnich dobowych wartości temperatury powietrza  $\Delta T_{mx} = T - f_2(t)$  i maksimum liczb Wolfa ( $W_{max}$ ) (ryc. 31).



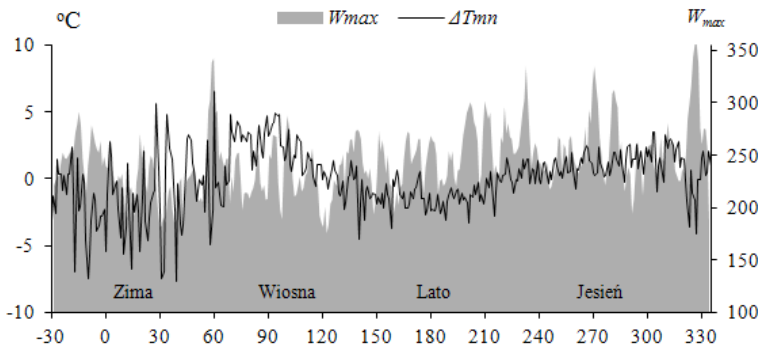
**Ryc. 27.** Zmiany roczne temperatury powietrza w Warszawie i liczb Wolfa (1951-2010); a) średnich dobowych wartości ( $T$ ,  $W$ ); b) najmniejszych ( $T_{mn}$ ) i największych ( $T_{mx}$ ) średnich dobowych wartości temperatury i  $W_{max}$

**Fig. 27.** Annual course of air temperature in Warsaw and Wolf numbers; a) daily mean values ( $T$ ,  $W$ ); b) lowest and highest values ( $T_{mn}$ ,  $T_{mx}$ ) and  $W_{max}$



**Ryc. 28.** Fale ciepła ( $\Delta T \geq 0$ ) i chłodu ( $\Delta T < 0$ ) w Warszawie i dobowe liczby Wolfa ( $W_{max}$ ) w okresie XII-III (1951-2010)

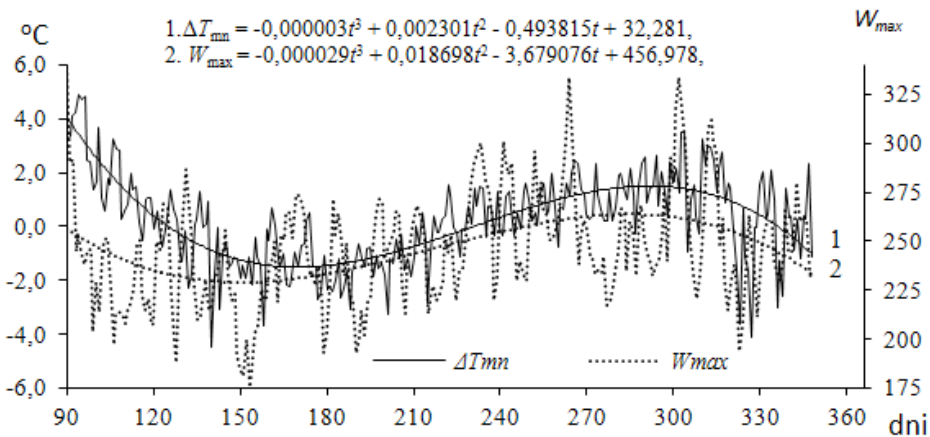
**Fig. 28.** Warm ( $\Delta T \geq 0$ ) and cold ( $\Delta T < 0$ ) waves in Warsaw and daily Wolf numbers ( $W_{max}$ ) at XII-III (1951-11951)



**Ryc. 29.** Przebieg roczny odchyłeń najniższych średnich dobowych wartości temperatury powietrza  $\Delta T_{mn} = T_{mn} - f_j(t)$  w Warszawie (1951-2010) i maksimum ( $W_{max}$ ) liczb Wolfa (największych) w okresie 60 lat (1951-2010)

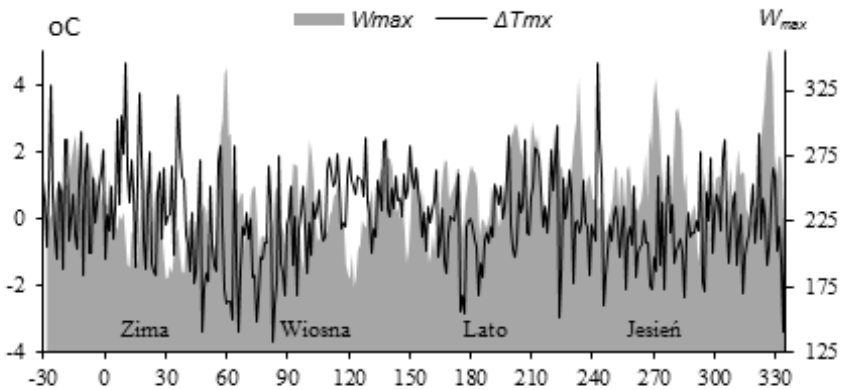
**Fig. 29.** Annual course of deviations  $\Delta T_{mn} = T_{mn} - f_j(t)$  of air temperature's the lowest values ( $T_{mn}$ ) in Warsaw and Wolf numbers and  $W_{max}$  – the highest ones in the 60-year period (1951-2010)





**Ryc. 30.** Przebieg roczny odchyień ( $\Delta T_{mn}$ ) najniższych wartości temperatury powietrza ( $T_{mn}$ ) w okresie 60 lat w Warszawie od sinusoidy  $f_1(t)$  i maksima dobowe liczb Wolfa (1951-2010)

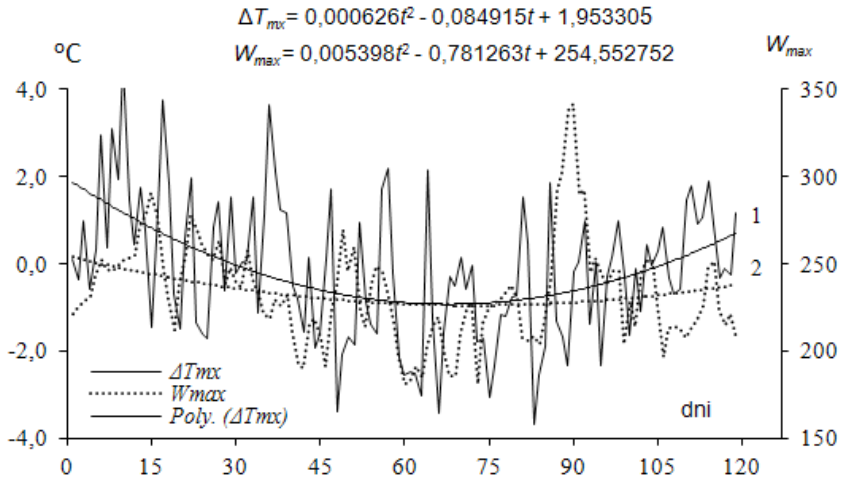
**Fig. 30.** Annual course of deviations ( $\Delta T_{mn}$ ) the lowest ( $T_{mn}$ ) of air temperature in Warsaw – in the 60-year period from sinusoid  $f_1(t)$  and maximum daily of Wolf numbers (1951-2010)



**Ryc. 31.** Przebieg roczny odchyień największych średnich dobowych wartości temperatury powietrza  $\Delta T_{mx} = T_{mx} - f_2(t)$  w Warszawie (1951-2010) i największych liczb Wolfa ( $W_{max}$ ) w okresie 60 lat 1951-2010

**Fig. 31.** Annual course of deviations  $\Delta T_{mx} = T_{mx} - f_2(t)$  of highest values of air temperature in Warsaw and the highest of Wolf numbers ( $W_{max}$ ) the 60-year period 1951-2010

Przebiegi odchyień największych średnich dobowych wartości temperatury powietrza ( $\Delta T_{mx}$ ) w Warszawie i maksimów liczb Wolfa ( $W_{max}$ ) w dniach 0-120 (I-IV) opisano wielomianami regresji 2. stopnia  $\Delta T_{mx}$  i  $W_{max}$  względem czasu  $t$  (współczynniki korelacji wielokrotnej  $R = 0,459$  i  $R = 0,251$  są istotne na poziomie 0,01). Wierzchołki tych parabol regresji (minima) występują prawie w tym samym czasie ( $\Delta T_{mx} - t = 67,8^d$  i  $W_{max} - t = 72,4$  dni) (ryc. 32).



**Ryc. 32.** Przebieg roczny odchylen ( $\Delta T_{mx}$ ) najwyższej średniej dobowej temperatury powietrza ( $T_{mx}$ ) w okresie 60 lat w Warszawie od sinusoidy  $f_2(t)$  i maksimum ( $W_{max}$ ) liczb Wolfa (1951-2010)

**Fig. 32.** Annual course of deviations ( $\Delta T_{mx}$ ) the lowest ( $T_{mx}$ ) of air temperature in Warsaw – in the 60-year period from sinusoid  $f_2(t)$  and Wolf numbers's maximum ( $W_{max}$ ) (1951-2010)

## PODSUMOWANIE

Posłużenie się wartościami codziennymi temperatury powietrza w Warszawie i liczb Wolfa (z  $365,25 \cdot 60 = 21915$  dni) 1951-2010 umożliwiło określenie zależności fal chłodu i ciepła od aktywności Słońca i od Oscylacji Północnoatlantycznej, uwarunkowanej zmianami cyrkulacji atmosferycznej.

Interesujące jest duże podobieństwo widm najniższych średnich dobowych wartości temperatury powietrza ( $T_{mn}$ ) w Warszawie i najmniejszych średnich dobowych wartości wskaźnika Oscylacji Północnoatlantycznej ( $NAO_{min}$ ). Świadczy o tym obecność w widmach zbliżonych okresów 151,8 i 152,6 dni o dużych amplitudach:  $T_{mn} - 11,84^\circ\text{C}$  i  $NAO_{min} - 1,644$ . Jest także duże podobieństwo między widmami najwyższych średnich dobowych wartości temperatury ( $T_{mx}$ ) i wskaźnika  $NAO_{max}$ , w których są obecne zbliżone cykle 146,2 i 150,4 dni o amplitudach  $6,03^\circ\text{C}$  i 1,08. Okazało się również, że ekstrema (maksima i minima) sinusoid regresji występują w tym samym czasie.

W widmach średnich dobowych ( $W$  – w latach 1951-2013) i maksimum liczb Wolfa ( $W_{max}$  – w latach 1951-2010) są obecne najsilniejsze cykle roczne:  $\Theta = 365,25$  dni i  $\Theta = 365,25$  o istotnych (na poziomie 0,01) współczynnikach korelacji  $R = 0,433$  i  $R = 0,385$ .

O wahaniach rocznych maksimum liczb Wolfa świadczą również ekstrema wielomianu regresji 3. stopnia  $W_{max}$  względem czasu  $t$  – o współczynniku korelacji  $R = 0,387$  (istotnym na poziomie 0,01). Minimum tego wielomianu 3. stopnia

przypada także na wiosnę, a maksimum – na jesień.

Informacji o wpływie aktywności Słońca na fale chłodu i ciepła dostarczają porównania przebiegów rocznych odchyłeń ( $\Delta T$ ) średnich dobowych wartości temperatury powietrza w Warszawie (z 60 lat) od sinusoidy  $f(t)$  o okresie  $\Theta=365,25$  dni z codziennymi zmianami liczb Wolfa – po uśrednieniu w kolejnych dniach 1, 2, ..., 365. Na ogół fale chłodu ( $\Delta T < 0$ ) występują przy małej średniej dobowej aktywności Słońca ( $W$ ), a fale ciepła ( $\Delta T \geq 0$ ) – przy dużych wartościach dobowych liczb Wolfa ( $W$ ).

O dużej zależności temperatury powietrza w Warszawie od liczb Wolfa świadczą równania sinusoidy regresji o zbliżonych najdłuższych okresach obecnych w widmach oscylacji (bez cyklu rocznego o długości  $\Theta=365,25$  dni):  $T - 147,9$  dni,  $W - 133,2$  dni,  $T_{mn} - 151,8$  dni,  $T_{mx} - 146,2$  dni, i  $W_{max} - 122,0$  dni. Cykle te charakteryzują się istotnymi współczynnikami korelacji wielokrotnej – odpowiednio  $R = 0,386$ ,  $R = 0,283$ ,  $R = 0,453$ ,  $R = 0,340$ ,  $R = 0,384$  (istotnymi na poziomie 0,01,  $R_{kr} = 0,160$ ). Na uwagę zasługują podobne wahania i tendencje rosnące średniej dobowej temperatury powietrza ( $T$ ) w Warszawie – w cyklu 147,9 dni i średnich dobowych liczb Wolfa ( $W$ ) – w cyklu 133,2 dni. Analogiczny wniosek o prawdopodobnej zależności najniższych i najwyższych średnich dobowych wartości temperatury powietrza w Warszawie ( $T_{mn}$ ,  $T_{mx}$ ) od maksimum liczb Wolfa ( $W_{max}$ ) wynika z porównania sinusoid o okresach  $T_{mn} - 151,8$  dni,  $T_{mx} - 146,2$  dni i  $W_{max} - 122,0$  dni.

O „równoległości” rocznych zmian odchyłeń ( $\Delta T_{min}$ ) najniższych średnich dobowych wartości temperatury powietrza w Warszawie i maksimum codziennych liczb Wolfa ( $W_{max}$ ) w dniach 90-366 (IV-XII) świadczy także porównanie wykresów wielomianów regresji 3. stopnia  $\Delta T_{min}$  i  $W_{max}$  względem czasu  $t$  (o istotnych statystycznie współczynnikach korelacji wielokrotnej  $R=0,761$  i  $R=0,408$ ). Na „synchroniczność” wahań odchyłeń ( $\Delta T_{mx}$ ) największych średnich wartości dobowych temperatury powietrza w Warszawie i maksimum dobowych liczb Wolfa ( $W_{max}$ ) w dniach 0-120 (I-IV) wskazują również wielomiany regresji 2. stopnia (parabole)  $\Delta T_{mx}$  i  $W_{max}$  względem czasu  $t$  o współczynnikach korelacji wielokrotnej  $R=0,459$  i  $R=0,249$  (istotnych na poziomie 0,01). Dużą zależnością od liczb Wolfa wyróżniają się fale ciepła i chłodu ( $\Delta T$ ) w miesiącach zimowych i w marcu (XII-III), w których współczynnik korelacji między codziennymi wartościami  $\Delta T$  i  $W_{max}$  wynosi  $r = 0,408$ .

## Literatura

- Boryczka J., 2010, Metoda J. Boryczki „sinusoid regresji” badań okresowości zmiennych przyrodniczych, [w:] K. Błażejczyk, M. Stopa-Boryczka, J. Boryczka, J. Wawer, W. Żakowski (red.), Atlas współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce 25, Zmiany klimatu Warszawy i innych miast Europy w XVII-XXI wieku, Wyd. UW, Warszawa, 71-87.
- Chromov S.P., Mamontova L.J., 1963, Meteorologičeskij slovar, Leningrad, Gidrometeoizdat.
- Flohn H., 1942, Witterung und Klima in Deutschland, Forschungen zur Deutsche Landeskunde 41, Leipzig, Verlag von S. Hirzel.
- Flohn H., 1954, Witterung und Klima in Metteleuropa, Forschungen zur Deutsche Landeskunde 78, Stuttgart, S. Hirzel Verlag.
- Glossary of Meteorology*, 2000, (red.) T.S. Glickman, American Meteorology Society, Boston.
- Gumiński R., 1952, Materiały do poznania genezy i struktury klimatu Polski (fakty i problemy), *Prz. Geogr.* 24, 3, oraz 1998, *Prace i Studia Geograficzne* 22, 119-144.
- 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, *Int. J. Climatol.* 17, 1433-1450.
- Kossowska-Cezak U., 1994, O „monsunie europejskim”, *Prz. Geof.* 39, 1, 65-73.
- Marsz A.A. (red.), 1999, Wpływ stanu termicznego powierzchni oceanu na modyfikacje cyrkulacji atmosferycznej w wymiarze klimatologicznym, Conference proceedings, Gdynia, 6 May 1999.
- Rakipova L.R., 1960, O wozdiejstwie solniecznoj aktiwnosti na obszczuju cirkulaciju atmosfery, *Astronom. Sbornik*, III i IV.
- Reznikov A.P., 1982, Priedskazanije jestiestwiennych processow obuczajuszcziesja sistiemoj, Nowosybirsk.
- Romer E., 1949, Regiony klimatyczne Polski, *Prace Wrocławskiego Towarzystwa Naukowego*, seria B, 16 oraz (1962), Wybór prac 3, PWN, Warszawa.
- Słownik meteorologiczny*, 2003, T. Niedźwiedz (red.), Warszawa, PT Geof./IMGW.
- Stopa-Boryczka M., Boryczka J., Tońska M., 2006, Fale chłodu i ciepła w przebiegu rocznym temperatury powietrza w Polsce, [w:] Prognozy pogody w przysłowiach i ich sprawdzalność w Polsce. Materiały Zakładu Klimatologii WGSR UW z X Pikniku Naukowego Radia BIS (3 VI 2006). Wyd. WG i SR UW, Warszawa.
- Tońska M., 2006, Wartość prognostyczna niektórych przysłów dotyczących pogody, Praca magisterska w Zakładzie Klimatologii WGiSR UW.
- Stopa-Boryczka M., Boryczka J., Kossowska-Cezak U., Wawer J., 2011a, Fale chłodu i ciepła w przebiegu rocznym temperatury powietrza w Warszawie (1951-2010), *Prz. Geof.* 56, 3-4, 181-200
- Stopa-Boryczka M., Boryczka J., Kossowska-Cezak U., Wawer J., 2011b, Heat and cold waves in an annual cycle air temperatures in Warsaw (1951-2010), *Miscellanea Geographica* 15, 103-114.
- Stopa-Boryczka M., Boryczka J., Wawer J., Grabowska K., Dobrowolska M., Osowiec M., Błażek E., Skrzypczuk J., Grzęda M., 2012, Fale chłodu i ciepła w przebiegu rocznym temperatury powietrza w Warszawie (1951-2010), [w:] K. Błażejczyk, M. Stopa-Boryczka, J. Boryczka, J. Wawer, W. Żakowski (red.) Atlas współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce 26-27, Z badań klimatu Mazowsza (z uwzględnieniem większych miast), Wyd. UW, Warszawa, 43-53.

### Summary

The paper discusses the dependency of the annual patterns of average air temperature on the annual patterns of solar activity, as driven by the movement of the Earth's orbit and the Sun's rotation. The temperatures were taken from the Warsaw Okęcie weather station and covered the period 1951-2010. The study found synchronic fluctuations and a statistically significant correlation of the 60-year average daily temperature ( $T$ ), average minimum daily temperature ( $T_{min}$ ) and average maximum daily temperature ( $T_{max}$ ) with the Wolf numbers (60-year daily averages  $W$  and maximums  $W_{max}$ ). Cold waves and heat waves were defined as deviations, i.e. differences (balances)  $\Delta T = \epsilon_i = T_i - f(t_i)$ , where:  $T_i$  – average daily measured values,  $f(t_i)$  – values calculated according to the sinusoidal regression formula and a period of  $\Theta = 365.25$  days. Cold waves (typically  $\Delta T < 0$ ) occurred at low daily average values of solar activity ( $W$ ) (based on the 60-year average), while heat waves ( $\Delta T \geq 0$ ) coincided with high daily Wolf numbers ( $W$ ). Strong cycles (365.25 and 147.9 days long) were found in the spectra of the 60-year average daily temperature oscillations. These were similar to the strongest daily average cycles of the Wolf numbers ( $W$ ) (i.e. 365.25 and 133.0 days) and their multiple correlation coefficients were significant (at 0.01 according to the Fisher-Snedecor test). The periods of air temperature change and solar activity have a similar length and the extremes of the sinusoids of regression and regression polynomials approximating the annual patterns fall approximately on the same days. The annual pattern of the maximums of the Wolf numbers ( $W_{max}$ ) are confirmed by a regression polynomial of the 3rd order in the function of time  $t$  (with a minimum in spring and a maximum in autumn) with a correlation coefficient  $R = 0.387$  (significant at  $p < 0.01$ ). The oscillation spectra of the lowest daily air temperature values ( $T_{min}$ ) in Warsaw and of the  $NAO_{min}$  values involve nearly the same strong cycles, i.e. 151.8 and 152.6 days (with multiple correlation coefficients of  $R = 0.453$  and  $R = 0.491$ ). The cycles of change in the daily air temperature, the  $NAO$  coefficient and the Wolf number values were determined using the sinusoidal regression method (Boryczka 2010).

