

IX. ZMIANY WIEKOWE KLIMATU POLSKI. NA PRZYKŁADZIE WARSZAWY

Zmiany klimatu Ziemi i ich przyczyny są głównym problemem badań współczesnej klimatologii – objętym programem Światowej Organizacji Meteorologicznej. Temat ten podjęto w siódmym tomie *Atlasu*:

– Stopa-Boryczka M, Boryczka J., Kicińska B., Żmudzka E., 1992, *Atlas współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce*, t. VII. *Zmiany wiekowe klimatu Polski* (red. M. Stopa-Boryczka), Wyd. UW, ss. 439.

Głównym celem pracy jest określenie cyklicznych zmian i tendencji klimatu Polski na przykładzie Warszawy. Zbadano ciągi chronologiczne: aktywności Słońca (liczb Wolfa) – w latach 1749-1983, cyrkulacji atmosferycznej (wschodniej, zachodniej, południkowej) – w latach 1891-1976 wg klasyfikacji Wangerheima, temperatury powietrza i opadów atmosferycznych w Warszawie w latach 1779-1979 i 1813-1980.

Zasadniczą część *Atlasu* stanowią wyniki badań cykliczności zmian klimatu z zastosowaniem oryginalnej metody wyznaczania widm i optymalnych okresów, wprowadzonej przez J. Boryczkę (1984).

Innym rozwiązywanym w *Atlasie* problemem jest modelowanie naturalnych wahań i antropogenicznych zmian klimatu. W serii pomiarowej temperatury powietrza w Warszawie wyodrębniono dwa składniki: naturalny i antropogeniczny. Składnik naturalny to wypadkowa $f(t)$ interferencji cykli, a składnik antropogeniczny – to część liniowa at trendu czasowego. Współczynnik regresji cząstkowej $a \geq 0$ wskazuje tendencję rosnącą zmian antropogenicznych.

Istotne znaczenie poznawcze ma określenie przyczyn naturalnych wahań klimatu Polski. Ekstrapolując trendy czasowe – wynikające z interferencji cykli temperatury i opadów opracowano unikatowe (w krajowej i zagranicznej literaturze) prognozy zmian klimatu Warszawy w XXI wieku.

Według prof. J. Kondrackiego: *Praca ta stanowi znaczący wkład Zakładu Klimatologii Uniwersytetu Warszawskiego w badania współczesnych zmian klimatu Ziemi i ich przyczyn.*

Ważniejsze wyniki badań

W pracy określono naturalne i antropogeniczne zmiany wiekowe klimatu Polski wraz z prognozą sięgającą po rok 2100. Zbadano ciągi chronologiczne: plam słonecznych (liczb Wolfa, 1749-1980), cyrkulacji atmosferycznej (wschodniej, zachodniej, południkowej wg Wangerheima, 1891- 1976) oraz temperatury powietrza (1779-1979) i opadów atmosferycznych (1813-1980) w Warszawie. Analizie poddano miesięczne, sezonowe, półroczne i roczne wartości.

Metody statystyczne stosowane dotychczas: analiza harmoniczna – wyznaczanie kolejnych wyrazów szeregu Fouriera, analiza spektralna – metoda autokorelacyjna niezbyt nadają się do badań periodycznych zmian klimatu. Niedoskonałością analizy harmonicznej jest założenie fikcyjnych okresów: $n, \frac{n}{2}, \frac{n}{3}, \dots$. Okresy te, otrzymane z podziału arbitralnego długości ciągu chronologicznego na dwie, trzy itd. części, nie pokrywają się z okresami rzeczywistymi (prawdziwymi). Tylko niektóre z harmonik mogą przypadkowo być takie same jak okresy rzeczywiste. Metodą tą nie można wykryć okresów między: n i $\frac{n}{2}$; $\frac{n}{2}$ i $\frac{n}{3}$ itd..

SPIS TREŚCI (7)

PRZEDMOWA	5
I. WSTĘP	9
II. METODY BADAŃ ZMIAN KLIMTU WPROWADZONE PRZEZ ZAKŁAD KLIMATOLOGII UNWERSYTETU WARSZAWSKIEGO	11
1. Teoria analizy oscylacji i rzeczywistych okresów	13
2. Modelowanie naturalnych zmian klimatu	17
3. Modelowanie antropogenicznych zmian klimatu	18
III. CYKLICZNE ZMIANY AKTYWNOŚCI SŁOŃCA	29
1. Chronologiczny ciąg liczb Wolfa	29
2. Rzeczywiste cykle liczb Wolfa	32
3. Trend wiekowy aktywności Słońca	35
IV. ZMIANY OKRESOWE CYRKULACJI ATMOSFERYCZNEJ	96
1. Cyrkulacja wschodnia	97
2. Cyrkulacja zachodnia	100
3. Cyrkulacja południkowa	103
V. TREND WIEKOWY TEMPERATURY POWIETRZA W POLSCE	280
1. Widma oscylacji temperatury powietrza	282
2. Naturalna i antropogeniczne zmiany temperatury powietrza	285
3. Prognoza temperatury powietrza w stuleciu XXI	287
VI. TREND WIEKOWY OPADÓW ATMOSFERYCZNYCH W POLSCE	349
1. Widma oscylacji opadów atmosferycznych	352
2. Naturalne i antropogeniczne zmiany opadów atmosferycznych	353
3. Prognoza opadów atmosferycznych w stuleciu XXI	356
VII. ZAKOŃCZENIE	416
SUMMARY	426
LITERATURA	434

Powszechnie zaś stosowaną metodą autokorelacyjną można wykrywać w zasadzie tylko okresy zmian bardzo krótkie (o dużej częstotliwości). Współczynniki autokorelacji między ciągiem chronologicznym pierwotnym i ciągami otrzymanymi z translacji osi czasu o 1, 2, 3, ..., k jednostek są obliczane na podstawie coraz to mniejszej liczby $n - k$ danych. Prowadzi to do ograniczeń jej stosowalności do okresów nie przekraczających $k = \frac{n}{2}$. Nowością w badaniach sekularnych zmian klimatu jest analiza oscylacji – wyznaczenie widma oscylacji i rzeczywistych okresów (metoda Boryczki). Nie ma ona żadnego z wymienionych ograniczeń stosowalności. Ciąg chronologiczny (także niekompletny) pomiarów wykonanych w dowolnych odstępach czasu jest aproksymowany kolejnymi sinusoidami regresji:

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

o zadanym paśmie oscylacji, np. $\theta = \frac{1}{12}, \frac{2}{12}, \dots, N$, gdzie $N \geq n$.

Metodą tą otrzymuje się

$\vec{b} = b_1, \dots, b_N$ – empiryczne widmo oscylacji

$\vec{c} = c_1, \dots, c_N$ – fazy początkowe

$\vec{R} = R_1, \dots, R_N$ – oscylogram korelacji.

Poszukiwane okresy rzeczywiste Θ_j – to maksima lokalne widma oscylacji (ciągu amplitud). Odpowiadają im w przybliżeniu minima wariancji resztkowej i mak-

sima współczynnika korelacji wielokrotnej R_j . Amplitudy b_j są weryfikowane testem Fishera-Snedecora o 2 i $n-3$ stopniach swobody.

Znalezienie ukrytego okresu Θ_j – sinusoidy regresji o amplitudzie b_j i przesunięciu fazowym c_j – sprowadza się do wyznaczenia równania płaszczyzny regresji:

$$y = a_0 + \alpha x_1 + \beta x_2$$

względem zmiennych czasowych $x_1 = \sin \frac{2\pi}{\Theta} t$, $x_2 = \cos \frac{2\pi}{\Theta} t$. Amplituda (b) zmian i przesunięcie fazowe (c) są określone wzorami

$$b = (\alpha^2 + \beta^2)^{0.5}, \quad \text{tg } c = \frac{\beta}{\alpha}$$

gdzie kąt c spełnia warunki $\alpha = b \cos c$, $\beta = b \sin c$.

Widma oscylacji \vec{b} i wektory faz wykorzystano do identyfikacji przyczyn zmian klimatu. Widma oscylacji \vec{b} przyczyn (aktywności Słońca), mechanizmu przenoszenia na Ziemię (cyrkulacji atmosferycznej) i elementów klimatu (temperatura powietrza, opady) powinny być identyczne. W tej samej epoce czasu $\langle 0, t \rangle$ powinny być także zbliżone wektory przesunięć fazowych \vec{c} , tj. cykle synchroniczne.

Okresy rzeczywiste Θ_j zastosowano do wyznaczania trendów czasowych:

$$y = f(t) = a_0 + \sum_{j=1}^k b_j \sin \left(\frac{2\pi}{\Theta_j} t + c_j \right)$$

składając (wg rachunku najmniejszych kwadratów (sinusoidy regresji o rzeczywistych okresach, zweryfikowanych testem Fishera-Snedecora o $2k$ i $n-2k-1$ stopniach swobody).

Innym rozwiązywanym w *Atlasie* problemem jest modelowanie naturalnych i antropogenicznych zmian klimatu. Zmierzone wartości np. temperatury powietrza (y) są sumą składników naturalnego (y_0) i antropogenicznego (Δy). Istnieje możliwość wyodrębnienia składnika naturalnego, gdy ulega on periodycznym zmianom. Wypadkową tych naturalnych zmian można opisać kilkoma lub kilkunastoma sinusoidami o wykrytych rzeczywistych okresach.

Natomiast miarą antropogenicznych zmian jest składnik liniowy $\Delta y = at$ trendu czasowego

$$T = F(t) = a_0 + \underbrace{\underbrace{at}_{\text{ziany antropogeniczne}} + \sum_{j=1}^k b_j \sin \left(\frac{2\pi}{\Theta_j} t + c_j \right)}_{\text{zmiany naturalne}}$$

Współczynnik regresji cząstkowej a może wskazywać tendencję wzrostową ($a > 0$) lub spadkową ($a < 0$) zmian antropogenicznych. Może on także aproksymować zmiany naturalne – odcinek sinusoidy o bardzo długim nieznanym okresie.

Różnica między składnikami liniowymi $\Delta y_1 - \Delta y_2 = (a_1 - a_2) t$ trendów czasowych dwóch sąsiednich miejscowości (1 i 2) wynika z wpływu czynników antropogenicznych. Widma oscylacji, charakteryzujące naturalne zmiany są w sąsiednich miastach takie same

$$\vec{b}_1 \approx \vec{b}_2$$

Cykle rzeczywiste liczby plam słonecznych (W), cyrkulacji atmosferycznej (wschodniej C_E , zachodniej C_W , południkowej C), temperatury powietrza (T) i opadów atmosferycznych (P) i trendy czasowe, które są ich wypadkową, wskazują, iż zmiany klimatu Polski w XIX - XX wieku były kształtowane głównie przez aktywność Słońca. Minimum absolutne aktywności Słońca przypada na najslabszy cykl pojedynczy 1811 -

1823, a maksimum – na najmocniejszy cykl 1959 -1964. Maksimum absolutne aktywności Słońca 189,9 wystąpiło w roku 1957. Te ekstrema absolutne liczby plan słonecznych były wywołane nałożeniem się 4 głównych cykli:

$$W = 50,41 + 27,45 \sin\left(\frac{2\pi}{11} t + 1,071\right)$$

$$W = 50,17 + 12,80 \sin\left(\frac{2\pi}{59} t - 1,901\right)$$

$$W = 48,09 + 18,84 \sin\left(\frac{2\pi}{91} t + 0,012\right)$$

$$W = 46,51 + 9,856 \sin\left(\frac{2\pi}{79} t - 1,32\right), \text{ (dane 1700-1978)}$$

Oto daty minimów i maksimumów tych sinusoid regresji:

Cykl	minima	maksima
11 lat	1810	1959
59 lat	1811	1959
91 lat	1817	1954
179 lat	1871	1960

Liczba plan słonecznych cechuje się stałą tendencją wzrostową $\frac{\partial W}{\partial t} = 8/100$ lat.

Minimum absolutne średniej rocznej temperatury powietrza $T_{\min} = 6,5^{\circ}\text{C}$ (wg trendu $F(t)$ przypada na rok 1823, w którym wystąpiło minimum absolutne aktywności Słońca (1811- 1823 – najsłabszy cykl). Maksimum zaś absolutne $T_{\max} = 8,5^{\circ}\text{C}$ nieco wyprzedza datę maksimum absolutnego aktywności Słońca (1957).

Temperatura powietrza, podobnie jak aktywność Słońca w ostatnich dwóch stuleciach, wzrastała o $0,6^{\circ}\text{C}/100$ lat:

$$W = 36,10 + 0,0803 t, \quad (1779 - 1979)$$

$$T = 6,88 + 0,0058 t, \quad (1700 - 1978)$$

Ten stały wzrost średniej rocznej temperatury powietrza w Warszawie jest wynikiem nakładania się naturalnych cykli – głównie 89 lat i 194 lat. To postępujące ocieplenie klimatu w XVIII-XX wieku jest prawdopodobnie uwarunkowane wzrostem aktywności Słońca. Temperatura powietrza jest dodatnio skorelowana z liczbą plam słonecznych.

Cykle rocznych wartości temperatury powietrza – 60 lat, aktywności Słońca – 59 lat i cyrkulacji południkowej – 61 lat są synchroniczne:

$$T = 7,45 + 0,133 \sin\left(\frac{2\pi}{60} t + 1,363\right)$$

$$W = 50,17 + 12,8 \sin\left(\frac{2\pi}{59} t - 1,90\right)$$

$$C = 95,09 + 19,68 \sin\left(\frac{2\pi}{61} t + 1,525\right)$$

Maksima tych sinusoid regresji występują mniej więcej w tym samym czasie:

T_{\max}	1780	1840	1900	1960	2020
W_{\max}	1781	1840	1899	1958	2017
C_{\max}	1768	1829	1890	1951	2012

Synchroniczne są też cykle: 89 lat – średniej rocznej temperatury powietrza i 91 lat – aktywności Słońca:

$$P = 7,45 + 0,199 \sin\left(\frac{2\pi}{89}t + 2,474\right)$$

$$W = 48,09 + 18,84 \sin\left(\frac{2\pi}{91}t + 0,012\right)$$

Ich minima przypadają na lata:

T_{\min}	1632	1721	1810	1898	1988	2077
W_{\min}	1634	1725	1816	1907	1998	2089

Pewna zbieżność dat występuje także między ekstremami cykli: 58 lat – opadów atmosferycznych:

$$P = 569,3 + 30,86 \sin\left(\frac{2\pi}{58}t - 2,930\right)$$

oraz 60 lat – temperatury powietrza i 59 lat – aktywności Słońca. Najdłuższy cykl rocznych sum opadów wynosi 112 lat:

$$P = 565,0 + 30,0 \sin\left(\frac{2\pi}{112}t - 0,861\right)$$

Jest on znacznie dłuższy od cykli: 87-99 lat – cyrkulacji zachodniej, 89 lat – temperatury powietrza i 91 lat – aktywności Słońca.

Prawie we wszystkich miesiącach wykryto cykle 9-13 lat opadów atmosferycznych, zbliżone do cyklu 11-letniego aktywności Słońca.

Istnieje ogólna prawidłowość, że cyrkulacja wschodnia w latach 1891 - 1980 ma tendencję rosnącą ($a > 0$), a zachodnia – malejącą ($a < 0$). Natomiast składnik liniowy cyrkulacji południkowej ($\Delta C = at$) zmienia znak w ciągu roku.

Składnik liniowy $\Delta T = at$ trendu wiekowego temperatury powietrza jest uwarunkowany przyczynami (czynnikami) antropogenicznymi. Świadczą o tym jego zmiany roczne – od dużych ($1,48^\circ\text{C}/100$ lat) dodatnich wartości w miesiącach zimowych do bardzo małych, bliskich zera, a nawet ujemnych w lecie.

Antropogeniczne przyrosty temperatury powietrza w Warszawie ($\Delta T = at$) w latach 2000, 2100 w odniesieniu do roku 1778 ($^\circ\text{C}$, $t=0$, $\Delta T=0$) mogą osiągnąć wartości:

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
2000	1,31	0,47	0,16	0,02	0,18	2,57	0,02	0,47	0,07	0,58	0,44	3,28
2100	2,91	0,68	0,23	0,03	0,26	3,74	0,03	0,68	0,10	0,84	0,64	4,76

Wydaje się, że te duże przyrosty temperatury powietrza ($\Delta T > 0$) w miesiącach zimowych wynikają z rozbudowy miasta (coraz większej akumulacji ciepła w dzień przez licznější wielokondygnacyjną zabudowę i emisji ciepła sztucznego) oraz dominacji efektu cieplarnianego atmosfery, wynikającego ze wzrostu zawartości CO_2 w atmosferze. Natomiast w lecie ($\Delta T \approx 0$) lub $\Delta T < 0$) dominuje absorpcja promieniowania słonecznego przez pyły naturalne i przemysłowe (z emisji wtórnej). To przeciwne oddziaływanie czynników antropogenicznych prowadzi do niewielkich przyrostów $\Delta T = 0,19^\circ\text{C}/100$ lat (średniej rocznej temperatury powietrza):

$$T = -0,1385 + 0,00483 t + \dots \quad \text{– półrocze chłodne (X-III)}$$

$$T = 14,52 + 0,00041 t + \dots \quad \text{– półrocze ciepłe (IV-IX)}$$

$$T = 7,263 + 0,00189 t + \dots \quad \text{– rok}$$

Antropogeniczne przyrosty miesięcznych sum opadów antropogenicznych ($\Delta P = at$) są rzędu kilku mm/100 lat. W niektórych miesiącach są one ujemne. Przyrosty ΔP półrocznych (X-III, IV- IX i rocznych (I-XII) sum opadów atmosferycznych w Warszawie są nieistotne statystycznie.

Ekstrema absolutne krzywej trendu czasowego temperatury powietrza w Warszawie w stuleciach XVIII - XXI występują w latach:

	T_{\min}	Data	T_{\max}	Data
Styczeń	-7,5	1801	-0,9	1916
Lipiec	17,7	1822	19,6	1944
Rok	6,5	1823	8,5	1949

Minimum absolutne średniej rocznej temperatury powietrza $T_{\min} = 6,5^{\circ}\text{C}$ przypada na rok 1823 – podczas minimum absolutnego aktywności Słońca (najsłabszego cyklu 1811- 1823). Maksimum absolutne temperatury $T_{\max} = 8,5^{\circ}\text{C}$ nieco wyprzedza datę maksimum absolutnego plam słonecznych (1957). Analogiczne ekstrema wiekowe temperatury prawdopodobnie powtórzą się w XXI wieku:

	T_{\min}	Data	T_{\max}	Data
Styczeń	-6,8	2011	-1,2	2044
Lipiec	17,6	1977	19,5	2085
Rok	6,8	2088	8,3	2093

Można oczekiwać, iż na początku stulecia XXI w roku 2011 – wystąpią duże spadki temperatury w styczniu. Jeszcze przed rokiem 2000 mogą w lutym wystąpić bardzo niskie wartości temperatury powietrza.

W stuleciu XXI średnie roczne wartości temperatury powietrza w Warszawie będą na ogół niższe od normy $\bar{T} = 7,46^{\circ}\text{C}$ (średniej z dwóch minionych stuleci). Nie wystąpi jednak zbyt duże ochłodzenie klimatu, ponieważ znaczne są antropogeniczne przyrosty temperatury powietrza.

Krzywa wiekowych zmian sum rocznych opadów w latach 1700 - 2100 ma kilka wyraźnych minimów (P_{\min}) i maksimum (P_{\max}), np.:

P_{\min} , mm	Data	P_{\max} , mm	Data
468	1764	654	1756
466	1824	684	852
457	1938	690	1965
486	2017	641	2025

Maksimum opadów $P_{\max} = 641$ mm przypada na rok 1965, a minimum $P_{\min} = 486$ mm wystąpi około roku 2017. Opady atmosferyczne w latach 1991- 2023 będą w zasadzie poniżej normy $\bar{P} = 569,2$ mm (średniej sumy rocznej z lat 1813-1980/ lub będą do niej zbliżone.

Przyczyną naturalnych zmian klimatu Polski w XVIII-XXI wieku są periodyczne zmiany aktywności Słońca. Widma oscylacji temperatury powietrza w Warszawie i liczb Wolfa w latach 1779-1979 są prawie identyczne (rys. 1). Zgodność tych widm występuje we wszystkich pasmach częstości $\omega = \frac{2\pi}{\Theta}$ o maksimach, tj. okresach rzeczywistych Θ :

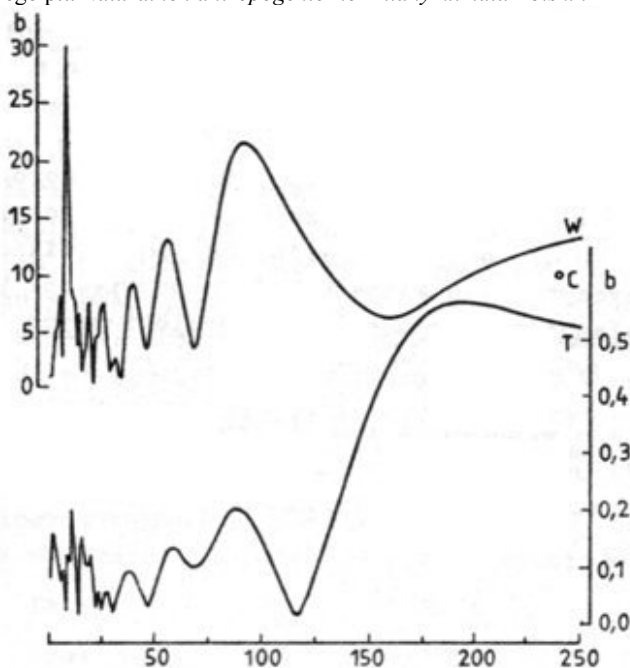
Lczby Wolfa	11	21	28	43	59	91	179	lat
Temperatura powietrza	13	22	28	41	60	90	194	lat

Mało prawdopodobne jest, by ta zgodność 7 pasm częstości oscylacji temperatury powietrza i aktywności Słońca była przypadkowa.

Opady atmosferyczne w Warszawie są uwarunkowane przede wszystkim periodycznymi zmianami cyrkulacji zachodniej. Świadczą o tym analogiczne oscylogramy korelacji $R(\theta)$ cyrkulacji zachodniej (C_W) i opadów (P) w latach 1891-1976 (rys. 2), które otrzymano na podstawie ciągów chronologicznych – średnich konsekwentnych 12-miesięcznych (o liczebności $n = 1021$).

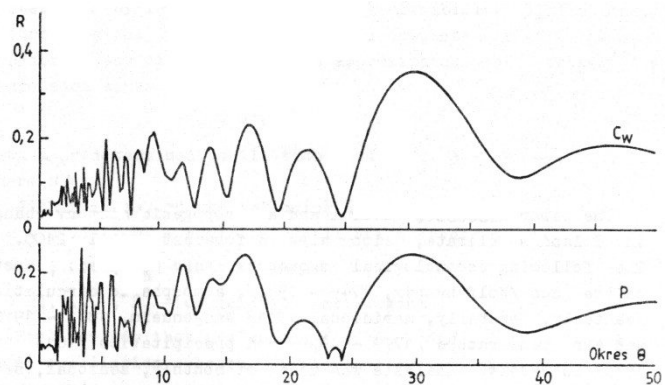
Zastosowaniom widm oscylacji m.in. do identyfikacji astronomicznych przyczyn zmian klimatu są poświęcone kolejne części *Atlasu Współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce*.

Praca została wykonana w ramach konkursu Ministerstwa Edukacji Narodowej (1990) – wg projektu badawczego p.t. *Naturalne i antropogeniczne zmiany klimatu Polski*.



Rys. 1. Widma oscylacji temperatury powietrza w Warszawie (T) i aktywności Słońca (W) w latach 1779-1979

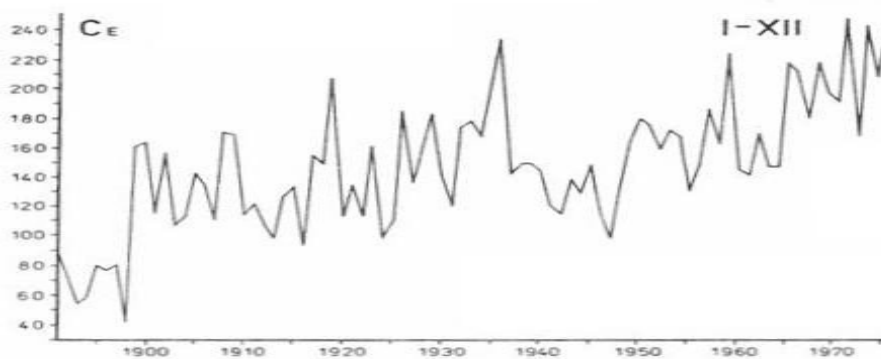
Fig. 1. Oscillation spectrum of air temperature in Warsaw (T) and Sun activity (W) in the period 1779-1979



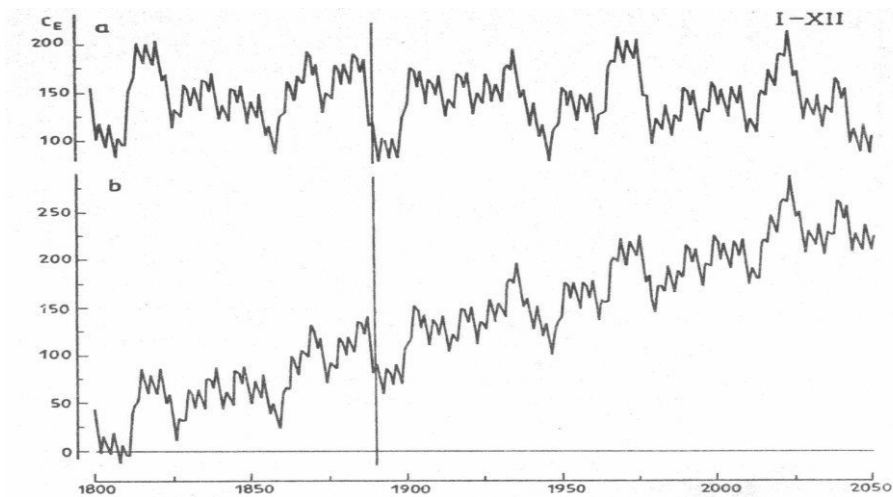
Rys. 2. Widma oscylacji opadów atmosferycznych w Warszawie (P) i cyrkulacji zachodniej (C_w) w latach 1891-1976
Fig. 2. Oscillation spectrum of precipitation in Warsaw (P) and the westerly circulation (C_w) in the period 1891-1976

9.1. Prognozy cyrkulacji atmosferycznej: wschodniej (C_E), zachodniej (C_w) i południkowej (C) (wg klasyfikacji G. J. Wangerheima)

Rys. 3-8



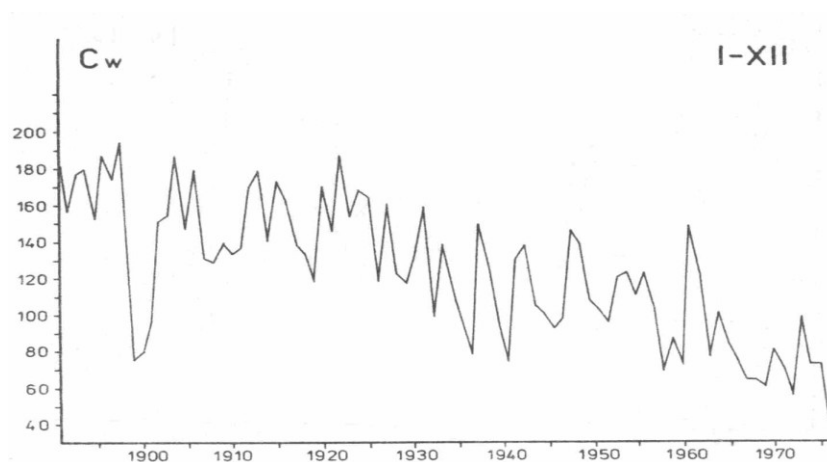
Rys. 3. Cyrkulacja atmosferyczna wschodnia (wg Wangerheima) w latach 1891-1976 – rok
Fig. 3. Easterly atmospheric circulation (after Wangerheim) in the period 1891-1976 - year



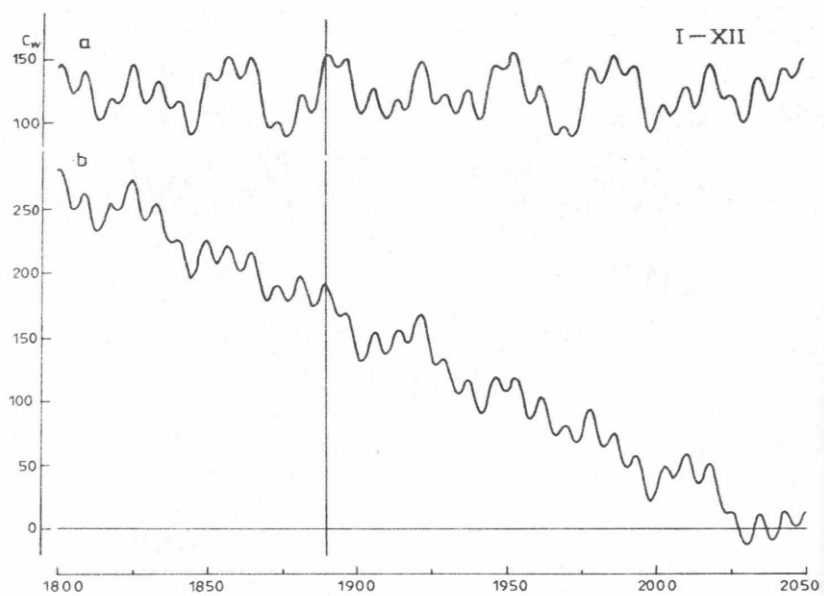
Rys. 4. Trend wiekowy cyrkulacji wschodniej w latach 1800-2050; a – wypadkowa rzeczywistych cykli, b – z uwzględnieniem tendencji stałej, wykresy funkcji $f(t)$ i $F(t)$ – rok
Fig. 4. Century trend of easterly circulation on the period 1800-2050; a – resultant of actual cycles, b – with stable tendency accounted for graphs of functions $f(t)$, $F(t)$ – year

$$C_E = f(t) = 146,0 + 13,42 \sin\left(\frac{2\pi}{3}t + 0,9632\right) + 12,51 \sin\left(\frac{2\pi}{8}t - 1,882\right) + 18,87 \sin\left(\frac{2\pi}{17}t - 2,928\right) + 14,17 \sin\left(\frac{2\pi}{22}t + 2,916\right) + 15,73 \sin\left(\frac{2\pi}{30}t - 1,998\right) + 20,99 \sin\left(\frac{2\pi}{48}t - 2,649\right)$$

$$C_E = F(t) = 1007,2 + 0,09031 t + 13,10 \sin\left(\frac{2\pi}{3}t + 0,9612\right) + 11,63 \sin\left(\frac{2\pi}{8}t - 1,843\right) + 18,21 \sin\left(\frac{2\pi}{17}t - 2,860\right) + 14,17 \sin\left(\frac{2\pi}{22}t + 2,916\right) + 15,73 \sin\left(\frac{2\pi}{30}t - 1,998\right) + 20,99 \sin\left(\frac{2\pi}{48}t - 2,649\right)$$



Rys. 5. Cyrkulacja atmosferyczna zachodnia (wg Wangenheima) w latach 1891-1976 – rok
Fig. 5. Westerly atmospheric circulation (after Wangenheim) in the period 1891-1976 - year



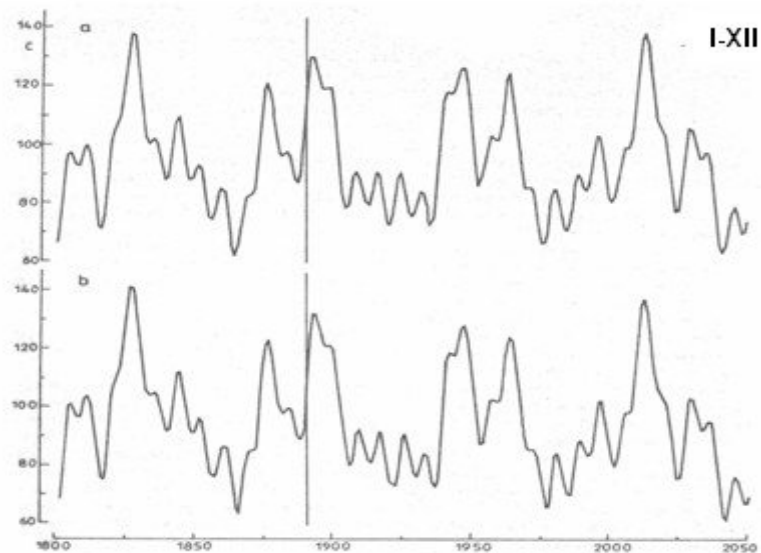
Rys. 6. Trend wiekowy cyrkulacji zachodniej w latach 1800-2050; a – wypadkowa rzeczywistych cykli, b – z uwzględnieniem tendencji stałej, wykresy funkcji $f(t)$ i $F(t)$ – rok
Fig. 6. Century trend of westerly circulation on the period 1800-2050; a – resultant of actual cycles, b – with stable tendency accounted for graphs of functions $f(t)$, $F(t)$ – year

$$C_w = f(t) = 123,4 + 10,43 \sin\left(\frac{2\pi}{8}t + 1,916\right) + 7,962 \sin\left(\frac{2\pi}{14}t - 0,0512\right) + 18,35 \sin\left(\frac{2\pi}{31}t + 1,297\right) + 10,73 \sin\left(\frac{2\pi}{45}t + 0,2201\right)$$

$$C_w = F(t) = 172,2 - 1,136t + 9,941 \sin\left(\frac{2\pi}{8}t + 2,031\right) + 5,081 \sin\left(\frac{2\pi}{14}t + 0,2032\right) + 11,74 \sin\left(\frac{2\pi}{31}t + 1,759\right) + 5,490 \sin\left(\frac{2\pi}{45}t - 2,743\right)$$



Rys. 7. Cyrkulacja atmosferyczna południkowa (wg Wangenheima) w latach 1891-1976 – rok
Fig. 7. Meridional atmospheric circulation (after Wangenheim) in the period 1891-1976 - year



Rys. 8. Trend wiekowy cyrkulacji południkowej w latach 1800-2050; a – wypadkowa rzeczywistych cykli, b – z uwzględnieniem tendencji stałej, wykresy funkcji $f(t)$ i $F(t)$ – rok
Fig. 8. Century trend of meridional circulation on the period 1800-2050; a – resultant of actual cycles, b – with stable tendency accounted for graphs of functions $f(t)$, $F(t)$ – year

$$C = f(t) = 94,40 + 7,665 \sin\left(\frac{2\pi}{8}t + 0,2688\right) + 9,207 \sin\left(\frac{2\pi}{17}t + 0,1569\right) + 11,62 \sin\left(\frac{2\pi}{23}t - 0,2156\right) + 17,38 \sin\left(\frac{2\pi}{61}t + 1,515\right)$$

$$C = F(t) = 95,61 - 0,0280 t + 7,634 \sin\left(\frac{2\pi}{8}t + 0,2665\right) + 9,075 \sin\left(\frac{2\pi}{17}t + 0,1622\right) + 11,56 \sin\left(\frac{2\pi}{23}t - 0,2156\right) + 17,48 \sin\left(\frac{2\pi}{61}t + 1,517\right)$$

9.2. Prognozy temperatury powietrza w Warszawie (1980-2100)

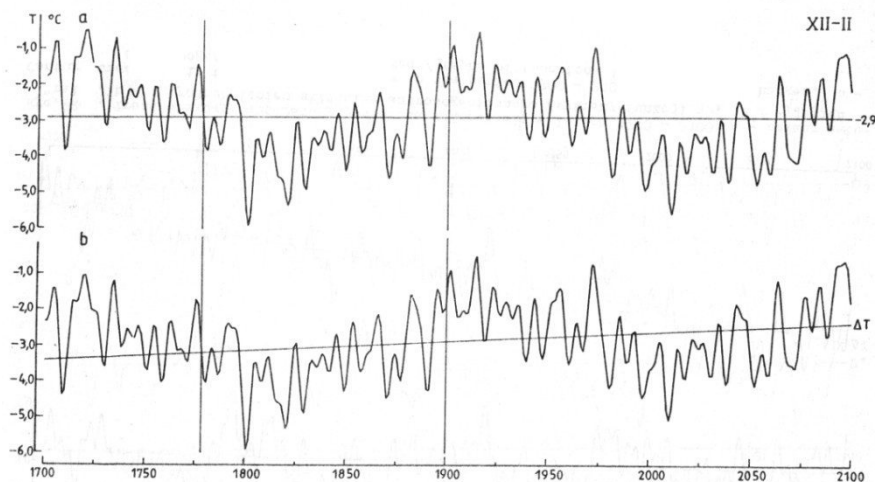
Rys. 9-11

Funkcja trendu czasowego $F(t)$ opisująca interferencję k cykli temperatury o okresie Θ_j , amplitudzie b_j i fazie c_j , zawiera składnik liniowy at , który określa zmiany antropogeniczne:

$$T = F(t) = a_0 + at + \sum_{j=1}^k b_j \sin\left(\frac{2\pi}{\Theta_j}t + c_j\right)$$

Przykładowo zamieszczono rekonstrukcje i prognozy średniej temperatury powietrza w zimie, lecie i roku w Warszawie, na podstawie danych z lat 1779-1979 bez składnikiem liniowego ($at=0$) i z składnikiem liniowym at

Zima (XII-II)



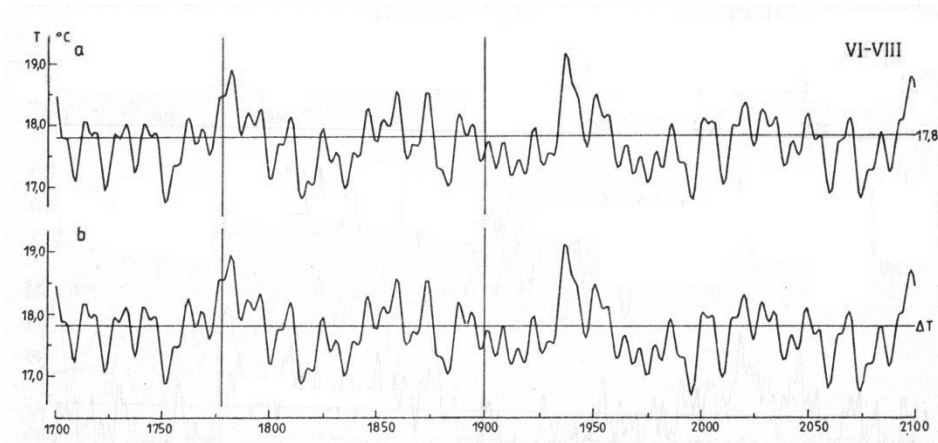
Rys. 9. Trend wiekowy temperatury powietrza w Warszawie w latach 1700- 2100; a – zmiany naturalne, b – z wyodrębnieniem składnika antropogenicznego, wykresy funkcji $f(t)$, $F(t)$ – zima

Fig. 9. Century trend of air temperature in Warsaw in the period 1700-2100; a – natural changes, b – anthropogenic component separated, graphs of functions $f(t)$, $F(t)$ – winter

$$\begin{aligned}
 T = f(t) = & 0,3469 + \\
 & + 0,2492 \sin \left(\frac{2\pi}{4} t - 3,025 \right) + 0,29485 \sin \left(\frac{2\pi}{13} t + 0,7026 \right) + 0,2642 \sin \left(\frac{2\pi}{18} t - 2,961 \right) + \\
 & + 0,2027 \sin \left(\frac{2\pi}{22} t + 2,461 \right) + 0,2868 \sin \left(\frac{2\pi}{67} t + 2,096 \right) + 0,1379 \sin \left(\frac{2\pi}{98} t + 2,2,786 \right) + \\
 & + 0,8480 \sin \left(\frac{2\pi}{205} t - 2,979 \right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T = F(t) = & -0,1385 + 0,00483 t + \\
 & + 0,2450 \sin \left(\frac{2\pi}{4} t - 3,001 \right) + 0,29345 \sin \left(\frac{2\pi}{13} t + 0,6950 \right) + 0,2642 \sin \left(\frac{2\pi}{18} t - 2,961 \right) + \\
 & + 0,1742 \sin \left(\frac{2\pi}{22} t + 2,418 \right) + 0,2508 \sin \left(\frac{2\pi}{67} t + 1,721 \right) + 0,0272 \sin \left(\frac{2\pi}{98} t + 1,284 \right) + \\
 & + 0,5453 \sin \left(\frac{2\pi}{205} t - 2,925 \right)
 \end{aligned}$$

Lato (VI-VIII)

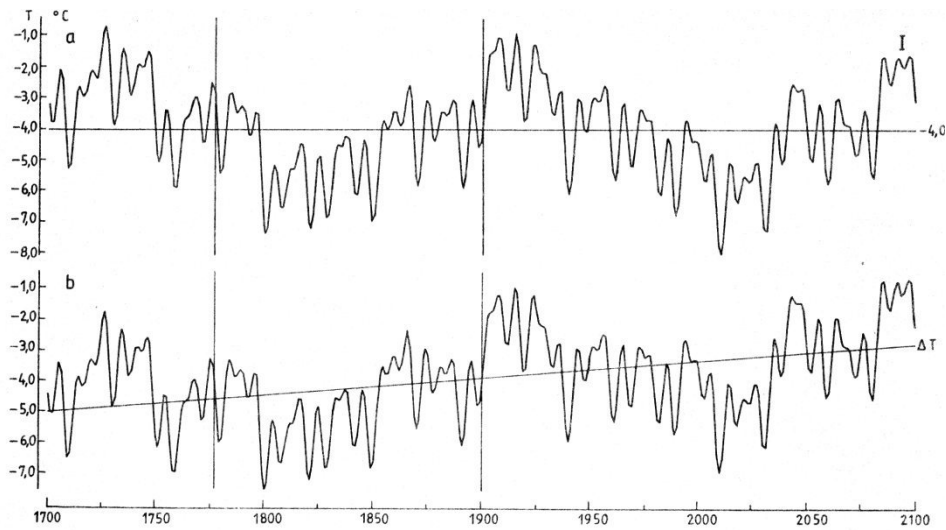


Rys. 10. Trend wiekowy temperatury powietrza w Warszawie w latach 1700 - 2100; a – zmiany naturalne, b – z wyodrębnieniem składnika antropogenicznego, wykresy funkcji $f(t)$, $F(t)$ – Lato
Fig. 10. Century trend of air temperature in Warsaw in the period 1700-2100; a – natural changes, b – anthropogenic component separated, graphs of functions $f(t)$, $F(t)$ – Summer

$$\begin{aligned}
 T = f(t) = & 17,74 + \\
 & + 0,2163 \sin \left(\frac{2\pi}{7} t - 2,594 \right) + 0,1565 \sin \left(\frac{2\pi}{13} t - 0,4477 \right) + 0,3191 \sin \left(\frac{2\pi}{16} t + 1,532 \right) + \\
 & + 0,2008 \sin \left(\frac{2\pi}{22} t - 0,0961 \right) + 0,1697 \sin \left(\frac{2\pi}{41} t + 1,742 \right) + 0,1834 \sin \left(\frac{2\pi}{52} t + 0,1453 \right) + \\
 & + 0,3599 \sin \left(\frac{2\pi}{81} t + 1,269 \right) + 0,0746 \sin \left(\frac{2\pi}{160} t + 1,9369 \right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T = F(t) = & 17,79 + 0,00057 t + \\
 & + 0,2168 \sin \left(\frac{2\pi}{7} t - 2,594 \right) + 0,1562 \sin \left(\frac{2\pi}{13} t - 0,4448 \right) + 0,3184 \sin \left(\frac{2\pi}{16} t + 1,532 \right) + \\
 & + 0,1970 \sin \left(\frac{2\pi}{22} t - 0,0894 \right) + 0,1687 \sin \left(\frac{2\pi}{41} t + 1,791 \right) + 0,1530 \sin \left(\frac{2\pi}{52} t + 0,1256 \right) + \\
 & + 0,3618 \sin \left(\frac{2\pi}{81} t + 1,271 \right) + 0,0935 \sin \left(\frac{2\pi}{160} t + 2,019 \right)
 \end{aligned}$$

Styczeń (I)



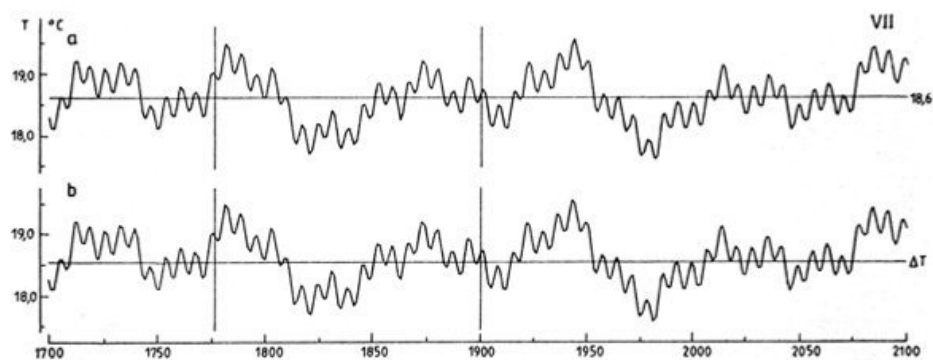
Rys. 11. Trend wiekowy temperatury powietrza w Warszawie w latach 1700-2100; a – zmiany naturalne, b – z wyodrębnieniem składnika antropogenicznego, wykresy funkcji $f(t)$, $F(t)$ – Styczeń

Fig. 11. Century trend of air temperature in Warsaw in the period 1700-2100; a – natural changes, b – anthropogenic component separated, graphs of functions $f(t)$, $F(t)$ – January

$$T = f(t) = -4,025 + 0,6600 \sin\left(\frac{2\pi}{7}t + 2,873\right) + 0,7763 \sin\left(\frac{2\pi}{10}t + 2,829\right) + 0,7609 \sin\left(\frac{2\pi}{23}t - 2,154\right) + 0,5089 \sin\left(\frac{2\pi}{44}t + 0,9392\right) + 0,5351 \sin\left(\frac{2\pi}{64}t + 0,4523\right) + 1,408 \sin\left(\frac{2\pi}{187}t - 3,120\right)$$

$$T = F(t) = -4,622 + 0,00591 t + 0,6522 \sin\left(\frac{2\pi}{7}t + 2,862\right) + 0,7579 \sin\left(\frac{2\pi}{10}t + 2,837\right) + 0,7247 \sin\left(\frac{2\pi}{23}t - 2,138\right) + 0,5625 \sin\left(\frac{2\pi}{44}t + 0,9734\right) + 0,6176 \sin\left(\frac{2\pi}{64}t + 0,2858\right) + 1,079 \sin\left(\frac{2\pi}{187}t - 3,033\right)$$

Lipiec (VII)

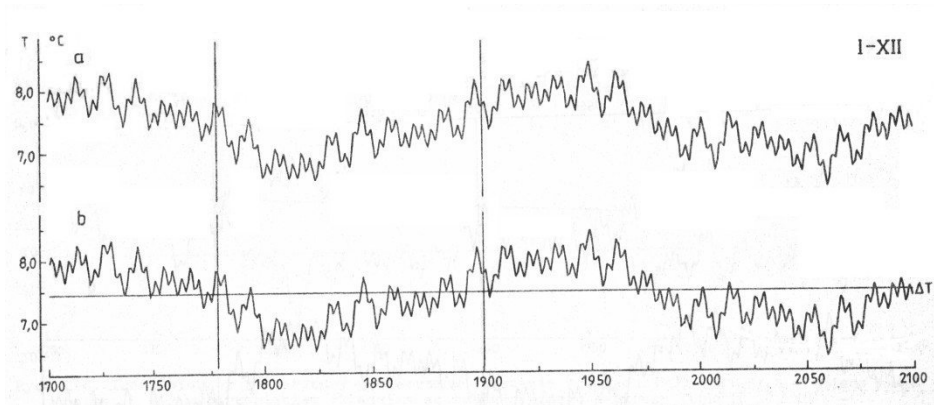


Rys. 11. Trend wiekowy temperatury powietrza w Warszawie w latach 1700-2100; a – zmiany naturalne, b – z wyodrębnieniem składnika antropogenicznego, wykresy funkcji $f(t)$, $F(t)$ – Lipiec
Fig. 11. Century trend of air temperature in Warsaw in the period 1700-2100; a – natural changes, b – anthropogenic component separated, graphs of functions $f(t)$, $F(t)$ – July

$$T = f(t) = 18,56 + 0,2148 \sin\left(\frac{2\pi}{7}t + 3,046\right) + 0,0523 \sin\left(\frac{2\pi}{15}t + 0,8547\right) + 0,1937 \sin\left(\frac{2\pi}{23}t + 0,029\right) + 0,0953 \sin\left(\frac{2\pi}{52}t + 0,4714\right) + 0,3949 \sin\left(\frac{2\pi}{75}t + 0,3358\right) + 0,2768 \sin\left(\frac{2\pi}{158}t + 2,340\right)$$

$$T = F(t) = 18,56 + 0,00006 t + 0,2148 \sin\left(\frac{2\pi}{7}t + 3,046\right) + 0,0523 \sin\left(\frac{2\pi}{15}t + 0,8547\right) + 0,1940 \sin\left(\frac{2\pi}{23}t + 0,0940\right) + 0,0962 \sin\left(\frac{2\pi}{52}t + 0,4704\right) + 0,3957 \sin\left(\frac{2\pi}{75}t + 0,3372\right) + 0,2749 \sin\left(\frac{2\pi}{158}t + 2,341\right)$$

Rok (I-XII)



Rys. 11. Trend wiekowy temperatury powietrza w Warszawie w latach 1700-2100; a – zmiany naturalne, b – z wyodrębnieniem składnika antropogenicznego, wykresy funkcji $f(t)$, $F(t)$ – rok

Fig. 11. Century trend of air temperature in Warsaw in the period 1700-2100; a – natural changes, b – anthropogenic component separated, graphs of functions $f(t)$, $F(t)$ – year

$$T = f(t) = 7,453 +$$

$$+ 0,1618 \sin\left(\frac{2\pi}{4}t + 2,8710\right) + 0,1933 \sin\left(\frac{2\pi}{13}t - 0,7498\right) + 0,1208 \sin\left(\frac{2\pi}{17}t + 1,842\right) +$$

$$+ 0,1185 \sin\left(\frac{2\pi}{60}t + 1,165\right) + 0,1484 \sin\left(\frac{2\pi}{89}t + 2,570\right) + 0,5403 \sin\left(\frac{2\pi}{194}t + 3,058\right)$$

$$T = F(t) = 7,263 + 0,00189 t +$$

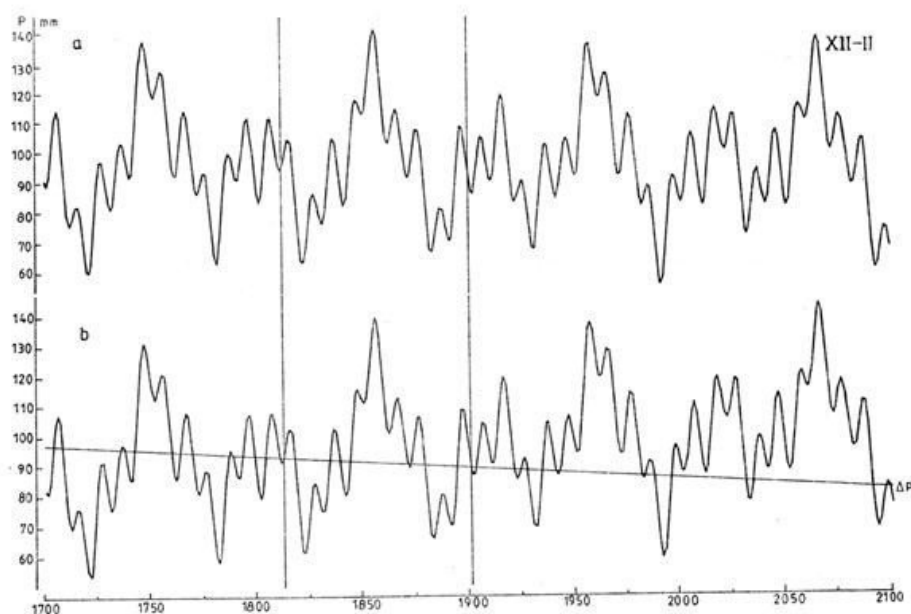
$$+ 0,1591 \sin\left(\frac{2\pi}{22}t + 2,871\right) + 0,1920 \sin\left(\frac{2\pi}{13}t + 0,7408\right) + 0,1238 \sin\left(\frac{2\pi}{17}t + 1,768\right) +$$

$$+ 0,1122 \sin\left(\frac{2\pi}{60}t + 1,094\right) + 0,1246 \sin\left(\frac{2\pi}{89}t + 2,617\right) + 0,4269 \sin\left(\frac{2\pi}{194}t + 3,067\right)$$

9.3. Prognozy opadów atmosferycznych w Warszawie (1980-2100)

Rys. 12-14

Zima (XII-II)



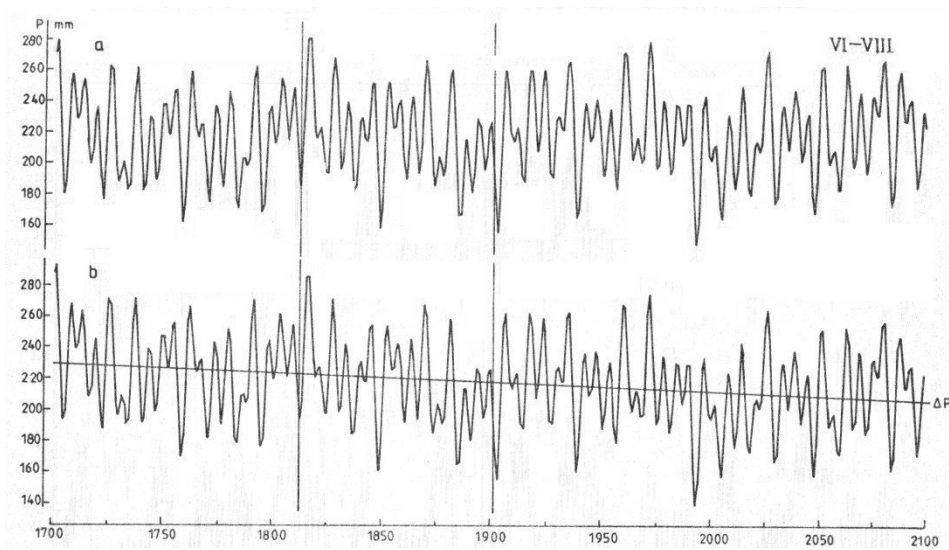
Rys. 12. Trend wiekowy opadów atmosferycznych w Warszawie w latach 1700 -2100; a – zmiany naturalne, b – z wyodrębnieniem składnika antropogenicznego, wykresy funkcji $f(t)$, $F(t)$ – Zima

Fig. 12. Century trend of precipitation in Warsaw in the period 1700-2100; a – natural changes, b – anthropogenic component separated, graphs of functions $f(t)$, $F(t)$ – Winter

$$P = f(t) = 218,0 + 25,22 \sin\left(\frac{2\pi}{6}t - 1,741\right) + 15,89 \sin\left(\frac{2\pi}{9}t - 1,716\right) + 19,14 \sin\left(\frac{2\pi}{13}t - 0,3370\right) + 8,843 \sin\left(\frac{2\pi}{54}t + 1,717\right) + 7,588 \sin\left(\frac{2\pi}{122}t + 1,003\right)$$

$$P = F(t) = 222,9 - 0,05795t + 25,24 \sin\left(\frac{2\pi}{6}t - 1,746\right) + 15,04 \sin\left(\frac{2\pi}{9}t - 1,717\right) + 18,91 \sin\left(\frac{2\pi}{13}t - 0,3448\right) + 9,429 \sin\left(\frac{2\pi}{54}t + 1,822\right) + 8,035 \sin\left(\frac{2\pi}{122}t + 1,077\right)$$

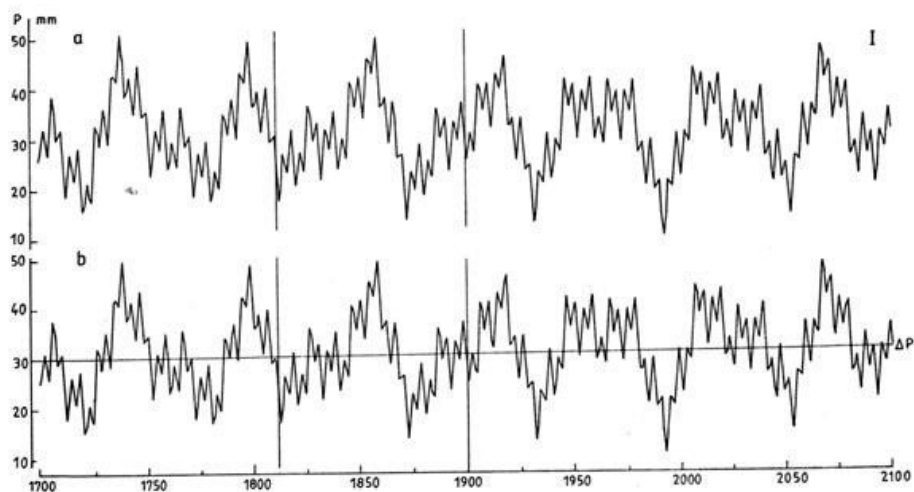
Lato (VI-VIII)



Rys. 13. Trend wiekowy opadów atmosferycznych w Warszawie w latach 1700 - 2100; a – zmiany naturalne, b – z wyodrębnieniem składnika antropogenicznego, wykresy funkcji $f(t)$, $F(t)$ – Lato
Fig. 13. Century trend of precipitation in Warsaw in the period 1700-2100; a – natural changes, b – anthropogenic component separated, graphs of functions $f(t)$, $F(t)$ – Summer

$$P = f(t) = 96,39 + \\ +11,20\sin\left(\frac{2\pi}{10}t - 1,030\right) + 8,665 \sin \frac{2\pi}{21}t + 1,551 + 16,25 \sin\left(\frac{2\pi}{53}t + 2,623\right) + \\ + 10,01 \sin\left(\frac{2\pi}{100}t - 1,186\right)$$

$$P = F(t) = 93,11 - 0,03897t + \\ + 11,20\sin\left(\frac{2\pi}{10}t - 1,024\right) + 8,672 \sin \frac{2\pi}{21}t + 1,524 + 15,83 \sin\left(\frac{2\pi}{53}t + 2,623\right) + \\ + 0,643 \sin\left(\frac{2\pi}{100}t - 1,131\right)$$

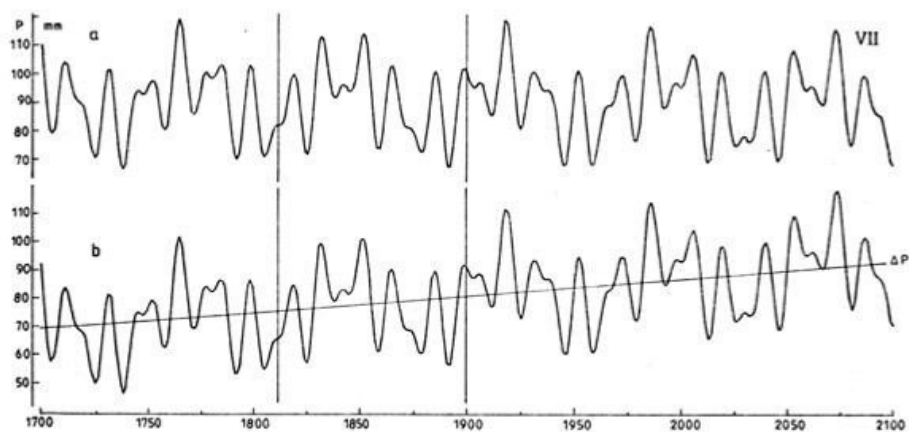


Rys. 14. Trend wiekowy opadów atmosferycznych w Warszawie w latach 1700 - 2100; a – zmiany naturalne, b – z wyodrębnieniem składnika antropogenicznego, wykresy funkcji $f(t)$, $F(t)$ – Styczeń
Fig. 14. Century trend of precipitation in Warsaw in the period 1700-2100; a – natural changes, b – anthropogenic component separated, graphs of functions $f(t)$, $F(t)$ – January

$$\begin{aligned}
 P = f(t) &= 31,24 + \\
 &+ 3,918 \sin\left(\frac{2\pi}{4}t + 3,096\right) + 3,830 \sin\left(\frac{2\pi}{10}t - 2,252\right) + \\
 &+ 5,062 \sin\left(\frac{2\pi}{30}t - 1,831\right) + 7,230 \sin\left(\frac{2\pi}{55}t + 3,086\right) + 1,234 \sin\left(\frac{2\pi}{100}t - 0,3768\right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P = F(t) &= 30,71 + 0,00631 t + \\
 &+ 3,912 \sin\left(\frac{2\pi}{4}t + 3,097\right) + 3,819 \sin\left(\frac{2\pi}{10}t - 2,250\right) + \\
 &+ 5,035 \sin\left(\frac{2\pi}{30}t - 1,830\right) + 7,148 \sin\left(\frac{2\pi}{55}t + 3,088\right) + 1,261 \sin\left(\frac{2\pi}{100}t - 0,2934\right)
 \end{aligned}$$

Lipiec (VII)



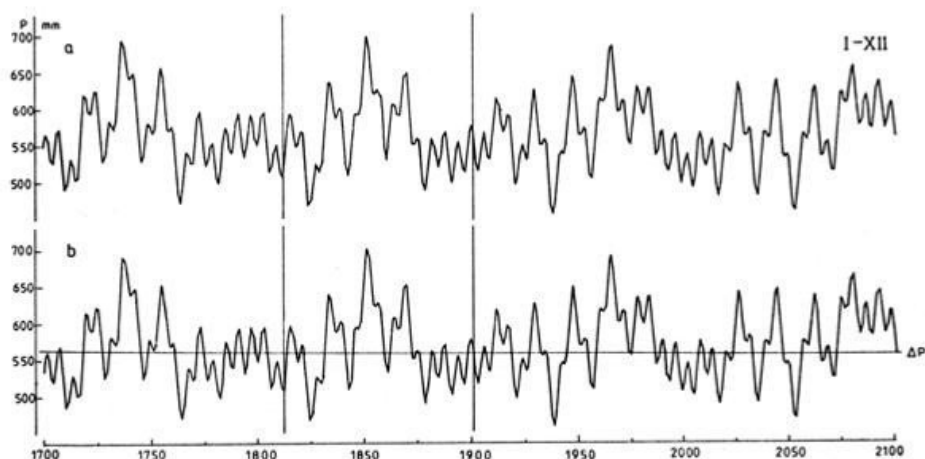
Rys. 15. Trend wiekowy opadów atmosferycznych w Warszawie w latach 1700 - 2100; a – zmiany naturalne, b – z wyodrębnieniem składnika antropogenicznego, wykresy funkcji $f(t)$, $F(t)$ – Lipiec

Fig. 15. Century trend of precipitation in Warsaw in the period 1700-2100; a – natural changes, b – anthropogenic component separated, graphs of functions $f(t)$, $F(t)$ – July

$$P = f(t) = 80,81 + 8,157 \sin\left(\frac{2\pi}{11}t + 2,880\right) + 11,70 \sin\left(\frac{2\pi}{17}t - 0,2923\right) + 8,803 \sin\left(\frac{2\pi}{74}t - 1,160\right)$$

$$P = F(t) = 75,96 + 0,05741 t + 8,075 \sin\left(\frac{2\pi}{11}t + 2,892\right) + 12,00 \sin\left(\frac{2\pi}{17}t - 0,2797\right) + 9,605 \sin\left(\frac{2\pi}{74}t - 1,137\right)$$

Rok (I-XII)



Rys. 16. Trend wiekowy opadów atmosferycznych w Warszawie w latach 1700 - 2100; a – zmiany naturalne, b – z wyodrębnieniem składnika antropogenicznego, wykresy funkcji $f(t)$, $F(t)$ – rok

Fig. 16. Century trend of precipitation in Warsaw in the period 1700-2100; a – natural changes, b – anthropogenic component separated, graphs of functions $f(t)$, $F(t)$ – year

$$P = f(t) = 564,6 + 28,22 \sin\left(\frac{2\pi}{6}t - 1,450\right) + 32,02 \sin\left(\frac{2\pi}{16}t + 1,113\right) + 27,48 \sin\left(\frac{2\pi}{19}t + 0,8780\right) + 27,40 \sin\left(\frac{2\pi}{58}t - 3,015\right) + 26,75 \sin\left(\frac{2\pi}{112}t - 0,6919\right)$$

$$P = F(t) = 562,5 - 0,002481t + 28,22 \sin\left(\frac{2\pi}{6}t - 1,449\right) + 32,02 \sin\left(\frac{2\pi}{16}t + 1,113\right) + 27,59 \sin\left(\frac{2\pi}{19}t + 0,8765\right) + 26,99 \sin\left(\frac{2\pi}{58}t - 3,018\right) + 26,73 \sin\left(\frac{2\pi}{112}t - 0,6907\right)$$

Summary

The paper discusses natural and anthropogenic century changes in Poland's climate, along with a forecast until 2100. The following chronological sequences were examined: spots on the Sun (Wolf number, 1749 - 1980/, atmospheric circulation) easterly, westerly, meridional after i Vangenheim, 1891 - 1976/ and air temperature (1779 -1979) and precipitation /1813 - 1983/ in Warsaw. Analysis was made of monthly, seasonal, semi-annual and annual values.

The statistical methods used until now harmonic analysis – determination of consecutive terms in Fourier series, spectroanalysis – autocorrelation method, are not too well suited to study periodic changes of the climate. The deficiency of the harmonic analysis is assumption of fictional periods: $n, \frac{n}{2}, \frac{n}{3}, \dots$. The periods received by dividing arbitrarily the duration of a chronological sequence into two, three, etc. parts do not correspond to actual periods. Only some of the harmonics may by accident appear to be the same as actual periods. The method is useless to discover periods between: n and $n, \frac{n}{2}$ and $\frac{n}{3}$, etc.

The commonly used autocorrelation method can only be used to determine only very short periods of change (with high frequency). Autocorrelation coefficients between the original chronological sequence and sequences obtained in effect of time translation by 1, 2, 3, ..., k units are calculated basing on an increasingly smaller number of data $n - k$. This restricts the applicability of the method to periods not exceeding $k = \frac{n}{2}$.

An oscillation analysis is a novelty in secular examination of climate changes – determination of oscillation spectra and actual periods (Boryczka's method). The method is characterized by lack of all *above* applicability limitations. A chronological sequence (also an incomplete one) of measurements in any time intervals is approximated with consecutive regression sinusoids:

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

with a predetermined oscillation band, e.g. $\Theta = \frac{1}{12}, \frac{2}{12}, \dots, N$, where $N \geq n$

With this method the following are obtained:

$$\vec{b} = b_1, \dots, b_N - \text{empirical oscillation spectrum}$$

$$\vec{c} = c_1, \dots, c_N - \text{initial phases}$$

$$\vec{R} = R_1, \dots, R_N - \text{correlation oscillogram}$$

Real periods that are sought for Θ_j – are maximum values of local oscillation spectra (a sequence of amplitudes). They correspond to minimum values of rest variances and maximum values of multiple correlation coefficient R . Amplitudes b_j verified with Fisher-Snadecor test with 2 and $n-3$ degrees of freedom.

Determination of a hidden period Θ_j – regression sinusoid with amplitude b_j and phase shift c_j requires the determination of a formula of a regression plane.

$$y = a_0 + \alpha x_1 + \beta x_2$$

in relation to time variables $x_1 = \sin\left(\frac{2\pi}{\Theta}t\right)$, $x_2 = \cos\left(\frac{2\pi}{\Theta}t\right)$.

Amplitude of changes (b) and phase shift (c) are determined with the following formulae:

$$b = (\alpha^2 + \beta^2)^{\frac{1}{2}}, \quad \operatorname{tg} c = \frac{\beta}{\alpha}$$

where angle c meets the following conditions: $\alpha = b \cos c$, $\beta = b \sin c$.

Oscillation spectra b and phase vectors were used to identify reasons for climate change. Oscillation spectra b of reasons (Sun activity), of the mechanism of transmission to the Earth (atmospheric circulation) and climate elements (air temperature, precipitation) should be identical. In the same time epoch 0 , t also the vectors of phase shifts c , i.e. synchronic cycles should be similar.

Real periods were used to determine time trends

$$y = f(t) = a_o + \sum_{j=1}^k b_j \sin \left(\frac{2\pi}{\theta_j} t + c_j \right)$$

composing (smallest square condition) regression sinusoids with actual periods, verified with the Fisher-Snedecor test with $2k$ and $n-2k-1$ degrees of freedom.

Another problem solved in the *Atlas* is modelling of natural and anthropogenic changes of climate. The measured values of e.g. air temperature (y) are a sum of natural (y_0) and anthropogenic (Δy) components. It is possible to separate the natural component since it undergoes periodic changes. The resultant of those natural changes can be described with a few or about a dozen sinusoids with discovered real periods. The measure of anthropogenic changes is a linear component $\Delta y = at$ of time trend

$$y = f(t) = a_o + at + \sum_{j=1}^k b_j \sin \left(\frac{2\pi}{\theta_j} t + c_j \right)$$

Partial regression coefficient a can indicate an upward ($a > 0$) or downward ($a < 0$) trend of anthropogenic changes. It can also approximate natural changes – a stretch of the sinusoid with a very long unknown period.

The difference between linear components $\Delta y_1 - \Delta y_2 = (a_1 - a_2) t$ of time trends of two neighbouring localities results from the impact of anthropogenic factors. Oscillation spectra, characterizing natural changes in neighbouring towns are the same ($\vec{b}_1 \approx \vec{b}_2$).

Real cycles of the number of Sun spots (W) atmospheric circulation (easterly C_E , westerly C_W , meridional (C), air temperature (T) and precipitation (P) and time trends, being their resultant, show that changes in Poland's climate in 19th and 20th centuries were mostly affected by Sun activity. An absolute minimum of Sun activity took place in the weakest single cycle 1811-1823, and maximum – in the strongest cycle 1959-1964. An absolute maximum of Sun activity of 189.9 occurred in 1957. The extreme absolute values of the number of sunspots resulted in effect of overlapping of four main cycles:

$$\begin{aligned} W &= 50,41 + 27,45 \sin \left(\frac{2\pi}{11} t + 1,071 \right) \\ W &= 50,17 + 12,80 \sin \left(\frac{2\pi}{59} t - 1,901 \right) \\ W &= 48,09 + 18,84 \sin \left(\frac{2\pi}{91} t + 0,012 \right) \\ W &= 46,51 + 9,856 \sin \left(\frac{2\pi}{79} t - 1,32 \right), \quad (1700 - 1978) \end{aligned}$$

Here are dates of the minimum and maximum values of the regression sinusoids:

Cycle	minimum	maximum
11 lat	1810	1959
59 lat	1811	1959
91 lat	1817	1954
179 lat	1871	1960

The number of sunspots is characterized by a stable growth $\frac{\partial W}{\partial t} = 8/100$ years. An absolute minimum of a mean annual air temperature $T_{\min} = 6.5^{\circ}\text{C}$ /according to $F(t)$ trend/ was in 1823 when there was an absolute minimum of Sun activity (1811 – 1923) – the weakest cycle/. And the absolute maximum $T_{\max} = 8.5^{\circ}\text{C}$ is slightly earlier than the maximum of Sun activity (1957). Air temperature, similarly to Sun activity, has been growing by $0.6^{\circ}\text{C}/100$ years over the last two centuries:

$$W = 36,10 + 0,0803 t, \quad (1779 - 1979)$$

$$T = 6,88 + 0,0058 t, \quad (1700 - 1978)$$

The regular increase of the average annual air temperature in Warsaw results from overlapping of natural cycles – primarily 89 years and 194. years. The progressing warming up of the climate in 18th -20th centuries is probably due to intensified Sun activity. Air temperature is positively correlated to the number of sunspots.

The cycles of annual air temperature values – 60 years, Sun activity – 59 years and meridional circulation – 61 years are synchronic:

$$T = 7,45 + 0,133 \sin\left(\frac{2\pi}{60}t + 1,363\right)$$

$$W = 50,17 + 12,8 \sin\left(\frac{2\pi}{59}t - 1,90\right)$$

$$C = 95,09 + 19,68 \sin\left(\frac{2\pi}{61}t + 1,525\right)$$

Maximum values of the regression sinusoids occur more or less at the same time:

T_{\max}	1780	1840	1900	1960	2020
W_{\max}	1781	1840	1899	1958	2017
C_{\max}	1768	1829	1890	1951	2012

Also the following cycles are synchronic: 89 years – of average annual air temperature and 91 years – of Sun activity.

$$P = 7,45 + 0,199 \sin\left(\frac{2\pi}{89}t + 2,474\right)$$

$$W = 48,09 + 18,84 \sin\left(\frac{2\pi}{91}t + 0,012\right)$$

Their minimum values are as follows:

T_{\min}	1632	1721	1810	1898	1988	2077
W_{\min}	1634	1725	1816	1907	1998	2089

A concurrence of dates also occurs among extremes of cycles: 58 years – precipitation.

$$P = 569,3 + 30,86 \sin\left(\frac{2\pi}{58}t - 2,930\right)$$

and so years – air temperature and 59 years – Sun activity. The longest cycle of annual precipitation is 112 years:

$$P = 565,0 + 30,0 \sin\left(\frac{2\pi}{112}t - 0,861\right)$$

It is much longer than the following cycles: 87- 99 years – westerly circulation and 89 years – air temperature and 91 years – Sun activity. Almost in all months, 9-13 year cycles of precipitation were discovered that were close to the 11-year cycle of Sun activity.

There is a general regularity that easterly circulation had a growing trend in the period 1891 - 1980 ($a > 0$) and the west early circulation – decreasing ($a < 0$). And the linear component of the southerly circulation would alternate within the year ($\Delta C = at$).

The linear component $\Delta T = at$ of the secular trend of air temperature depends on anthropogenic factors. This is shown in its annual changes – from high ($1.48^{\circ}\text{C}/100$ years) positive values in winter to very low, close to zero, or even negative changes in the summer.

Anthropogenic growth of ir temperature in Warsaw ($T = at$) in the years 2000, 2100 can reach the following values in reference to 1778 (in $^{\circ}\text{C}$, $t=0$, $\Delta T=0$):

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
2000	1,31	0,47	0,16	0,02	0,18	2,57	0,02	0,47	0,07	0,58	0,44	3,28
2100	2,91	0,68	0,23	0,03	0,26	3,74	0,03	0,68	0,10	0,84	0,64	4,76

The large growth of air temperature ($\Delta T > 0$) in winter seems to have resulted from expansion of the town (increasing heat accumulation during the day by an increased number of multistorey buildings and emission of artificial heat) and domination of the hot-house effect of the atmosphere due to an increased CO_2 content in the atmosphere. In the summer ($\Delta T \approx 0$ or $\Delta T < 0$) there is absorption of Sun radiation by natural and industrial dusts (from secondary emission). The contrary activity of anthropogenic factors produces small growths ($\Delta T = 0.19^\circ\text{C}/100$ years) of the average annual air temperature:

$$T = -0,1385 + 0,00483 t + \dots \quad \text{– cool six months (X-III)}$$

$$T = 14,52 + 0,00041 t + \dots \quad \text{– cool six months (IV-IX)}$$

$$T = 7,263 + 0,00189 t + \dots \quad \text{– year}$$

Anthropogenic growths of monthly sums of anthropogenic precipitation ($\Delta P = at$) are a few mm/100 years. In some months it is negative ΔP growths of semi-annual (X-III, IV-IX) and annual (I-XII) sums of precipitation in Warsaw are statistically insignificant.

Absolute extremes of the time trend curve of air temperature in Warsaw in 18th-21st centuries occur in the following years:

	T_{\min}	Year	T_{\max}	Year
January	-7,5	1801	-0,9	1916
July	17,7	1822	19,6	1944
Year	6,5	1823	8,5	1949

An absolute minimum value of the average annual air temperature $T_{\min} = 6.5^\circ\text{C}$ occurred in 1823 – at the time of an absolute minimum of Sun activity (the weakest cycle 1811- 1823). An absolute maximum value of temperature $T_{\max} = 8.5^\circ\text{C}$ occurred somewhat ahead of the date of an absolute maximum of sunspots (1957).

Corresponding secular extreme values of temperature will be probably repeated in 21st century:

	T_{\min}	Year	T_{\max}	Year
January	-6,8	2011	-1,2	2044
July	17,6	1977	19,5	2085
Year	6,8	2088	8,3	2093

Substantial temperature drops in January can be expected at the beginning of the next century – in 2011. Even before the year 2000 very low air temperatures can occur in February. In 21st century average annual air temperatures in Warsaw will generally be below standard $\bar{T} = 7.46^\circ\text{C}$ (an average of the two previous centuries). However, the climate will not be excessively cooled down due to substantial anthropogenic increase of air temperature.

The curve of secular changes in the sums of annual precipitation in the period 1700 - 2100 shows a few clear minimum values (P_{\min}) and maximum values (P_{\max}) e.g.:

$P_{\min, \text{mm}}$	Year	$P_{\max, \text{mm}}$	Year
468	1764	654	1756
466	1824	684	1852
457	1938	690	1965
486	2017	641	2025

A maximum of precipitation $P_{\max} = 641$ mm occurred in 1965 and. minimum $P_{\min} = 486$ will occur around the year 2017. In the period 1991- 2023, precipitation will be in principle below the standard $\bar{P} = 569.2$ ins !being the average annual sum from the period 1813 - 1980/ or will be close to the standard. Periodic changes in Sun activity are the reason for natural changes in Poland's climate in 18th - 21st centuries. Spectra of oscillation of air temperature in Warsaw and Wolf number in the period 1779-1979 are almost identical. The consistence of the spectra occurs in all frequency bands $\omega = \frac{2\pi}{\Theta} =$ with maximum values or real periods Θ :

Wolf number	11	21	28	43	59	91	179	years
Air temperature	13	22	28	41	60	90	194	years

It is highly improbable that the consistence of seven frequency bands of oscillation of air temperature and Sun activity is accidental.

Precipitation in Warsaw depends primarily on periodic changes of westerly circulation. This is confirmed by corresponding correlation oscillograms $R(\Theta)$ of westerly circulation (C) and precipitation (P) in the period 1891- 1976, which were received basing on chronological sequences – average consecutive 12 – month values (with quantity $n = 1021$). The applications of oscillation spectra e.g. to identify astronomical reasons of climate changes will be discussed in part VIII of the geographical parameters in Poland.

JERZY BORYCZKA
MARIA STOPA-BORYCZKA
BOŻENA KICIŃSKA
ELWIRA ŻMUDZKA

VII. Zmiany wiekowe klimatu Polski

atlas

WSPÓLZALEŻNOŚCI
PARAMETRÓW
METEOROLOGICZNYCH
I GEOGRAFICZNYCH
W POLSCE

WYDAWNICTWA UNIwersYTETU WARSZAWSKIEGO
WARSZAWA 1992

X. PROGNOZY ZMIAN KLIMATU WARSZAWY

Duże znaczenie poznawcze mają wyniki badań w zakresie cykliczności, rekonstrukcji i prognoz zmian klimatu Warszawy (temperatury powietrza i opadów atmosferycznych) przedstawione w tomie XIV *Atlasu współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce* opublikowanym w roku 2000:

- Boryczka J., Stopa-Boryczka M., Lorenc H., Kicińska B. Błazek E., Skrzypczuk J., 2000, t. XIV. *Prognozy zmian klimatu Warszawy* (red. M. Stopa-Boryczka), Wyd. UW, ss. 209

SPIS TREŚCI (14)

I	WPROWADZENIE	7
II	POSTĘP BADAŃ ZMIAN KLIMATU W OSTATNICH DZIESIĘCIOLECIACH	11
III	ZMIANY AKTYWNOŚCI SŁOŃCA I STAŁEJ SŁONECZNEJ W XVIII-XX WIEKU	17
IV.	CYKLICZNE WAHANIA I TENDENCJA ZMIAN OSCYLACJI PÓŁNOCNOATLANTYCKIEJ (NAO) W XIX-XX WIEKU	40
V	WARSZAWSKA SERIA POMIARÓW TEMPERATURY POWIETRZA NA STACJI OBSERWATORIUM ASTRONOMICZNE W LATACH 1779-1997	66
1.	Dokumentacja historyczna prowadzonych pomiarów temperatury powietrza w Warszawie od 1779 roku	66
2.	Poprawki korygujące dotychczasową "serię warszawską" temperatury powietrza w latach 1779- 1997	70
3.	Zakres wahań temperatury powietrza w Warszawie (Obserwatorium) w latach 1779-1997	73
VI.	ZMIANY KLIMATU WARSZAWY W XVIII-XXI	97
1.	Ochłodzenia i ocieplenia klimatu Warszawy i ich uwarunkowania	97
2.	Okresowa zmienność opadów atmosferycznych w Warszawie	102
3.	Tendencje zmian klimatu Warszawy	104
4.	Prognoza zmian klimatu Warszawy w XXI wieku	106
VII.	STAN AEROSANITARNY WARSZAWY W ODNIESIENIU DO INNYCH MIAST POLSKI	176
1.	Przestrzenny rozkład stężenia dwutlenku siarki w Polsce	178
2.	Wpływ cyrkulacji atmosferycznej na stężenia zanieczyszczeń powietrza (SO ₂)	179
3.	Rozkład prawdopodobieństwa stężenia zanieczyszczeń przy różnych kierunkach adwekcji powietrza	180
4.	Synchroniczne wahania stężeń zanieczyszczeń powietrza w Polsce	181
5.	Podobieństwo stanu zanieczyszczenia powietrza dwutlenkiem siarki w poszczególnych regionach Polski przy różnych kierunkach adwekcji mas powietrza	188
6.	Zanieczyszczenie atmosfery a zdrowie i zgony mieszkańców Warszawy	193
VIII	ZAKOŃCZENIE	198
	LITERATURA	202
	SUMMARY	207

10.1. Ochłodzenia i ocieplenia klimatu Warszawy i ich uwarunkowania

W ostatnich 400 latach wystąpiły trzy główne ochłodzenia klimatu Ziemi o najmniejszej średniej globalnej temperaturze na półkuli północnej w pobliżu dat: 1600, 1700, 1830 (Groverman i Landsberg, 1979, Schönwiese, 1992).

Najbardziej poznane na podstawie danych instrumentalnych jest to ostatnie, największe ochłodzenie w Europie (Genewa – Boryczka, 1998, Berlin – Wójcik i inni, 1999) i Polsce (wg serii warszawskiej i krakowskiej). Trzeba zauważyć, że wystąpiło ono

podczas trzech najsłabszych, wydłużonych (12-13- letnich) cykli aktywności Słońca (1798-1833). Ochłodzenie to pojawiło się w czasie najsłabszego 13-letniego cyklu plam słonecznych (1811-1823), podczas absolutnego minimum wiekowego (od 1700 r.).

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. Wtedy stała słoneczna zmniejszyła się o 0,5%.

To ostatnie globalne ochłodzenie klimatu (także w Polsce) wystąpiło podczas wzmózonej aktywności wulkanicznej, po największych eksplozywnych erupcjach wulkanów: 1803 – Cotopaxi ($DVI = 1100$), 1815 – Tambora ($DVI = 3000$), 1835 – Cosequina ($DVI = 4000$, maksimum absolutne).

W Polsce podczas ostatniego ochłodzenia klimatu (1798-1833) średnia roczna temperatura powietrza spadła, np. w Warszawie do 4,6°C w roku 1779 i do 4,8°C w 1829 r. Najmroźniejsze zimy wystąpiły w Polsce w latach 1779 i 1830 o średniej temperaturze -8,9 i -9,3°C.

Okazało się, że ochłodzenia i ocieplenia klimatu w ostatnich stuleciach są efektem nakładania się długich i krótkich cykli temperatury powietrza, skorelowanych z okresowymi zmianami aktywności Słońca (stałej słonecznej) – zależnych od parametrów Układu Słonecznego.

W rekonstrukcji i prognozach ochłodzeń i ociepleń klimatu fundamentalne znaczenie ma wykrycie prawdziwych (realnych) okresów zmiennych klimatologicznych (skutków) i zmiennych astronomicznych (domniemyanych przyczyn). Identyfikacja przyczyn polega na sprawdzeniu, czy „cykliczność skutków i przyczyn jest taka sama”. W tym celu zastosowano metodę J. Boryczki „sinusoid regresji” (1998) wyznaczania prawdziwych cykli. Metoda ta polega na aproksymacji wyników pomiarów (także niekompletnych), wykonanych w dowolnych odstępach czasu kolejnymi sinusoidami regresji:

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

gdzie: Θ – okres, b – amplituda, c – faza.

Kluczowe znaczenie w identyfikacji przyczyn ochłodzeń i ociepleń klimatu ma planetarny 178,9-letni okres zmian parametrów Układu Słonecznego, aktywności Słońca (liczb Wolfa) i stałej słonecznej. Na przykład wykresy zmian: przyspieszenia Słońca (względem środka masy US, liczb Wolfa i stałej słonecznej z lat 1700-1879 i 1879-1993 (po upływie 178,9 lat) prawie pokrywają się.

Ten prawie dwuwiekowy okres wykryto (metodą „sinusoid regresji”) w ciągach czasowych temperatury powietrza w Europie i Polsce:

Miejscowość	Zima		Lato		Rok	
	Θ	ΔT	Θ	ΔT	Θ	ΔT
Warszawa (1779-1990)	218,3	1,8	208,2	0,3	223,9	1,1
Genewa (1768-1980)	216,6	1,0	147,4	0,7	166,3	0,7
Anglia (1659-1973)	170,2	0,6	220,8	0,4	175,6	0,4

Analogiczna cykliczność występuje w ciągach czasowych: aktywności Słońca (liczb Wolfa), erupcji wulkanów (DVI , $\Delta VI = DVI/\Delta t$, Δt – odstęp między erupcjami) i parametrów Układu Słonecznego (siła pływowa na Słońcu ΔG , dyspersja masy w Układzie Słonecznym B).

Zmienne	Okres (lata)
Aktywność Słońca (1700-1993)	187,3
Stała słoneczna (1700-1993)	187,0
Erupcje wulkanów (1680-1980):	
<i>DVI</i> (dust veil index)	257,0
ΔVI	206,7
Parametry Układu Słonecznego (1700-2000):	
Siły pływowe na Słońcu (ΔG)	170,1
Dyspersja masy (<i>B</i>)	175,1

Należy zaznaczyć, że okresy długie wyznaczone metodami statystycznymi

$$f(t_i + \Theta) = f(t_i) + \varepsilon_i$$

gdzie ε_i – składnik losowy) cechują się znaczną dyspersją (szerokość połówkowa pasma widma jest dość duża).

Dużym zakresem wahań charakteryzują się również około 100-letnie cykle temperatury powietrza w Europie i Oscylacji Północnoatlantyckiej (NAO):

	Okres	Zima		Lato		Rok	
		Θ	ΔT	Θ	ΔT	Θ	ΔT
Warszawa	1779-1990	113,1	0,7	91,2	0,4	104,7	0,2
Praga	1771-1980	98,5	0,5	76,9	0,8	80,9	1,0
Genewa	1768-1980	93,4	0,4	76,6	1,0	76,0	0,6
Anglia	1659-1973	99,1	0,6	101,9	0,3	102,5	0,5
<i>NAO</i>	1825-1997	105,1	0,6	83,2	0,5	–	–

Te długie okresy temperatury powietrza skorelowane są z podobnymi cyklami zmiennych astronomicznych i geologicznych:

Zmienne		Okres (lata)
Aktywność Słońca	1700-1993	102,0
Aktywność Słońca	1749-1993	100,8
Stała słoneczna	1700-1993	102,0
Erupcje wulkanów	1680-1980:	
<i>DVI</i> (dust veil index)		91,8
ΔVI		90,5
Δt		118,6
Parametry Układu Słonecznego):	1700-2000	
Siły pływowe na Słońcu (ΔG)		91,4
Dyspersja masy (<i>B</i>)		84,1
Odległość środka masy US od Słońca (<i>S</i>)		101,3
Okres obiegu Urana		84,0

O realności tych okresów: planetarnego 178,9-letniego i około 100-letniego świadczy też ich obecność w ciągach chronologicznych zmiennych sedymentologicznych: paleotemperatury – stosunku izotopów tlenu $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ (Johnsen i inni, 1970) i substancji organicznych zdeponowanych w osadach jeziornych (Boryczka, Wicik, 1994):

Zmienne sedimentologiczne	Okres (lat)	
Paleotemperatura 180/160	180	78
Gościąg (substancje organiczne)	206	103
Gościąg (węglany wapnia)	180	87
Wikaryjskie (substancje organiczne)	200	-
Wielki Staw (warstewki piasku)	180	138

Stała słoneczna (s), warunkująca dopływ energii słonecznej do powierzchni Ziemi, zmienia się o 0,2% w cyklu 187,8-letnim i o 0,4% – w cyklu 102-letnim (w stosunku do $s_{\text{sr}}=1,94 \text{ cal}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$):

$$s = 1,9433 + 0,002084 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{187,8}t - 1,0349\right)$$

$$s = 1,9435 + 0,004154 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{102,0}t - 2,1359\right)$$

Zakres zmian energii słonecznej w poszczególnych cyklach stałej słonecznej wynosi: cykl 187,8 lat – $5490 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, cykl 102,0 lat – $5950 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$. Nadwyżka energii słonecznej w czasie $0,5\Theta$ (gdy $s > a_0$) jest akumulowana głównie w głębszych warstwach oceanów.

Tym najdłuższym okresem stałej słonecznej, wywołującym wahania energii słonecznej $\pm 2745 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ i $\pm 2975 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, odpowiadają dwa najdłuższe cykle temperatury powietrza w Europie i Polsce.

W Polsce (i Europie) dominuje w zimie około 8-letni cykl temperatury powietrza:

$$\text{Warszawa (1779-1990)} \quad T = -2,65 + 0,756 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{7,7}t - 0,6870\right)$$

$$\text{Wrocław (1851-1980)} \quad T = -0,72 + 0,983 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{7,6}t + 0,4152\right)$$

$$\text{NAO (1825-1997)} \quad \text{NAO} = 0,1315 + 0,4778 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{7,8}t - 0,1266\right)$$

$$\text{Liczby Wolfa (1700-1993)} \quad W = 51,93 + 10,40 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{8,1}t + 2,8659\right)$$

$$\text{Przyspieszenie Słońca (1700-2000)} \quad \ddot{s} = 0,667 + 1,130 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{7,8}t + 1,21\right)$$

Maksima tych zimowych cykli: temperatury powietrza, Oscylacji Północnoatlantycznej (NAO), aktywności Słońca i przyspieszenia Słońca przypadają na te same lata.

Okresy temperatury powietrza w Warszawie w poszczególnych miesiącach zawierają się w przedziałach: 4-8, 9-14, 15-18, 20-24, 27-35, 38-44, 47-66, 73-101, 147-207 lat.

Temperatura powietrza w obu półroczach: chłodnym (X-III) i ciepłym (IV-IX) ulega podobnej periodyczności:

X-III ^{''}	Θ	4,0	13,0	18,0	''	67,0	98,0	205,0	lat
	b	0,25	0,30	0,26	0,22	0,30	0,18	0,86	°C
IV-IX	Θ	4,0	14,0	18,0	23,0	54,0	83,0	172,0	lat
	b	0,13	0,14	0,18	0,18	0,23	0,29	0,29	°C
I-XII	Θ	4,0	13,0	17,0	60,0	.	89,0	194,0	lat
	b	0,16	0,20	0,13	0,13	.	0,20	0,56	°C

Według oscylogramu korelacji (maksymalne współczynniki korelacji wielokrotnej) najdłuższy cykl średniej rocznej temperatury powietrza jest równy 217 lat.

Cykle rocznych wartości temperatury – 60 lat, aktywności Słońca – 59 lat i cyrkulacji południkowej – 61 lat są synchroniczne:

$$T = 7,45 + 0,133 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{60}t + 1,363\right) \quad 1778 \quad (t=0)$$

$$W = 50,17 + 12,8 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{59}t - 1,901\right) \quad 1748 \quad (t=0)$$

$$C = 95,09 + 19,68 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{61}t + 1,525\right) \quad 1890 \quad (t=0)$$

Maksima tych sinusoid regresji występują w tym samym czasie:

T_{\max}	W_{\max}	C_{\max}
1780	1781	1768
1840	1840	1829
1900	1899	1890
1960	1958	1951
2020	2017	2012

Synchroniczne są także cykle średnich rocznych wartości temperatury powietrza – 89 lat i aktywności Słońca – 91 lat:

$$T = 7,46 + 0,199 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{89}t + 2,474\right)$$

$$W = 48,09 + 19,84 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{91}t + 0,012\right)$$

Ich minima przypadają na lata:

T_{\min}	W_{\min}
1632	1634
1721	1725
1810	1816
1898	1907
1988	1988
2077	2089

Minimum średniej rocznej temperatury powietrza w cyklu 194 lat:

$$T = 7,457 + 0,557 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{194}t + 3,042\right)$$

występuje w latach: 1636, 1830, 2024 – znacznie różniących się od dat minimów wiekowych aktywności Słońca w cyklu 179 lat: 1698, 1872, 2051.

Najdłuższymi cyklami temperatury powietrza w Warszawie w poszczególnych miesiącach są:

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Θ	187,0	177,0	207,0	199,0	162,0	90,0	158,0	147,0	180,0	98,0	100,0	101 lat
b	1,40	0,75	1,05	0,62	0,60	0,53	0,38	0,22	0,24	0,40	0,30	0,36°C

Minima tych cykli o dość dużych amplitudach $2b$, od $0,44^{\circ}\text{C}$ (sierpień) do $2,8^{\circ}\text{C}$ (styczeń), przypadają na lata:

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1825	1829	1820	1832	1848	1846	1845	1867	1832	1799	1807	1797
2013	2005	2027	2031	2010	1996	2003	2014	2012	1995	2007	1999

10.2. Okresowa zmienność opadów atmosferycznych w Warszawie

Cykliczność miesięcznych, sezonowych, półrocznych sum opadów atmosferycznych w Warszawie w latach 1813-1980 przedstawiono w tomie VII *Atlasu* (Boryczka, Stopa-Boryczka i inni, 1992).

Okresy miesięcznych sum opadów są zawarte w przedziałach: 3-6, 9-13, 15-23, 30-44, 51-67, 74-100, 113-124 lat.

Długości najdłuższych cykli (Θ) i ich amplitudy (b) wynoszą:

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Θ (lata)	100,0	93,0	139,0	64,0	133,0	80,0	74,0	100,0	100,0	129,0	115,0	113,0
b (mm)	2,10	7,90	6,70	2,50	3,80	8,10	8,30	4,20	4,50	7,50	4,40	4,00

We wszystkich miesiącach (z wyjątkiem października) występuje okres 9-13 lat, zbliżony do 11-letniego cyklu aktywności Słońca:

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Θ (lata)	10,0	10,0	10,0	10,0	11,0	9,0	11,0	13,0	10,0	–	10,0	11,0
b (mm)	3,90	3,20	4,00	5,80	5,70	9,80	8,20	9,50	7,90	–	7,20	7,00

Na przykład w miesiącach I kwartału maksima cykli 10-letnich występują w latach:

I	1817	1827	1837	1847	1857	...	1917	1927	1937	1947	1957
II	1818	1828	1838	1848	1858	...	1918	1928	1938	1948	1958
III	1818	1828	1838	1848	1858	...	1918	1928	1938	1948	1958
IV	1818	1828	1838	1848	1858	...	1918	1928	1938	1948	1958

o maksymalnej aktywności Słońca W_{\max} w latach:

1817, 1830, 1837, 1848, 1860, ..., 1917, 1927, 1937, 1947, 1957.

W drugiej połowie XIX wieku i na początku XX wieku maksima opadów atmosferycznych występują podczas minimów aktywności Słońca W_{\min} :

1867, 1878, 1889, 1901, 1913, 1923.

Roczne sumy opadów atmosferycznych w Warszawie (1813-1980) ulegają okresowym zmianom:

Θ (lata)	6	16	19	58	112
$2b$ (mm)	28,4	36	31,6	30,9	30

Dwa najdłuższe cykle opisują równania sinusoid regresji:

$$P = 569,3 + 30,86 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{58}t - 2,930\right)$$

$$P = 565,0 + 30,00 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{112}t - 0,861\right)$$

Istnieje zbieżność czasowa ekstremów cykli: opadów atmosferycznych – 58 lat, temperatury powietrza – 60 lat i aktywności Słońca – 59 lat:

P_{\max}	T_{\max}	W_{\max}
1796	1780	1781
1853	1840	1840
1912	1900	1899
1970	1960	1958
2028	2020	2017

Ekstrema cyklu 112 lat opadów o amplitudach $2b = 60$ mm przypadają na lata: maksima – 1631, 1743, 1855, 1967, 2079, a minima – 1687, 1799, 1911, 2023.

Krzywa wiekowych zmian sum rocznych opadów atmosferycznych w latach 1700-2100 ma kilka głównych maksimów (P_{\max}) i minimów (P_{\min}), np.:

Data	P_{\max} (mm)	Data	P_{\min} (mm)
1756	654	1764	468
1852	684	1824	466
1965	690	1938	457
2025	641	2017	486

Maksimum opadów $P_{\max} = 690$ mm przypada w Warszawie na rok 1965, a minimum $P_{\min} = 486$ mm wystąpi w roku 2017.

Opady atmosferyczne w Warszawie są uwarunkowane przede wszystkim periodycznymi zmianami cyrkulacji zachodniej. Świadczą o tym analogiczne oscylogramy korelacji $R(\Theta)$ cyrkulacji zachodniej (C_w) i opadów (P) w latach 1891-1976, które otrzymano na podstawie ciągów chronologicznych średnich konsekwentnych 12-miesięcznych (o liczebności $n = 1021$).

Istotnym rozszerzeniem badań okresowości opadów atmosferycznych w Polsce jest praca A. Michalskiej (1998). Stosując tę samą metodę "sinusoid regresji" wyznaczania cykli (Boryczka, 1993) poddano analizie statystycznej 130-letnie ciągi chronologiczne (1861-1990) sezonowych i rocznych sum opadów w 6 miejscowościach w Polsce (Koszalin, Bydgoszcz, Poznań, Wrocław, Kraków i Warszawa).

Istotną statystycznie okresowością około 11-letnią cechują się sezonowe sumy opadów atmosferycznych w Polsce. Amplitudy $\Delta P = P_{\max} - P_{\min}$ w stosunku do średnich sezonowych ($\Delta P \cdot P^{-1}$ w %) są duże:

	Wiosna		Lato		Jesień		Zima		Rok	
	Θ	%	Θ	%	Θ	%	Θ	%	Θ	%
Koszalin	11,9	16,6	9,9	9,7	11,1	22,8	10,1	17,6	11,1	10,6
Bydgoszcz	10,9	22,4	11,3	17,7	12,2	23,9	10,0	24,7	11,6	12,4
Poznań	10,5	21,0	9,9	23,4	10,7	19,3	10,0	24,7	10,7	15,2
Warszawa	12,0	23,7	11,2	13,8	10,2	10,6	10,1	25,9	11,3	9,5
Wrocław	10,2	27,4	9,7	16,7	9,9	13,2	9,9	17,4	9,8	13,9
Kraków	10,2	18,7	10,3	12,9	10,9	17,1	9,8	12,3	9,8	5,4

Zakres zmienności sezonowych sum opadów w niektórych porach roku (wiosna, zima) przekracza 25%.

W przypadku Warszawy wyniki tych badań potwierdzają omówioną już cykliczność opadów atmosferycznych (z lat 1813-1980). Podobnie jest w przypadku opadów we Wrocławiu (1859-1980) i Krakowie (1850-1987), których cykliczność określono wcześniej (np. Boryczka, 1993).

Istnieje zbieżność prawdziwych okresów opadów atmosferycznych w Warszawie (1813-1980) z okresami otrzymanymi metodą autokorelacji (Kozuchowski, 1990), w paśmie dużych częstości zmian. Oto porównanie okresów opadów w Warszawie (1881-1980) z obliczonymi metodą autokorelacji:

Autorzy Atlasu	39,3	10,7	6,0	4,8	3,5	2,5	2,3	lat
K. Kozuchowski	39,9	11,0	6,7	4,7	3,4	2,7	2,4	lat

Roczne sumy opadów w Warszawie ulegają m.in. okresowości 39,3 lat, znacznie różniącemu się od cyklu 35-letniego, stwierdzonego przez E. Brücknera (1890).

Niedoskonałość metody autokorelacyjnej występuje w pasmach średnich częstości, a szczególnie małych częstości zmian (długich okresów).

Interesujące są też wyniki badań A. Ewerta (1984), dotyczące przestrzenno-czasowych zmienności opadów atmosferycznych w Polsce, ze szczególnym uwzględnieniem północno-zachodniej części Polski. Wyrównując np. ciągi chronologiczne opadów (1891-1980), cyrkulacji atmosferycznej (1891-1976), zachodniej składowej wiatru geostroficznego na poziomie 500 hPa w sektorze atlantycko-europejskim (1881-1976) autor wyjaśnia mechanizm występowania ekstremów wiekowych.

Innym wskaźnikiem opadów atmosferycznych są odpływy rzek. Istotne znaczenie w określeniu wiekowych odpływów rzek mają wcześniejsze prace J. Stachy (1968, 1970) oraz J. Jokiela i K. Kozuchowskiego (1989). J. Stachy stwierdza istotną statystyczną zależność między cyklami odpływów rzek i cyklami aktywności Słońca oraz zmianami wiekowymi cyrkulacji zachodniej, wschodniej, południowej wg klasyfikacji Wangenheima.

Natomiast J. Jokiel i K. Kozuchowski dokonali analizy spektralnej (autokorelacyjnej) odpływów rzek. Trzeba zaznaczyć, że tylko okresy krótkie (do kilkunastu lat), wyznaczone tą metodą, są wiarygodne.

Wcześniej zmienność opadów atmosferycznych w Polsce była badana przez Z. Kaczorowską (1962) z zastosowaniem analizy harmonicznej. Wyznaczanie jednak kolejnych wyrazów szeregu Fouriera jest mało „precyzyjną” metodą wykrywania okre-

sów opadów atmosferycznych. Okazuje się, że tylko niektóre z przyjętych *a priori* harmonik są przypadkowo równe prawdziwym okresom (np. cykl 70 lat).

10.3. Tendencje zmian klimatu Warszawy

Średnia globalna temperatura powietrza w latach 1890-1985 wzrosła od 0,2°C w strefie okołorównikowej do 5°C w strefie polarnej w czasie zim. Wzrost średniej globalnej temperatury, obliczonej na podstawie pomiarów temperatury powietrza i powierzchni mórz w latach 1861-1991, wynosi średnio 0,5°C (IPCC, 1990).

W Europie i Polsce są coraz cieplejsze przede wszystkim zimy: w Warszawie o 1°C/100 lat, Krakowie – o 1,4°C, Pradze – o 0,25°C, Genewie – o 0,5°C, Anglii Środkowej – o 0,3°C (tab. 1).

Tabela 1. Tendencje temperatury powietrza w Europie (i Polsce) w °C/100 lat
Table.1. The tendency of air temperature in Europe (and Poland) in °C/100 years

		Wiosna	Lato	Jesień	Zima	Rok
Warszawa	1779-1990	0,79	0,13	0,66	1,03	0,66
Kraków	1826-1990	0,99	0,32	0,81	1,38	0,93
Wrocław	1851-1980	0,37	-0,70	0,05	0,12	-0,04
Praga	1771-1980	0,00	-0,25	-0,11	0,25	-0,03
Zurych	1864-1980	-0,15	-0,90	0,38	0,65	0,03
Genewa	1768-1980	-0,12	-0,19	0,14	0,51	0,08
Poczdám	1893-1992	0,50	0,92	1,11	0,10	0,66
Anglia	1659-1973	0,21	0,01	0,19	0,32	0,18

Inaczej jest w sezonie letnim – coraz chłodniejszym w niektórych miejscowościach: w Pradze – o 0,25°C/100 lat, Genewie – o 0,19°C/100 lat. Średnie roczne wartości temperatury w: Wrocławiu, Pradze, Zurychu, Genewie mają prawie zerowe tendencje.

Wraz ze wzrostem średniej globalnej temperatury powietrza obserwuje się podnoszenie poziomu oceanów – średnio o 10-15 cm w ostatnim stuleciu.

Poziom Morza Bałtyckiego wg stanów wody w Świnoujściu w latach 1811-1990 podnosi się średnio o 4,5 cm/100 lat: wiosna – 1,4, lato – 3,8, jesień – 6,8, zima – 5,7 cm/100lat (Kozuchowski, Boryczka, 1997). Ekwiwalentem obecnej pokrywy lodowej (lody Antarktydy, Arktyki i lodowce górskie) jest różnica poziomu oceanów 59,1-83,3 m (Boryczka, 1998). Obecnie pokrywa lodowa na Ziemi stanowi 43,8-61,7 % masy lodu sprzed 18000 lat, kiedy to poziom Atlantyku obniżył się o 135 m (rekonstrukcje linii brzegowych w III fazie würm, Lamb, 1972-77, zob. Schönwiese, 1992). Średnie tempo wzrostu poziomu oceanów w ciągu tych 18 000 lat wynosi zatem 75 cm/100 lat.

Nie wiadomo, jaka część postępującego ocieplenia klimatu w XIX-XX wieku jest wywołana przyczynami naturalnymi, a jaka czynnikami antropogenicznymi. Istnieje jednak możliwość oszacowania składnika naturalnego $T'(t)$ trendu czasowego temperatury powietrza. Składnik naturalny $T'(t)$ – to wypadkowa nakładających się cykli naturalnych, skorelowanych ze zmiennymi astronomicznymi.

Jeżeli przez punkty empiryczne (t_i, T_i) poprowadzimy prostą regresji $T = A_0 + At$, a przez punkty „naturalne” (t_i, T'_i) prostą $T' = B_0 + Bt$, to różnica $a = A - B$ wskazuje tendencję antropogeniczną.

Postępujące ocieplenie klimatu Europy (i Polski) jest przede wszystkim efektem interferencji naturalnych cykli temperatury synchronicznych z cyklami zmiennych astronomicznych i geologicznych. Na przykład tendencja rosnąca temperatury powietrza

podczas zim w Warszawie $A = 1^{\circ}\text{C}/100$ lat jest wynikiem nakładania się kilku wykrytych cykli. Uwzględnienie tylko najdłuższych okresów: 38,3, 66,7, 113,1, 218,3 lat wyjaśnia część $B = 0,89^{\circ}\text{C}/100$ lat postępującego ocieplenia. Na czynniki antropogeniczne przypada zaledwie $0,1^{\circ}\text{C}/100$ lat. Podobnie jest podczas zim w Genewie, gdzie tendencję rosnącą $A = 0,5^{\circ}\text{C}/100$ lat wyjaśnia nakładanie się dłuższych okresów: 28,8, 46,7, 93,7, 216,6 lat ($B = 0,48$, $a = 0,02^{\circ}\text{C}/100$ lat).

Tendencje sezonowych, półrocznych i rocznych sum opadów atmosferycznych w Warszawie w latach 1813-1990, określone równaniami prostych regresji $P = C_0 + Ct$ (współczynniki regresji C w mm/100lat), wynoszą:

Zima	Wiosna	Lato	Jesień	P. Chłodne	P. Ciepłe	Rok
5,6	-7,2	-3,1	0,9	3,3	-6,7	-4,2

Sumy wiosenne i letnie opadów w Warszawie maleją średnio o 7,2 mm/100lat i 3,1 mm/100lat, sumy zimowych opadów są coraz większe – o 5,6 mm/100lat. Tendencja rocznych sum opadów jest w Warszawie malejąca – $C = -4,2$ mm/100lat.

Postępujące ocieplenie klimatu np. Warszawy o $0,66^{\circ}\text{C}/100$ lat może być wywołane wzrostem aktywności Słońca (stałej słonecznej) w latach 1779-1993 – o 16,8/100 lat.

$$T = 6,915 + 0,006572 t$$

$$W = 20,80 + 0,168364 t$$

Natomiast obserwuje się spadek aktywności wulkanicznej na Ziemi w ostatnich dwóch stuleciach (1680-1980); tendencję malejącą wskaźnika DVI ($-49/100$ lat), a rosnącą – odstępów czasu między erupcjami Δt ($1,9$ lat/100 lat).

Nie bez znaczenia jest coraz większa koncentracja masy w Układzie Słonecznym względem płaszczyzny ekliptyki (dyspersja masy maleje).

10. 4. Prognoza zmian klimatu Warszawy w XXI wieku

W prognozach zmian klimatu Polski 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. Najdłuższe okresy około 100- i 180-letni powtarzają się wielokrotnie w ciągach chronologicznych paleotemperatury ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) i zawartości substancji organicznych zdeponowanych w osadach jeziornych.

Sprawdziły się dotychczasowe prognozy temperatury powietrza w Warszawie na podstawie danych z lat 1799-1980 – prognozowane minimum wiekowe średniej rocznej temperatury w roku 1980 (Boryczka, 1993). Średnia roczna temperatura $6,6^{\circ}\text{C}$ w roku 1980, wg pomiarów ze stacji Warszawa-Okęcie, jest najmniejszą wartością w 30-leciu 1966-1995.

Prognozy temperatury powietrza i opadów atmosferycznych w Warszawie w XXI wieku na podstawie danych: średnich sezonowych, stycznia, lipca i rocznych z lat 1779-1990 i 1813-1990 przedstawiają wykresy (rys. 1-5) trendów czasowych $T = T(t)$, $P = P(t)$.

Są to wypadkowe z nakładania się (interferencji) zimowych i letnich cykli temperatury powietrza, wykrytych na podstawie danych z lat 1779-1990.

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

Postępującego globalnego ocieplenia nie można przypisać jedynie czynnikom antropogenicznym – antropogenicznej części efektu cieplarnianego, wywołanego wzrostem zawartości CO₂ w atmosferze. Wzrosty i spadki temperatury powietrza są skorelowane ze wzrostami i spadkami zmierzonej masy CO₂ w atmosferze (ppm), a nie ze wzrostami i spadkami CO₂ (wyrażonymi w Gt), pochodzącymi ze spalania paliw. Około 125 000 lat temu, podczas globalnego ocieplenia wystąpił wzrost koncentracji CO₂ w atmosferze podobny jak teraz. Świadczą o tym krzywe zmian stężenia CO₂ i paleotemperatury w ciągu ostatnich 160000 lat odtworzone na podstawie izotopu tlenu z rdzeni lodowych na stacji Wostok (WMO, 1990). Zmiany stężenia CO₂ w atmosferze (w ppm) i paleotemperatury (w °C) są synchroniczne. Maksimum sprzed 125 000 lat – to naturalne ocieplenie klimatu Ziemi, spowodowane wzrostem promieniowania słonecznego. Jest to maksimum promieniowania na krzywej M. Milankoviča (1938), otrzymanej z nakładania się okresów zmian parametrów orbity Ziemi.

Tak więc „równoległość” krzywych zmian stężenia CO₂ i paleotemperatury nie jest dowodem, że postępujące ocieplenie jest wywołane antropogenicznym efektem cieplarnianym. Wspiera to tezę, że zawartość dwutlenku węgla (zmierzona masa CO₂, ppm) zależy od temperatury wód oceanów.

Na podstawie widma oscylacji sum rocznych opadów atmosferycznych w Warszawie w latach 1813-1990 prognozowano również tendencję zmian opadów, sięgając po rok 2100 (Boryczka, 1993). Opady prognozowano ekstrapolując wartości trendu czasowego superpozycji cykli od 6 do 112,5 lat o współczynniku korelacji wielokrotnej $R = 0,67$.

Według prognozy z 1993 roku w ostatniej dekadzie XX wieku opady będą mniejsze od normy $\bar{P} = 568,9$ mm. W pierwszych dwóch dekadach XXI wieku będą oscylować wokół średniej \bar{P} . Maksimum wiekowe opadów 720 mm wystąpi mniej więcej w latach 2030, 2063, 2068. Najmniejsze sumy roczne, rzędu 400 mm, wystąpią prawdopodobnie w pobliżu dat: 2033, 2040.

O istnieniu realnych (deterministycznych) okresów opadów atmosferycznych o poprawności modeli statystycznych świadczy sprawdzalność prognoz zmian klimatu Polski w XX wieku. Dobra jest także zgodność z wynikami pomiarów (na Okęciu) prognozowanych rocznych sum opadów atmosferycznych w Warszawie (1813-1980) przedstawionych w pracy J. Boryczki (1993). Krzywej sum rocznych 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.

Dość dobra zgodność prognozowanych wartości temperatury i opadów atmosferycznych ze zmierzonymi – poza przedziałem aproksymacji – świadczy, iż istnieją przyczynowo-skutkowe związki między okresami zmiennych klimatologicznych i astronomicznych.

Postępem w badaniach wiekowych zmian klimatu jest także wyodrębnienie dwóch składników trendu czasowego: naturalnego i antropogenicznego. Obserwowane zmiany wiekowe np. temperatury powietrza można traktować jako wypadową zmian naturalnych uwarunkowanych aktywnością Słońca i zmian antropogenicznych wynikających z wpływu takich czynników, jak rozbudowa miasta, wzrost zawartości CO₂ (efekt cieplarniany) i pyłów (absorpcja promieniowania słonecznego) w atmosferze i innych. Autorzy wyszli z założenia, że składnik naturalny jest wynikiem nakładania się tych sinusoidalnych cykli. Natomiast składnik antropogeniczny cechuje się stałą tendencją zmian. Trzeba jednak pamiętać, że wyodrębnione przyrosty antropogeniczne temperatury i opadów atmosferycznych (i ich prognoza na lata 2000-2100) nie zawsze wynikają z wpływu czynników antropogenicznych. Mogą to być również zmiany naturalne o bardzo

długich nieznanymi okresach, nie stwierdzonych na podstawie istniejących ciągów chronologicznych.

Tego rodzaju trendy czasowe elementów klimatu umożliwiły autorom dokonanie rekonstrukcji (od roku 1700) i prognozy (po rok 2100) klimatu Warszawy przez zwykłą eksplorację funkcji aproksymujących.

Trzeba zauważyć, że krzywa wiekowych zmian temperatury powietrza w stuleciu XXI znajduje się poniżej średniej rocznej z dwóch ostatnich stuleci. Biorąc jednak pod uwagę przyrosty antropogeniczne temperatury, które złagodzą jej naturalne spadki, może nie wystąpić zbytnie ochłodzenie klimatu w przyszłym stuleciu. Oczywiście prognozy te – sondaż przyszłości – otrzymano przy założeniu, że ekstrema wykrytych cykli, które wystąpiły w XVIII-XX wieku, powtarzać się będą nadal.

Antropogeniczne przyrosty temperatury $\Delta t = at$ ulegają rocznym zmianom. Oto wartości współczynnika liniowego a (w $^{\circ}\text{C}/100$ lat) w poszczególnych miesiącach:

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
A	0,59	0,01	0,21	0,21	0,07	0,03	0,01	-0,26	0,08	0,2	1,16	1,48

Antropogeniczne przyrosty temperatury $\Delta T = at$ w odniesieniu do roku 1778 ($t = 0$, $\Delta T = 0$) mają wartości ($^{\circ}\text{C}$):

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1900	0,72	0,01	0,26	0,26	0,01	0,04	0,01	-0,32	0,1	0,1	1,42	1,81
2000	1,31	0,02	0,47	0,47	0,16	0,07	0,02	-0,58	0,18	0,44	2,57	3,28
2100	2,91	0,03	0,08	0,68	0,23	0,1	0,03	-0,84	0,26	0,64	3,74	4,46

Składniki liniowe $a_0 + aT$ trendu temperatury powietrza w półroczach chłodnym (X-III) i ciepłym (IV-IX) oraz w roku (I-XII) wynoszą:

$$\begin{array}{ll} \text{X-III} & T = -0,1385 + 0,00483t + \dots \\ \text{IV-IX} & T = 14,52 + 0,00041t + \dots \\ \text{I-XII} & T = 7,263 + 0,00181t + \dots \end{array}$$

Antropogeniczne przyrosty temperatury powietrza w miesiącach półrocza chłodnego są dodatnie ($a > 0$, dominacja efektu cieplarnianego wynikającego ze wzrostu zawartości CO_2 w atmosferze), a w miesiącach półrocza ciepłego – bardzo małe lub ujemne ($a < 0$, dominacja absorpcji promieniowania słonecznego przez pyły naturalne lub przemysłowe pochodzące z emisji wtórnej).

Antropogeniczne przyrosty temperatury (ΔT) są największe w grudniu: $a = 1,48^{\circ}\text{C}/100$ lat, a spadki w sierpniu: $a = -0,26^{\circ}\text{C}/100$ lat. Średnie wartości stałej tendencji zmian wynoszą: półrocze chłodne – $a = 0,48^{\circ}\text{C}/100$ lat, półrocze ciepłe – $a = 0,04^{\circ}\text{C}/100$ lat, rok – $a = 0,19^{\circ}\text{C}/100$ lat. Przyrosty (ΔT w $^{\circ}\text{C}$) średniej rocznej temperatury powietrza nie są zbyt duże:

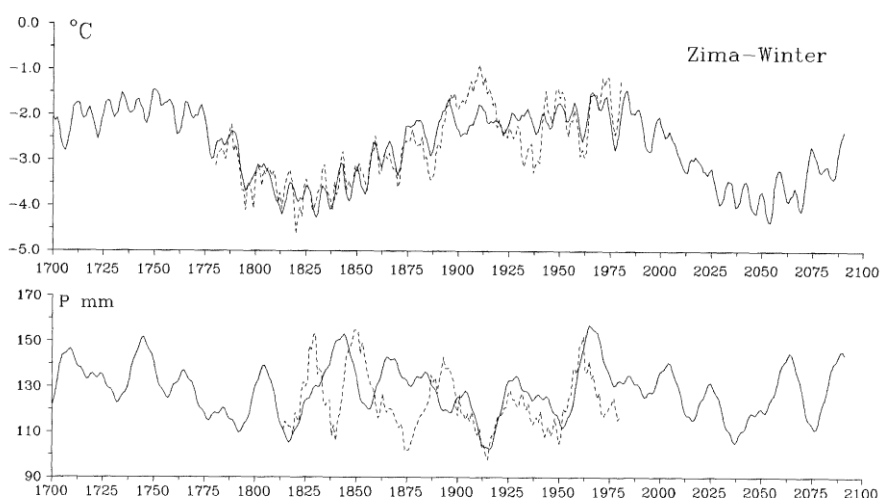
1900 – 0,23, 2000 – 0,42, 2100 – 0,61

W latach 2000, 2100 wyniosą one odpowiednio 0,4 i $0,6^{\circ}\text{C}$. Tendencja rosnąca temperatury powietrza może też wynikać, ze wzrostu akumulacji ciepła przez zabudowę (w dzień) – rozbudowy miast.

Te małe wartości przyrostów antropogenicznych ΔT temperatury powietrza w niektórych miesiącach wynikają prawdopodobnie z przeciwnego oddziaływania na pole temperatury powietrza pyłów – absorbujących promieniowanie słoneczne i dwutlenku węgla – wywołującego efekt cieplarniany atmosfery.

Prognozy temperatury powietrza i opadów atmosferycznych) w Warszawie w XXI wieku

Zima (XII-II)



Rys. 1. Zmiany temperatury powietrza T i opadów atmosferycznych P w Warszawie w XVIII-XXI wieku – Zima

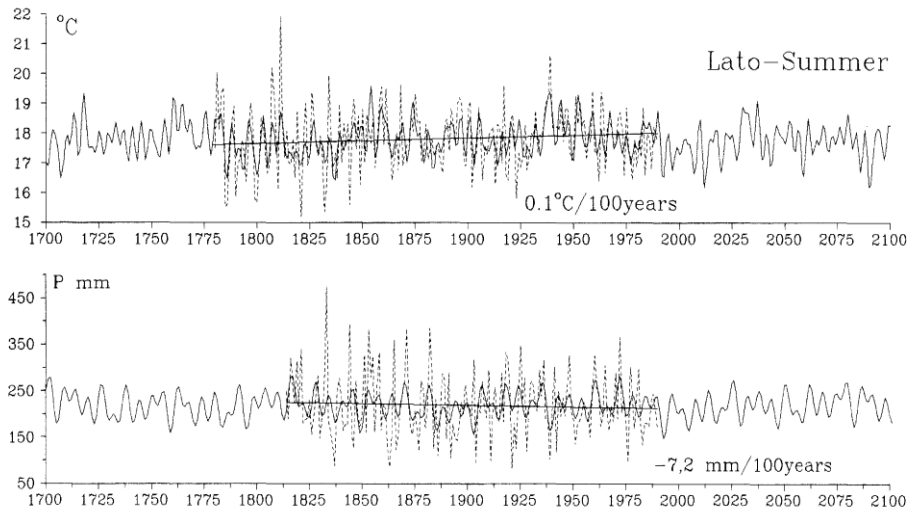
Fig. 1. Changes of air temperature T and precipitation P in Warsaw in 18th-21th centuries – Winter

$$\begin{aligned}
 T = & -2,634 + \\
 & +0,5148\sin\left(\frac{2\pi}{2,6}t - 1,327\right) + 0,5715\sin\left(\frac{2\pi}{3,5}t + 0,5523\right) + 0,6238\sin\left(\frac{2\pi}{5,2}t + 0,05656\right) \\
 & + 0,4422\sin\left(\frac{2\pi}{5,7}t + 2,486\right) + 0,7067\sin\left(\frac{2\pi}{7,7}t - 0,7303\right) + 0,7836\sin\left(\frac{2\pi}{8,3}t - 2,370\right) + \\
 & + 0,4829\sin\left(\frac{2\pi}{8,7}t - 0,3237\right) + 0,4078\sin\left(\frac{2\pi}{12,9}t + 0,1328\right) + 0,4560\sin\left(\frac{2\pi}{15,2}t + 2,318\right) + \\
 & + 0,4940\sin\left(\frac{2\pi}{18,0}t - 3,058\right) + 0,3645\sin\left(\frac{2\pi}{113,1}t + 2,040\right) + 0,8946\sin\left(\frac{2\pi}{218,3}t + 3,073\right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T = & -3,721 + 0,01025 t + \\
 & + 0,5218\sin\left(\frac{2\pi}{2,6}t - 1,332\right) + 0,5674\sin\left(\frac{2\pi}{3,5}t + 0,55448\right) + 0,6281\sin\left(\frac{2\pi}{5,2}t + 0,06189\right) \\
 & + 0,4266\sin\left(\frac{2\pi}{5,7}t + 2,484\right) + 0,7091\sin\left(\frac{2\pi}{7,7}t - 0,7349\right) + 0,7349\sin\left(\frac{2\pi}{8,3}t - 2,368\right) + \\
 & + 0,4920\sin\left(\frac{2\pi}{8,7}t - 0,3439\right) + 0,4082\sin\left(\frac{2\pi}{12,9}t + 0,1191\right) + 0,4379\sin\left(\frac{2\pi}{15,2}t + 2,252\right) + \\
 & + 0,4685\sin\left(\frac{2\pi}{18,0}t - 3,097\right) + 0,50295\sin\left(\frac{2\pi}{113,1}t + 1,197\right) + 0,2097\sin\left(\frac{2\pi}{218,3}t + 2,497\right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P = & 93,11 - 0,03897 t + 11,20\sin\left(\frac{2\pi}{10}t - 1,024\right) + 8,672 \sin\frac{2\pi}{21}t + 1,524 + 15,83 \sin\left(\frac{2\pi}{53}t + 2,623\right) + \\
 & + 0,643 \sin\left(\frac{2\pi}{100}t - 1,131\right)
 \end{aligned}$$

Lato (VI-VIII)



Rys. 2. Zmiany temperatury powietrza T i opadów atmosferycznych P w Warszawie w XVIII-XXI wieku – Lato

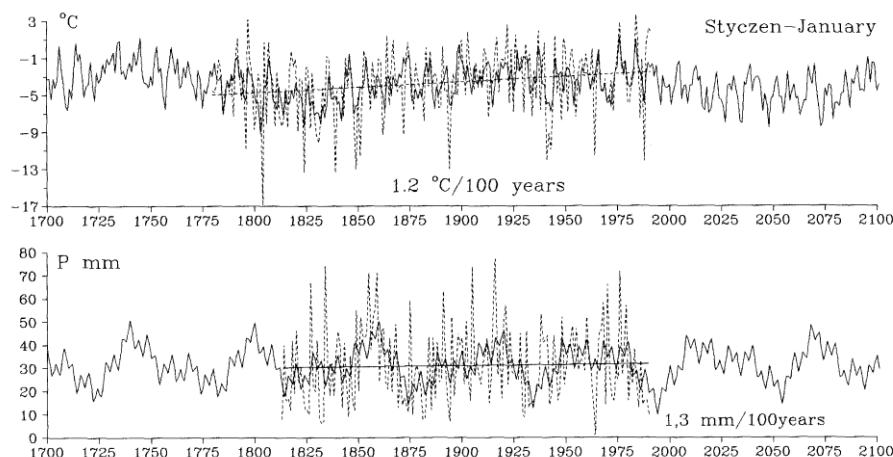
Fig. 2. Changes of air temperature T and precipitation P in Warsaw in 18th-21th centuries – Summer

$$\begin{aligned}
 T = & 17,810 + \\
 & +0,3927\sin\left(\frac{2\pi}{3,9}t + 0,1769\right) + 0,2666\sin\left(\frac{2\pi}{4,7}t + 1,869\right) + 0,24845\sin\left(\frac{2\pi}{5,2}t - 1,224\right) + \\
 & +0,2253\sin\left(\frac{2\pi}{6,5}t - 1,737\right) + 0,2747\sin\left(\frac{2\pi}{7,1}t - 1,389\right) + 0,08968\sin\left(\frac{2\pi}{7,4}t + 0,1413\right) + \\
 & +0,1762\sin\left(\frac{2\pi}{67,8}t - 0,2554\right) + 0,2644\sin\left(\frac{2\pi}{15,9}t + 1,476\right) + 0,2181\sin\left(\frac{2\pi}{22,5}t + 0,2921\right) + \\
 & +0,2304\sin\left(\frac{2\pi}{44,0}t - 3,034\right) + 0,2390\sin\left(\frac{2\pi}{91,2}t + 2,720\right) + 0,1317\sin\left(\frac{2\pi}{208,2}t - 2,804\right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T = & 17,690 - 0,00143t + \\
 & +0,3923\sin\left(\frac{2\pi}{3,9}t + 0,1814\right) + 0,2679\sin\left(\frac{2\pi}{4,7}t + 1,875\right) + 0,2486\sin\left(\frac{2\pi}{5,2}t - 1,224\right) + \\
 & +0,2253\sin\left(\frac{2\pi}{6,5}t - 1,737\right) + 0,2747\sin\left(\frac{2\pi}{7,1}t - 1,389\right) + 0,08944\sin\left(\frac{2\pi}{7,4}t + 0,1493\right) + \\
 & +0,1722\sin\left(\frac{2\pi}{67,8}t - 0,2480\right) + 0,2680\sin\left(\frac{2\pi}{15,9}t + 1,486\right) + 0,2183\sin\left(\frac{2\pi}{22,5}t + 0,3032\right) + \\
 & +0,2480\sin\left(\frac{2\pi}{44,0}t - 2,999\right) + 0,2500\sin\left(\frac{2\pi}{91,2}t + 2,264\right) + 0,2211\sin\left(\frac{2\pi}{208,2}t - 2,969\right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P = & 222,9 - 0,05795t + 25,24\sin\left(\frac{2\pi}{6}t - 1,746\right) + 15,04\sin\left(\frac{2\pi}{9}t - 1,717\right) + \\
 & + 18,91\sin\left(\frac{2\pi}{13}t - 0,3448\right) + 9,429\sin\left(\frac{2\pi}{54}t + 1,822\right) + 8,035\sin\left(\frac{2\pi}{122}t + 1,077\right)
 \end{aligned}$$

Styczeń (I)



Rys. 3. Zmiany temperatury powietrza T i opadów atmosferycznych P w Warszawie w XVIII-XXI wieku – Styczeń

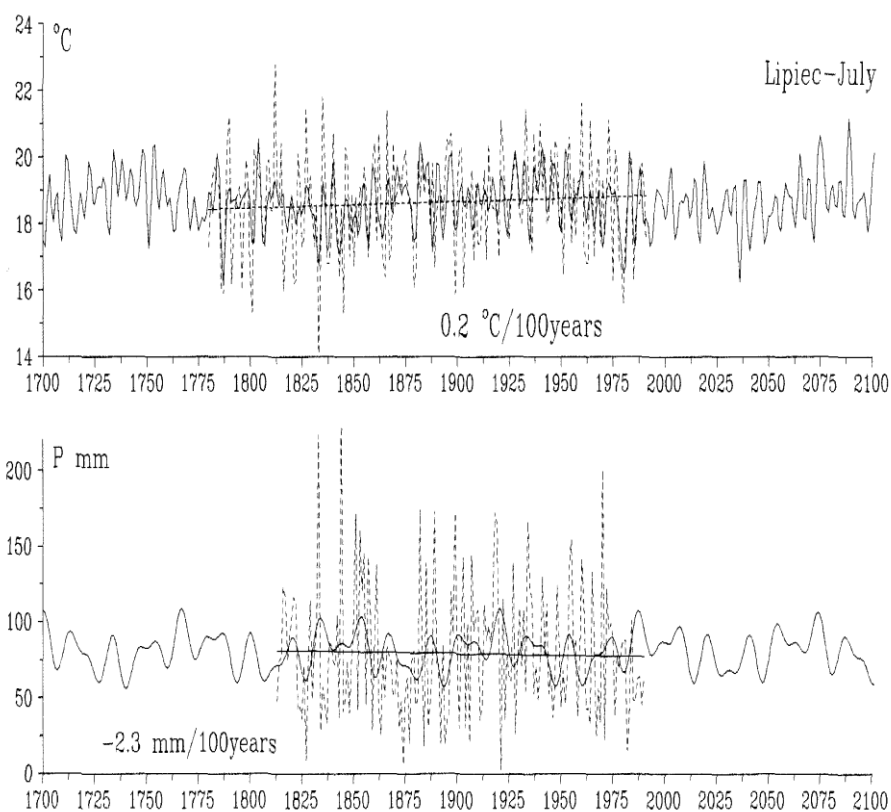
Fig. 3. Changes of air temperature T and precipitation P in Warsaw in 18th-21th centuries – January

$$\begin{aligned}
 T = & -3,734 + 1,016 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{2,6}t + 2,426\right) + 0,6558 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{3,5}t - 0,6561\right) + 0,6535 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{4,8}t + 2,718\right) + \\
 & + 0,7148 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{6,6}t + 0,6532\right) + 0,8569 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{7,7}t - 1,821\right) + 1,056 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{9,3}t + 0,7635\right) + \\
 & + 0,5900 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{13,0}t + 0,5444\right) + 0,5849 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{15,4}t + 1,928\right) + 0,5959 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{27,5}t - 1,162\right) + \\
 & + 0,5427 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{62,5}t - 0,2586\right) + 0,5881 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{122,7}t + 2,761\right) + 1,166 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{204,7}t + 3,000\right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T = & -4,915 + 0,0118t + 1,016 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{2,6}t + 2,425\right) + 0,667 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{3,5}t - 0,6526\right) + 0,6569 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{4,8}t + 2,727\right) + \\
 & + 0,7157 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{6,6}t + 0,6356\right) + 0,8535 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{7,7}t - 1,820\right) + 1,072 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{9,3}t + 0,7560\right) + \\
 & + 0,5883 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{13,0}t + 0,5276\right) + 0,5903 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{15,4}t + 1,882\right) + 0,5783 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{27,5}t - 1,080\right) + \\
 & + 0,5092 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{62,5}t - 0,1398\right) + 0,6507 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{122,7}t + 1,787\right) + 0,2585 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{204,7}t + 2,954\right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P = & 31,24 + 3,918 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{4}t + 3,096\right) + 3,830 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{10}t - 2,252\right) + 5,062 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{30}t - 1,831\right) + \\
 & + 7,230 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{55}t + 3,086\right) + 1,234 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{100}t - 0,3768\right)
 \end{aligned}$$

Lipiec (VII)



Rys. 4. Zmiany temperatury powietrza T i opadów atmosferycznych P w Warszawie w XVIII-XXI wieku – Lipiec

Fig. 4. Changes of air temperature T and precipitation P in Warsaw in 18th-21th centuries – July

$$\begin{aligned}
 T = & 18,65 + 0,4263 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{3,9}t - 1,246\right) + 0,3087 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{4,6}t - 0,4015\right) + 0,4696 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{5,1}t + 1,689\right) + \\
 & + 0,4297 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{6,2}t + 1,834\right) + 0,3384 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{7,1}t - 2,092\right) + 0,2149 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{7,7}t - 1,199\right) + \\
 & + 0,1957 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{9,1}t - 1,810\right) + 0,3025 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{11,4}t + 0,5977\right) + 0,2903 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{14,6}t + 0,07375\right) + \\
 & + 0,09521 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{12,8}t + 1,947\right) + 0,2780 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{66,8}t - 1,352\right) + 0,3071 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{184,7}t + 3,027\right)
 \end{aligned}$$

$$T = 18,53 + 0,001087t + 0,4268 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{3,9}t - 1,247\right) + 0,3105 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{4,6}t - 0,4051\right) + 0,4699 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{5,1}t + 1,688\right) +$$

$$+ 0,4275 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{6,2}t + 1,833\right) + 0,3269 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{7,1}t - 2,084\right) + 0,2149 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{7,7}t - 1,199\right) +$$

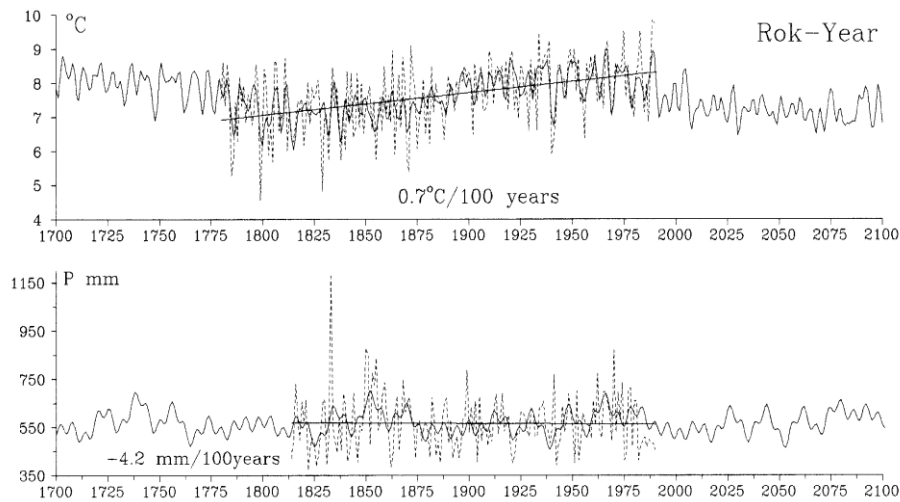
$$+ 0,1979 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{9,1}t - 1,804\right) + 0,3039 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{11,4}t + 0,5996\right) + 0,2905 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{14,6}t + 0,07585\right) +$$

$$+ 0,095941 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{12,8}t + 0,2049\right) + 0,2895 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{66,8}t - 1,299\right) + 0,2548 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{184,7}t + 3,107\right)$$

$$P = 75,96 + 0,05741 \cdot t + 8,075 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{11}t + 2,892\right) + 12,00 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{17}t - 0,2797\right) +$$

$$+ 9,605 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{74}t - 1,137\right)$$

Rok (I-XII)



Rys. 5. Zmiany temperatury powietrza T i opadów atmosferycznych P w Warszawie w XVIII-XXI wieku – Rok

Fig. 5. Changes of air temperature T and precipitation P in Warsaw in 18th-21th centuries – Year

$$T = 7,606 +$$

$$+ 0,2652 \sin\left(\frac{2\pi}{4,7}t + 2,068\right) + 0,1975 \sin\left(\frac{2\pi}{5,5}t + 1,195\right) + 0,1861 \sin\left(\frac{2\pi}{5,7}t + 2,770\right)$$

$$+ 0,1016 \sin\left(\frac{2\pi}{56,5}t + 1,393\right) + 0,1769 \sin\left(\frac{2\pi}{7,4}t - 0,6569\right) + 0,2681 \sin\left(\frac{2\pi}{7,7}t - 0,6979\right) +$$

$$+ 0,1601 \sin\left(\frac{2\pi}{12,9}t + 0,3615\right) + 0,1532 \sin\left(\frac{2\pi}{1214,0}t + 1,007\right) + 0,1676 \sin\left(\frac{2\pi}{117,7}t - 3,014\right) +$$

$$+ 0,1229 \sin\left(\frac{2\pi}{69,7}t + 2,516\right) + 0,5475 \sin\left(\frac{2\pi}{223,9}t - 3,085\right)$$

$$\begin{aligned}
T = & 7,356 + 0,002366 t + \\
& + 0,2627 \sin\left(\frac{2\pi}{4,7} t + 2,059\right) + 0,1967 \sin\left(\frac{2\pi}{5,5} t + 1,194\right) + 0,1822 \sin\left(\frac{2\pi}{5,7} t + 2,775\right) \\
& + 0,09961 \sin\left(\frac{2\pi}{56,5} t + 1,378\right) + 0,1767 \sin\left(\frac{2\pi}{7,4} t - 0,6535\right) + 0,2688 \sin\left(\frac{2\pi}{7,7} t - 0,7022\right) + \\
& + 0,1800 \sin\left(\frac{2\pi}{12,9} t + 0,3563\right) + 0,1544 \sin\left(\frac{2\pi}{1214,0} t + 0,9523\right) + 0,1561 \sin\left(\frac{2\pi}{117,7} t - 3,010\right) + \\
& + 0,08633 \sin\left(\frac{2\pi}{69,7} t + 2,265\right) + 0,38495 \sin\left(\frac{2\pi}{223,9} t - 3,131\right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P = & 562,5 - 0,002481 t + 28,22 \sin\left(\frac{2\pi}{6} t - 1,449\right) + 32,02 \sin\left(\frac{2\pi}{16} t + 1,113\right) + 27,59 \sin\left(\frac{2\pi}{19} t + 0,8765\right) + \\
& + 26,99 \sin\left(\frac{2\pi}{58} t - 3,018\right) + 26,73 \sin\left(\frac{2\pi}{112} t - 0,6907\right)
\end{aligned}$$

Summary

The purpose of the report is to present the account on the identification of the deterministic (periodical) components in the variability of the climate of Poland in time in the 18th-20th centuries. Along with this, the subject of the paper is constituted by the identification of the natural causes of the coolings and warmings of the climate in Poland, as well as the forecast of air temperature and precipitation in Warsaw in the 21st century. It was assumed in the forecasts of climate of Poland that the extremes of the identified cycles of temperature and precipitation will be repeated in the same way as in the 18th-20th centuries. Adoption of this assumption is justified by the presence of the analogous cycles in the time series of solar activity (solar constant) and the parameters of the solar system, as well as their synchronicity (coincidence of the extrema). The longest periods, of about 100 and 200 years, are repeated many times over in the chronological series of the palaeotemperatures (180/160) and the organic matter content of the lake deposits. The coldest winters, with average temperatures of approximately -7°C will most probably occur in the middle of the next century, at about the year 2050. According to the resultant of the summer cycles of temperature cool summers will occur in the first two decades of the next century. The secular maximum of -720 mm per annum – will occur more or less in the years 2030, 2063, 2068. The lowest annual precipitation, of the order of 400 mm, will most probably take place at around the years 2033 and 2040.

The global warming and the regional phenomena – disadvantageous for the inhabitants of the Earth – are usually attributed to human activity. They are first of all attributed to the anthropogenic part of the greenhouse effect in the atmosphere – the increase of the carbon dioxide (CO_2) content in the atmosphere, originating from the combustion of coal and other fuels.

The IPCC (1990) report, forecasting the increase of air temperature on the Earth in the year 2030 by 1.5-4.5 $^{\circ}\text{C}$, was too pessimistic. Soon afterwards, the catastrophic forecasts of the melting of Arctic and Antarctic ice caps, as well as the mountain glaciers, leading to the inundation of a part of continents by the ocean waters, appeared. The history of the Earth's climate and the simple calculations (Borvuczka, 1988) indicate that such a process would have lasted for at least a dozen thousand years.

Analogously, the cooling of climate in the 1940s, motivated by the undertaking of the studies on the influence of volcanic dust on climate. At that time, the catastrophic forecasts appeared of the complete glaciation of the Earth. It was forecasted that the drop in the global radiation sum by 1.5-1.6% would lead to the irreversible glaciation, proceeding from the poles towards the equator.

The subsequent report of the IPCC (1995) is more optimistic, the forecasted anthropogenic increments of temperature attain from 1 to 3.5 $^{\circ}\text{C}$ by the year 2100 (i.e. the increase has been cut by half), after the dispersion of the solar radiation by the sulphate aerosols, originating from the emission of the sulphur dioxide, SO_2 . had been accounted for.

The circulation models – the $2 \times \text{CO}_2$ scenarios (i.e. the course of events after the doubling of the pre-industrial concentration of carbon dioxide – 280 ppm) have nowadays rather methodological significance. The numerical solutions to the equations of motion of the atmosphere, with consideration of the more important forces acting on the revolving Earth, the physical and chemical states of the air up to the level of the stratosphere, constitute a significant advance in the development of the physics of atmosphere.

Yet, attribution of the progressing climate warming solely to the anthropogenic part of the greenhouse effect is an uncertain, poorly justified assumption. It is namely not known what part of the increasing trend in the air temperature is due to the natural factors, and what – to the anthropogenic ones. Little is known about the tendencies of atmospheric concentration of the natural trace gases (water vapour, natural CO_2), which are

responsible for the essential part of the greenhouse effect – amounting to + 33°C in the pre-industrial years (the difference between the then temperature and the planetary one).

An essential role in the shaping of the Earth's climate will still be played, also in the 21st century, by the explosive volcanic eruptions, bringing about the appearance of the layer of volcanic sulphate aerosols in the stratosphere. This fact is being demonstrated through the long time series of the measurements of total radiation and air temperature, correlated with the indicators of concentration of volcanic dusts in the atmosphere. The inflow of solar energy to the surface of the Earth depends first of all on the solar constant, whose variability will condition the fluctuations of climate in the next century.

The results of the studies presented in this part of the Atlas indicate that one should interpret the contemporary changes of climate in the light of climate changes in the Quaternary and especially in the Holocene. These results point out also the need of elaborating the forecasts of both natural and anthropogenic tendencies of climate changes in the 21st century.

Changes of climate, its fluctuations and trends, and the respective forecasts, have high significance in planning of development of all the sectors of economy: agriculture, construction, energy, transport, etc.

That is also why it is most important to study the longest measurement series in Poland, serving as the basis for determining the range of variation of climate, air temperature and precipitation, and for probing into the future. It is still essential to identify the long-term changes and to elaborate the forecasts of climate with the use of the methods of modelling, due account being taken of the connections with the human activity. The global warming and the anomalies of climate in various zones of the globe threaten the life on Earth. The most disadvantageous changes include hurricanes, storms, as well as floods, landslides, avalanches, which bring altogether 85% of economic losses. Other extreme phenomena include earthquakes and volcanic eruptions. Large losses are also caused by droughts, heat waves (forest fires), and frosts.

The highest significance in the forecasts of climate changes and of the extreme phenomena in the 21st century must be attributed to the identification of the deterministic (periodical) components of the temporal trends in the meteorological variables. It is most important to determine the role of the fluctuations in the solar activity (solar constant) in the shaping (by the intermediary of the atmospheric circulation) of climate changes – including the extreme phenomena. The key problem is to better demonstrate that the fluctuations of the solar constant are conditioned by the changes in the parameters of the solar system, as evidenced by the statistical studies to date. This will make it possible to separate the natural shifts (warmings and coolings) of climate in Europe and in Poland. It will become possible to answer the question: what part of the increasing trend of air temperature (progressing warming) can be attributed to natural factors (volcanic eruptions included), and what part – to anthropogenic factors (the proper greenhouse effect).

Thus, it is important to identify the short- and long-term cycles of: air temperature, precipitation, Baltic Sea level, and in particular – of the extreme phenomena, which intensify during the climate warming: storms, floods, droughts, heat and frost waves, hurricanes, tornadoes, etc.

More detailed studies should also be conducted of the periodicity of the catastrophic volcanic eruptions and earthquakes, dangerous to life.

All these problems will still be studied at the Laboratory of Climatology of the University of Warsaw, both in the framework of own research projects and of the diploma works.

¹ Boryczka J., Stopa-Boryczka M., Lorenc H., Kicińska B., Błażek E., Skrzypczuk J., 2000, *Atlas współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce*, t. XIV, *Prognozy zmian klimatu Warszawy*, Wyd. WGSR UW, zmieniony rozdz. VI.

JERZY BORYCZKA
MARIA STOPA-BORYCZKA
HALINA LORENC
BOŻENA KICIŃSKA
ELŻBIETA BŁAŻEK
JAN SKRZYPCZUK

XIV. THE FORECAST OF THE CLIMATE CHANGE IN WARSAW

atlas

OF INTERDEPENDENCE
OF METEOROLOGICAL
AND GEOGRAPHICAL
PARAMETERS
IN POLAND

Warszawa 2000

XI. OCENA PROGNOZ ZMIAN TEMPERATURY POWIETRZA W WARSZAWIE WEDŁUG DANYCH Z LAT 1779-1979, 1779-1998 (OBSERWATORIUM ASTRONOMICZNE) I OKĘCIA (1951-2016)

11.1. Ocena prognoz zmian temperatury powietrza w Warszawie według danych z lat 1779-1990 (Obserwatorium Astronomiczne) – t. XIV

Na ogół, wiarygodne są prognozy zmian temperatury powietrza w Warszawie na lata 1991-2100 opracowane na podstawie danych z Obserwatorium Astronomicznego z lat 1779-1990 (Atlas t. XIV):

- Boryczka J., Stopa-Boryczka M., Lorenc H., Kicińska B., Błażek E., Skrzypczuk J., 2000, *Atlas współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce*, t. XIV *Prognoza zmian klimatu Warszawy w XXI wieku* (red. M. Stopa-Boryczka), Wyd. UW, ss. 209

Porównano średnie wartości temperatury powietrza w różnych przedziałach czasu (miesiące, pory roku, rok) zmierzone w Warszawie na Okęciu (T) z prognozowanymi $f(t)$ na lata 1991-2015.

Cykle temperatury powietrza w Warszawie wyznaczono na podstawie danych z lat 1779-1979 (Obserwatorium Astronomiczne). Okresy Θ , amplitudy b i fazy c wyznaczono metodą „sinusoid regresji” („optymalnych cykli”), zmieniając okres sinusoidy Θ w przedziale czasu 2,1- 250 lat z odstępem 0.1 roku:

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

Prognozy i rekonstrukcje temperatury powietrza – to wypadkowe nakładania się (interferencji) k cykli:

$$F(t) = a_o + at + \sum_{j=1}^k b_j \sin \left(\frac{2\pi}{\Theta_j} t + c_j \right)$$

gdzie: t – czas, at – składnik liniowy

Funkcje trendów czasowych temperatury powietrza $f(t)$, gdy $at=0$ i $F(t)$ – ze składnikiem liniowym at wzięto z Atlasu, t. XIV..

Porównano temperaturę powietrza w różnych przedziałach czasu (miesiące, pory roku, rok) zmierzone w Warszawie na Okęciu (T) z prognozowanymi $f(t)$ i $F(t)$ na lata 1991-2100. Równania opisujące interferencję cykli otrzymano przyjmując rok 1778 jako początek osi czasu $t=0$ ($t = -78$ – rok 1700, $t = 322$ – rok 2100)..

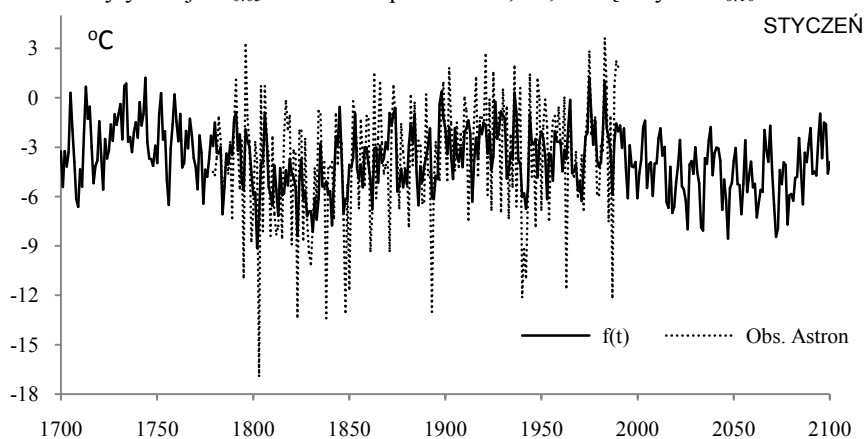
Wahania zmierzonych wartości temperatury powietrza w Warszawie (Okęcie) (średnich konsekwentnych 3-letnich) i prognozowanych sum opadów na lata 1991-2015, według modeli $f(t)$ (składnik liniowy $at = 0$) i $F(t)$ (składnik liniowy $at \neq 0$) są na ogół dodatnio skorelowane (rys. 11-15).

W styczniu funkcje **trendu czasowego** $f(t)$, gdy $at=0$ i $F(t)$ – ze składnikiem liniowym $at = 0,0118 t$ jest wypadkową interferencji 12 cykli obecnych w widmie oscylacji temperatury (Obserwatorium Astronomiczne), w tym najdłuższych okresów 122,7 i 204,7 lat:

$$f(t) = -3,734 + 1,016 \sin(2\pi t/2,6 + 2,426) + 0,6558 \sin(2\pi t/3,5 - 0,6561) + 0,6535 \sin(2\pi t/4,8 + 2,718) + \\ + 0,7148 \sin(2\pi t/6,6 + 0,6532) + 0,8569 \sin(2\pi t/7,7 - 1,821) + 1,056 \sin(2\pi t/9,3 + 0,7635) + \\ + 0,5900 \sin(2\pi t/13,0 + 0,5444) + 0,5849 \sin(2\pi t/15,4 + 1,928) + 0,5959 \sin(2\pi t/27,5 - 1,162) + \\ + 0,5427 \sin(2\pi t/62,5 - 0,2586) + 0,5881 \sin(2\pi t/122,7 + 2,761) + 1,166 \sin(2\pi t/204,7 + 3,00)$$

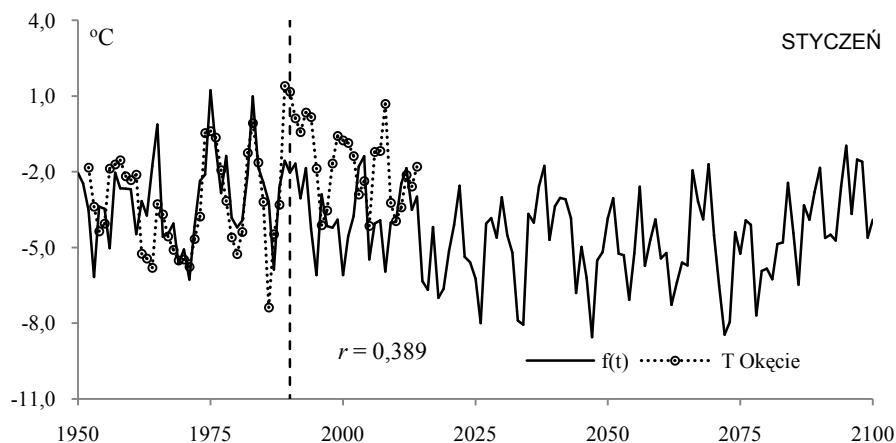
$$F(t) = -4,915 + 0,0118t + \\ + 1,016 \sin(2,4255 + 2\pi/2,6) + 0,667 \sin(-0,6526 + 2\pi/3,5) + 0,6569 \sin(2,727 + 2\pi/4,8) + \\ + 0,7157 \sin(0,6356 + 2\pi/6,6) + 0,8535 \sin(-1,82 + 2\pi/7,7) + 1,072 \sin(0,756 + 2\pi/9,3) + \\ + 0,5883 \sin(0,5276 + 2\pi/13) + 0,5903 \sin(1,8821 + 2\pi/15,4) + 0,5783 \sin(-1,08 + 2\pi/27,5) + \\ + 0,5092 \sin(-0,1398 + 2\pi/62,5) + 0,6507 \sin(1,787 + 2\pi/122,7) + 0,2585 \sin(2,954 + 2\pi/204,7)$$

Zmiany temperatury powietrza w styczniu w latach 1779-2100, tj. z prognozą na lata 1991-2100 przedstawiono na rys. 1-3. O dobrej zgodności wyników pomiarów z prognozami na lata 1991-2015 świadczą synchroniczne wahania temperatury T na Okęciu i prognozowanych $f(t)$. Współczynnik korelacji $r = 0,389$ zbliżony do wartości krytycznej $r_{0,05} = 0,423$ na poziomie 0,05, a większy od $r_{0,10} = 0,356$.

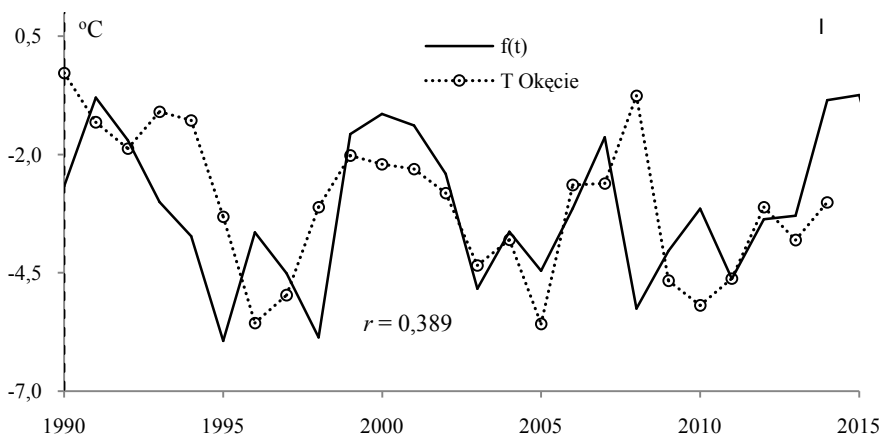


Rys. 1. Zmiany temperatury powietrza w Warszawie w styczniu w latach 1700-2100, Obs. Astron – wartości zmierzone w Warszawie (Obserwatorium Astronomiczne) w latach 1779-1990, $f(t)$ – obliczone z prognozą na lata 1991-2100

Fig. 1. Air temperature changes in Warsaw in January in the years 1700-2100, Obs. Astron – values measured in Warsaw (Astronomical Observatory) in the years 1779-1990, $f(t)$ – calculated values, with a forecast for the years 1991-2100



Rys. 2. Zmiany temperatury powietrza w Warszawie w styczniu w latach 1951-2100, T – wartości zmierzzone na Okęcie (średnie konsekutywne 3-letnie), $f(t)$ – obliczone z wzoru z prognozą na lata 1991-2100
Fig. 2. Air temperature changes in Warsaw in January in the years 1951-2035, T – values measured in Okęcie (3-year moving average), $f(t)$ – values calculated on the basis of the formula and with a forecast for the years 1991-2100



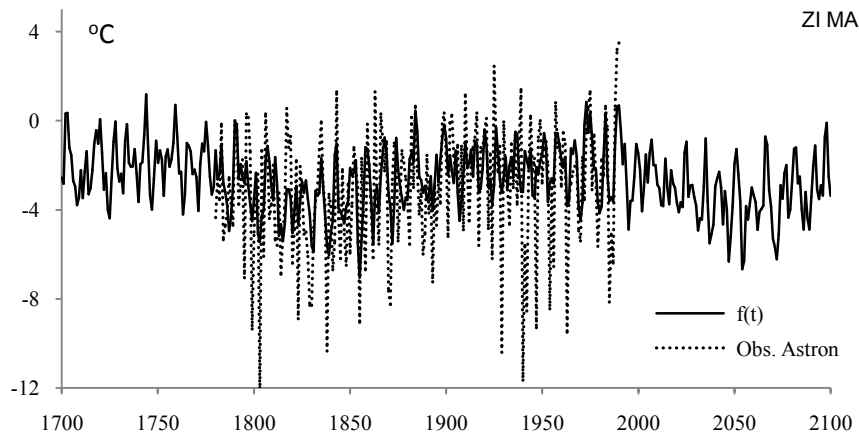
Rys. 3. Porównanie zmierzonych wartości temperatury powietrza w Warszawie-Okęcie w styczniu (średnich konsekutywnych 3-letnich) w 25-leciu 1991-2015 z prognozowanymi $f(t)$
Fig. 3. Comparison of measured air temperature values in Warsaw-Okęcie in January (3-year moving average) during the 25-year period 1991-2015, with predicted values $f(t)$

W zimie, trendy czasowe temperatury powietrza w Warszawie $T = f(t)$ i ze składnikiem liniowym $T = F(t)$ są wypadkową nakładania się 12 cykli obecnych w widmie temperatury, w tym najdłuższych 113.1 lat i 218.3 lat (rys. 4-6):

$$\begin{aligned}
 f(t) = & -2,634 + \\
 & +0,5148\sin(2\pi t/2,6-1,327) + 0,5715\sin(2\pi t/3,5+0,5523) + 0,6238\sin(2\pi t/5,2+0,05656) + \\
 & +0,4422\sin(2\pi t/5,7+2,486) + 0,7067\sin(2\pi t/7,7-0,7303) + 0,7349\sin(2\pi t/8,3-2,370) + \\
 & +0,4829\sin(2\pi t/8,7-0,3237) + 0,4078\sin(2\pi t/12,9+0,1328) + 0,456\sin(2\pi t/15,2+2,318) + \\
 & +0,4940\sin(2\pi t/18,0-3,058) + 0,3645\sin(2\pi t/113,1+2,040) + 0,8946\sin(2\pi t/218,3+3,073)
 \end{aligned}$$

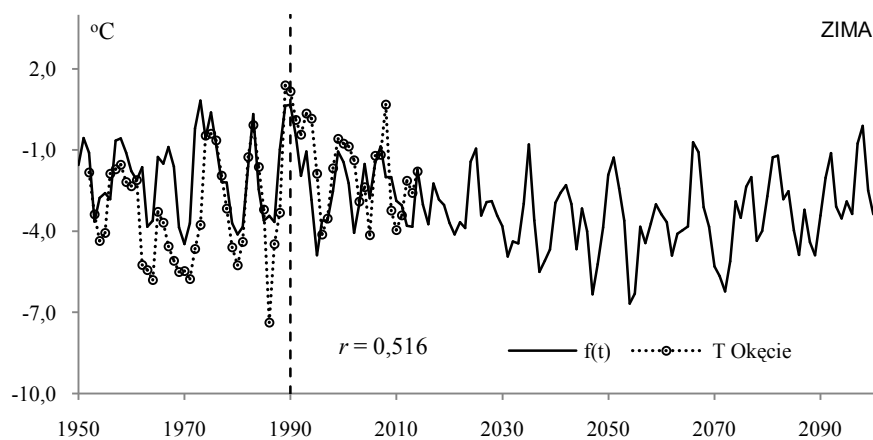
$$\begin{aligned}
 F(t) = & -3,721 + 0,01025t + \\
 & + 0,5218 \sin(2\pi t / 2,6 - 1,332) + 0,5674 \sin(2\pi t / 3,5 + 0,5448) + 0,6281 \sin(2\pi t / 5,2 + 0,06199) + \\
 & + 0,4266 \sin(2\pi t / 5,7 + 2,484) + 0,7091 \sin(2\pi t / 7,7 - 0,7349) + 0,7349 \sin(2\pi t / 8,3 - 2,368) + \\
 & + 0,4920 \sin(2\pi t / 8,7 - 0,3439) + 0,4082 \sin(2\pi t / 12,9 + 0,1191) + 0,4379 \sin(2\pi t / 15,2 + 2,252) + \\
 & + 0,4685 \sin(2\pi t / 18,0 - 3,097) + 0,5029 \sin(2\pi t / 113,1 + 1,197) + 0,2097 \sin(2\pi t / 218,3 + 2,497)
 \end{aligned}$$

Z porównań wartości temperatury powietrza wynikających z interferencji tych 12 cykli, tj. obliczonych z równań $T = f(t)$ i $T = F(t)$ z wartościami zmierzonymi w Warszawie-Okęcie w latach 1951-2010 wynika dobra zgodność wyników pomiarów z prognozami zim na lata 1991-2010 (rys. 4-6).



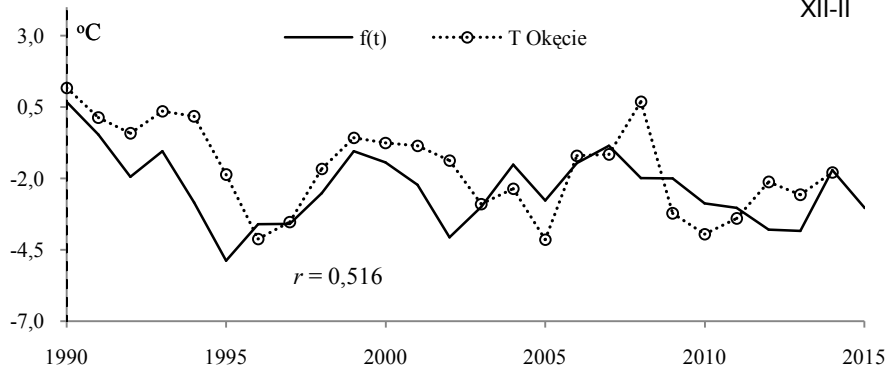
Rys. 4. Zmiany temperatury powietrza w Warszawie w zimie w latach 1700-2100, Obs. Astron – wartości zmierzone w Warszawie (Obserwatorium Astronomiczne) w latach 1779-1990, $f(t)$ – obliczone z prognozą na lata 1991-2100

Fig. 4. Air temperature changes in Warsaw in winter in the years 1700-2100, Obs. Astron – values measured in Warsaw (Astronomical Observatory) in the years 1779-1990, $f(t)$ – calculated values, with a forecast for the years 1991-2100



Rys. 5. Zmiany temperatury powietrza w Warszawie w zimie w latach 1951-2100, T – wartości zmierzone na Okęciu (średnie konsekwtywne 3-letnie), $f(t)$ – obliczone z wzoru z prognozą na lata 1991-2100

Fig. 5. Air temperature changes in Warsaw in winter in the years 1951-2035, T – values measured in Okęcie (3-year moving average), $f(t)$ – values calculated on the basis of the formula and with a forecast for the years 1991-2100



Rys. 6. Porównanie zmierzonych wartości temperatury powietrza w Warszawie-Okęcie w zimie, T – średnich konsekwentnych 3-letnich w 25-leciu 1991-2015 z prognozowanymi $f(t)$

Fig. 6. Comparison of measured air temperature values in Warsaw-Okęcie in Winter (T – 3-year moving average) during the 25-year period 1991-2015, with predicted values $f(t)$

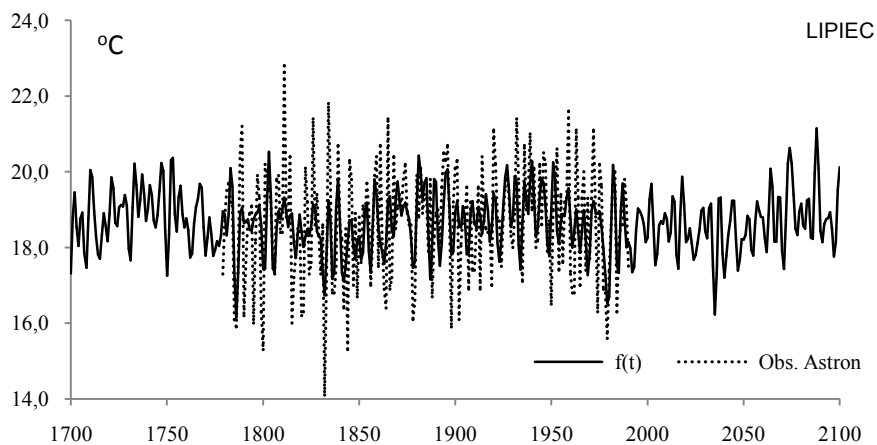
O dobrej zgodności wyników pomiarów (T) na Okęciu z prognozowaną temperaturą powietrza w zimie ($f(t)$) na lata 1991-2015 świadczy współczynnik korelacji $r = 0,456$ większy od wartości krytycznej $r_{0,05} = 0,380$ na poziomie istotności 0,05.

W przypadku średnich konsekwentnych 3-letnich współczynnik korelacji $r = 0,516$ jest znacznie większy i istotny na poziomie 0,01 ($r_{0,01} = 0,487$)

Tendencja rosnąca temperatury powietrza zimą w Warszawie w latach 1779-1990, może wynikać z nakładania się cykli naturalnych. Na przykład, coraz cieplejsze zimy w Warszawie – o $1,04^{\circ}\text{C}/100$ lat w latach 1779-1990 mogą być efektem nałożenia się kilku okresów: 2,6, 3,5, 5,2, 5,7, 7,7, 8,3, 8,7, 12,9, 15,2, 18,0, 113,1, 218,3, lat. Ich wypadkowa (prosta regresji) wyjaśnia wzrost temperatury powietrza podczas zim o $0,93^{\circ}\text{C}/100$ lat. Na zmienność antropogeniczną przypada zaledwie $0,1^{\circ}\text{C}/100$ lat.

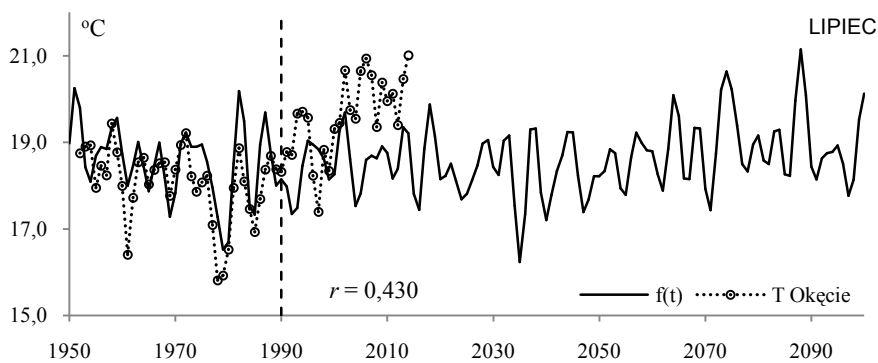
O zgodności przebiegu zmierzonych wartości temperatury (T) na Okęciu w lipcu (średnich konsekwentnych 3-letnich) z prognozowaną temperaturą ($f(t)$) na lata 1991-2015 świadczy dość duży współczynnik korelacji $r = 0,430$ istotny na poziomie 0,05 ($r_{0,05} = 0,380$) (rys. 7-9)

$$\begin{aligned}
 f(t) = & 18,65 + 0,4263 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{3,9}t - 1,246\right) + 0,3087 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{4,6}t - 0,4015\right) + 0,4696 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{5,1}t + 1,689\right) + \\
 & + 0,4297 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{6,2}t + 1,834\right) + 0,3384 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{7,1}t - 2,092\right) + 0,2149 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{7,7}t - 1,199\right) + \\
 & + 0,1957 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{9,1}t - 1,810\right) + 0,3025 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{11,4}t + 0,5977\right) + 0,2903 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{14,6}t + 0,07375\right) + \\
 & + 0,09521 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{12,8}t + 1,947\right) + 0,2780 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{66,8}t - 1,352\right) + 0,3071 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{184,7}t + 3,027\right)
 \end{aligned}$$



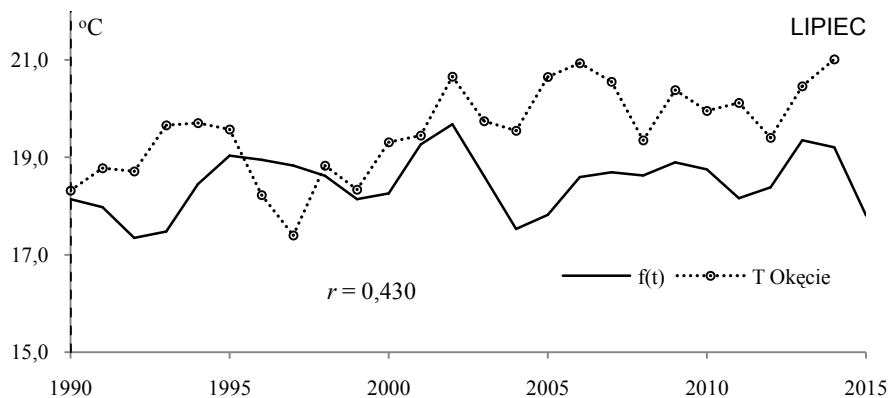
Rys. 7. Zmiany temperatury powietrza w Warszawie w lipcu w latach 1700-2100, Obs. Astron – wartości zmierzone w Warszawie (Obserwatorium Astronomiczne) w latach 1779-1990, $f(t)$ – obliczone z prognozą na lata 1991-2100

Fig. 7. Air temperature changes in Warsaw in July in the years 1700-2100, Obs. Astron – values measured in Warsaw (Astronomical Observatory) in the years 1779-1990, $f(t)$ – calculated values, with a forecast for the years 1991-2100



Rys. 8. Zmiany temperatury powietrza w Warszawie w lipcu w latach 1951-2100, T – wartości zmierzone na Okęciu (średnie konsekwtywne 3-letnie), $f(t)$ – obliczone z wzoru z prognozą na lata 1991-2100

Fig. 8. Air temperature changes in Warsaw in July in the years 1951-2035, T – values measured in Okęcie (3-year moving average), $f(t)$ – values calculated on the basis of the formula and with a forecast for the years 1991-2035

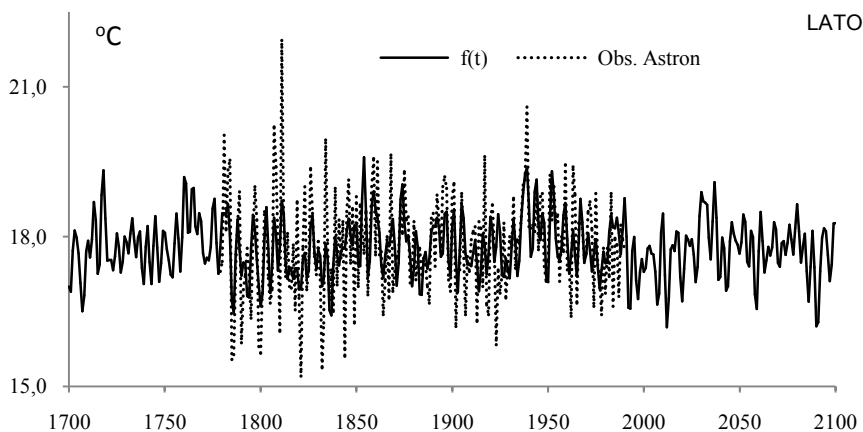


Rys. 9. Porównanie zmierzonych wartości temperatury powietrza T w Warszawie-Okęcie w lipcu (średnich konsekwentnych 3-letnich) w 25-leciu 1991-2015 z prognozowanymi $f(t)$

Fig. 9. Comparison of measured air temperature values T in Warsaw-Okęcie in July (3-year moving average during the 25-year period 1991-2015, with predicted values $f(t)$)

W lecie, trend czasowy temperatury powietrza w Warszawie $f(t)$ jest superpozycją 12 cykli obecnych w widmie wartości temperatury (Obserwatorium Astronomiczne) z cyklami najdłuższymi 91.2 lat i 208.2 lat (rys. 10-11):

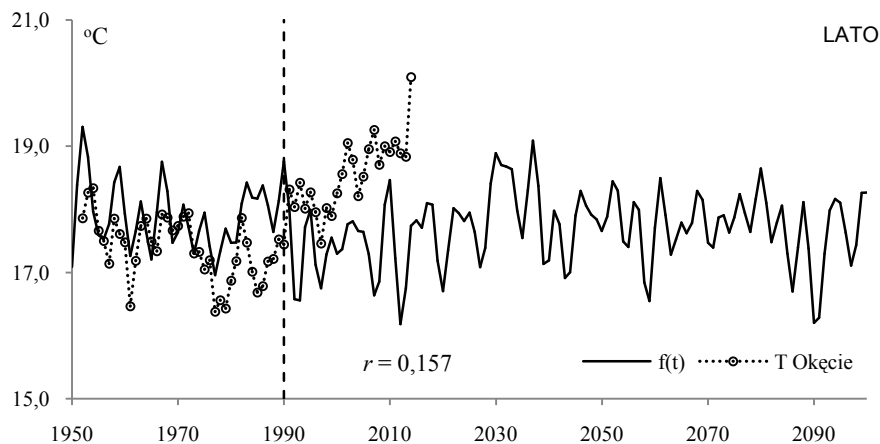
$$\begin{aligned}
 f(t) = & 17.81 + 0.3927 \sin(2\pi t / 3.9 + 0.1769) + 0.2666 \sin(2\pi t / 4.7 + 1.869) + 0.2484 \sin(2\pi t / 5.2 - 1.224) \\
 & + 0.22531 \sin(2\pi t / 6.5 - 1.737) + 0.2747 \sin(2\pi t / 7.1 - 1.389) + 0.08968 \sin(2\pi t / 7.4 - 0.1413) \\
 & + 0.1762 \sin(2\pi t / 7.8 - 0.2554) + 0.2644 \sin(2\pi t / 15.9 + 1.476) + 0.2181 \sin(+2\pi t / 22.5 + 0.2921) \\
 & + 0.2304 \sin(2\pi t / 44 - 3.034) + 0.239 \sin(2\pi t / 91.2 + 2.720) + 0.1317 \sin(2\pi t / 208.2 - 2.804)
 \end{aligned}$$



Rys. 10. Zmiany temperatury powietrza w Warszawie w lecie w latach 1700-2100, Obs. Astron – wartości zmierzone w Warszawie (Obserwatorium Astronomiczne) w latach 1779-1990, $f(t)$ – obliczone z prognozą na lata 1991-2100

Fig. 10. Air temperature changes in Warsaw in summer in the years 1700-2100, Obs. Astron – values measured in Warsaw (Astronomical Observatory) in the years 1779-1990, $f(t)$ – calculated values, with a forecast for the years 1991-2100

W dziesięcioleciu 2001-2010 pogorszyła się sprawdzalność prognoz sezonów letnich w porównaniu z 1991-2000 (rys. 11).

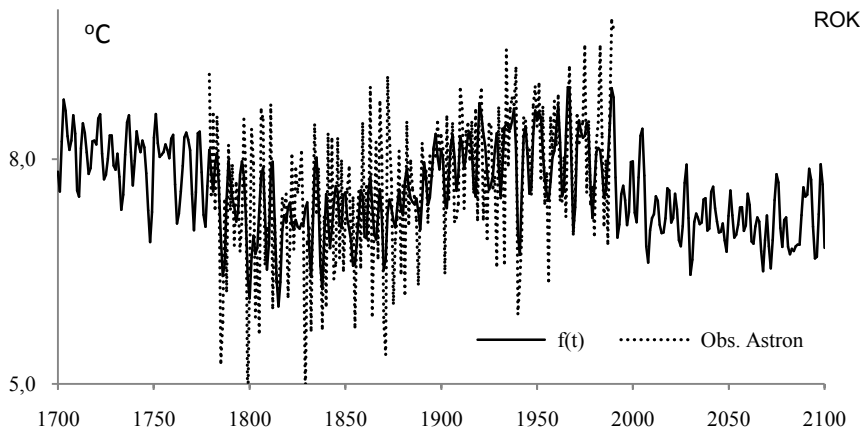


Rys. 11. Porównanie zmierzonych wartości temperatury powietrza T w Warszawie-Okęcie w lecie (średnich konsekwentnych 3-letnich) w 25-leciu 1991-2015 z prognozowanymi $f(t)$

Fig. 11. Comparison of measured air temperature values T in Warsaw-Okęcie in summer (3-year moving average) during the 25-year period 1991-2015, with predicted values $f(t)$

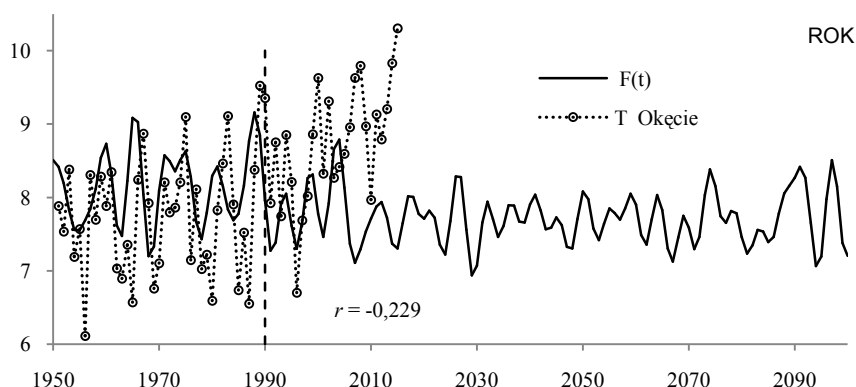
Trend czasowy średniej rocznej temperatury powietrza w Warszawie $T = F(t)$ (ze składnikiem liniowym at) jest superpozycją 12 cykli – z cyklami najdłuższymi 69.7 lat i 223.9 lat (rys. 12-13):

$$\begin{aligned}
 F(t) = & 7.356 + 0.002366 t + \\
 & + 0.2627 \sin(2\pi t / 4.7 + 2.059) + 0.1967 \sin(2\pi t / 5.5 + 1.194) + 0.1822 \sin(2\pi t / 5.7 + 2.775) \\
 & + 0.09961 \sin(2\pi t / 6.5 + 1.378) + 0.1767 \sin(2\pi t / 7.4 - 0.6535) + 0.2688 \sin(2\pi t / 7.7 - 0.7022) + \\
 & + 0.180 \sin(2\pi t / 12.9 + 0.3563) + 0.1544 \sin(2\pi t / 14.0 + 0.9523) + 0.1561 \sin(2\pi t / 17.7 + 3.010) \\
 & + 0.08633 \sin(2\pi t / 69.7 + 2.265) + 0.3849 \sin(2\pi t / 223.9 - 3.131)
 \end{aligned}$$



Rys. 12. Zmiany temperatury powietrza w Warszawie w roku w latach 1700-2100, Obs. Astron – wartości zmierzone w Warszawie (Obserwatorium Astronomiczne) w latach 1779-1990, $F(t)$ – obliczone z prognozą na lata 1991-2100

Fig. 12. Air temperature changes in Warsaw in year in the years 1700-2100, Obs. Astron – values measured in Warsaw (Astronomical Observatory) in the years 1779-1990, $F(t)$ – calculated values, with a forecast for the years 1991-2100



Rys. 13. Porównanie zmierzonych średnich rocznych wartości temperatury powietrza T w Warszawie-Okęcie (średnich konsekwentnych 3-letnich) w 25-leciu 1991-2015 z prognozowanymi $f(t)$

Fig. 13. Comparison of measured yearly mean air temperature values average T in Warsaw-Okęcie (3-year moving average) during the 25-year period 1991-2015, with predicted values $f(t)$

Dobra zgodność wyników pomiarów temperatury z prognozami występuje tylko w pierwszych 13 latach 1991-2003 (współczynnik korelacji $r = 0.279$)

11.2. Ocena prognoz zmian temperatury powietrza w Warszawie według danych z lat 1779-1998 (Obserwatorium Astronomiczne) – t. XVII, XIX i XX-XXI

Dłuższe serie pomiarowe temperatury powietrza wraz z upływem czasu umożliwiają weryfikację opracowanych wcześniej prognoz..

Wspomniane prognozy były opracowane na podstawie długich serii pomiarów temperatury w różnych miejscach Europy i były już częściowo sprawdzane (Boryczka i in., 2012 a, b, c)

Celem tego rozdziału jest weryfikacja prognoz zmian temperatury powietrza w Warszawie do roku 2100, opublikowanych w trzech tomach czasopisma *Atlas współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce*, dotyczących zimy i lata (t. XVII), miesięcy styczeń i lipiec (t. XIX) oraz średniej rocznej (t. XX-XXI):

- Boryczka J., Stopa-Boryczka M., Baranowski D., Kirchenstein M., Błażek E., Skrzypczuk J., 2003, t. XVII. *Mroźne zimy i upalne lata w Polsce*, Wyd. UW, ss.297; rozdz. V *Zmiany temperatury powietrza w Europie w XVIII-XX wieku. Prognozy po rok 2100*, s. 31-171.
- Boryczka J., Stopa-Boryczka M., Pietras K., Bijak S., J., Błażek E., Skrzypczuk J., 2005, t. XIX. *Cechy termiczne klimatu Europy*, Wyd. UW, ss.184; rozdz. IV. *Ochłodzenia i ocieplenia klimatu Europy w ostatnich stuleciach*, s. 35-131.
- Stopa-Boryczka M., Boryczka J., Bijak S., Cebulski R., Błażek E., Skrzypczuk J., 2007, t. XX-XXI. *Cykliczne zmiany klimatu Europy w ostatnim tysiącleciu według danych dendrologicznych*, Wyd. UW, ss. 226; rozdz. III. *Ochłodzenia i ocieplenia klimatu Europy w XIX-XXI wieku*, s. 97-126.

Zweryfikowano prognozy zmian temperatury powietrza (do roku 2100) w Warszawie wybranej spośród 40 miejsc Europy: Warszawa (1779-1998 i 1779-2002)

Prognozy temperatury powietrza na podstawie danych z 40 miast na obszarze Europy są opracowane według cykli wyznaczonych metodą sinusoid regresji (Boryczka, 1998).

Wyniki pomiarów y_1, \dots, y_n , wykonane w dowolnych odstępach czasu t_1, \dots, t_n , czyli punkty empiryczne (y_i, t_i) aproksymowano kolejnymi sinusoidami regresji o okresie Θ , amplitudzie b i fazie c , z „krokiem” $\Delta\Theta = 0,1$ roku:

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

Prognozowano według interferencji k najistotniejszych statystycznie („najsilniejszych”) cykli $F(t)$ lub $f(t)$ – bez składnika liniowego ($at=0$):

$$F(t) = a_o + at + \sum_{j=1}^k b_j \sin \left(\frac{2\pi}{\Theta_j} t + c_j \right)$$

Prognozy temperatury powietrza w Warszawie w: zimie, lecie, styczniu, lipcu i roku otrzymano według interferencji cykli o okresach Θ , amplitudach b i fazach c (tab. 1-10). W przypadku kolejnych cykli średniej rocznej (rok) podano również wartości współczynnika korelacji R i testu Fishera-Snedecora F_{obl} .

Weryfikacja tych prognoz obecnie polega na zbadaniu synchroniczności przebiegów (koincydencji ekstremów) wartości temperatury zmierzonych (T_i) i prognozowanych $F(t)$, $f(t)$ – na ocenie istotności korelacji, z zastosowaniem testu t-Studenta.

W weryfikacji wykorzystano późniejsze wyniki pomiarów na stacjach:

Warszawa (Okęcie, 1951-2016). Materiały źródłowe z Warszawy do roku 2016 stanowią średnie miesięczne wartości temperatury powietrza – pochodzące z archiwum PIHM i IMGW

Prognozy temperatury powietrza w Warszawie (Obserwatorium Astronomiczne) w zimie, lecie, styczniu, lipcu i roku otrzymano według interferencji cykli o okresach Θ , amplitudach b i fazach c (tab. 1 -2).

Są one wypadkową nakładania się cykli: zima –13 z najdłuższym 113,4 lat, lato – 13 z najdłuższym 75,9, styczeń – 9 z najdłuższym 116,9, lipiec– 9 z najdłuższym 102,8, rok – 9 z najdłuższym 106,1 lat, obecnych w widmach temperatury powietrza, ze składnikiem liniowym $a_o+ at$ lub $at=0$.

Tabela 1. Cykle temperatury powietrza w Warszawie (1779-1998) – zima, lato, styczeń

Table 1. The cycles of air temperature in Warsaw(1779-1998) – winter, summer, January

Warszawa								
Zima			Lato			Styczeń		
Θ lat	b °C	c	Θ lat	b °C	c	Θ lat	b °C	c
7,1	0,4175	2,4521	3,9	0,3641	-0,7784	2,6	0,9280	-2,8418
10,3	0,2996	1,7114	7,1	0,3331	1,3276	3,3	0,7682	-1,5864
12,9	0,4887	1,1769	11,2	0,1139	0,9389	7,8	0,7486	-0,2256
15,3	0,4423	1,1935	14,2	0,1672	-1,1165	8,3	0,6442	2,0114
18,1	0,4416	1,9332	15,7	0,2517	-0,6862	8,7	0,4123	2,7596
20,1	0,1632	0,3849	19,1	0,1846	-0,4722	9,2	0,9003	-1,5833
22,5	0,2333	-2,5650	23,5	0,1166	-3,1350	22,5	0,6046	-2,8984
25,2	0,0842	-1,3204	25,9	0,0810	2,0726	66,5	0,4700	2,0910
28,1	0,0147	0,1270	29,8	0,2022	1,4964	116,9	0,7507	0,1344
32,5	0,1087	1,6750	35,6	0,0727	0,7218			
39,3	0,3132	-2,5117	42,4	0,1176	2,3673			
73,8	0,2229	1,9412	52,4	0,1160	1,2668			
113,4	0,5201	3,1386	75,9	0,3840	-2,3167			

Tabela 2. Cykle temperatury powietrza w Warszawie (1779-1998) – Lipiec, rok
Table 2. The cycles of air temperature in Warsaw(1779-1998) – July, year

Lipiec			Rok				
Θ lat	b °C	c	Θ lat	b °C	c	R	F _{obl}
2,3	0,4913	-0,7533	4,0	0,1721	-1,7682	0,129	1,86
3,4	0,3516	-2,8145	4,7	0,2252	-1,1214	0,160	2,87
7,1	0,3834	1,4953	5,5	0,2076	-1,4487	0,166	3,12
7,9	0,2945	-0,5240	5,7	0,1615	1,9814	0,149	2,49
12,9	0,3346	-0,4188	7,8	0,2735	0,3040	0,194	4,28
20,4	0,3947	1,7183	11,3	0,1695	-0,9404	0,111	1,37
30,0	0,4100	-2,4146	12,8	0,2236	0,0026	0,156	2,74
83,0	0,3030	-0,6115	14,1	0,2039	-0,1043	0,170	3,25
102,8	0,3536	0,4917	106,1	0,1637	2,1264	0,120	1,61

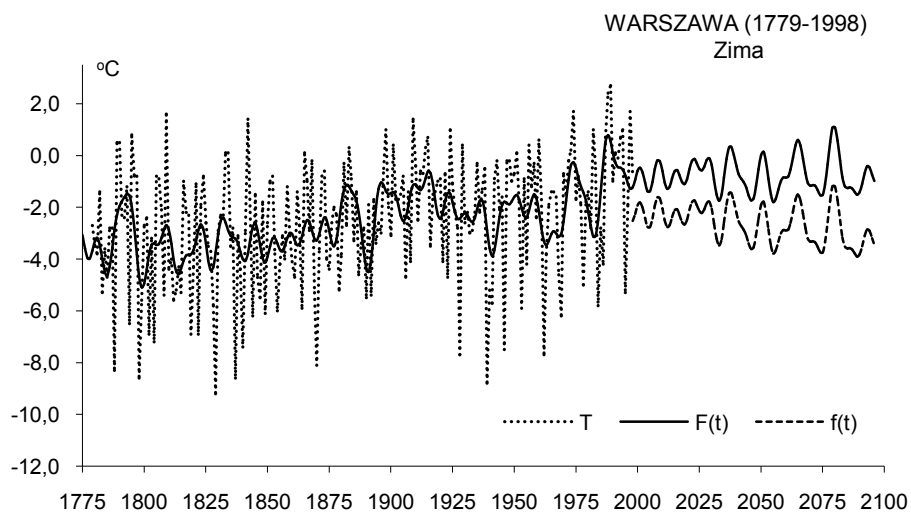
Funkcje trendów czasowych – to wypadkowe interferencji cykli $F(t) = a_0 + at + \dots$ (ze składnikiem liniowym) i $f(t)$ (bez składnika liniowego, $at=0$). Dokładność aproksymacji serii pomiarowej charakteryzuje współczynnik korelacji wielokrotnej R :

Warszawa

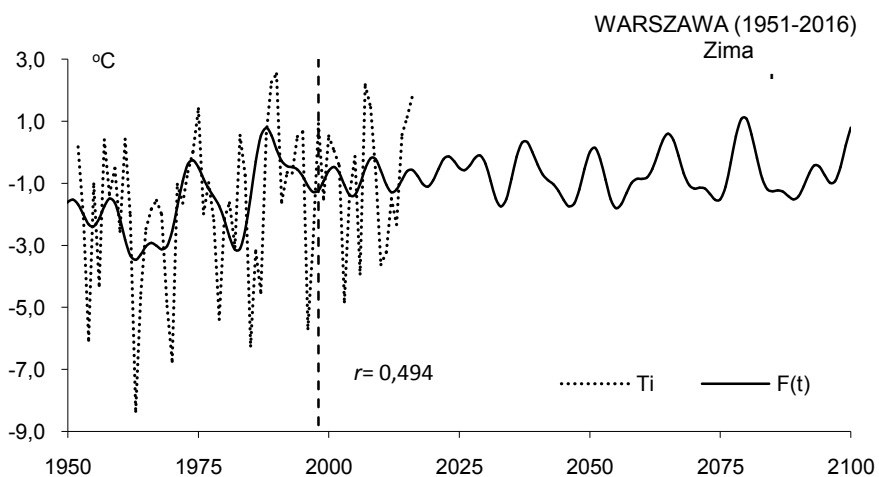
Zima	$F(t) = -25,9473 t + 0,01187 t + \dots$	$R = 0,480$
Lato	$F(t) = 16,84904 + 0,000524 t + \dots$	$R = 0,552$
Styczeń	$F(t) = -30,0974 + 0,014021 t + \dots$	$R = 0,528$
Lipiec	$F(t) = 16,24038 + 0,00046 t + \dots$	$R = 0,532$
Rok	$F(t) = -3,78794 + 0,006076 t + \dots$	$R = 0,585$

Synchroniczne są wahania średnich zmierzonych wartości temperatury powietrza w Warszawie (Okęcie) w zimie (XII-II) i lecie (VI-VIII) w 18-leciu 1999-2016 z prognozowanymi $T = f(t)$. W zimie (rys. 14-17) współczynnik korelacji $r = 0,494$ między średnimi wartościami zmierzonymi T_i i prognozowanymi $f(t)$ jest większy od wartości krytycznej poziomu istotności 0,05 ($r_{0,05} = 0,444$, $n=18$). Ponadto w zimie (współczynnik korelacji $r_3 = 0,576$ między średnimi konsekwentnymi 3-letnimi wartościami zmierzonymi T_3 i prognozowanymi $f(t)$ na lata 1999-2016 jest istotny na poziomie 0,01 ($r_{0,01} = 0,561$). Natomiast w lecie (rys. 19-21) współczynnik korelacji $r = 0,598$ między wartościami zmierzonymi na Okęciu T_i i prognozowanymi $f(t)$ jest istotny na poziomie 0,01 ($r_{0,01} = 0,561$), a wyjątkowo mniejszy $r_3 = 0,492$ jest istotny na poziomie 0,05.

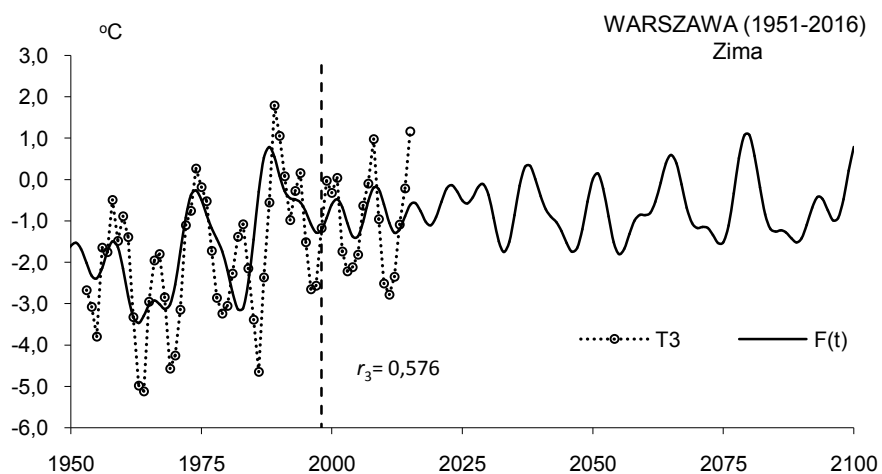
W styczniu (rys. 22-25) współczynnik korelacji $r = 0,355$ między T_i i $F(t)$ nie jest istotny na poziomie 0,05, a $r_3 = 0,492$ między T_3 i $F(t)$ jest istotny. W lipcu (rys. 26-29) współczynniki korelacji r i r_3 są ujemne. Średnia roczna temperatura T_i i T_3 na Okęciu jest bardzo mało skorelowana ($r = 0,058$, $r_3 = 0,221$) z wartościami prognozowanymi $F(t)$ (rys. 30-33).



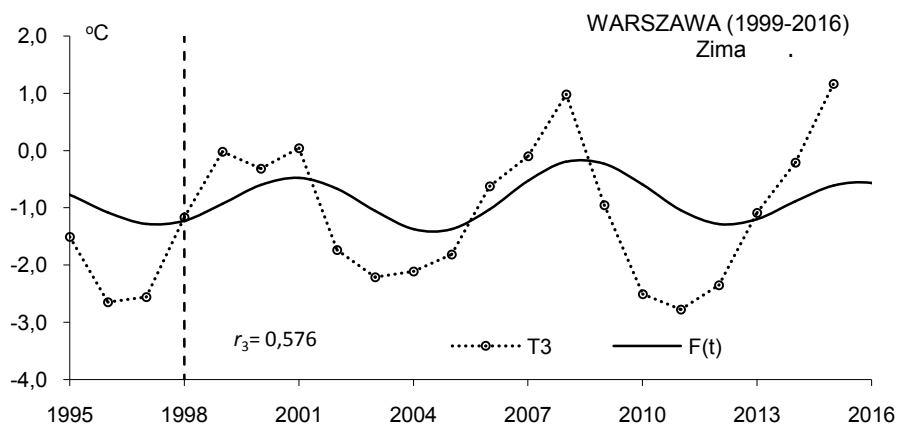
Rys. 14. Zmiany średniej temperatury powietrza w zimie w Warszawie (Obserwatorium Astronomiczne, 1779-2100); T – wartości zmierzone, $F(t)$, $f(t)$ – wartości obliczone, z prognozą na lata 1999-2100
Fig.14. Changes of mean air temperature in winter in Warsaw (Astronomical Observatory, 1779-2100); T – measured values, $F(t)$, $f(t)$ – calculated values, with forecast for the years 1991-2100



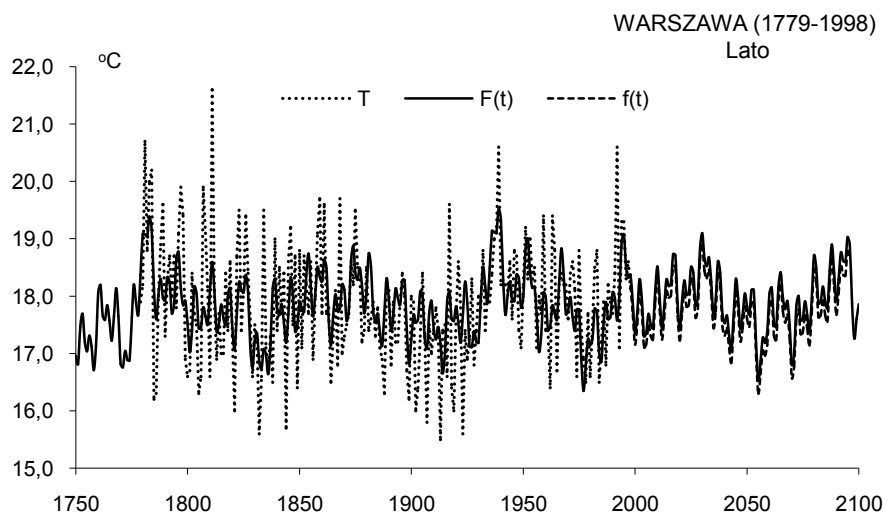
Rys. 15. Zmiany średniej temperatury powietrza w zimie w Warszawie (1951-2100); T_1 wartości zmierzone (Okęcie, 1951-2016), $F(t)$ – wartości obliczone (Obserwatorium Astronomiczne), z prognozą na lata 1999-2100
Fig. 15. Changes of mean air temperature in winter in Warsaw (Okęcie, 1951-2016); T_1 – measured values, (Okęcie, 1951-2016), $F(t)$ – calculated values (Astronomical Observatory), with forecast for the years 1999-2100



Rys. 16. Zmiany średniej temperatury powietrza w zimie w Warszawie (Okęcie, 1951-2100); T_3 – wartości zmierzone, średnie konsekwentne 3-letnie (Okęcie, 1951-2016), $F(t)$ – wartości obliczone (Obserwatorium Astronomiczne., z prognozą na lata 1999-2100)
Fig. 16. Changes of mean air temperature in winter in Warsaw (Okęcie, 1951-2100); T_3 – measured values, 3-year moving average (Okęcie, 1951-2016), $F(t)$ – calculated values (Astronomical Observatory, 1779-1998), with forecast for the years 1999-2100

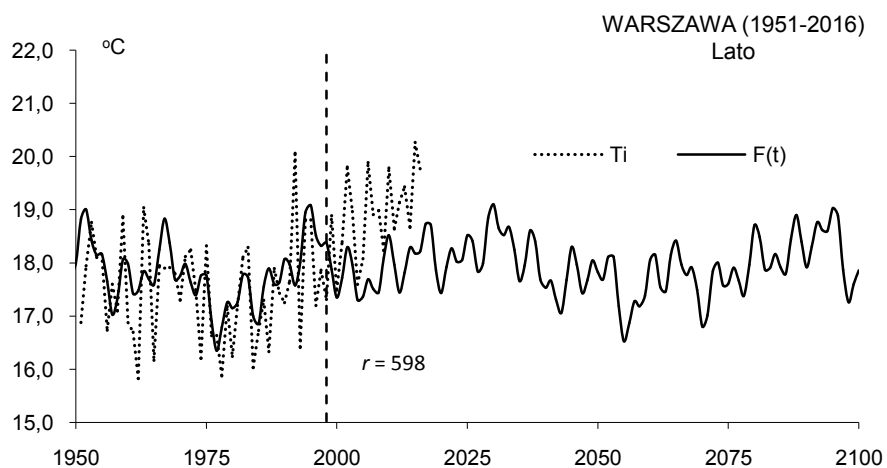


Rys. 17. Zmiany średniej temperatury powietrza w zimie w Warszawie (Okęcie, 1999-2016); T_3 – wartości zmierzone, średnie konsekwentne 3-letnie, $F(t)$ – wartości obliczone (Obserwatorium Astronomiczne., z prognozą na lata 1999-2016)
Fig. 17. Changes of mean air temperature in winter in Warsaw (Okęcie, 1999-2016); T_3 – measured values, 3-year moving average, $F(t)$ – calculated values (Astronomical Observatory, 1779-1998), with forecast for the years 1999-2016



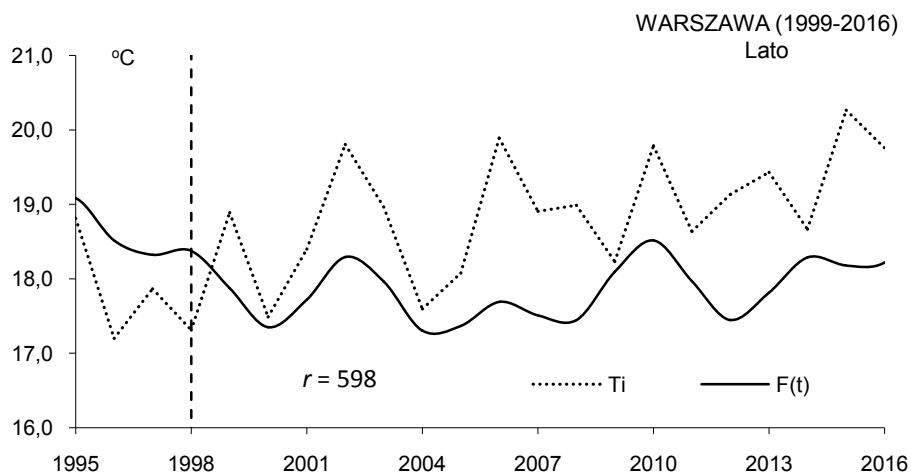
Rys 18 Zmiany średniej temperatury powietrza w lecie w Warszawie (Obserwatorium Astronomiczne, 1779-2100); T – wartości zmierzone, $F(t)$, $f(t)$ – wartości obliczone, z prognozą na lata 1999-2100

Fig. 18. Changes of mean air temperature in summer in Warsaw (Astronomical Observatory, 1779-2100); T – measured values, $F(t)$, $f(t)$ – calculated values, with forecast for the years 1991-2100



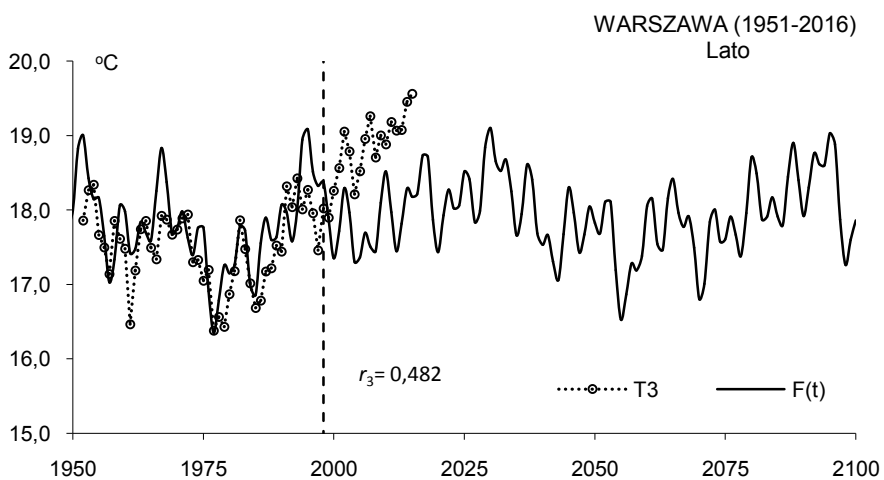
Rys. 19. Zmiany średniej temperatury powietrza w lecie w Warszawie (1951-2100); T_i wartości zmierzone (Okęcie, 1951-2016); $F(t)$ – wartości obliczone (Obserwatorium Astronomiczne), z prognozą na lata 1999-2100

Fig. 19. Changes of mean air temperature in summer in Warsaw (1951-2100); T_i – measured values, (Okęcie, 1951-2016); $F(t)$ – calculated values (Astronomical Observatory), with forecast for the years 1999-2100



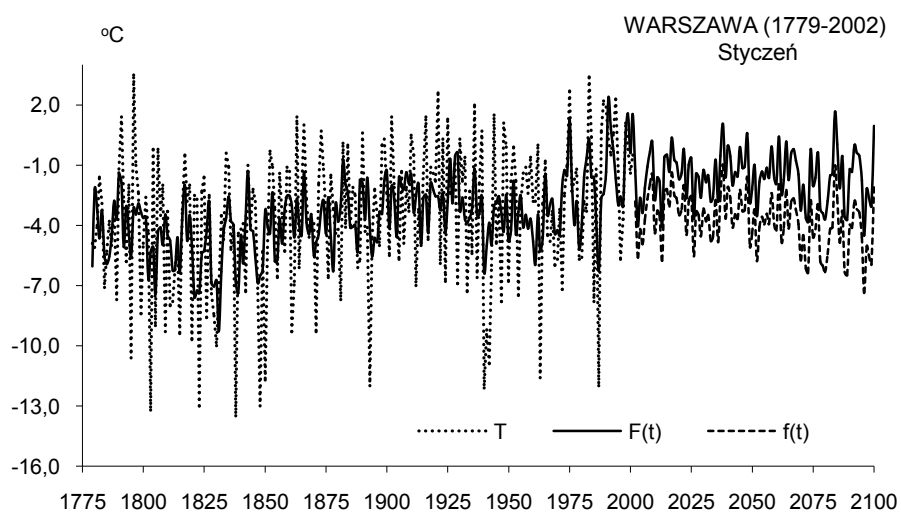
Rys. 20. Zmiany średniej temperatury powietrza w lecie w Warszawie (1999-2016); T_1 – wartości zmierzone (Okęcie, 1999-2016), $F(t)$ – wartości obliczone (Observatorium Astronomiczne), z prognozą na lata 1999-2016

Fig. 20. Changes of mean air temperature in summer in Warsaw (1999-2016); T_1 – measured values (Okęcie, 1999-2016), $F(t)$ – calculated values (Astronomical Observatory), with forecast for the years 1999-2016

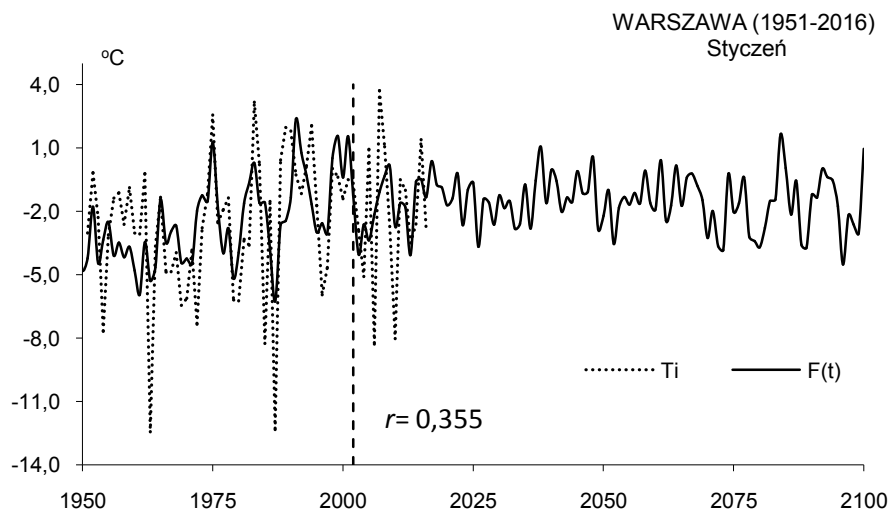


Rys. 21. Zmiany średniej temperatury powietrza w zimie w Warszawie (1951-2100); T_3 – wartości zmierzone, średnie konsekwentne 3-letnie (Okęcie, 1951-2016); $F(t)$ – wartości obliczone (Observatorium Astronomiczne), z prognozą na lata 1999-2100

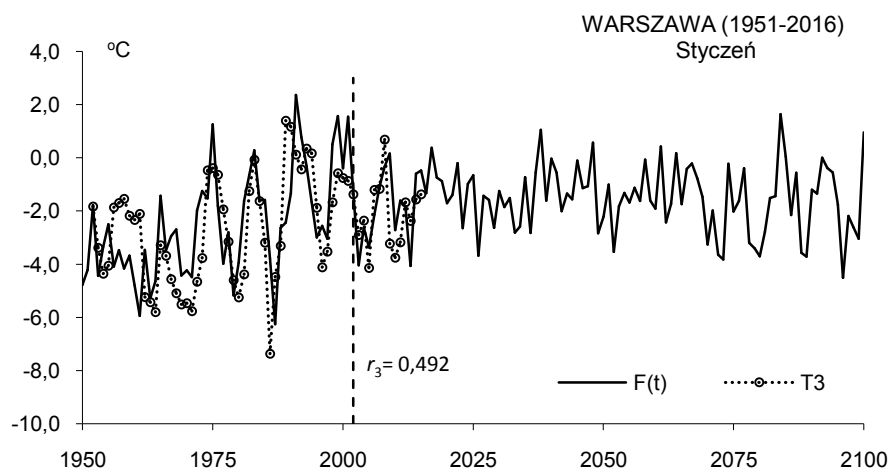
Fig. 21. Changes of mean air temperature in winter in Warsaw (1951-2100); T_3 – measured values, 3-year moving average (Okęcie, 1951-2016); $F(t)$ – calculated values (Astronomical Observatory, 1779-1998), with forecast for the years 1999-2100



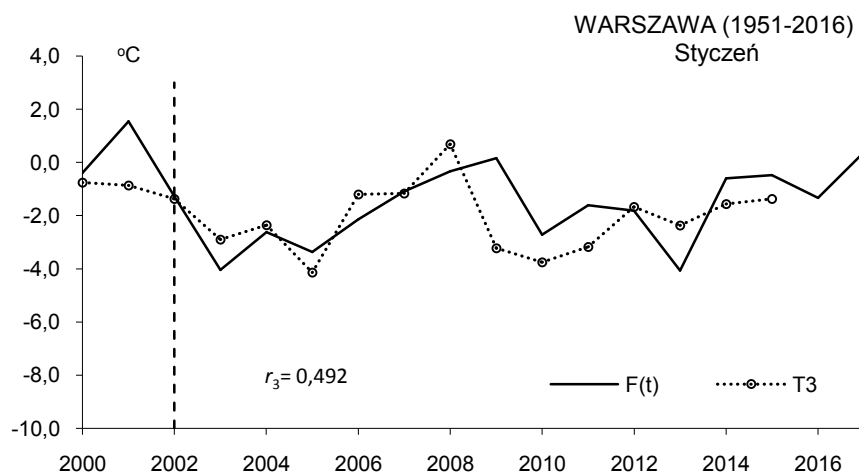
Rys. 22. Zmiany średniej temperatury powietrza w styczniu w Warszawie (Obserwatorium Astronomiczne, 1779-2100); T – wartości zmierzone, $F(t)$, $f(t)$ – wartości obliczone, z prognozą na lata 2003-2100
Fig. 22. Changes of mean air temperature in January in Warsaw (Astronomical Observatory, 1779-2100; T – measured values, $F(t)$, $f(t)$ – calculated values, with forecast for the years 2003-2100



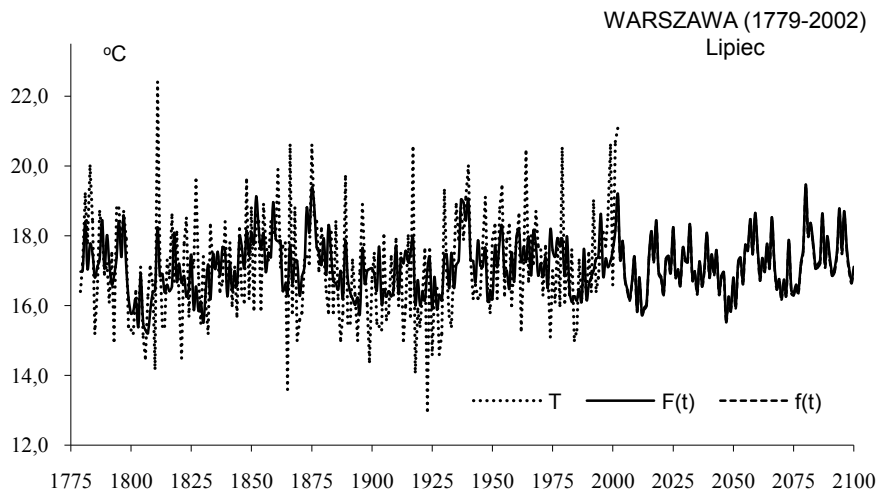
Rys. 23. Zmiany średniej temperatury powietrza w styczniu w Warszawie (1951-2100); T_i wartości zmierzone (Okęcie, 1951-2016); $F(t)$ – wartości obliczone (Obserwatorium Astronomiczne), z prognozą na lata 2003-2100
Fig. 23. Changes of mean air temperature in January in Warsaw (1951-2100); T_i – measured values, (Okęcie, 1951-2016); $F(t)$ – calculated values (Astronomical Observatory), with forecast for the years 2003-2100



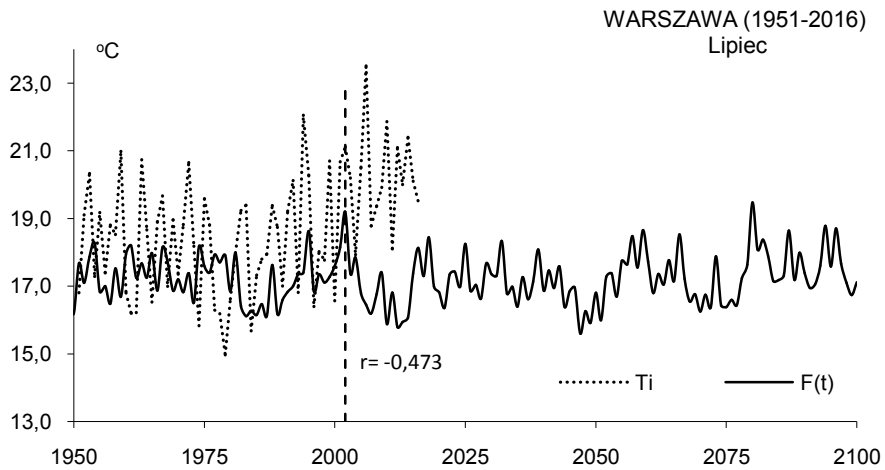
Rys. 24. Zmiany średniej temperatury powietrza w styczniu w Warszawie (1951-2100); T_3 – wartości zmierzane, średnie konsekwtywne 3-letnie (Okęcie, 1951-2016); $F(t)$ – wartości obliczone (Observatorium Astronomiczne, z prognozą na lata 1999-2100)
Fig. 24. Changes of mean air temperature in January in Warsaw (1951-2100); T_3 – measured values, 3-year moving average (Okęcie, 1951-2016); $F(t)$ – calculated values (Astronomical Observatory, 1779-1998), with forecast for the years 1999-2100



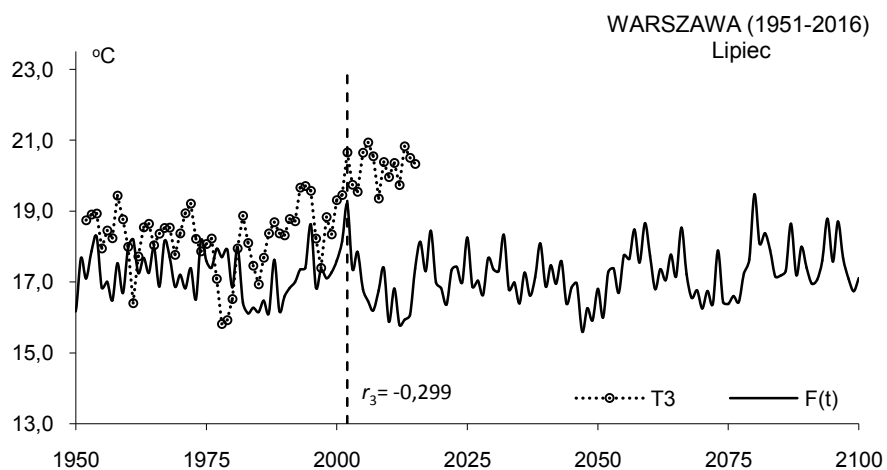
Rys. 25. Zmiany średniej temperatury powietrza w styczniu w Warszawie (2003-2016); T_3 – wartości zmierzane, średnie konsekwtywne 3-letnie (Okęcie, 2003-2016); $F(t)$ – wartości obliczone (Observatorium Astronomiczne, z prognozą na lata 2003-2016)
Fig. 25. Changes of mean air temperature in January in Warsaw (2003-2016); T_3 – measured values, 3-year moving average (Okęcie, 2003-2016); $F(t)$ – calculated values (Astronomical Observatory, with forecast for the years 2003-2016)



Rys. 26. Zmiany średniej temperatury powietrza w lipcu w Warszawie (Obserwatorium Astronomiczne, 1779-2100); T – wartości zmierzone, $F(t)$, $f(t)$ – wartości obliczone, z prognozą na lata 2003-2100
Fig. 26. Changes of mean air temperature in July in Warsaw (Astronomical Observatory, 1779-2100); T – measured values, $F(t)$, $f(t)$ – calculated values, with forecast for the years 2003-2100

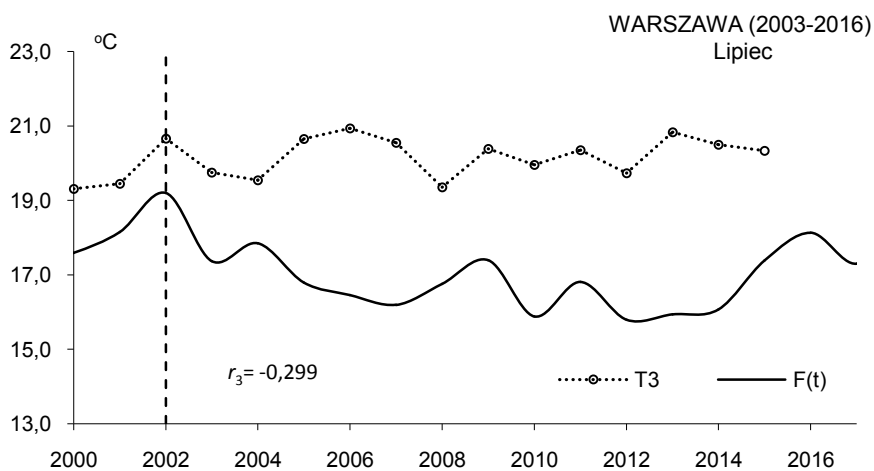


Rys. 27. Zmiany średniej temperatury powietrza w lipcu w Warszawie (1951-2100); T_i – wartości zmierzone (Okęcie, 1951-2016); $F(t)$ – wartości obliczone (Obserwatorium Astronomiczne), z prognozą na lata 2003-2100
Fig. 27. Changes of mean air temperature in July in Warsaw (1951-2100); T_i – measured values, (Okęcie, 1951-2016); $F(t)$ – calculated values (Astronomical Observatory), with forecast for the years 2003-2100



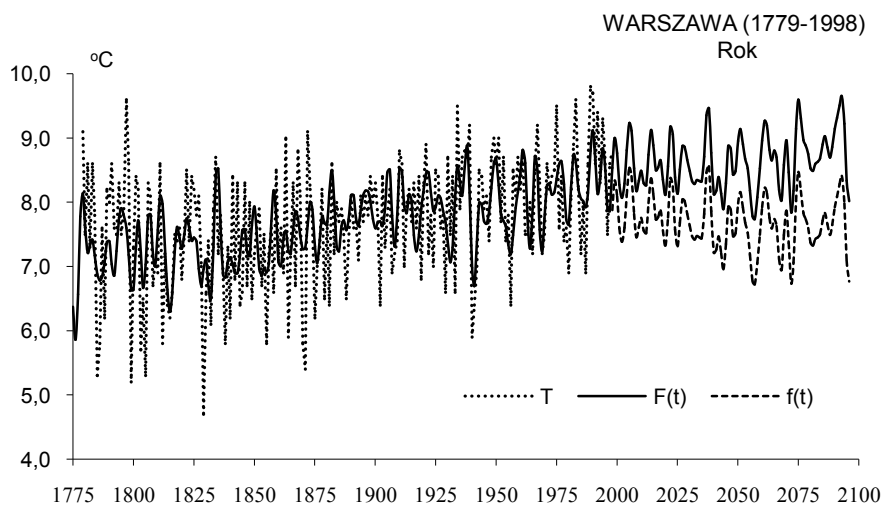
Rys. 28. Zmiany średniej temperatury powietrza w lipcu w Warszawie (1951-2100); T_3 – wartości zmierzone, średnie konsekwentne 3-letnie (Okęcie, 1951-2016); $F(t)$ – wartości obliczone (Obserwatorium Astronomiczne, z prognozą na lata 1999-2100)

Fig. 28. Changes of mean air temperature in July in Warsaw (1951-2100); T_3 – measured values, 3-year moving average (Okęcie, 1951-2016); $F(t)$ – calculated values (Astronomical Observatory, 1779-1998), with forecast for the years 1999-2100

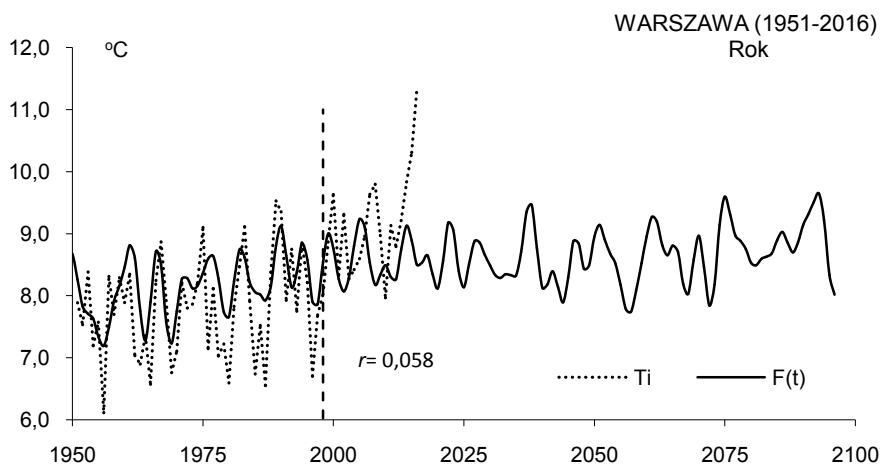


Rys. 29. Zmiany średniej temperatury powietrza w lipcu w Warszawie (2003-2016); T_3 – wartości zmierzone, średnie konsekwentne 3-letnie (Okęcie, 2003-2016); $F(t)$ – wartości obliczone (Obserwatorium Astronomiczne, z prognozą na lata 2003-2016)

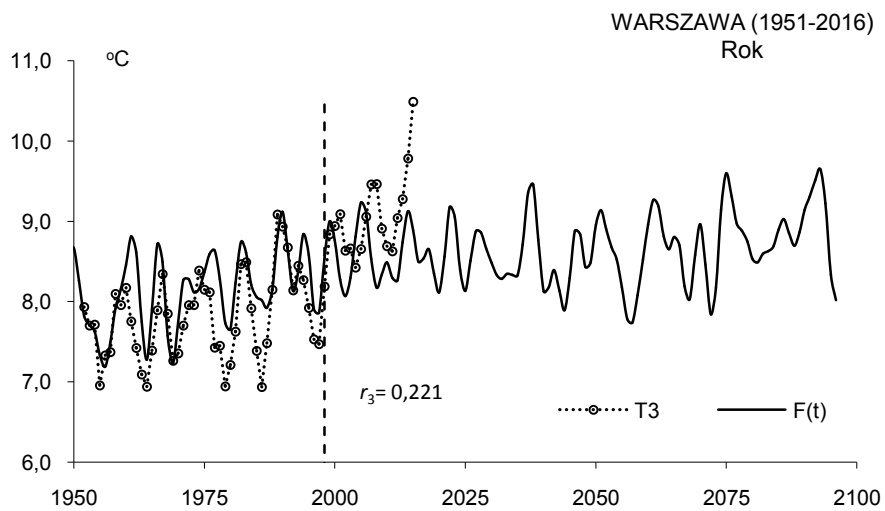
Fig. 29. Changes of mean air temperature in July in Warsaw (2003-2016); T_3 – measured values, 3-year moving average (Okęcie, 2003-2016); $F(t)$ – calculated values (Astronomical Observatory, with forecast for the years 2003-2016)



Rys. 30. Zmiany średniej rocznej temperatury powietrza w Warszawie (Obserwatorium Astronomiczne, 1779-2100); T – wartości zmierzone, $F(t)$, $f(t)$ – wartości obliczone, z prognozą na lata 2003-2100
Fig. 30. Changes of yearly mean air temperature in Warsaw (Astronomical Observatory, 1779-2100; T – measured values, $F(t)$, $f(t)$ – calculated values, with forecast for the years 2003-2100

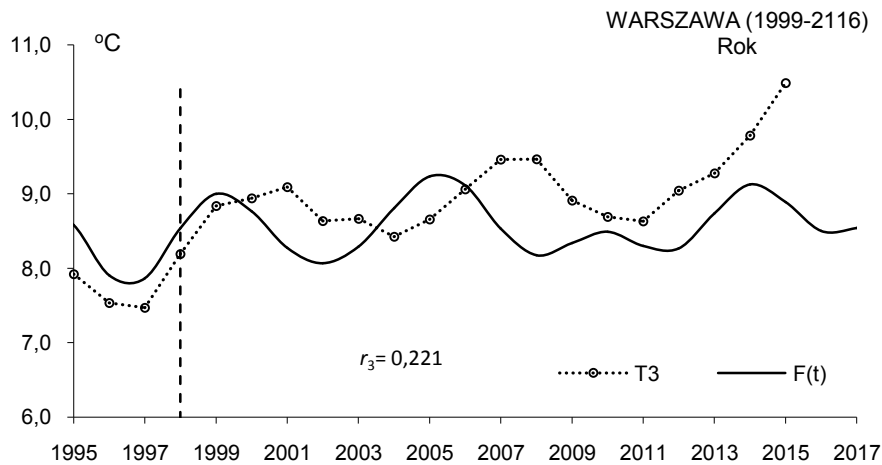


Rys. 31. Zmiany średniej rocznej temperatury powietrza w Warszawie (1951-2100); T_i – wartości zmierzone (Okęcie, 1951-2016); $F(t)$ – wartości obliczone (Obserwatorium Astronomiczne), z prognozą na lata 2003-2100
Fig. 31. Changes of yearly mean air temperature in July in Warsaw (1951-2100); T_i – measured values, (Okęcie, 1951-2016); $F(t)$ – calculated values (Astronomical Observatory), with forecast for the years 2003-2100



Rys. 32. Zmiany średniej rocznej temperatury powietrza w Warszawie (1951-2100); T_3 – wartości zmierzone, średnie konsekwentne 3-letnie (Okęcie, 1951-2016); $F(t)$ – wartości obliczone (Observatorium Astronomiczne, z prognozą na lata 1999-2100)

Fig. 32. Changes of yearly mean air temperature in Warsaw (1951-2100); T_3 – measured values, 3-year moving average (Okęcie, 1951-2016); $F(t)$ – calculated values (Astronomical Observatory, 1779-1998), with forecast for the years 1999-2100



Rys. 33. Zmiany średniej rocznej temperatury powietrza w Warszawie (1999-2016); T_3 – wartości zmierzone, średnie konsekwentne 3-letnie (Okęcie, 1999-2016); $F(t)$ – wartości obliczone (Observatorium Astronomiczne, z prognozą na lata 1999-2016)

Fig. 33 Changes of yearly mean air temperature in Warsaw (1999-2016); T_3 – measured values, 3-year moving average (Okęcie, 1999-2016); $F(t)$ – calculated values (Astronomical Observatory,), with forecast for the years 1999-2016

**UNIwersYTET WARSZAWSKI
WYDZIAŁ GEOGRAFII I STUDIÓW REGIONALNYCH**

JERZY BORYCZKA, MARIA STOPA-BORYCZKA

**XXXVI. POSTĘP BADAŃ ZMIAN KLIMATU ZIEMI
W OSTATNIM TYSIĄCLECIU (XI-XXI)**

atlas

**WSPÓLZALEŻNOŚCI
PARAMETRÓW
METEOROLOGICZNYCH
I GEOGRAFICZNYCH
W POLSCE**

Warszawa 2017

XII. PROGNOZY ZMIAN OPADÓW ATMOSFERYCZNYCH W WARSZAWIE WEDŁUG DANYCH Z LAT 1813 -1990 (OBSERWATORIUM ASTRONOMICZNE) I ICH WERYFIKACJA

12.1. Prognozy zmian opadów atmosferycznych w Warszawie na lata 1990-2100 i ocena ich sprawdzalności

Celem rozdziału jest weryfikacja prognoz zmian sum opadów atmosferycznych w Warszawie opracowanych w Zakładzie Klimatologii UW (Boryczka i in. 2000):

– Boryczka J., Stopa-Boryczka M., Lorenc H., Kicińska B., Błażek E., Skrzypczuk J., 2000, *Atlas współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce*, t. XIV. *Prognoza zmian klimatu Warszawy w XXI wieku* (red. M. Stopa-Boryczka), Wyd. UW, ss. 209

Jest nim ocena synchroniczności przebiegów zmierzonych sum opadów w Warszawie i prognozowanych z wyprzedzeniem 20 lat (1991-2010).

Prognozy opadów i ich weryfikację opracowano na podstawie wyników pomiarów w Warszawie-Observatorium (1813-1979) i Warszawie-Okęciu (1951-2010). Dane pochodzą z Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej.

W prognozach i ich weryfikacji zastosowano metodę J. Boryczki „sinusoid regresji” (1998, 2010 wyznaczania okresów:

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

gdzie: t – czas, Θ – okres, b – amplitudy, c – faza. Okres sinusoidy Θ zmieniano z odstępem czasu 0,1 i 0,0833 roku.

Prognozy i rekonstrukcje opadów to wypadkowe nakładania się (interferencji) k cykli ze składnikiem liniowym at :

$$F(t) = a_0 + at + \sum_{j=1}^k b_j \sin \left(\frac{2\pi}{\Theta_j} t + c_j \right)$$

Istotność statystyczną okresów oceniano testem t- Studenta lub testem F Fishera-Snedecora

$$F_{obl} = 0,5(n-3) \frac{R^2}{(1-R^2)}$$

gdzie: R jest współczynnikiem korelacji wielokrotnej.

Liczbę uwzględnionych okresów i ich długość ustalano tak, by błąd standardowy trendu czasowego $f(t)$ był najmniejszy. Dlatego też ekstrapolowane wartości – rekonstruowane ($t < 0$) i prognozowane ($t > n$) – cechują się wysokim poziomem wiarygodności. Okęciu (P) i prognozowanych według modelu $F(t)$

Wiarygodne są prognozy zmian opadów atmosferycznych w Warszawie na lata 1991-2100 opracowane na podstawie danych z Obserwatorium Astronomicznego z lat 1813-1990 (Boryczka i in., 2000)

Równania opisujące interferencję cykli opadów otrzymano przyjmując rok 1813 jako początek osi czasu $t=0$ ($t = -113$ – rok 1700, $t = 287$ – rok 2100).

Wahania zmierzonych sum opadów atmosferycznych w Warszawie-Okęciu (średnich konsekwentnych 3-letnich) i prognozowanych sum opadów na lata 1991-2010, według modeli $f(t)$ (składnik liniowy $at = 0$) i $F(t)$ (składnik liniowy $at \neq 0$) są na ogół dodatnio skorelowane. Świadczą o tym np. porównania (współczynniki korelacji)

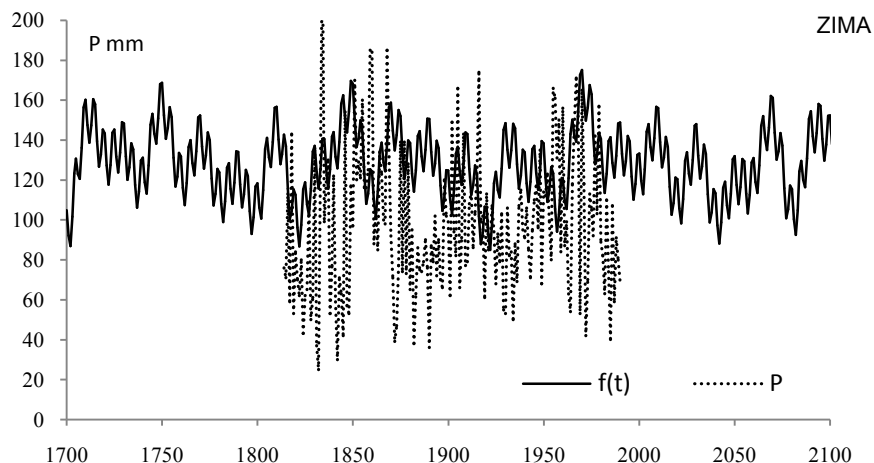
przebiegów czasowych zmierzonych i prognozowanych sum opadów atmosferycznych w lecie (VI-VIII), w zimie (XII-II) i roku (I-XII) (rys. 11-16).

Zweryfikowano prognozy sum opadów w różnych przedziałach czasu, porównując sumy opadów zmierzone w latach 1990-2010 w Warszawie na Okęciu (P) z prognozowanymi $f(t)$.

ZIMA (XII-II)

Trend czasowy $P = f(t)$ średnich sum opadów atmosferycznych w Warszawie w zimie (bez składnika liniowego at) w latach 1813-1990 jest wypadkową nakładania się 4 cykli, w tym najdłuższych 53 i 100 lat (rys. 1-3):

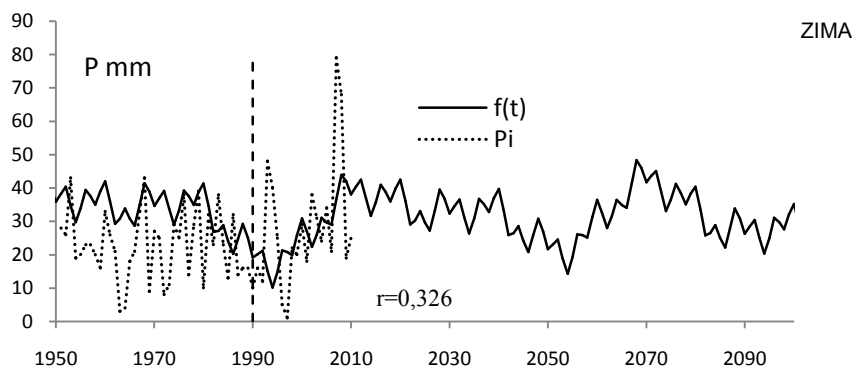
$$f(t) = 96,39 + 11,2\sin(-1,030 + \frac{2\pi}{10}t) + 8,665\sin(1,551 + \frac{2\pi}{21}t) + 16,25\sin(2,623 + \frac{2\pi}{53}t) + 10,01\sin(-1,186 + \frac{2\pi}{100}t)$$



Rys. 1. Zmiany opadów atmosferycznych w Warszawie w zimie w latach 1700-2100, P – wartości zmierzone w Warszawie (Obserwatorium Astronomiczne) w latach 1813-1990, $f(t)$ – obliczone z prognozą na lata 1991-2100

Fig. 1. Precipitation changes in Warsaw in winter in the years 1700-2100, P – values measured in Warsaw (Astronomical Observatory) in the years 1813-1990, $f(t)$ – calculated values, with a forecast P for the years 1991-2100

Współczynnik korelacji sum opadów atmosferycznych w zimie w Warszawie (Okęcie) z prognozami (1990-2010) według modelu $f(t)$ wynosi $r = 0,326$

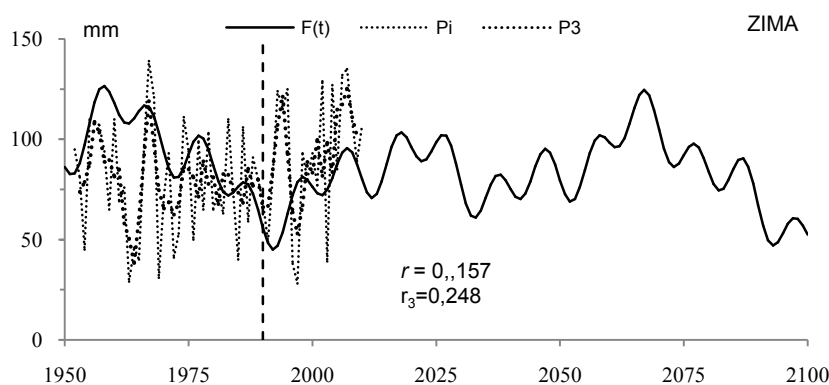


Rys. 2. Porównanie zmierzonych w zimie sum opadów atmosferycznych w Warszawie (Okęcie) z prognozami (1990-2100) według modelu $f(t)$

Fig. 2. Comparison of measured winter precipitation totals at Warsaw (Okęcie) with forecasts (1990-2100) prognostic model $f(t)$

Trend czasowy $P = F(t)$ średnich sum opadów atmosferycznych w Warszawie w zimie (ze składnikiem liniowym at) jest wypadkową nakładania się 4 cykli, w tym najdłuższych 53 i 100 lat:

$$F(t) = 93,11 - 0,03897t + 11,2 \sin(-1,024 + \frac{2\pi}{10}t) + 8,672 \sin(1,524 + \frac{2\pi}{21}t) + 15,83 \sin(2,623 + \frac{2\pi}{53}t) + 9,643 \sin(-1,131 + \frac{2\pi}{100}t)$$



Rys. 3. Porównanie zmierzonych w zimie (średnich konsekwentnych 3-letnich) sum opadów atmosferycznych w Warszawie (Okęcie) z prognozami (1990-2010) według modelu $F(t)$

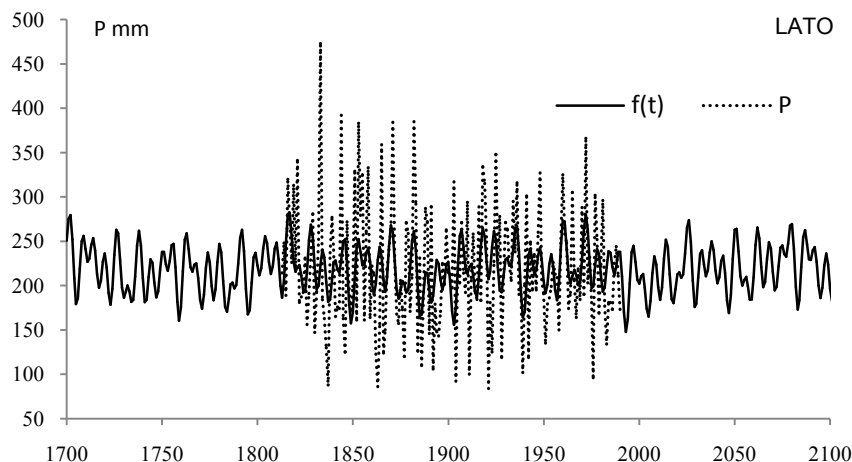
Fig. 3. Comparison of measured winter precipitation totals at Warsaw (Okęcie) (3-year running average) with forecasts (1990-2100) prognostic model $F(t)$

Współczynniki korelacji ($r = 0,157$ i $0,248$) sum i średnich konsekwentnych 3-letnich sum opadów atmosferycznych w zimie w Warszawie (Okęcie) z prognozami (1990-2010) według modelu $F(t)$ są zbliżone do poziomu istotności 0,10 według testu t-Studenta.

LATO (VI-VIII)

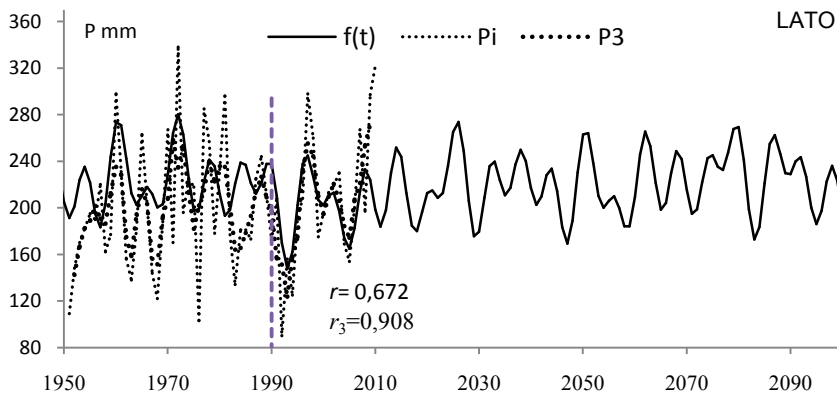
Trend czasowy $P = f(t)$ sum opadów atmosferycznych w Warszawie w lecie (bez składnika liniowego a_t) w latach 1813-1990 jest wypadkową nakładania się 5 cykli, w tym najdłuższych 54 i 122 lat (rys. 4-6)

$$f(t) = 218,0 + 25,224 \sin(-1,741 + \frac{2\pi}{6}t) + 15,89 \sin(-1,716 + \frac{2\pi}{9}t) + 19,14 \sin(-0,3370 + \frac{2\pi}{13}t) + 8,843 \sin(1,717 + \frac{2\pi}{54}t) + 7,5885 \sin(1,003 + \frac{2\pi}{122}t)$$



Rys. 4. Zmiany opadów atmosferycznych w Warszawie w lecie w latach 1700-2100, P – wartości zmierzone w Warszawie (Obserwatorium Astronomiczne) w latach 1813-1990, $f(t)$ – obliczone z prognozą na lata 1991-2100

Fig. 4. Precipitation changes in Warsaw in summer in the years 1700-2100, P – values measured in Warsaw (Astronomical Observatory) in the years 1813-1990, $f(t)$ – calculated values, with a forecast for the years 1991-2100



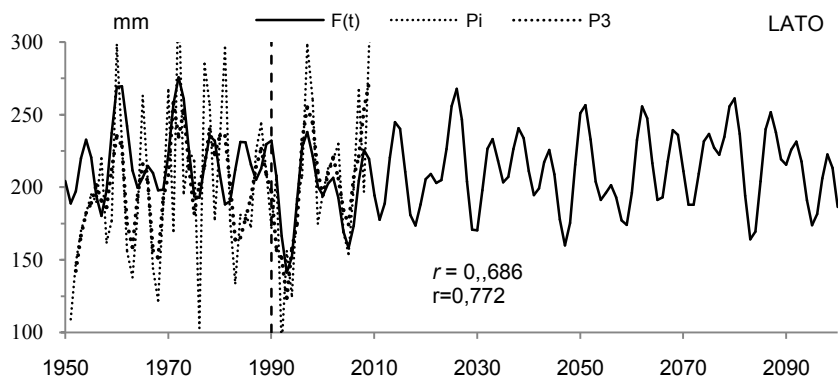
Rys. 5. Porównanie zmierzonych w lecie sum (P_i i średnich konsekwentnych 3-letnich P_3) opadów atmosferycznych w Warszawie (Okęcie) z prognozami (1990-2100) według modelu $f(t)$

Fig. 5. Comparison of measured summer precipitation totals at Warsaw (Okęcie) (P_i and 3-year running average P_3) with forecasts (1990-2100) prognostic model $f(t)$

Współczynniki korelacji $r = 0,672$ i $r = 0,908$ sum letnich opadów atmosferycznych i średnich konsekwentnych 3-letnich sum w Warszawie (Okęcie) z prognozami (1990-2010) według modelu $P=f(t)$ są wyjątkowo duże (istotne na poziomie 0.01 według testu t-Studenta..

Trend czasowy $F(t)$ sum opadów atmosferycznych w Warszawie w lecie (ze składnikiem liniowym at) ma postać

$$F(t) = 222,9 - 0,05795t + 25,24 \sin(-1,746 + \frac{2\pi}{6}t) + 15,94 \sin(-1,717 + \frac{2\pi}{9}t) + 18,91 \sin(-0,3448 + \frac{2\pi}{13}t) + 9,429 \sin(1,822 + \frac{2\pi}{54}t) + 8,035 \sin(1,077 + \frac{2\pi}{122}t)$$



Rys. 6. Porównanie zmierzonych w lecie sum (P_i i średnich konsekwentnych 3-letnich P_3) opadów atmosferycznych w Warszawie (Okęcie) z prognozami (1990-2100) według modelu $F(t)$

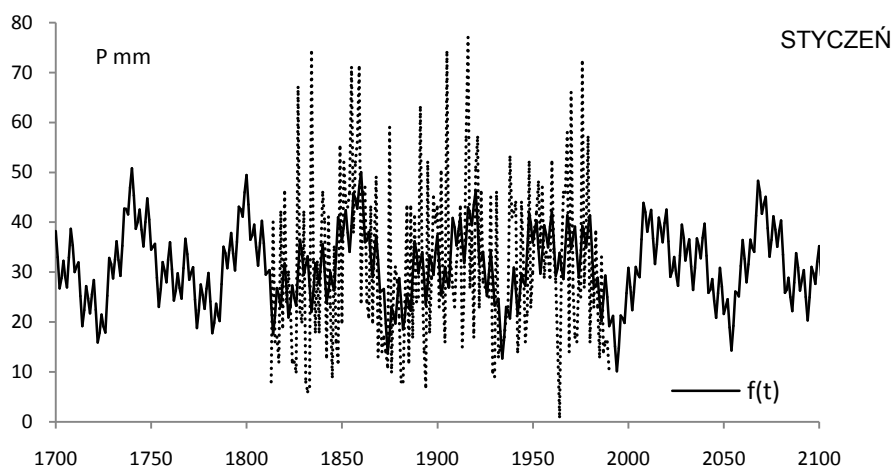
Fig. 6. Comparison of measured summer precipitation totals at Warsaw (Okęcie) (P_i and 3-year running average P_3) with forecasts (1990-2100) prognostic model $F(t)$

Współczynniki korelacji $r = 0,686$ i $r = 0,772$ sum średnich konsekwentnych 3-letnich sum opadów atmosferycznych w lecie w Warszawie (Okęcie) z prognozami (1990-2010) według modelu $F(t)$ są istotne na poziomie 0,05 według testu t-Studenta.

STYCZEŃ (I)

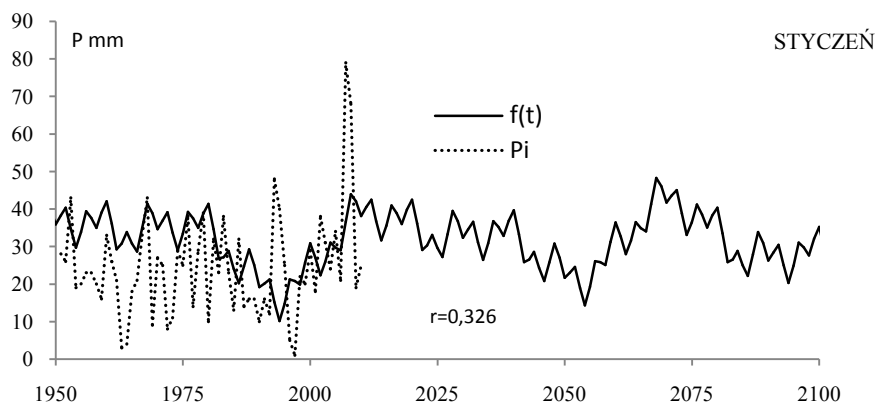
Trend czasowy $P = f(t)$ sum opadów atmosferycznych w Warszawie w styczniu (bez składnika liniowego a_1) w latach 1813-1990 jest wypadkową nakładania się 5 cykli, w tym najdłuższych 55 i 100 lat (rys. 7-8)

$$f(t) = 31,24 + 3,918 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{4}t + 3,096\right) + 3,830 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{10}t - 2,252\right) + 5,062 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{30}t - 1,831\right) + 7,230 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{55}t + 3,086\right) + 1,234 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{100}t - 0,3768\right)$$



Rys. 7. Zmiany opadów atmosferycznych w Warszawie w styczniu w latach 1700-2100, P – wartości zmierzone w Warszawie (Obserwatorium Astronomiczne) w latach 1813-1990, $f(t)$ – obliczone z prognozą na lata 1991-2100

Fig. 7. Precipitation changes in Warsaw in January in the years 1700-2100, P – values measured in Warsaw (Astronomical Observatory) in the years 1813-1990, $f(t)$ – calculated values, with a forecast for the years 1991-2100



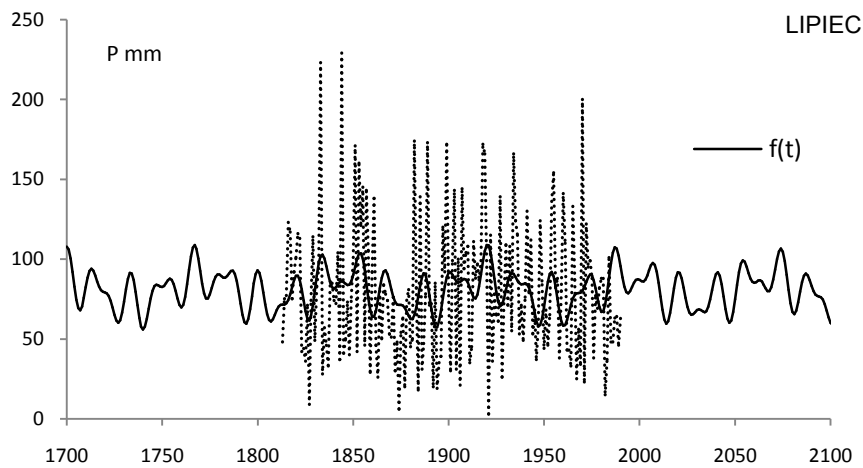
Rys. 8. Zmiany opadów atmosferycznych w Warszawie w styczniu w latach 1951-2100, P_i – wartości zmierzone na Okęciu $f(t)$ – obliczone z wzoru z prognozą na lata 1991-2100

Fig.8. Precipitation changes in Warsaw in January in the years 1951-2035, P_i – values measured in Okęcie, $f(t)$ – values calculated on the basis of the formula and with a forecast for the years 1991-2100

LIPIEC (VII)

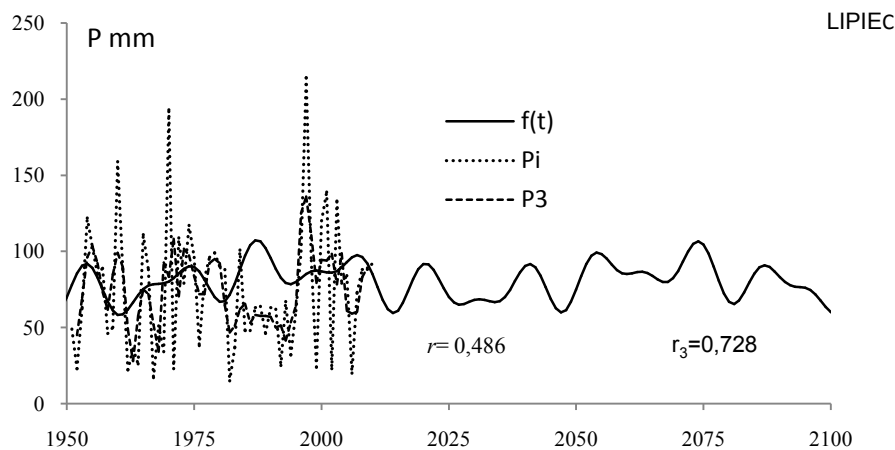
Trend czasowy $P = f(t)$ sum opadów atmosferycznych w Warszawie w lipcu (bez składnika liniowego a_1) w latach 1813-1990 jest wypadkową nakładania się 3cykli, w tym najdłuższych 17 i 74 lat (rys. 9-10)

$$f(t) = 80,81 + 8,157 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{11}t + 2,880\right) + 11,70 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{17}t - 0,2923\right) + 8,803 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{74}t - 1,160\right)$$



Rys. 9. Zmiany opadów atmosferycznych w Warszawie w lipcu w latach 1700-2100, P – wartości zmierzony w Warszawie (Observatorium Astronomiczne) w latach 1813-1990, $f(t)$ – obliczone z prognozą na lata 1991-2100

Fig. 9. Precipitation changes in Warsaw in July in the years 1700-2100, P – values measured in Warsaw (Astronomical Observatory) in the years 1813-1990, $f(t)$ – calculated values, with a forecast for the years 1991-2100



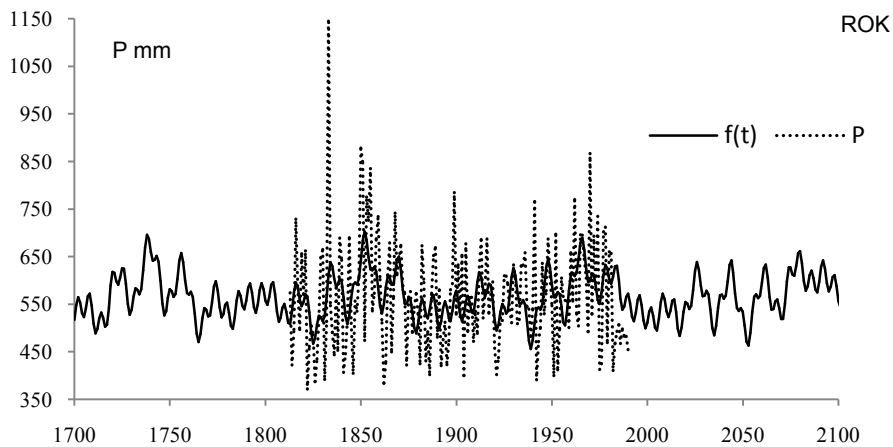
Rys. 10. Zmiany opadów atmosferycznych w Warszawie w lipcu w latach 1951-2100, P_i – wartości zmierzony na Okęciu $f(t)$ – obliczone z wzoru z prognozą na lata 1991-2100

Fig. 10. Precipitation changes in Warsaw in July in the years 1951-2100, P_i – values measured in Okęcie, $f(t)$ – values calculated on the basis of the formula and with a forecast for the years 1991-2100

ROK (I-XII)

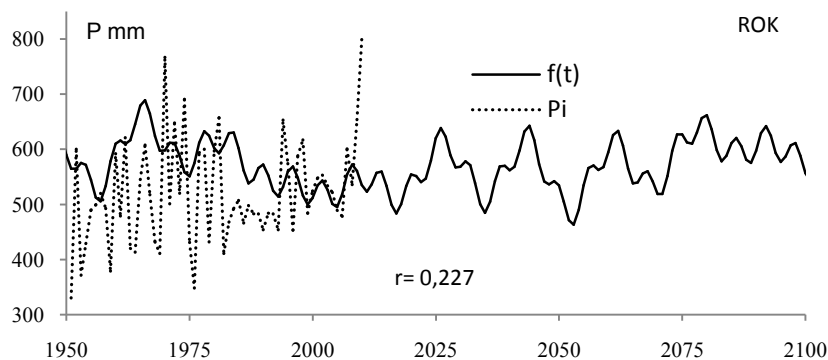
Trend czasowy $P = f(t)$ rocznych sum opadów w Warszawie (bez składnika liniowego at) w latach 1813-1990 jest wypadkową nakładania się 5 cykli, w tym najdłuższych 58 i 112 lat (rys. 11-12):

$$f(t) = 564,6 + 28,22 \sin(-1,450 + \frac{2\pi}{6} t) + 32,02 \sin(-1,113 + \frac{2\pi}{16} t) + 27,48 \sin(0,8780 + \frac{2\pi}{19} t) + 27,40 \sin(-3,015 + \frac{2\pi}{58} t) + 26,75 \sin(-0,6919 + \frac{2\pi}{112} t)$$



Rys. 11 Zmiany opadów atmosferycznych w Warszawie w roku w latach 1700-2100, P – wartości zmierzony w Warszawie (Obserwatorium Astronomiczne) w latach 1813-1990, $f(t)$ – obliczone z prognozą na lata 1991-2100

Fig. 11. Precipitation changes in Warsaw in year in the years 1700-2100, P – values measured in Warsaw (Astronomical Observatory) in the years 1813-1990, $f(t)$ – calculated values, with a forecast for the years 1991-2100



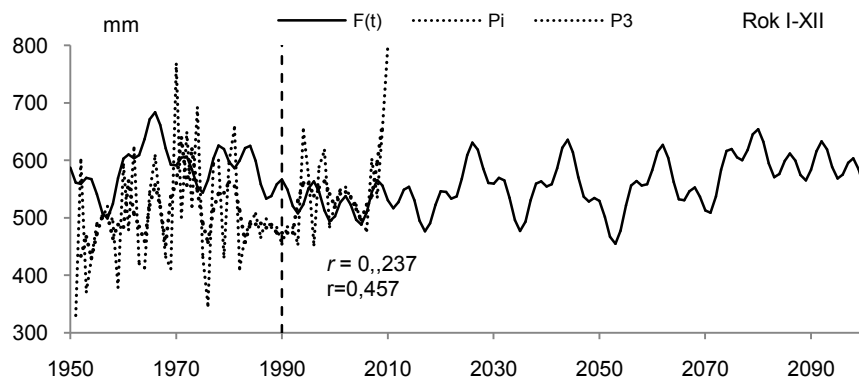
Rys. 12 Porównanie zmierzonych sum rocznych opadów atmosferycznych w Warszawie (Okęcie) z prognozami (1990-2067) według modelu $f(t)$

Fig. 12. Comparison of measured yearly precipitation totals at Warsaw (Okęcie) with forecasts (1990-2067) prognostic model $f(t)$.

Współczynnik korelacji sum rocznych opadów atmosferycznych (P_i) w Warszawie (Okęcie) z prognozami (1990-2010) według modelu $f(t)$ wynosi $r = 0,227$.

Trend czasowy $P = F(t)$ rocznych sum opadów w Warszawie (ze składnikiem liniowym $at = -0,02481t$) jest wypadkową nakładania się 5 cykli, w tym najdłuższych 58 i 112 lat (rys. 13):

$$F(t) = 562,5 - 0,02481t + 28,22\sin(-1,449 + \frac{2\pi}{6}t) + 32,02\sin(-1,113 + \frac{2\pi}{16}t) + 27,59\sin(0,8765 + \frac{2\pi}{19}t) + 26,99\sin(-3,018 + \frac{2\pi}{58}t) + 26,73\sin(-0,6907 + \frac{2\pi}{112}t)$$



Rys. 13. Porównanie zmierzonych (średnich konsekwentnych 3-letnich) sum rocznych opadów atmosferycznych w Warszawie (Okęcie) z prognozami (1990-2067) według modelu $F(t)$
Fig. 13. Comparison of measured yearly precipitation totals at Warsaw (Okęcie) (3-year running average) with forecasts (1990-2067) prognostic model $F(t)$.

Współczynniki korelacji $r = 0,237$ i $r = 0,457$ sum rocznych opadów atmosferycznych w Warszawie (Okęcie) i średnich konsekwentnych 3-letnich sum z prognozami (1990-2010) według modelu $F(t)$ są zbliżone do $r_{0,10}$ i $r_{0,05}$ według testu t-Studenta