

KIERUNKI I WAŻNIEJSZE WYNIKI BADAŃ NATURALNYCH I ANTROPOGENICZNYCH ZMIAN KLIMATU POLSKI

Maria Stopa-Boryczka

Podstawowe badania Zakładu Klimatologii Wydziału Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego (poprzednio Instytutu Geograficznego) dotyczą głównie klimatu Polski. Temat ten od 1952 r. figuruje w planach naukowych Zakładu. Modyfikacji ulegały tylko jego sformułowania, nawiązujące często do nowych prądów w klimatologii.

Inicjatorem badań z zakresu klimatu Polski był prof. Romuald Gumiński – pierwszy kierownik Zakładu Klimatologii IG UW w latach 1951-1952. Z jego prac dotyczących całej Polski na szczególną uwagę zasługują *Materiały do poznania genezy i struktury klimatu Polski* (1952). Autor wprowadził w Polsce nowy kierunek – klimatologię dynamiczną i pokazał, jak zastosować jej metody na przykładzie Polski. Praca upoważnia do stwierdzenia, że R. Gumiński był prekursorem opracowania cech dynamicznych klimatu Polski.

R. Gumiński stał zawsze na stanowisku wiązania nauki z życiem, wprowadzając metody klimatologii stosowanej. Jego zasługą jest też propagowanie wiedzy na ten temat, o czym świadczą liczne publikacje. Do najbardziej znanych, najwyżej cenionych i najczęściej cytowanych w literaturze należy *Próba wydzielenia dzielnic rolniczo-klimatycznych w Polsce* (1948). Pełny tekst opracowania regionalizacji, znajdujący się w Zakładzie Klimatologii UW, opublikowano dopiero w 1998 r. w specjalnym zeszycie *Prac i Studiów Geograficznych*, t. 22.

Problemy naukowe zainicjowane przez R. Gumińskiego były i są kontynuowane przez Zakład Klimatologii Uniwersytetu Warszawskiego, przy czym najważniejszym obiektem badań jest nadal Polska. Świadczą o tym m.in., podstawowe kierunki badań realizowanych po śmierci prof. R. Gumińskiego przez jego następców.

Do głównych kierunków naukowych rozpoczętych w Zakładzie Klimatologii IG UW pod kierunkiem prof. dr Wincentego Okołowicza (1953-1975) i przy dużej pomocy doc dr hab. Zofii Kaczorowskiej (1951-1972) należą:

Struktura i regionalizacja klimatu Polski,
Klimat północno-wschodniej Polski,
Klimat i bioklimat miast.

Celem prac dotyczących pierwszego i drugiego tematu jest określenie zakresu oddziaływania czynników geograficznych na pola elementów klimatu w Polsce.

Podstawowe znaczenie w badaniach klimatu ma znajomość struktury pól elementów meteorologicznych, ich czasowa i przestrzenna zmienność, współzależność oraz dynamika zmian.

Pole temperatury powietrza charakteryzują takie zmienne, jak: średnia dobowa temperatura, średnie ekstremalne (maksymalna i minimalna), amplituda dobowa i roczna, daty początku i czasu trwania termicznych pór roku, okres wegetacyjny, liczba dni z przymrozkami, okres bezprzymrozkowy, liczba dni mroźnych i bardzo mroźnych oraz gorących. Wskazują one na intensywność procesów cieplnych zachodzących na obszarze Polski.

Pole wilgotności powietrza określają takie zmienne, jak: ciśnienie pary wodnej, wilgotność bezwzględna, właściwa, względna i niedosyt wilgotności powietrza oraz pośrednio – parowanie z powierzchni gruntu.

Z obiegiem wody w układzie Ziemia – atmosfera wiążą się, oprócz wskaźników wilgotności i parowania, także opady atmosferyczne i zachmurzenie. Oto zmienne charakteryzujące opad: sumy miesięczne zmierzone i rzeczywiste, amplituda, maksymalne sumy dobowe, liczba dni z opadem powyżej progów 0,1; 1,0; 10,0 mm, liczba dni z burzą, liczba dni z pokrywą śnieżną i czas jej występowania. W przypadku zachmurzenia nie ograniczono się do podstawowych wskaźników, takich jak średnie dobowe zachmurzenie, liczba dni pogodnych i pochmurnych, liczba dni z mgłą, lecz także zajmowano się rodzajami chmur.

Miarami intensywności poziomego ruchu powietrza są: średnia prędkość wiatru, poziomy strumień powietrza i pary wodnej, liczba dni z wiatrem silnym i bardzo silnym oraz częstość cisz.

Wskaźnikami biometeorologicznymi, które znajdują coraz częstsze zastosowanie w opracowaniach klimatologicznych, są temperatura ekwiwalentna i entalpia.

Do wielkości fizycznych wyznaczonych po raz pierwszy w odniesieniu do całego obszaru Polski należą: gęstość powietrza, wilgotność bezwzględna, wilgotność właściwa, poziome strumienie powietrza i pary wodnej, temperatura potencjalna i entropia (tab. 1).

Tabela 1 Parametry meteorologiczne, ich symbole i jednostki
Meteorological parameters, their notation and units used

Lp.	Symbole	Parametry meteorologiczne	Jednostki
1.	T	Temperatura powietrza	K
2.	A	Dobowa amplituda temperatury	°C
3.	T_{\max}	Temperatura maksymalna	K
4.	T_{\min}	Temperatura minimalna	K
5.	U	Energia wewnętrzna	cal/g
6.	H	Enthalpia	cal/g
7.	p	Ciśnienie atmosferyczne	hPa
8.	Θ	Temperatura potencjalna	K
9.	ρ	Gęstość powietrza	kg/m ³
10.	S	Entropia	J/gK
11.	e	Ciśnienie pary wodnej	hPa
12.	ρ'	Wilgotność bezwzględna	g/m ³
13.	q	Wilgotność właściwa	g/kg
14.	f	Wilgotność względna	%
15.	Δ	Niedosyt wilgotności	hPa
16.	Θ_e	Temperatura ekwiwalentna	K
17.	v	Prędkość wiatru	m/s
18.	M	Poziomy strumień powietrza	kg/m ² s
19.	M'	Poziomy strumień pary wodnej	kg/m ² s
20.	N	Zachmurzenie	1/10
21.	O	Opady atmosferyczne	mm
22.	L_O	Dni pogodne	liczba dni
23.	L_O	Dni pochmurne	liczba dni
24.	L_O	Dni z opadem	liczba dni
25.	L_m	Dni z mgłą	liczba dni
26.	L_v	Dni z wiatrem >10 m/s	liczba dni
27.	L_c	Dni z ciszą	liczba dni

Dotychczas klimat Polski przedstawiany był za pomocą izarytm średnich wieloletnich wartości poszczególnych elementów meteorologicznych, które najlepiej charakteryzują średni stan atmosfery.

Przestrzenne zróżnicowanie klimatu wynika głównie ze zmian szerokości geograficznej (strefowości), odległości od Oceanu Atlantyckiego i wysokości nad poziomem morza (astrefowości). Syntezą wyników badań w tym zakresie są wyodrębnione regiony klimatyczne Polski (Okołowicz, 1966).

Do ważniejszych prac oryginalnych z zakresu badań struktury i regionalizacji klimatu Polski należą:

Zachmurzenie Polski (Okołowicz, 1962),

Burze w Polsce (Stopa, 1962),

Temperatura powietrza w Polsce (Stopa, 1968),

Mapy klimatyczne do *Atlasu Narodowego Polski*, w tym podział klimatu Polski (Okołowicz, 1973-1978),

Transformacja pary wodnej w dolnej troposferze nad wybranymi obszarami Polski (Olszewski, 1973 – maszynopis pracy doktorskiej),

Wpływ podłoża na rozwój chmur Cumulus nad wybranymi terenami Niżu Polskiego (Lenart, 1973 – maszynopis pracy doktorskiej).

Głównym celem wymienionych prac jest wyodrębnienie cech charakterystycznych i specyficznych klimatu Polski, wynikających z jej położenia geograficznego w umiarkowanych szerokościach Europy Środkowej ($\varphi = 49-55^\circ$, $\lambda = 14-25^\circ$). Tytuły prac wskazują, że dotyczą one głównie naturalnych zmian klimatu, ze szczególnym uwzględnieniem cyklu rocznego. Do elementów uprzywilejowanych pod względem liczby opracowań należy z całą pewnością temperatura powietrza, traktowana, jako efekt intensywności obiegu ciepła w systemie Ziemia-atmosfera. Temperatura powietrza jest bowiem elementem najważniejszym, który determinuje stan pozostałych elementów klimatu. Badania przeprowadzono w różnych skalach przestrzennych i czasowych. Najwięcej przykładów pochodzi z całej Polski, jej północno-wschodniej części oraz Mazowsza. Podstawą tych opracowań były głównie dane Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej z lat 1951-1960, 1951-1965 oraz 1951-1980.

CECHY CHARAKTERYSTYCZNE I OSOBLIWE KLIMATU PÓŁNOCNO-WSCHODNIEJ POLSKI

Klimat północno-wschodniej części Polski charakteryzuje się cechami typowymi dla całego obszaru Polski, ponieważ jest kształtowany przez charakterystyczny dla naszego kraju zespół procesów klimatotwórczych i czynników geograficznych. Jednakże ze względu na położenie geograficzne obszar ten, a szczególnie jego część północno-wschodnią, wyróżnia się pewnymi cechami znanymi. Północno-wschodnią Polskę wyodrębnia się jako obszar najchłodniejszy (poza rejonami górskimi), głównie w chłodnej porze roku, czego następstwem jest:

- wydłużony okres zimy i skrócony czas trwania lata,
- skrócony okres wegetacyjny,
- najkrótszy okres bezprzymrozkowy,
- najdłuższy okres zalegania pokrywy śnieżnej.

Poza tym charakteryzuje się największymi rocznymi amplitudami temperatury powietrza i skróconym czasem trwania przejściowych pór roku, zwłaszcza przedwiośnia. Inne charakterystyki klimatu, do których należą: wiatry (przeważnie słabe z kierunków W i NW – latem, a SW z wyraźnym wzrostem E – zimą), wilgotność powietrza, wysokość opadów i liczba dni z opadem, przewaga opadów letnich nad zimowymi, liczba dni pogodnych i pochmurnych, nie wyróżniają tego obszaru na tle Polski.

Wymienione specyficzne cechy warunków klimatycznych tego terenu są przejawem narastania wpływów kontynentalnych w kierunku z zachodu na wschód. To narastanie cech kontynentalizmu, typowe dla całego obszaru Polski, można również prześledzić na fragmencie objętym opracowaniem. Ogólny kierunek zmian, szczególnie cech termicznych, zachowuje układ typowy dla całej Polski. Najbardziej zaznacza się wzrost ku wschodowi rocznej amplitudy temperatury ze względu na niższe wartości temperatury powietrza w miesiącach zimowych.

Ogólny kierunek zmian temperatury (typowy również dla całej Polski): w zimie spadek równoleżnikowy – na wschód, a w lecie spadek południkowy – ku północy sprawia, że wschodnia część Pojezierza Mazurskiego jest najchłodniejszym fragmentem tego terenu, średnio o 2°C w porównaniu z najcieplejszą doliną Wisły. Potwierdzeniem są liczby dni charakterystycznych, np. dni bardzo mroźnych jest więcej o 15, mroźnych o 25, a dni z przymrozkami aż o 35 na krańcach wschodnich niż w zachodniej części omawianego terenu. Ta odmienna liczba dni charakterystycznych jest nie tylko wynikiem silniejszego wychłodzenia obszarów położonych w północno-wschodniej i wschodniej części terenu, lecz także wynikiem dłuższego zalegania mas chłodnego powietrza. Pierwsze jesienne przymrozki pojawiają się na tym terenie przeciętnie o około 40 dni wcześniej niż na zachodzie, a zanikają na wiosnę o miesiąc później. Okres bezprzymrozkowy jest więc o około 70 dni krótszy. Pokrywa śnieżna zalega na tym obszarze również o ponad miesiąc dłużej niż w dolinie Wisły. Dni ze średnią dobową temperaturą poniżej i równą 0°C, które określają porę zimową, jest o ponad 25 więcej niż w południowej i południowo-zachodniej części obszaru i o tyleż samo dni krócej trwa lato. Okres wegetacyjny na Pojezierzu Suwalskim jest przeciętnie o 15 dni krótszy niż w dolinie Wisły. Surowość warunków termicznych, nasilająca się w kierunku północno-wschodnim, warunkuje wiele zjawisk, jakie zachodzą w przyrodzie. Na podstawie map dotyczących zjawisk fenologicznych można stwierdzić, że zróżnicowanie terminów początku i końca określonych faz rozwojowych zarówno roślinności naturalnej, jak i upraw rolniczych jest ściśle związane z rozkładem temperatury i zachowuje podobne zróżnicowanie. W północno-wschodniej części Pojezierza Mazurskiego roślinność wchodzi w poszczególne fazy rozwoju z opóźnieniem przeciętnie o 10 do 20 dni w stosunku do rejonów położonych na południu i zachodzie.

Omówione cechy klimatu północno-wschodniej części Polski (ostrość zim, większe roczne amplitudy temperatury, zmniejszająca się w kierunku wschodnim zawartość pary wodnej w powietrzu, jak również wyraźna przewaga opadów letnich nad zimowymi) są skutkiem wpływów kontynentalnych. Spowodowane jest to przede wszystkim położeniem geograficznym – znacznym oddaleniem od wpływów Oceanu Atlantyckiego, ale również i ukształtowaniem terenu, które w południowej części stwarza warunki do swobodnego wnikania morskich mas powietrza, a w rejonie pojezierzy ich napływ jest utrudniony z powodu zróżnicowania rzeźby. Świadczy o tym zestawienie średniej

rocznej częstości (%) występowania typów mas powietrza w latach 1961-1970 w Warszawie i Suwałkach.

	Pm	Pk	A	Z
Warszawa	63,0	24,8	9,7	2,5
Suwałki	60,0	27,0	11,3	1,7

Rozkłady przestrzenne poszczególnych elementów meteorologicznych wskazują jednak, że na tle omówionych wyżej ogólnych prawidłowości, pewne fragmenty terenu wyróżniają się spośród otaczających je obszarów nasileniem lub osłabieniem, a niekiedy nawet odstępstwem tendencji niektórych cech klimatu.

Główną przyczyną zróżnicowania warunków klimatycznych tego obszaru jest oddziaływanie lokalnych czynników geograficznych, spośród których najbardziej istotny wpływ wywierają: rzeźba terenu i rodzaj powierzchni czynnych oraz obecność dużych zbiorników wodnych.

Za syntezę dotychczasowych badań klimatu północno-wschodniej Polski można uznać IV część *Atlasu współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce* z wyodrębnionym podtytułem *Klimat północno-wschodniej Polski*, (Stopa-Boryczka, Martyn, Boryczka, Wawer, Ryczywolska, Kopacz-Lembowicz, Kossowska-Cezak, Lenart, Danielak, Styś, 1986).

Najważniejsze wyniki w zakresie badań klimatu miast, ze szczególnym uwzględnieniem Warszawy przedstawiono w temacie *Antropogeniczne zmiany klimatu*.

NOWE KIERUNKI BADAŃ

Obecnie w Zakładzie Klimatologii UW rozwiązywany jest problem *Naturalne i antropogeniczne zmiany klimatu Europy, ze szczególnym uwzględnieniem Polski*, a na wyodrębnienie zasługują takie tematy, jak:

1. *Empiryczne modele przestrzennej i czasowej zmienności klimatu,*
2. *Cykliczne zmiany klimatu i ich przyczyny,*
3. *Tendencje wiekowe zmian klimatu,*
4. *Antropogeniczne zmiany klimatu,*
5. *Prognozy zmian klimatu Polski w XXI wieku.*

Przedstawione problemy badawcze rozwiązywane są w ramach prac indywidualnych i zespołowych. Do najważniejszych opracowań zespołowych należy 14 tomów *Atlasu współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce* opublikowanych w latach 1974-2000. Za syntezę dotychczasowych badań indywidualnych klimatu Polski można uznać 2 zeszyty Prac i Studiów Geograficznych, z wyodrębnionymi tytułami *Nowe metody badań klimatu Polski* (1997) i *Z badań klimatu Polski* (1998). Pierwszy opracowany został z okazji 45-lecia Zakładu, drugi zaś – z okazji 100. rocznicy urodzin prof. Romualda Gumińskiego.

Empiryczne modele przestrzennej i czasowej zmienności klimatu

Znaczącym postępem w badaniach klimatu Polski w odniesieniu do dekady lat pięćdziesiątych jest ujęcie empirycznymi wzorami zmienności klimatu na przykładzie Polski. W tym celu dokonano próby oddzielenia wpływu szerokości geograficznej, odległości od Oceanu Atlantyckiego i wysokości nad poziomem morza na klimat Polski. Miarami oddziaływania tych najważniejszych czynników geograficznych są gradienty: południkowe, równoleżnikowe i hipsometryczne. Wyznaczono je w odniesieniu do całego obszaru Polski,

północno-wschodniej jej części, pasa nizin i gór, a także pojedynczych miejscowości.

Istotne znaczenie poznawcze ma określenie deformacji pól elementów klimatologicznych przez rzeźbę terenu. Wyeliminowanie wpływu wysokości terenu na klimat Polski umożliwiło np. wyodrębnienie stref oddziaływania Atlantyku i Bałtyku. Jedną z cech klimatu morskiego są mniejsze gradienty pionowe termiczne i większe opadowe. O przejściowości klimatu Polski świadczy między innymi zmiana znaku gradientu południkowego temperatury (względem długości geograficznej) w ciągu roku, z ujemnego zimą na dodatni latem. Duże zróżnicowanie gradientów hipsometrycznych temperatury powietrza w Polsce wskazuje, iż nie można przyjmować przy redukcji do poziomu morza stałego spadku na 100 m. Zmiany przestrzenne gradientów południkowego i równoleżnikowego wskazują jednocześnie wpływ czynników regionalnych i lokalnych na klimat.

Pierwsze wyniki badań w zakresie związków korelacyjnych między temperaturą powietrza i innymi elementami meteorologicznymi oraz czynnikami geograficznymi znajdują się w rozprawie habilitacyjnej Marii Stopy-Boryczki pt. *Cechy termiczne klimatu Polski*, opublikowanej w 1973 r. Kontynuacją badań w zakresie wpływu czynników geograficznych na klimat jest publikacja pt. *Empiryczne równania klimatu Polski* (Boryczka, 1977) oraz kolejne tomy *Atlasu współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce*. Opublikowano ich na ten temat 7 w latach 1974-1994, wykonano także 3 prace doktorskie w tym zakresie:

Tom I – *Związki korelacyjne między elementami meteorologicznymi i czynnikami geograficznymi w Polsce* (Stopa-Boryczka, Boryczka, 1974),

Tom II – *Zależność elementów meteorologicznych od czynników geograficznych w Polsce* (Stopa-Boryczka, Boryczka, 1976),

Tom III – *Geograficzne gradienty parametrów wilgotności powietrza w Polsce* (Stopa-Boryczka, Boryczka, 1980),

Tom IV – *Klimat północno-wschodniej Polski* (Stopa-Boryczka, Martyn, Boryczka, Wawer, Ryczywolska, Kopacz-Lembowicz, Kossowska-Cezak, Lenart, Danielak, Styś, 1986),

Tom V – *Z badań klimatu Polski* (Stopa-Boryczka, Boryczka, Kicińska, Żmudzka, 1989),

Tom VI – *Wpływ Oceanu Atlantyckiego i ukształtowania powierzchni Ziemi na pole temperatury powietrza w Polsce* (Stopa-Boryczka, Boryczka, Kicińska, Żmudzka, 1990),

Tom VIII – *Cechy oceaniczne klimatu Europy* (Stopa-Boryczka, Boryczka, Wągrowaska, Śmiałkowski, 1994),

Pionowe gradienty temperatury powietrza w Sudetach (Górka, 1979 – maszynopis pracy doktorskiej).

Wpływ czynników geograficznych na klimat Iraku (Ahmed Bard Jaddoa, 1987 – maszynopis pracy doktorskiej).

Wpływ czynników geograficznych na klimat Wietnamu (Van Than Nguyen, 1990 – maszynopis pracy doktorskiej).

Metody badań modelowych zmienności przestrzennej klimatu zaproponowane przez Zakład Klimatologii Uniwersytetu Warszawskiego sprawdzone są na przykładach większych obszarów – Europa (Tom VIII *Atlasu*) oraz mniejszych – Irak (Ahmed, 1987) i Wietnam (Van Than, 1990), położonych w innych szerokościach geograficznych – zwrotnikowych i okołorównikowych.

Aproksymowano pola temperatury powietrza i innych zmiennych meteorologicznych równaniami prostych, płaszczyzn i hiperpłaszczyzn regresji. Wyjątkowo na obszarze Polski

zastosowano wielomiany regresji drugiego, trzeciego, czwartego i piątego stopnia względem trzech współrzędnych położenia: szerokości i długości geograficznej i wysokości nad poziomem morza.

Wprowadzenie do wielomianów regresji wysokości bezwzględnej H (oprócz szerokości i długości geograficznej φ , λ) znacznie zwiększa dokładność modeli, ponieważ temperatura powietrza jest z nią silnie skorelowana. Jest to ważki wkład Zakładu w udoskonalenie metod statystycznych opisujących pola zmiennych meteorologicznych.

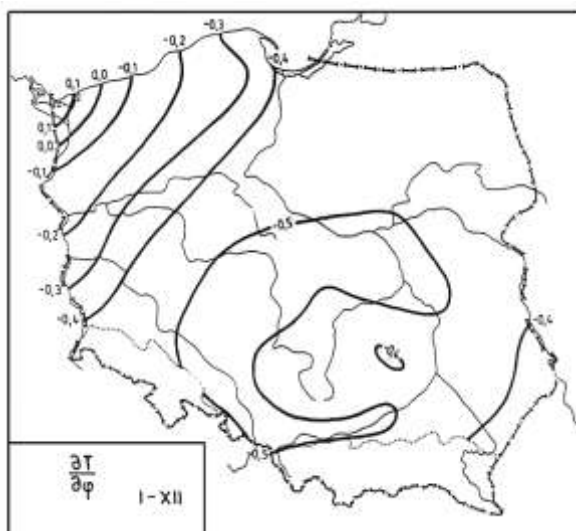
Wielomiany wyższych stopni względem trzech współrzędnych położenia (szerokości i długości geograficznej oraz wysokości nad poziomem morza) okazały się doskonałym narzędziem badań klimatu. W odróżnieniu od hiperpłaszczyzn regresji opisują one nie tylko główne cechy pola, lecz także zmienność regionalną i lokalną (rys. 1-4).

W praktyce najistotniejsze znaczenie mają równania hiperpłaszczyzn regresji, które można wykorzystać do prognozy poszczególnych elementów meteorologicznych (tab. 2, 3). Odczytując z mapy φ , λ , H można określić z dużą dokładnością np. temperaturę powietrza, wilgotność, ciśnienie atmosferyczne, zachmurzenie, prędkość wiatru itp.

Z zależności między samymi elementami meteorologicznymi można oszacować wartości nie mierzonych elementów na podstawie innych, np. wilgotności bezwzględnej, temperatury ekwiwalentnej, potencjalnej itp.

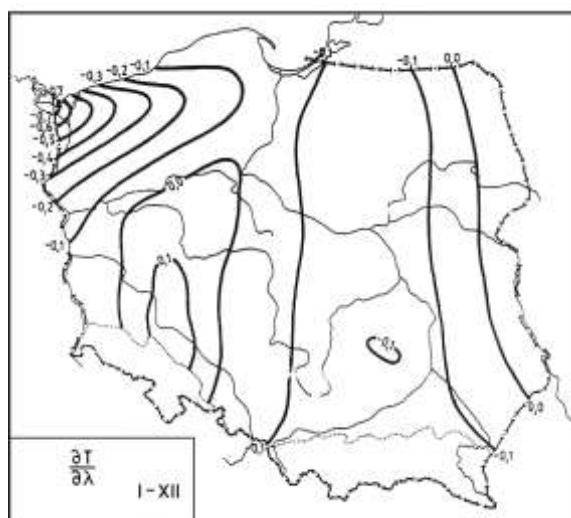
Sz szczególnie ważne są powiązania korelacyjne innych elementów meteorologicznych z temperaturą, ponieważ jest to najważniejsza wielkość fizyczna, warunkująca przebieg innych elementów meteorologicznych.

Wyniki tych badań (mimo że mają charakter badań podstawowych) mogą być wykorzystane w takich dziedzinach życia gospodarczego, jak rolnictwo, budownictwo, transport, komunikacja itp.



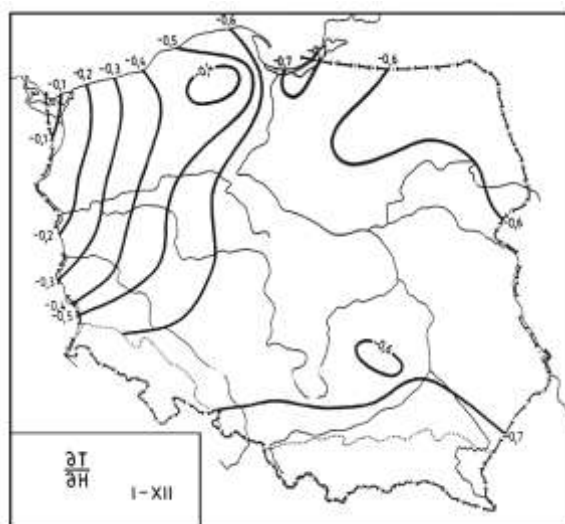
Rys. 1. Izogradyenty równoleżnikowe $\frac{\partial T}{\partial \varphi} = \text{const}$ temperatury powietrza w Polsce – rok (I-XII)

Longitudinal isogradients $\frac{\partial T}{\partial \varphi} = \text{const}$ of air temperature in Poland – year (I-XII)



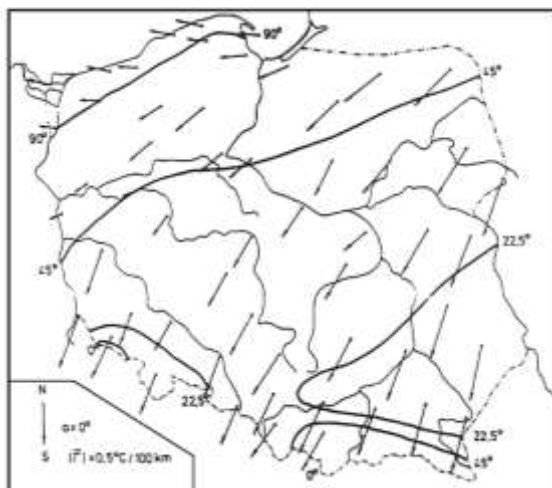
Rys. 2. Izogradyenty południkowy $\frac{\partial T}{\partial \lambda} = \text{const}$ temperatury powietrza w Polsce – rok (I-XII)

Latitudinal isogradients $\frac{\partial T}{\partial \lambda} = \text{const}$ of air temperature in Poland – year (I-XII)



Rys. 3. Izogradyenty hipsometryczne $\frac{\partial T}{\partial H} = \text{const}$ temperatury powietrza w Polsce – rok (I-XII)

Hipsometric isogradients $\frac{\partial T}{\partial H} = \text{const}$ of air temperature in Poland – year (I-XII)



Rys. 4. Strefy oddziaływania mas powietrza polarnego morskiego i kontynentalnego na pole temperatury powietrza w Polsce (X-III)

Zones of maritime polar air masses effects on the air temperature field in Poland (X-III)

Tabela 2. Równania hiperpłaszczyzn regresji zmiennych meteorologicznych względem φ , λ , H i współczynniki korelacji cząstkowej (październik-marzec, 1951-1960)

Equations of hyperplanes of regression of the meteorological variables with respect to and the partial correlation coefficients (October-March, 1951-1960)

	φ, λ, H	ρ_{φ}	ρ_{λ}	ρ_H
T	$-0,2018\varphi - 0,2255\lambda - 0,0040H + 289,599$	0,347	-0,382	-0,782
T_{\max}	$-0,6077\varphi - 0,2460\lambda - 0,0050H + 314,631$	0,037	-0,327	-0,757
T_{\min}	$-0,1949\varphi - 0,3789\lambda - 0,0035H + 269,298$	0,292	-0,277	-0,347
A	$-0,4864\varphi - 0,0241\lambda - 0,0011H + 32,471$	-0,636	0,108	0,074
U	$-0,0332\varphi - 0,0378\lambda - 0,0007H + 49,359$	0,353	-0,378	-0,786
H	$-0,1511\varphi - 0,0932\lambda - 0,0011H + 75,745$	0,014	-0,204	-0,255
p	$1,8288\varphi - 0,7904\lambda - 0,0863H + 930,244$	0,587	-0,128	-0,944
Θ	$-0,0076\varphi - 0,0029\lambda + 0,0041H + 274,046$	-0,334	0,028	0,636
ρ	$0,0039\varphi - 0,0003\lambda - 0,0001H + 1,076$	0,603	-0,102	-0,875
S	$0,0000\varphi - 0,0000\lambda + 0,0000H + 1,012$	-0,304	0,027	0,632
e	$-0,0863\varphi - 0,0523\lambda - 0,0016H + 11,835$	0,354	-0,248	-0,906
ρ'	$-0,6502\varphi - 0,0370\lambda - 0,0012H + 9,142$	0,350	-0,230	-0,907
q	$-0,0686\varphi - 0,0286\lambda - 0,0008H + 8,050$	-0,055	-0,463	-0,888
f	$0,0064\varphi - 0,0024\lambda + 0,0001H + 0,454$	0,133	-0,097	-0,083
Δ	$-0,1183\varphi - 0,0310\lambda - 0,0003H + 8,035$	-0,531	-0,198	-0,042
Θ_e	$-0,2920\varphi - 0,3991\lambda - 0,0058H + 307,114$	0,072	-0,601	-0,801
v	$0,5054\varphi + 0,0214\lambda + 0,0041H - 23,849$	0,046	-0,041	0,579
M	$0,6261\varphi + 0,0259\lambda + 0,0045H - 29,362$	0,101	-0,048	0,496
M'	$0,1778\varphi + 0,0667\lambda + 0,0086H - 78,368$	0,247	-0,006	0,257
N	$0,0285\varphi - 0,0401\lambda + 0,0008H + 5,174$	0,468	0,207	-0,204
O	$11,1315\varphi - 1,9965\lambda + 0,2673H - 364,747$	-0,314	-0,054	0,862
L_O	$-0,3544\varphi - 0,2439\lambda + 0,0018H + 40,664$	-0,257	-0,165	0,298
L_o	$3,9158\varphi + 1,2497\lambda + 0,0072H - 136,544$	0,551	0,247	-0,112
L_O	$2,8082\varphi - 0,0629\lambda + 0,0236H - 37,945$	0,039	-0,095	0,629
L_m	$4,6233\varphi - 0,5582\lambda + 0,0644H - 210,039$	-0,182	-0,092	0,793
L_v	$7,1435\varphi - 1,0108\lambda + 0,0726H - 342,691$	-0,036	-0,167	0,725
L_c	$-14,7956\varphi - 3,0137\lambda - 0,0226H + 896,356$	-0,418	-0,064	0,116

Tabela 3 Równania hiperpłaszczyzn regresji zmiennych meteorologicznych względem φ , λ , H i współczynniki korelacji cząstkowej (kwiecień-wrzesień, 1951-1960)

Equations of hyperplanes of regression of the meteorological variables with respect to φ and the partial correlation coefficients (April-September, 1951-1960)

φ, λ, H	ρ_{φ}	ρ_{λ}	ρ_H
$T = -0,5062\varphi + 0,1333\lambda - 0,0062H + 311,414$	0,101	0,200	-0,742
$T_{\max} = -0,7909\varphi + 0,1201\lambda - 0,0080H + 332,213$	0,039	0,200	-0,828
$T_{\min} = -0,5603\varphi - 0,0866\lambda - 0,0054H + 313,607$	0,045	-0,042	-0,525
$A = -0,4730\varphi + 0,1102\lambda - 0,0033H + 33,463$	-0,181	0,313	-0,517
$U = -0,0858\varphi + 0,0230\lambda - 0,0011H + 53,122$	0,103	0,200	-0,742
$H = -0,1218\varphi + 0,0321\lambda - 0,0015H + 75,041$	0,101	0,199	-0,742
$p = 1,8758\varphi - 0,9043\lambda - 0,0825H + 929,105$	0,591	-0,140	0,939
$\Theta = -0,5946\varphi + 0,2129\lambda + 0,0013H + 313,675$	-0,614	0,371	0,450
$\rho = 0,0040\varphi - 0,0017\lambda - 0,0001H + 1,038$	0,637	0,211	-0,877
$S = -0,0021\varphi + 0,0006\lambda + 0,0000H + 1,158$	-0,713	0,382	0,492
$e = -0,2795\varphi + 0,0371\lambda - 0,0033H + 26,727$	0,124	0,148	-0,871
$\rho' = -0,1950\varphi + 0,0243\lambda - 0,0024H + 19,405$	0,136	0,138	-0,875
$q = -0,1949\varphi + 0,0304\lambda - 0,0016H + 17,579$	-0,093	0,255	-0,731
$f = 0,0064\varphi - 0,0024\lambda + 0,0001H + 0,454$	-0,065	0,241	0,641
$\Delta = -0,2220\varphi + 0,0719\lambda - 0,0024H + 15,348$	0,031	0,270	-0,691
$\Theta_e = -0,9961\varphi + 0,1493\lambda - 0,0104H + 356,216$	0,054	0,194	-0,847
$v = 0,3758\varphi - 0,0050\lambda + 0,0027H - 17,002$	0,114	-0,098	0,519
$M = 0,4497\varphi - 0,0109\lambda + 0,0028H - 20,169$	0,178	-0,116	0,427
$M' = 2,4261\varphi + 0,1593\lambda + 0,0104H - 104,044$	0,278	-0,044	0,196
$N = 0,0285\varphi - 0,0401\lambda + 0,0008H + 5,174$	-0,201	-0,288	0,653
$O = -10,2813\varphi - 2,2940\lambda + 0,3429H - 209,694$	-0,535	0,023	0,854
$L_O = -0,5591\varphi + 0,3842\lambda - 0,0080H + 44,210$	0,069	0,246	-0,484
$L_O = 0,7629\varphi - 0,5142\lambda + 0,0228H + 18,673$	-0,292	-0,143	0,783
$L_O = 0,6451\varphi - 0,7996\lambda + 0,0255H + 54,078$	-0,331	-0,207	0,846
$L_m = 6,0925\varphi - 1,1780\lambda + 0,0804H - 292,763$	-0,150	-0,155	0,821
$L_v = 6,1307\varphi - 0,8850\lambda + 0,0608H - 299,463$	-0,023	-0,170	0,700
$L_c = -12,4960\varphi - 1,5262\lambda - 0,0239H + 762,156$	-0,327	0,060	0,060

Cykliczne zmiany klimatu

Niektóre problemy z zakresu zmian klimatu są rozwiązywane także w ramach rozpraw habilitacyjnych, doktorskich oraz prac magisterskich. Pionierski charakter ma rozprawa habilitacyjna Zofii Kaczorowskiej pt. *Opady w Polsce w przekroju wieloletnim* (1962), dotycząca zależności opadów od liczby plam słonecznych oraz tendencji opadów w Polsce.

Znaczącym postępowaniem w badaniach cykliczności zmian klimatu jest rozprawa habilitacyjna Jerzego Boryczki pt. *Model deterministyczno-stochastyczny wielookresowych zmian klimatu* (1984). Autor wprowadza do literatury modele symulujące cykliczność klimatu z uwzględnieniem składników antropogenicznych. Ukoronowaniem dotychczasowych badań w zakresie cykliczności, tendencji i prognoz współczesnych zmian klimatu są kolejne prace tego autora: *Naturalne i antropogeniczne zmiany klimatu Ziemi w XVIII-XXI wieku* (1993) i *Zmiany klimatu Ziemi* (1998). Istotne znaczenie poznawcze ma określenie astronomicznych przyczyn współczesnych wahań klimatu przez porównanie widm oscylacji (okresów) z widmami aktywności Słońca i stałej słonecznej oraz aktywności wulkanicznej. Nowością jest wykazanie podobieństwa widm

zmiennych klimatycznych, geologicznych i astronomicznych. Analogiczna okresowość parametrów Układu Słonecznego świadczy o deterministycznych wahaniami klimatu w ostatnich stuleciach.

Odrębność badań Zakładu Klimatologii Uniwersytetu Warszawskiego w porównaniu z innymi placówkami naukowymi w kraju i zagranicą dotyczy również synchroniczności wahań klimatu w Europie i Polsce. Informują o tym przestrzenne rozkłady (izarytmy) parametrów cykli: okresów, amplitud i faz. Na przykład, 8-letni cykl temperatury powietrza jest synchroniczny na obszarze Polski i Europy (Żmudzka, 1998). Podobnie jest w przypadku 11-letniego cyklu sezonowych sum opadów atmosferycznych w Polsce, które są synchroniczne (Michalska, 1998).

Dotychczasowe badania długich ciągów pomiarów wykazały, że w Warszawie, podobnie jak w innych miastach Polski, czy też Europy, występuje kilka cykli temperatury powietrza o znaczących amplitudach. Są to cykle około 3-5, 7-8, 10-13, 73-113 lat i planetarny 178,9 lat. Ich obecność prawie we wszystkich ciągach chronologicznych (wartości miesięcznych i sezonowych) i synchroniczność wahań (zbliżone daty ekstremów), głównie 8, 10-13, 180-letniego, wskazują, że cykliczność jest cechą pola temperatury powietrza w Polsce i Europie

Tendencje wiekowe zmian klimatu

Tendencje wiekowe temperatury powietrza (w °C/100lat), określono według trendów liniowych, są dodatnie prawie we wszystkich miesiącach. Świadczy to o postępującym ociepleniu klimatu w Europie (i Polsce). Szczególnie zimy w Europie są coraz cieplejsze: w Warszawie – o 1,15°C/100lat, Krakowie – o 1,72°C/100lat, Pradze – o 0,44°C/100lat, Genewie – o 0,74°C/100lat.

Tendencje wiekowe temperatury powietrza w porze letniej są w niektórych miastach dodatnie lub ujemne. Lipce są cieplejsze np. w Warszawie o 0,19°C/100lat, Krakowie o 0,34°C/100lat i Poczdamie o 0,64°C/100lat, natomiast są one chłodniejsze: we Wrocławiu o 0,73°C/100lat, Pradze o 0,16°C/100lat, Zurychu o 1,08°C/100lat, Genewie o 0,08°C/100lat. Tendencja temperatury powietrza w Anglii Środkowej w lecie $A = 0,01^\circ\text{C}/100$ lat jest prawie zerowa (nieistotna statystycznie na poziomie istotności 0,05) (tab. 4).

Globalne ocieplenie klimatu w ostatnich dwóch stuleciach jest prawdopodobnie wywołane głównie wzrostem aktywności Słońca (stałej słonecznej) i spadkiem aktywności wulkanicznej na Ziemi – mniejszą absorpcją promieniowania słonecznego przez aerozole siarczanowe zawarte w atmosferze (stratosferze). Aktywność Słońca jest skorelowana z wypadkową sił grawitacyjnego oddziaływania planet na Słońce. Wzrost aktywności Słońca w latach 1779-1993 o 15,3/100lat może być spowodowany coraz większą koncentracją masy (planet) w płaszczyźnie ekliptyki (maleje dyspersja masy – ujemne współczynniki regresji).

Tendencje malejące lub zerowe temperatury powietrza w miesiącach letnich nie wspierają hipotezy o antropogenicznych przyczynach globalnego ocieplenia klimatu. Nie można postępującego ocieplenia klimatu przypisać tylko nasilającemu się efektowi cieplarnianemu, wynikającemu ze wzrostu zawartości CO₂ w atmosferze, który pochodzi ze spalania węgla i innych paliw. Hipotezie tej przeczą: cykl roczny i przestrzenne zróżnicowanie tendencji wiekowej temperatury powietrza na obszarze Europy.

Tabela 4. Tendencje wiekowe temperatury powietrza (w °C)
The tendency of secular of air temperature (in °C)

Miesiące, sezony, rok	Warszawa	Kraków	Wrocław	Praga	Genewa	Zurych	Poczdám	Anglia
I	1,15	1,72	-0,61	0,44	0,74	0,84	0,38	0,38
II	0,50	1,14	-0,07	0,05	0,29	0,28	-0,36	0,27
III	1,01	1,45	0,61	0,50	0,37	0,87	0,35	0,30
IV	0,79	0,85	0,35	-0,01	-0,20	-0,77	0,40	0,22
V	0,43	0,69	0,13	-0,44	-0,53	-0,57	0,66	0,11
VI	0,26	0,07	-0,51	-0,09	-0,23	-1,00	0,63	0,00
VII	0,19	0,34	-0,73	-0,16	-0,08	-1,08	0,64	0,03
VIII	-0,04	0,46	-0,74	-0,40	-0,24	-0,47	1,40	-0,02
IX	0,18	0,43	-0,55	-0,41	0,06	-0,11	1,03	0,12
X	0,58	0,32	-0,72	-0,25	0,00	0,70	1,00	0,24
XI	1,11	1,64	1,44	0,40	0,32	0,60	1,25	0,20
XII	1,36	1,96	1,00	0,29	0,47	1,05	0,62	0,32
XII-II	1,03	1,38	0,12	0,25	0,51	0,64	0,10	0,32
III-V	0,79	0,99	0,37	0,00	-0,12	-0,15	0,50	0,21
VI-VIII	0,18	0,32	-0,70	-0,25	-0,19	-0,90	0,92	0,01
IX-XI	0,66	0,81	0,05	-0,11	0,14	0,38	1,11	0,19
X-III	1,00	1,37	0,29	0,22	0,37	0,65	0,53	0,29
II-IX	0,31	0,48	-0,37	-0,27	-0,20	-0,70	0,81	0,08
I-XII	0,66	0,93	-0,04	-0,03	0,08	0,03	0,66	0,18

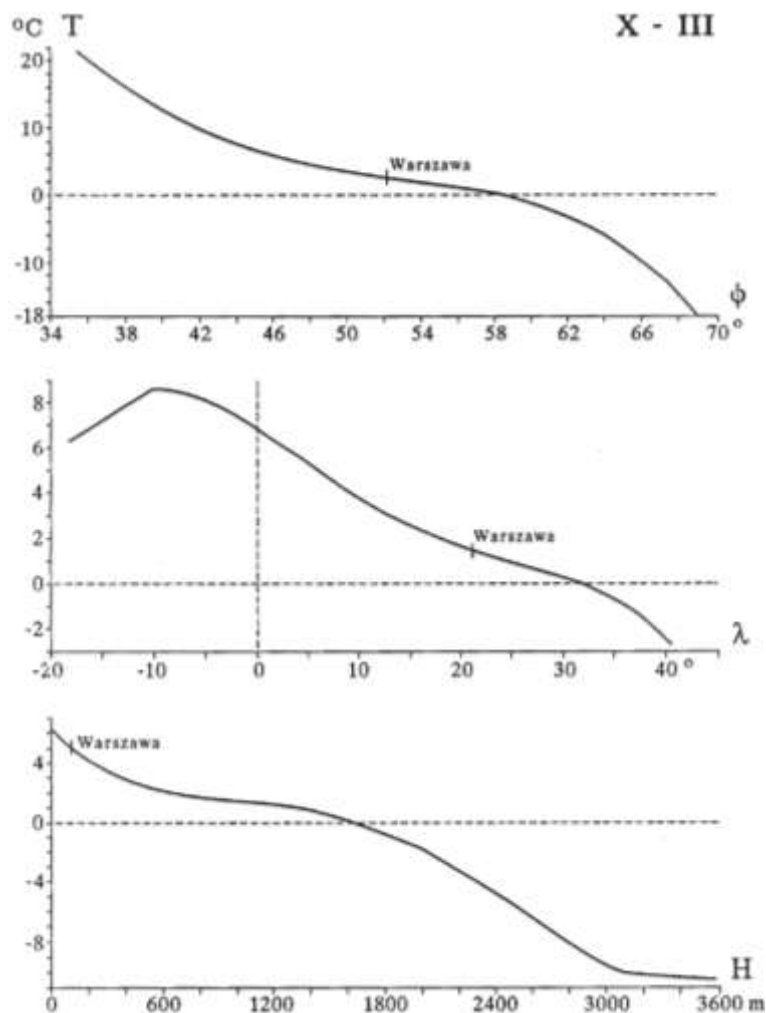
Dość duże wartości współczynnika regresji w miesiącach zimowych mogą wynikać z uwarunkowań lokalnych, tj. „miejskich wysp ciepła”. Są one prawdopodobnie spowodowane coraz większą akumulacją ciepła przez zabudowę (powierzchnie sztuczne o małym albedo), głównie w zimie. Należy też zauważyć, że trendy liniowe aproksymują części rosnące planetarnego 178,9-letniego cyklu temperatury powietrza (od daty minimum absolutnego aktywności Słońca, najsłabszego cyklu 13-letniego plam słonecznych w latach 1811-1823, do roku maksimum absolutnego w 1957 r.).

Za syntezę dotychczasowych badań w zakresie cykliczności i tendencji zmian klimatu Polski na tle Europy można uznać tom XIII *Atlasu...* Nawiązuje on głównie do trzech poprzednich tomów, dotyczących cykliczności i tendencji aktywności Słońca i cyrkulacji atmosferycznej w Europie (t. X, 1997) i temperatury powietrza w Europie w sezonach, półroczach i roku (t. XI, 1998) oraz poszczególnych miesiącach (cz. XII, 1999). W ostatnich dwóch tomach znacznie rozszerzono zakres badań zmian klimatu na podstawie długich ciągów chronologicznych temperatury powietrza w ośmiu miastach europejskich (Warszawa 1779-1990, Kraków 1826-1990, Wrocław 1850-1980, Praga 1771-1980, Zurych 1864-1980, Genewa 1768-1980, Poczdám 1893-1992, Anglia Środ-kowa 1659-1973 – seria Manley’a).

Antropogeniczne zmiany klimatu

Dotychczasowe wyniki badań w zakresie wpływu czynników antropogenicznych na klimat przyczyniły się głównie do poznania cech termicznych klimatu miast Europy, zwłaszcza Polski. Najważniejszym obiektem badań była i jest nadal Warszawa.

Najpierw dokonano oceny wpływu położenia geograficznego na cechy termiczne miast w Europie – ze szczególnym uwzględnieniem Polski (rys. 5).



Rys. 5. Profile gradientów temperatury powietrza w Europie: południkowy $\frac{\partial T}{\partial \varphi}$, równoleżnikowy $\frac{\partial T}{\partial \lambda}$, hipsometryczny $\frac{\partial T}{\partial H}$ (X-III)

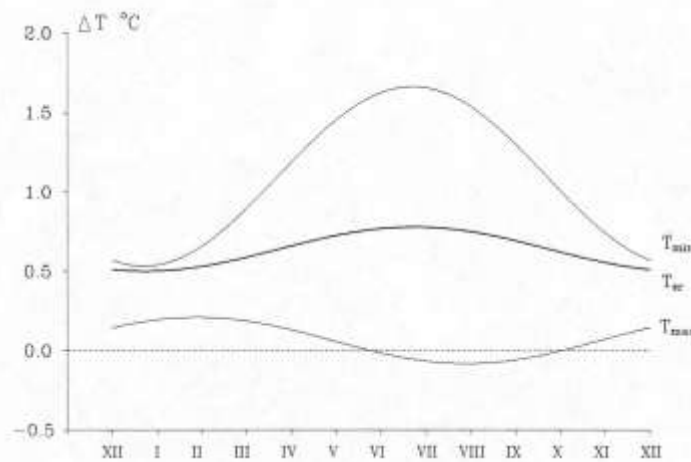
Profiles of gradients of air temperature in Europe: longitudinal $\frac{\partial T}{\partial \varphi}$, latitudinal $\frac{\partial T}{\partial \lambda}$, hisometric $\frac{\partial T}{\partial H}$ (X-III)

Z modeli statystycznych różnoskalowych – wielkoskalowych (Europa) i średnioskalowych (Polska) wynika, że w kształtowaniu klimatu miast (także największych) dominują czynniki naturalne: szerokość geograficzna – warunkująca strefowość klimatu, odległość od Oceanu Atlantyckiego (ocieplający wpływ w zimie mas powietrza polarnego morskiego) i wysokość n.p.m. Strefowość klimatu jest głównie deformowana przez Ocean Atlantycki i góry. W miastach „nizinnych” Europy Zachodniej dominuje oddziaływanie Oceanu Atlantyckiego na pole temperatury powietrza, a w Europie Wschodniej – wpływ lądu Azji. Pole temperatury powietrza w miastach położonych na południe i na północ od nizin europejskich jest głównie zdeformowane przez wysokość n.p.m. Najbardziej go deformują kotliny śródgórskie w Alpach, Karpatach, Sudetach (Stopa-Boryczka, Boryczka i in., 1984).

Z modeli symulujących zmienność przestrzenną temperatury powietrza w Europie wynika też znaczący wpływ czynników antropogenicznych na kształtowanie klimatu miast. Różnice temperatury powietrza między zmierzonymi i obliczonymi z wielomianów regresji 4 stopnia względem czynników geograficznych $T = f(\varphi, \lambda, H)$ świadczą o dość dużej roli powierzchni sztucznych – głównie w dużych miastach. W przypadku Warszawy ta różnica jest rzędu 1°C , mimo że wyróżnia się jako cieplejsza Nizina Mazowiecka.

Szczegółowe badania wpływu czynników antropogenicznych na klimat lokalny przeprowadzono na przykładzie Warszawy. Ilościowym wskaźnikiem nadwyżki energii cieplnej w Warszawie jest wyższa temperatura powietrza w odniesieniu do terenów otaczających miasto. Jest to tzw. miejska wyspa ciepła. Zjawisko to nie jest stabilne, lecz cechuje się dużą zmiennością zarówno w cyklu dobowym, jak też rocznym – zależnie od stanu atmosfery. Miejska wyspa ciepła w Warszawie cechuje się nawet trendem czasowym – wiekowym.

Największe zasoby ciepła w mieście występują w porze letniej. Różnice temperatury minimalnej w lipcu wynoszą ponad $1,7^{\circ}\text{C}$, a w styczniu zaledwie $0,5^{\circ}\text{C}$. Średnia dobowa temperatura powietrza w mieście jest w lecie o $0,7^{\circ}\text{C}$ wyższa niż poza miastem (rys. 6).

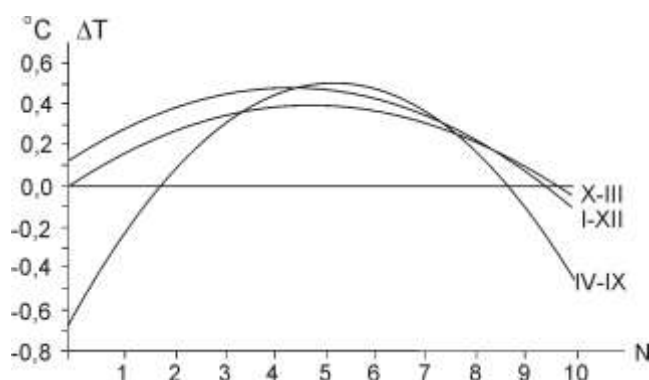


Rys. 6. Sinusoidy rocznych zmian różnic temperatury powietrza między miastem i otoczeniem w latach 1961-1965 średniej dobowej (ΔT), maksymalnej (ΔT_{\max}), minimalnej (ΔT_{\min})

Annual sine curve mean air temperature differences changes between the city and its surrounding in years 1961-1965: daily mean (ΔT), maximum (ΔT_{\max}), minimum (ΔT_{\min})

Miejska wyspa ciepła w Warszawie zależy od stanu atmosfery – od temperatury powietrza, zachmurzenia i prędkości wiatru. Najmniejsze różnice temperatury powietrza między centrum miasta i peryferiami (średniej dobowej i minimalnej) występują przy temperaturze bliskiej zeru. W półroczu ciepłym miejska wyspa ciepła jest najintensywniejsza (największe różnice), gdy temperatura powietrza poza miastem wynosi 13-16°C. Przy niższych i wyższych wartościach temperatury powietrza różnice maleją. W półroczu chłodnym najsłabsza jest ona przy temperaturze od -2 do 1°C, a najsilniejsza, gdy temperatura spada poniżej -10°C.

W mieście w chłodnej porze roku jest znacznie cieplej niż w otoczeniu przy małym zachmurzeniu nieba. W lecie ta różnica jest mniej więcej stała (0,4-0,5°C) i prawie nie zależy od zachmurzenia. Tempo ogrzewania się miasta w dzień i ochładzania nocą jest takie samo. Natomiast w każdej porze roku różnica temperatury między miastem i otoczeniem maleje ze wzrostem prędkości wiatru – do zera przy prędkościach wiatru 7-8 m/s. Po prostu przy dużych prędkościach wiatru intensywna pozioma wymiana ciepła powoduje zanik różnic temperatury powietrza (rys. 7, 8).

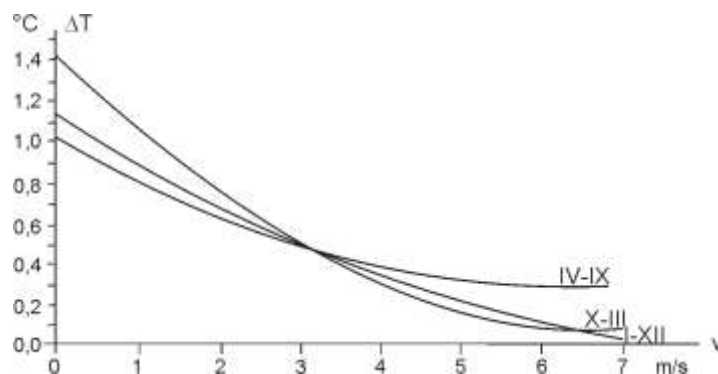


Rys. 7. Zależność paraboliczną różnic temperatury powietrza (ΔT) między miastem i peryferiami względem zachmurzenia (N) (Warszawa – X-III, IV-IX, I-XII)

Parabolic dependence of differences mean daily air temperature (ΔT) between the city and its vicinity on cloudiness (N), (Warsaw – X-III, IV-IX, I-XII)

Według parabol regresji prędkość wiatru w mieście jest w ciągu całego roku mniejsza o około 2 m/s niż poza miastem. Interesujące jest, że w Warszawie przy małych prędkościach wiatru poza miastem (poniżej 1 m/s) średnia prędkość poziomego ruchu powietrza w terenie zabudowanym jest większa niż w terenie otwartym. Obserwuje się w mieście mniej ciszy (dodatkowy efekt wewnętrznej cyrkulacji miejskiej). Przy dużych prędkościach wiatru, około 10 m/s, ich osłabienie w mieście wynosi ponad 3 m/s.

Warto podkreślić, że miejska wyspa ciepła w Warszawie o największej różnicy temperatury powietrza między centrum miasta i peryferiami wystąpiła w dniach o cyrkulacji antycyklonalnej (wyżowej), przy największej insolacji. Największą różnicę temperatury powietrza (9,1°C) zanotowano w dniach: 30 VII i 17 VIII 1992 roku przy typie cyrkulacji antycyklonalnej południowo-wschodniej. Kontrast termiczny między miastem i jego otoczeniem szczególnie nasila się przy frontach chłodnych, w godzinach późnowieczornych i nocnych.



Rys. 8. Zależność paraboliczna różnic temperatury powietrza między (ΔT) miastem i peryferiami względem prędkości wiatru (v) otoczenia (X-III, IV-IX, I-XII)

Parabolic dependence of differences mean daily air temperature (ΔT) between the city and its vicinity on the wind velocity (v), (Warsaw – X-III, IV-IX, I-XII)

Najważniejszym czynnikiem zapewniającym wymianę powietrza w Warszawie jest wiatr. Wydaje się, że spełnia on swoją funkcję wentylacyjną w sposób wystarczający w chłodnej porze roku. W lecie wymiana powietrza w centralnych rejonach miasta jest natomiast zbyt słaba. Zapewnia ją głównie napływ powietrza z sektora zachodniego. Wskazuje to na konieczność intensyfikacji lokalnej wymiany powietrza oraz na potrzebę ułatwienia dostępu powietrza z obszarów pozamiejskich do centrum. Można osiągnąć ten cel poprzez stworzenie niezabudowanych pasm, zagospodarowanych luźną zielenią oraz tras komunikacyjnych.

Pod względem opadów uprzywilejowane są przede wszystkim zachodnie peryferie Warszawy (590 mm/rok – Jelonki), co wynika z przeważających zachodnich kierunków wiatru. Na zawiętrznej stronie o zagęszczonej i coraz wyższej zabudowie może to być efektem wzmożonej turbulencji. Najmniejsze sumy (ok. 500 mm/rok występują na Okęciu, Mokotowie i Bielanych (Kaczorowska, 1967). Ponadto w prawobrzeżnej Warszawie częściej występują dni z opadem poniżej 5 mm/doba, natomiast w lewobrzeżnej – z obfitym opadem (powyżej 10 mm/doba) – z wyjątkiem południowo-zachodniej części miasta.

Ważnymi przykładami prac indywidualnych i zespołowych dotyczących problemów z zakresu klimatu i bioklimatu miast w Polsce, ze szczególnym uwzględnieniem Warszawy, są:

- *Opady Wielkiej Warszawy i jej okolic w okresie 1956-1960* (Kaczorowska, 1967),
- *Turbulencyjna transformacja pyłów i gazów w atmosferze ziemskiej i jej zależność od parametrów meteorologicznych* (Boryczka, 1967 – maszynopis pracy doktorskiej),
- *Osobliwości klimatu wielkomiejskiego na przykładzie Warszawy* (Kossowska, 1969 – maszynopis pracy doktorskiej),
- *Cechy charakterystyczne klimatu lokalnego Wielkiej Warszawy (cz. I). Próba określenia wpływu warunków meteorologicznych na rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń atmosfery na przykładzie Warszawy (cz. II)*. Opracowanie zbiorowe wykonane pod kierunkiem W. Okołowicza i Z. Kaczorowskiej na zamówienie Biura Studiów i Projektów Inżynierii Miejskiej w Warszawie, 1970,

Bioklimat uzdrowisk o profilu kardiologicznym (Kopacz-Lembowicz, 1975 – maszynopis pracy doktorskiej),

Wpływ zieleni miejskiej na klimat w Warszawie (opracowanie zbiorowe wykonane pod kierunkiem W. Okołowicza na zamówienie Instytutu Kształtowania Środowiska, 1976),

Związki korelacyjne parametrów meteorologicznych w różnych masach powietrza. (Nguyen Thien Son, 1978 – maszynopis pracy doktorskiej),

Cechy termiczne klimatu lokalnego Warszawy (Wawer, 1994 – maszynopis pracy doktorskiej),

Tom IX – *Atlasu współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce* z podtytułem *Naturalne i antropogeniczne zmiany klimatu Warszawy* (Stopa-Boryczka, Boryczka, Błażek, Skrzypczuk, 1995),

Wpływ cyrkulacji atmosferycznej na stężenie dwutlenku siarki w powietrzu w Polsce (Kicińska, 1999 – maszynopis pracy doktorskiej),

Wpływ warunków aerosanitarnych i biometeorologicznych na zgony mieszkańców Warszawy (Kuchcik, 2000 – maszynopis pracy doktorskiej).

Celem prac dotyczących klimatu miasta jest próba oddzielenia wpływów antropogenicznych od naturalnych zmian klimatu. Określono deformację pól zmiennych meteorologicznych pod wpływem zabudowy w skali całego miasta i osiedli na przykładzie Warszawy. Skorelowanie np. różnic temperatury powietrza między miastem i otoczeniem względem otoczenia pozwoliło na oszacowanie tempa nagrzewania się i wychładzania terenów zabudowanych oraz terminów pojawiania się i zaniku miejskiej wyspy ciepła. W ten sposób oszacowano nadwyżkę zachmurzenia i opadów oraz niedobór wilgotności powietrza i zniżkę prędkości wiatru względem otoczenia Warszawy.

Istotne znaczenie w poznaniu cech klimatu miasta mają wyznaczone wartości progowe temperatury powietrza, prędkości wiatru i zachmurzenia, przy których deformacja pola temperatury jest największa. Na przykładzie Warszawy dokonano także próby wyodrębnienia antropogenicznych zmian temperatury powietrza o stałej tendencji od jej naturalnych okresowych wahań. Przebiegi różnic temperatury powietrza (średniej dobowej, maksymalnej, minimalnej i amplitudy dobowej) między Warszawą i średnimi z całej Polski wskazują, jak duży jest zakres zmienności wywołany przez czynniki fizycznogeograficzne, od których zależy klimat miast. Czynniki antropogeniczne odgrywają rolę drugorzędą.

Poznane prawidłowości oddziaływania czynników geograficznych i antropogenicznych na klimat oraz próba ich oddzielenia ma istotne znaczenie w modelowaniu i prognozach przestrzennych i czasowych zmian klimatu.

Na podstawie empirycznych wzorów – równań prostych, parabol, sinusoid i hiperpłaszczyzn regresji – można ekstrapolować deformację pola temperatury powietrza przez miasto. Można oszacować różnice temperatury powietrza między miastem i otoczeniem wstawiając odpowiednie wartości zmiennych meteorologicznych. Istnieje wiele możliwości prognozowania, np. temperatury powietrza w dzielnicach miasta – przy projektowaniu nowej zabudowy. Można także oszacować temperaturę powietrza tam, gdzie nigdy nie prowadzono żadnych pomiarów meteorologicznych. Przykładem może być opracowanie prognozy w przypadku projektowanego osiedla mieszkaniowego w Białoleęce Dworskiej (praca wykonana w ramach tematu rządowego).

Prognozy zmian klimatu Warszawy w XXI wieku

W prognozach zmian klimatu Polski przyjęto założenie, że ekstrema wykrytych cykli temperatury powietrza będą się powtarzać tak jak w wiekach XVIII-XX. Do przyjęcia takiego założenia upoważnia obecność analogicznych cykli w ciągach czasowych aktywności Słońca (stałej słonecznej) i parametrów Układu Słonecznego. Najdłuższe okresy około 100- i 200-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, według pomiarów ze stacji Warszawa-Okęcie, jest najmniejszą wartością w 30-leciu 1966-1995.

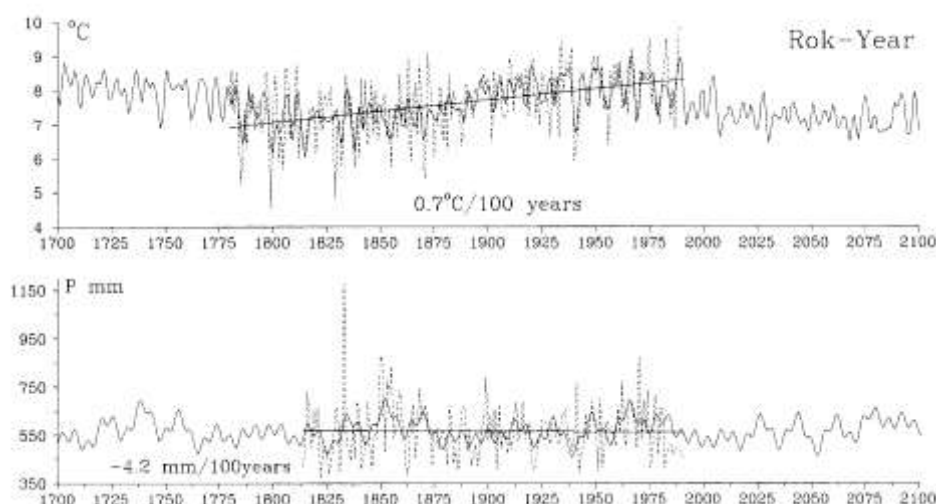
Najmroźniejsze zimy, o średniej temperaturze -7°C , wystąpią prawdopodobnie około roku 2050. Według wypadkowej letnich cykli temperatury powietrza chłodne lata wystąpią w latach 2001-2020.

Postępującego globalnego ocieplenia nie można przypisać jedynie czynnikom antropogenicznym – antropogenicznej części efektu cieplarnianego, wywołanego wzrostem zawartości CO_2 w atmosferze. Wzrosty i spadki temperatury powietrza są skorelowane ze wzrostami i spadkami zmierzonej masy CO_2 pochodzącej ze spalania paliw. Około 125 000 lat temu, podczas globalnego ocieplenia wystąpił wzrost koncentracji CO_2 w atmosferze podobny jak obecnie. Świadczą o tym krzywe zmian stężenia CO_2 i paleotemperatury w ciągu ostatnich 160 000 lat odtworzone na podstawie izotopu tlenu w rdzeniach lodowych ze stacji Wostok (WMO, 1990). Zmiany stężenia CO_2 w atmosferze (w ppm) i paleotemperatury (w $^{\circ}\text{C}$) są synchroniczne. Maksimum sprzed 125 000 lat – to naturalne ocieplenie klimatu Ziemi, spowodowane wzrostem promieniowania słonecznego. Jest to maksimum promieniowania na krzywej M. Milankovicia (1938), otrzymanej z nakładania się okresów zmian parametrów orbity Ziemi.

Tak więc „równoległość” zmian stężenia CO_2 i paleotemperatury nie jest dowodem, że postępujące ocieplenie jest wywołane antropogenicznym efektem cieplarnianym. Wspiera to tezę, że zawartość dwutlenku węgla (zmierzona masa CO_2 , 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 3,5 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 lat: 2033, 2040 (rys. 9).



Rys. 9. Zmiany temperatury powietrza T i opadów atmosferycznych P w Warszawie w XVIII-XXI wieku – rok
Changes of air temperature T and precipitation P in Warsaw in 18th-21th centuries – year

O istnieniu realnych (deterministycznych) okresów opadów atmosferycznych i 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 1994.

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

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 wypadkową 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. Składnik antropogeniczny natomiast 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, nieznanym okresie, 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 zbytne ochłodzenie klimatu w przyszłym stuleciu. Oczywiście prognozy te – sondaż przyszłości – otrzymano przy założeniu, że ekstrema wykrytych cykli, które wystąpiły w wiekach XVIII-XX, powtarzać się będą nadal.

Najlepszym świadectwem działalności naukowej w zakresie cykliczności, tendencji i prognoz zmian klimatu Polski na tle Europy jest wykaz książek opublikowanych i nieopublikowanych w latach 1962-2000:

Opady w Polsce w przekroju wieloletnim (Kaczorowska, 1962),

Model deterministyczno-stochastyczny wielookresowych zmian klimatu (Boryczka, 1984),

Naturalne i antropogeniczne zmiany klimatu Ziemi w XVIII-XXI wieku (Boryczka, 1984),

Atlas współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce:

Tom VII – *Zmiany wiekowe klimatu Polski* (Boryczka, Stopa-Boryczka, Kicińska, Żmudzka, 1992),

Tom X – *Cykliczne zmiany aktywności Słońca i cyrkulacji atmosferycznej w Europie* (Boryczka, Stopa-Boryczka, Błażek, Skrzypczuk, 1997),

Tom XI – *Tendencje wiekowe klimatu miast w Europie* (Boryczka, Stopa-Boryczka, Błażek, Skrzypczuk, 1998),

Tom XII – *Ocieplenia i ochłodzenia klimatu miast w Europie* (Boryczka, Stopa-Boryczka, Wągrowa, Błażek, Skrzypczuk, 1999),

Tom XIII – *Cykliczne zmiany klimatu miast w Europie* (Boryczka, Stopa-Boryczka, Błażek, Skrzypczuk, 1999),

Tom XIV – *Prognozy zmian klimatu Warszawy* (Boryczka, Stopa-Boryczka, Lorenc, Kicińska, Błażek, Skrzypczuk, 2000),

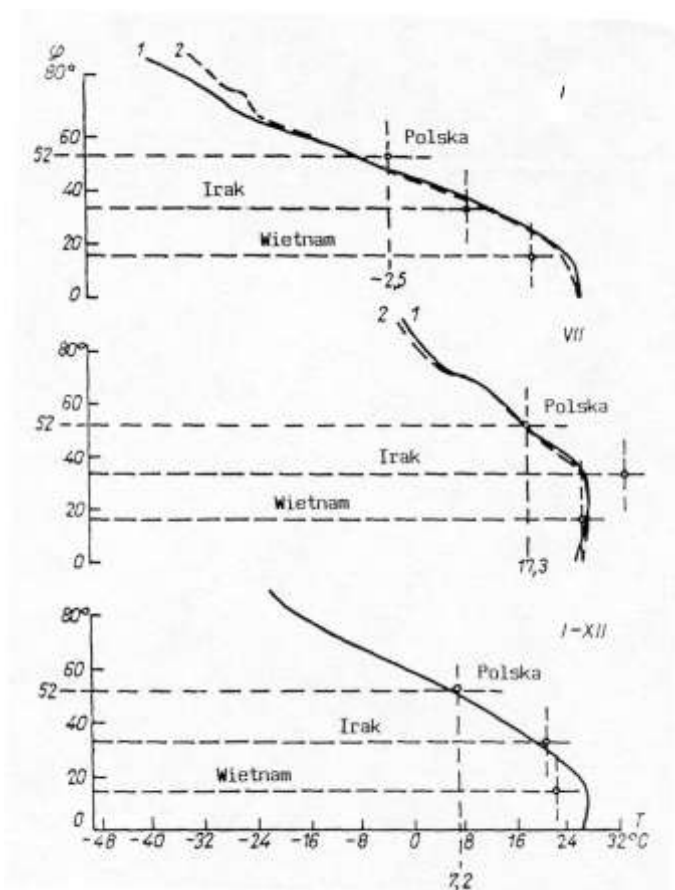
Długookresowe zmiany opadów atmosferycznych w Polsce (Michalska, 1998, maszynopis pracy doktorskiej),

Cykliczne zmiany temperatury powietrza w Polsce (Żmudzka, 1998, maszynopis pracy doktorskiej).

Istotnym ogniwem w badaniach naukowych i kształceniu klimatologów w zakresie długookresowych zmian klimatu są również prace magisterskie. Stanowią one oryginalne opracowania cząstkowe na podstawie krótkich, jak też najdłuższych serii pomiarów. Przykładem takiej współpracy pracowników Zakładu ze studentami są liczne prace magisterskie dotyczące temperatury powietrza i opadów atmosferycznych w Warszawie i Krakowie (Dąbrowska, 1984; Dębska, 1986; Tomasik, 1990; Grzęda, 1990; Klechta, 1990; Michalska, 1992; Olszewska, 1999)

Dwie prace magisterskie wykonano na podstawie najdłuższych serii pomiarów temperatury powietrza poza granicami Polski (Skrzypczuk, 1993 – Anglia Środkowa, Kierzkowska, 1994 – Alpy). Część wyników została włączona do tabel i wykresów opublikowanych w XI i XII tomie *Atlasu współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce* (Boryczka, Stopa-Boryczka, Błażek, Skrzypczuk, 1998, 1999).

Ogólnym tłem strefowości klimatu Polski są średnie wartości elementów klimatu z umiarkowanych i innych szerokości geograficznych półkuli północnej. Profile południkowe temperatury oraz opadów atmosferycznych prezentują rys. 10 i 11.



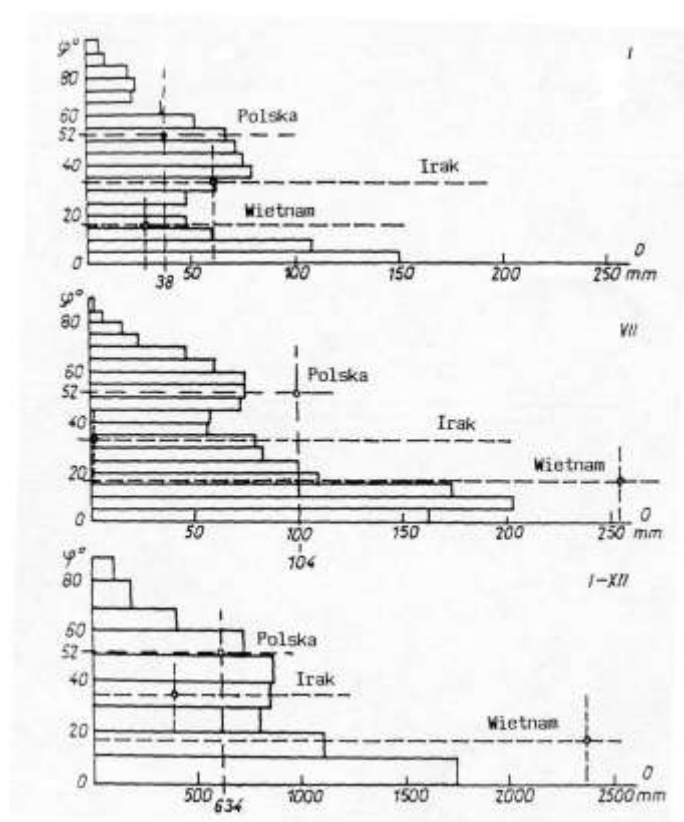
Rys. 10. Zależność temperatury powietrza (T) od szerokości geograficznej na półkuli północnej: styczeń, lipiec, rok (wg Chromowa i Witwickiego)

Dependence of air temperature (T) upon latitude within the northern hemisphere: January, July, year (according to Khromov and Vitvicki)

Na odrębność klimatu Polski wskazują różnice między średnimi uzyskanymi w całej Polsce i całej strefy umiarkowanej. Polska na tle równoleżnika 52° wyróżnia się przede wszystkim zimą – wyższą temperaturą i wilgotnością powietrza oraz mniejszymi sumami opadów atmosferycznych. Z kolei latem opady w Polsce są większe niż przeciętnie na równoleżniku 52° . Roczne sumy opadów atmosferycznych w Polsce są mniejsze o 100 mm od rocznej normy strefowej ($\varphi = 52^{\circ}$) wynoszącej 734 mm.

Studiom nad klimatem Polski poświęcono łącznie ponad 335 opracowań, w tym 3 rozprawy habilitacyjne i 11 prac doktorskich. Część wyników opublikowano w formie monografii i rozpraw (9), atlasów (14) i artykułów (172) w różnych czasopismach, sporo opublikowano w „Pracach i Studiach IGUW – Klimatologia” z. 1-11 (1964-1978) oraz w tomie 11, 20, 22 i 28 „Prac i Studiów Geograficznych” (1997, 1998, 2001). Niektóre z nich tłumaczono na język angielski, np. w 3 tomach „Miscellanea Geographica” (1984-2000), w tym 4 na zamówienie zagranicy.

Dla pełnego zobrazowania cząstkowych zadań rozwiązywanych w ramach badań klimatu Polski w tym tomie przedstawiono wykaz prac opublikowanych bądź przyjętych do druku oraz spis prac habilitacyjnych i doktorskich wykonanych w Zakładzie Klimatologii Uniwersytetu Warszawskiego w latach 1952-2001. Dodatkową informację o badaniach klimatu Polski można znaleźć w spisie prac zleconych.



Rys. 11. Zależność sum opadów atmosferycznych (O) od szerokości geograficznej na półkuli północnej: styczeń, lipiec, rok, wg Chromowa i Witwickiego

Dependence of precipitation (O) upon latitude within the northern hemisphere:
January, July, year (according to Khromov and Vitvicki)

Maria Stopa-Boryczka

**DIRECTIONS OF RESEARCH OF THE DEPARTMENT OF CLIMATOLOGY
OF THE WARSAW UNIVERSITY 1951-2000**

SUMMARY

The fundamental research conducted within the Department of Climatology of the Faculty of Geography and Regional Studies (previously Institute of Geography) at the Warsaw University concerns primarily the climate of Poland. This theme is contained in the research plans of the department since 1952. The theme would only undergo modifications as to its more precise formulation, referring frequently to the fresh currents in climatology.

The research in the domain of climate of Poland was initiated by Professor Romuald Gumiński, the first head of the Department of Climatology of the Institute of Geography at the Warsaw University (1951-1952).

The main research directions taken up at the Department of Climatology under the leadership of Professor Wincenty Okołowicz (the head of the Department in the years 1953-1973), with considerable assistance from Ass. Professor Zofia Kaczorowska (who worked at the Department between 1951 and 1972), include:

1. The structure and regionalisation of the climate of Poland,
2. The climate of the north-eastern Poland,
3. The climate and bio-climate of towns.

The primary object of research at the Department is nowadays constituted by the problem of natural and anthropogenic changes in the climate of Europe, with special consideration of Poland. Within this domain attention should be paid to such subjects as:

1. Empirical models of spatial and temporal variability of climate,
2. Periodical changes of climate and their causes,
3. Secular trends in climate changes,
4. Anthropogenic climate changes,
5. Forecasts of changes in the climate of Poland in the 21st century.

All of these research problems are being approached through both individual and team projects. The most important results of the teamwork include, first of all, the 14 volumes of the *Atlas of interdependencies of the meteorological and geographic parameters in Poland* (in Polish), published in the years 1974-2000. A *sui generis* synthesis of the individual work on the climate of Poland is constituted by the two issues of "Prace i Studia Geograficzne", published (in Polish) under the titles of *New methods of inquiry into the climate of Poland* (1997) and *From the study of the climate of Poland* (1998). The first of these issues was published on the occasion of the 45th anniversary of the establishment of the Department, while the second – to commemorate the 100th anniversary of birth of Professor Romuald Gumiński.