

KRYSTYNA BRYŚ, TADEUSZ BRYŚ

Zakład Agro- i Hydrometeorologii, Instytut Kształtowania i Ochrony Środowiska
Akademia Rolnicza we Wrocławiu

ZMIENNOŚĆ WARUNKÓW SOLARNYCH KLIMATU WROCŁAWIA W LATACH 1875–2004

The variability of solar conditions of wrocław climate in the 1875–2004 years

ABSTRAKT: Zmiany dopływu promieniowania słonecznego do powierzchni Ziemi są istotnym czynnikiem kształtującym dynamikę klimatu. Dla tworzenia doskonalszych modeli klimatycznych konieczne jest poznanie wieloletnich wahań całkowitego promieniowania słonecznego. Kluczowe znaczenie ma tu znalezienie odpowiedzi na pytanie o długookresową regularność zmian radiacyjnych, w skali nie tylko regionalnej, oraz jej przyczyny. Możliwości analityczne ogranicza brak nieprzerwanych, długich serii pomiarowych. Dotychczasowe prace poświęcone warunkom solarnym wykorzystują więc przede wszystkim wieloletnie serie usłonecznienia i zachmurzenia. Serie te pozwalają na wiarygodne odtworzenie z usłonecznienia względnego sum miesięcznych i rocznych promieniowania słonecznego całkowitego za pomocą wzoru Blacka. W opracowaniu zwrócono uwagę na ważną rolę temperatury i wilgotności względnej powietrza we wzorach regresji do obliczania usłonecznienia na podstawie danych z zachmurzenia. Zrekonstruowane, częściowo z wykorzystaniem tych wzorów, 130-letnie (1875–2004) przebiegi usłonecznienia i promieniowania całkowitego we Wrocławiu-Swojcu pozwoliły stwierdzić, że wydobyte dla XX wieku liniowe trendy spadkowe mają swoje co najmniej 30-letnie przedłużenie. Przeprowadzone porównania z innymi stacjami Polski i Europy środkowej dały podstawę do uznania tych trendów oraz podporządkowanych im tendencji krótkookresowych o zmiennym ukierunkowaniu za istotne przejawy makroskalowych zmian klimatycznych o charakterze wiekowym. Spadkowe trendy analizowanych elementów meteorologicznych mają charakter quasi-sinusoidalny i zostały zapoczątkowane u schyłku tzw. małej epoki lodowej. Skojarzone z długookresowymi sekularnymi zmianami termicznymi, a szczególnie z silnym trendem wzrostowym temperatury powietrza w okresie zimowym, świadczą o wzrastającej roli adwekcji ciepła pochodzenia oceanicznego i zwrotnikowego w bilansie cieplnym Polski i Europy środkowej. Obszary te charakteryzuje największa w Europie „wrażliwość” na dokonujące się zmiany, gdyż położone są w strefie klimatu przejściowego, czyli największej dynamiki zmian pomiędzy cechami oceanicznymi a kontynentalnymi. Ta zmienność i będące jej odzwierciedleniem zróżnicowanie czasowe i przestrzenne warunków solarnych są podstawą do dyskusji problemu telekoneksji i opóźnienia reakcji systemu klimatycznego na wyjściowy bodziec solarny. Stwierdzono, że w przypadku promieniowania słonecznego całkowitego we Wrocławiu „bufor klimatyczny” zachowuje wiekowy cykl aktywności słonecznej. Występuje tu także zgodność długości tego cyklu z 90-letnią sinusoidą Emmricha, która odpowiada sekularnemu cyklowi klimatycznemu na półkuli północnej.

słowa kluczowe – key words:

zachmurzenie – *cloudiness*, usłonecznienie – *sunshine duration*, promieniowanie słoneczne całkowite – *global radiation*, zmiany klimatyczne – *climate changes*, telekoneksje – *teleconnexions*, cykle wiekowe – *secular cycles*

WSTĘP

Dobowe, sezonowe i długookresowe zmiany dopływu promieniowania słonecznego do powierzchni Ziemi są istotnym czynnikiem kształtującym dynamikę klimatu. Od fluktuacji promieniowania zależy bowiem bilans radiacyjny powierzchni czynnej oraz bilanse cieplny i wodny. Napromienienie wraz z czynnikiem adwekcyjnym odpowiada nie tylko za „mozaikę” warunków pogodowych, ale także włącza je w system mniej lub bardziej regularnych zmian okresowych. Dla tworzenia doskonałych modeli klimatycznych konieczne jest więc poznanie wieloletnich wahań całkowitego promieniowania słonecznego.

Możliwości analityczne ogranicza brak nieprzerwanych, długich serii pomiarowych, gdyż stosunkowo nieliczna jest grupa obserwatoriów aktynometrycznych, które prowadzą od kilkudziesięciu lat ciągle pomiary natężenia promieniowania słonecznego całkowitego. Dotychczasowe prace poświęcone warunkom solarnym wykorzystują więc przede wszystkim wieloletnie serie usłonecznienia (m.in. 9, 11, 16, 19, 33-35) i zachmurzenia (m.in. 10, 17, 20, 29, 38, 40) lub analizują je razem (12, 13, 31, 32). Serie te pozwalają również na wiarygodne odtworzenie za pomocą wzoru Blacka sekularnych ciągów promieniowania całkowitego (5-7).

Skomplikowana historia pomiarów usłonecznienia we Wrocławiu, związana z częstą zmianą lokalizacji punktów pomiarowych, spowodowała konieczność uwzględnienia przy rekonstrukcji usłonecznienia i promieniowania słonecznego całkowitego w XX wieku odpowiedniej procedury homogenizacyjnej (5). Dzięki niej zrekonstruowano warunki solarne we Wrocławiu w latach 1891–2003 (6, 7), głównie pod kątem wykorzystania tak uzyskanych danych promieniowania całkowitego do oszacowania parowania w Obserwatorium Wrocław-Swojec (6). Badania archiwalne, które ostatnio umożliwiły autorom dotarcie do materiałów z terminowych pomiarów zachmurzenia w XIX wieku w obserwatorium uniwersyteckim Breslau-Sternwarte i wyprowadzone przez nich istotne związki statystyczne pomiędzy usłonecznieniem i zachmurzeniem oraz wilgotnością względną i temperaturą powietrza we Wrocławiu, pozwoliły obecnie na wydłużenie tego okresu na lata 1875–2004. Poniższa analiza przeprowadzona na podstawie tej rekonstrukcji zmierza do określenia występowania długookresowej regularności zmian radiacyjnych w skali nie tylko regionalnej oraz jej przyczyn.

MATERIAŁ I METODY

W analizie wykorzystano sumy miesięczne, półroczy letnich i zimowych oraz sumy roczne usłonecznienia rzeczywistego S i promieniowania słonecznego całkowitego G zrekonstruowane dla minionego 130-lecia (1875–2004) dla warunków topoklimatycznych Obserwatorium Wrocław-Swojec. Obserwatorium to, położone w północno-wschodniej, użytkowanej rolniczo, peryferyjnej części miasta, znajduje się poza bezpośrednim wpływem tzw. miejskiej wyspy ciepła. Ma charakter

reprezentatywny dla rolniczych terenów Niziny Śląskiej, a notowane tam wartości średnie S i G są zbliżone do przeciętnych wartości dla Dolnego Śląska. Na bazie prowadzonej w różnych punktach Wrocławia i w różnych latach rejestracji usłonecznienia, promieniowania słonecznego całkowitego oraz zachmurzenia i standardowych elementów meteorologicznych oraz rekonstrukcji (z danych stacji sąsiednich) roku 1945 odtworzono przebieg wartości usłonecznienia rzeczywistego S dla całego badanego okresu. Jednorodność tak uzyskanej serii S zweryfikowano za pomocą testu Bartletta (7). Zastosowane procedury homogenizacyjne (5) oraz optymalne dla Wrocławia współczynniki do wzoru Blacka pozwoliły również na wiarygodną rekonstrukcję jednych z najdłuższych w Europie szeregów czasowych promieniowania słonecznego całkowitego G .

Składają się na nie 3 podstawowe rodzaje danych G : 1) otrzymane bezpośrednio (lata 1961–2004) lub pośrednio (w latach 1958–1960 obliczone za pomocą równań regresji) z pomiarów G prowadzonych na Swojcu (od 1961 r.) lub w Obserwatorium Uniwersyteckim Wrocław-Biskupin (od 1958 r.), 2) obliczone z wzoru Blacka na podstawie pomiarów usłonecznienia (lata 1891–1957) oraz 3) uzyskane dwuetapową drogą obliczeń – najpierw z pomiarów zachmurzenia i wilgotności względnej powietrza (1875–1890) oraz ich relacji (regresja wieloczynnikowa) do usłonecznienia ustalono wartości S , a następnie wyliczono G stosując wzór Blacka. Odpowiadają im 3 główne stopnie malejącej wstecz dokładności oszacowania G , szczególnie zauważalne w przypadku sum miesięcznych. Dla danych G obliczonych z S mogą one często oscylować w granicach wartości odchylnych o 4–5% od wartości rzeczywistych, natomiast dla najmniej dokładnych danych z lat 1875–1890 różnice te mogą osiągać w miesiącach letnich 10%, zaś w niektórych zimowych 15–18%, a sporadycznie (5% prawdopodobieństwo wystąpienia) dla niskich wartości S i G w grudniu nawet ponad 50% (rys. 1). Dla sum półroczy oraz sum rocznych G przypuszczalny błąd oszacowania w tych pierwszych latach nie powinien jednak przekraczać 5% (efekt sumowania różnych znaków odchylenia) i dlatego w tym okresie będą brane pod uwagę jedynie te sumy. Analiza sum miesięcznych G ograniczona została więc do lat 1891–2004 i ma jedynie charakter marginalny.

Szczegółową metodykę obliczeń G dla ubiegłego stulecia i w 10-leciu je poprzedzającym przedstawiają wcześniejsze prace autorów (5, 7). Opracowanie obecne prezentuje bliżej sposób oszacowania sum S oraz G dla ostatnio zrekonstruowanych lat.

Przetestowano 2 sposoby obliczania S :

1) według 2 typów wzorów regresji dla 36 kolejnych dekad roku, będących funkcją bądź: a) wyłącznie zachmurzenia zch i usłonecznienia możliwego S_0 (tożsamego z długością dnia odczytanego z Tablic Astronomicznych), bądź b) zch , S_0 i średniej dobowej lub wartości z godz. 14 i 21 (ówczesny II i III termin obserwacji wg miejscowego czasu słonecznego) wilgotności względnej H (H_{14} , H_{21}) i temperatury powietrza T_p (T_{p14} , T_{p21})

2) wg wzorów regresji prostoliniowej korygujących (za pomocą różnych współczynników i składników równań) tzw. przybliżone sumy miesięczne usłonecznienia

rzeczywistego $S(z)$ (obliczone jako prosta suma wartości dekadowych otrzymanych wg podanego wyżej sposobu 1 a) i z racji stosunkowo dużych odchyłeń od wartości rzeczywistych potraktowane jedynie jako wartości 1. przybliżenia). W postępowaniu korekcyjnym uwzględniono: 1) prostą korektę z wykorzystaniem różnych dla poszczególnych miesięcy współczynników równań regresji przybliżających $S(z)$ do S oraz 2) korektę tworzoną przez równania regresji, w których obok $S(z)$ lub jego modyfikacji wykładniczej w postaci równania kwadratowego $S(z^w)$ wykorzystano również średnie miesięczne wartości T_p (T_{p14} , T_{p21}) oraz H (H_{14} , H_{21}). Ten drugi sposób postępowania przyniósł dokładniejsze wyniki i dlatego ostatecznie zastosowano go w pracy (tab. 1). Obliczono w ten sposób zarówno sumy miesięczne, półroczne i roczne S , jak i dekadowe usłonecznienia względnego S_r , potrzebne do poprawnego oszacowania (z wzoru Blacka) sum miesięcznych promieniowania słonecznego całkowitego G . Wyjściowe wzory (sposób 1 a) były zatem prostą modyfikacją wzoru $S\ t\ e\ n\ z\ a$ (37) na obliczanie S_r z zachmurzenia i usłonecznienia możliwego. Dzięki zastosowaniu w nich odpowiednich dla Wrocławia i kolejnych 36 dekad różnych współczynników regresji (w formule Stenza jest to tylko 1 współczynnik 0,0043, średni dla całej Polski) oraz znanemu stosunkowi $S_r = S/S_o$, a potem przedstawionemu postępowaniu korekcyjnemu otrzymano wartości S dla lat 1875–1890. Następnie z wzoru Blacka, w którym zastosowano współczynniki regresji reprezentatywne dla Wrocławia i Niziny Śląskiej (3), wyliczono dekadowe sumy G . Błąd oszacowania dekadowych sum S oraz G mógł czasami osiągać 15%, zwłaszcza w lutym (II), marcu (III) i listopadzie (XI) (a sporadycznie – najczęściej w dekadach grudnia i stycznia – nawet znacznie więcej), jednakże dla sum miesięcznych od kwietnia (IV) do października (X) przypuszczalnie (na co wskazują wyniki różnych testów) nie przekraczał 10%, zaś dla półrocznych i rocznych 5% (rys. 2). Najmniej dokładne oszacowania (rys. 1) dotyczą grudnia (XII) i stycznia (I), jednakże nie rzutuje to nazbyt mocno na sumy G półroczy zimowych (X–III), gdyż udział obydwu miesięcy w tych sumach jest stosunkowo nieduży. Większa dokładność (poza kwietniem i czerwcem) oszacowania sum miesięcznych G półroczy letnich (IV–IX) decyduje zarówno o mniejszym błędzie dla sum półroczy letnich (niż dla półroczy zimowych), jak i dla wartości rocznych. Mocne podstawy do tych przypuszczeń dają wyniki testów dla lat 1946–1995 (3) oraz lat poprzedzających (5). Uzupełniają je i podbudowują niedawne (7) i obecne analizy wykonane na jednorodnym materiale danych meteorologicznych z okresu 1891–1920. Umożliwiły one przeanalizowanie dokładności, wyprowadzonych na bazie lat 1891–1910, zastosowanych w pracy wzorów regresji. Badania te skoncentrowane zostały na znalezieniu relacji pomiędzy S i zachmurzeniem oraz podstawowymi elementami meteorologicznymi mierzonymi w Obserwatorium Breslau-Sternwarte.

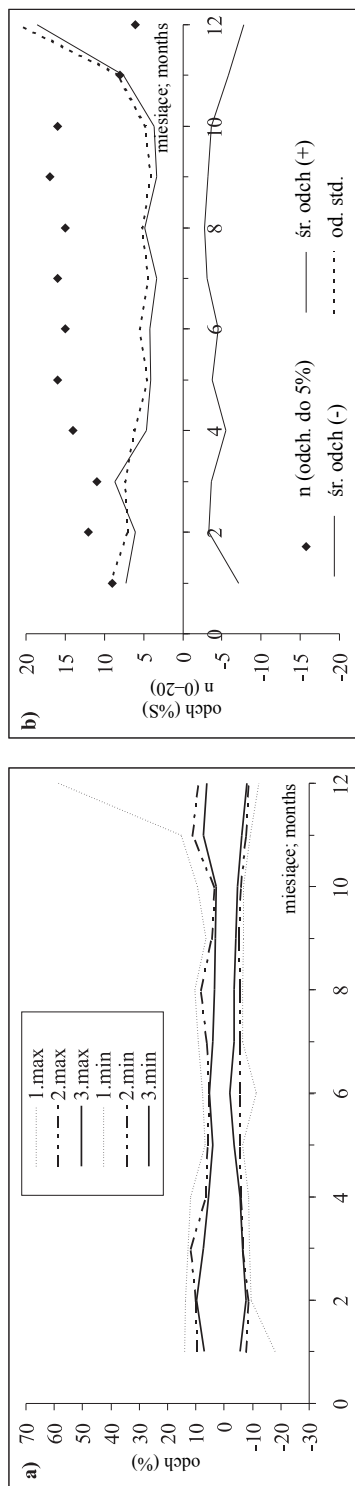
Do analizy tak odtworzonych przebiegów S i G zastosowano różnej sekwencji wartości konsekwentne i wygładzenia wielomianowe. Długookresowe tendencje zostały również przedstawione w postaci trendów prostoliniowych: ogólnych (dla całego wielolecia) i cząstkowych (obejmujących kilkudziesięcioletnie odcinki rozwa-

zanego okresu). Ciągi danych wrocławskich S i G porównano z korespondującymi szeregami czasowymi usłonecznienia i zachmurzenia w Krakowie, Warszawie oraz innych stacjach Europy środkowej. Przeprowadzono dyskusję uzyskanych wyników odnosząc je do wieloletnich zmian cyrkulacyjnych (korelacje z NAO) i aktywności słonecznej (korelacje z liczbami Wolfa). W celu wyeliminowania wpływów fluktuacji z roku na rok na długookresowe tendencje w analizie korelacyjnej zastosowano ciągi wygładzone 35-letnimi średnimi konsekwentnymi. Szczególną uwagę zwrócono tu na telekoneksje czasowe i dlatego obok korelacji synchronicznych (średnie wartości roczne liczb Wolfa w stosunku do sum rocznych G) i quasi-synchronicznych (indeks zimowy NAO Hurrella odniesiony do średnich wartości rocznych liczb Wolfa oraz sum rocznych G) zbadano również korelacje asynchroniczne o przesunięciu czasowym od -1 do -160 lat.

REKONSTRUKCJA USŁONECZNIENIA W LATACH 1875–1890, CZYLI WPROWADZENIE DO DYSKUSJI

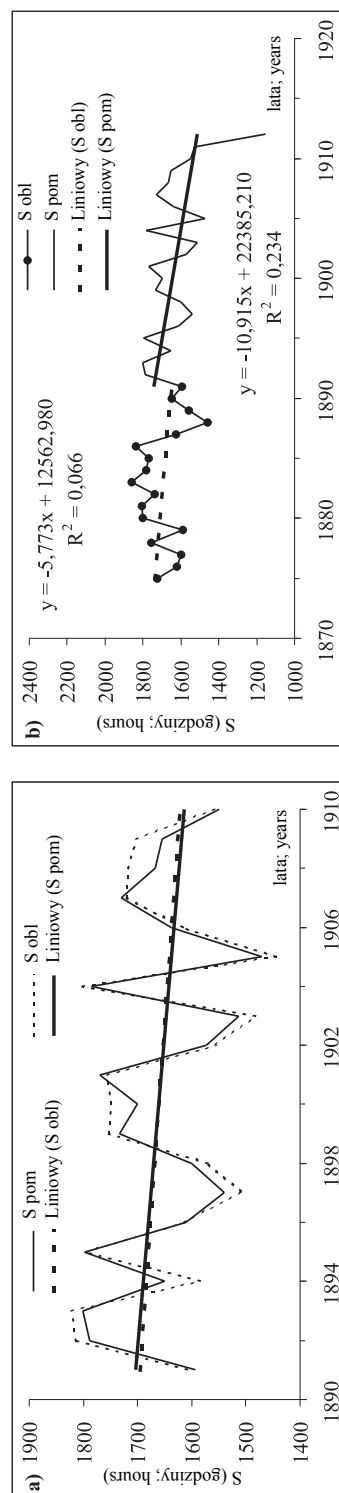
W odróżnieniu od metod największego usłonecznienia (18, 31) lub pogodnych wschodów i zachodów słońca (14) w przeprowadzonej dla lat 1875–1890 rekonstrukcji usłonecznienia (względne i rzeczywiste) wykorzystano usłonecznienie możliwe jedynie w postaci astronomicznej długości każdego dnia roku. W wprowadzonych i zastosowanych w pracy równaniach regresji uwzględniono jednak obok zachmurzenia także miesięczne wartości H i Tp. O roli tych dwóch ostatnich parametrów świadczy porównanie wyników otrzymanych z 2 typów równań regresji: 1) będących omówioną wcześniej modyfikacją (sposób 2a) wzoru Stenza; 2) z wykorzystaniem obok zachmurzenia wartości H i Tp (sposób 2b). Uzyskane na bazie danych z lat 1891–1910 (jako najbliższym czasowo latom rekonstruowanym) wzory regresji przetestowano na homogenicznym materiale pomiarowym z okresu 1891–1920 analizując wielkości maksymalnych różnic pomiędzy sumami miesięcznymi lub półrocznymi i rocznymi usłonecznienia rzeczywistego obliczonego a odpowiednimi sumami usłonecznienia pomierzonego. Zwraca uwagę fakt, że chociaż w latach 1911–1920 miała miejsce stosunkowo duża zmienność z roku na rok wartości S (rys. 3a), to uzyskane dla tych lat odchylenia pomiędzy wartościami pomierzonymi Spom a obliczonymi Sobl mieszczą się w granicach odchyłeń stwierdzonych w 20-leciu 1891–1910 (rys. 2a).

Na rysunku 1a przedstawiono po 3 największe ekstrema maksymalne (+) i minimalne (–) odchyłeń procentowych w sumach miesięcznych Sobl od Spom, jakie miały miejsce w tym „bazowym” 20-leciu odniesienia. W najistotniejszych dla kształtowania sum rocznych S miesiącach letnich wyróżniają się „podatnością” na pojedyncze większe odchylenia czerwiec (-14%) i sierpień (ok. 10%). Mniejsze znaczenie pod tym względem ma większa „podatność” miesięcy zimowych. Średnie odchylenia, zarówno dodanie (+), jak i ujemne (-) dla miesięcy IV–X mieszczą się na ogół w granicach 5% (rys. 1b), co podkreśla także zanotowana w tym okresie



Rys. 1. Przebiegi roczne parametrów odchyżeń procentowych (odch) sum miesięcznych ustonecznienia rzeczywistego obliczonego (S obl) od ustonecznienia rzeczywistego pomierzonego (S pom) w latach 1891–1910 we Wrocławiu: a) ekstremów tych odchyżeń (3 pierwszych max i min); b) średnich wartości (+) lub (-) tych odchyżeń (śr odch), wartości odchylenia standardowego (od. std.) i frekwencji (n) odchyżeń do 5%

The annual courses of the percentage deviation (odch) parameters of monthly sums of calculated sunshine duration (S obl) from measured sunshine duration (S pom) in 1891–1910 in Wrocław of: a) the first extremes of the deviations (3 max and 3 min); b) the mean values (+) or (-) of the deviations (śr. odch), the standard deviation values (od. std.) and frequency (n) of the deviations to 5%



Rys. 2. Przebiegi sum rocznych ustonecznienia obliczonego (S obl) oraz pomierzonego (S pom) we Wrocławiu i ich trendy liniowe (Liniowy): a) w latach 1890–1910, b) w latach 1875–1912

The courses of annual sums of the calculated sunshine duration (S obl) and the measured one (S pom) in Wrocław and their linear trends (Liniowy): a) in 1890–1910, b) in 1875–1912

wysoka frekwencja (od 14 w IV do 17 w IX na 20 możliwych) odchyłeń miesięcznych w tych granicach. Z tymi wielkościami koresponduje odchylenie standardowe, w miesiącach letnich najwyższe w IV i VI. Wyniki te potwierdza analiza współczynników determinacji oraz standardowego błędu estymacji najlepszych spośród testowanych równań regresji (tab. 1). Wskazuje ona na fakt, że najlepsze dopasowanie pomiędzy Sobl a Spom osiągane jest w październiku ($R^2 = 0,985$, błąd standardowy estymacji = 4,89), a najgorsze w lutym (odpowiednio 0,762 i 5,43), zaś dla okresu IV–IX w czerwcu (odpowiednio 0,865 i 18,25).

Obok zachmurzenia istotne znaczenie w analizowanych równaniach regresji wieloczynnikowej w okresie I–V oraz IX–XII ma wilgotność względna powietrza (H lub H14). Uwidacznia się to (tab. 1) szczególnie w miesiącach II, IX, XII (np. w grudniu daje wzrost R^2 z 0,72 dla równania $S(z^w)$ do 0,85 dla równania $S(z^w, H14)$). Z kolei dla miesięcy letnich VI–VIII oraz października duże znaczenie ma, oprócz zachmurzenia, uwzględnienie w tych równaniach temperatury powietrza. Istotna jest tu także zmienna sezonowo pora dnia (terminu obserwacji) parametru wilgotnościowego lub termicznego zastosowanego w najlepszych dla poszczególnych miesięcy równaniach regresji.

Pomimo występujących sporadycznie względnie wysokich wartości odchyłeń sum miesięcznych Sobl od Spom efekt sumaryczny w postaci odchyłeń sum półrocznych lub rocznych nie jest relatywnie duży, gdyż nigdy w badanych latach nie przekracza 5% (max odchylenie = 4,1%), a najczęściej sięga ok. 2-3% sumy Spom (rys. 2a). Na tej podstawie oraz w oparciu o, wspomniane w poprzednim rozdziale, przeprowadzone przez autorów wcześniejsze testowania relacji G obliczonego z S do G pomierzonego można zasadnie wnosić, że otrzymane drogą obliczeń sumy roczne i półroczne G dla okresu 1875–1890 również nie przekraczają progu 5% odchylenia od wartości rzeczywistych.

Wysokie prawdopodobieństwo dużego zbliżenia wartości estymowanych, otrzymanych z równań regresji, do wartości rzeczywistych, a szczególnie sum rocznych i półrocznych, potwierdzają, obok niewielkich odchyłeń tych sum, także niemal identyczne trendy spadkowe wyprowadzone dla Spom i Sobl w okresie 1891–1912 (rys. 2a). O wiarygodności zrekonstruowanych sum rocznych może również świadczyć, prawdopodobnie nieprzypadkowy, fakt, że wspomniana spadkowa tendencja usłonecznienia ma swój bieg już w odtwarzanym 16-leciu (rys. 2b) w postaci podobnego, choć nieco mniejszego, kąta kierunkowego nachylenia linii trendu. Ponad 30-letni cząstkowy trend spadkowy, obejmujący lata 1885–1919, notowany jest także w Krakowie (rys. 3a), skąd pochodzą najstarsze (od czerwca 1883 roku) dane z pomiarów usłonecznienia w Polsce (31). Mogą one stanowić solidne oparcie dla badań porównawczych, ale nie są bezwzględną miarą zmian stosunków solarnych w zachodniej Polsce. Dowodzą tego pewne rozbieżności w kształtowaniu się sum S w poszczególnych latach pomiędzy Wrocławiem a Krakowem, które rzutują także na kąt nachylenia ich linii trendów oraz rozpiętości i granice czasowe trendów cząstkowych wyznaczanych w obrębie ich trendów ogólnych. Podkreślają to stosunkowo

Tabela 1

Współczynniki determinacji równań regresji na obliczanie sum miesięcznych usłonecznienia rzeczywistego oraz błąd standardowy estymacji dla najlepszego równania

Determination coefficients of regression equations for monthly sums of sunshine duration calculation and standard estimation error for the best equation

Miesiąc Month	S(z)	S(z ^w)	S(Tp)	S(Tp14)	S(Tp21)	S(H)	S(H14)	S(H21)	S(z,H)	S(z,H14)	S(z,Tp14)	S(z ^w ,Tp)	S(z ^w ,Tp21)	S(z ^w ,H14)	Std. błąd estym. Std. estim. error
1	0,926		0,044	0,096	0,037	0,912	0,925		0,977	0,972					5,06
2	0,668		0,106	0,103	0,112	0,223	0,209		0,765	0,762					5,43
3	0,912		0,002	0	0	0,75	0,526		0,925	0,913					8,36
4	0,932		0,186	0,372	0,193	0,798	0,817		0,957	0,961					10,37
5	0,902		0,301	0,426	0,332	0,773	0,861		0,947	0,953					10,31
6	0,826		0,251	0,235	0,614	0,106	0,123	0,109	0,839	0,83		0,865			18,25
7	0,7	0,88	0,51	0,504	0,619	0,631	0,615	0,64	0,883	0,861	0,948	0,946	0,921		11,78
8	0,839	0,91	0,637	0,636	0,664	0,448	0,462	0,474	0,874	0,899	0,916	0,92	0,919		13,37
9	0,837		0	0,108	0,037	0,343	0,46		0,938	0,92	0,851				7,03
10	0,981		0,253	0,509	0,235	0,337	0,568		0,983	0,983	0,985				4,89
11	0,885		0,001	0,012	0	0,438	0,693		0,9	0,915					5,45
12	0,638	0,72	0,162	0,221	0,148	0,337	0,604		0,756	0,842			0,85		6,34

Rozpatrywane równania: The investigated equations:

a) prosto liniowe, w których usłonecznienie S jest funkcją (...): linear, in which sunshine duration S is a function (...) of: z – zachmurzenia, cloudiness; Tp – średniej dobowej temperatury powietrza, average diurnal air temperature; Tp 14 – temperatury powietrza o godz. 14, air temperature at 14 o'clock; Tp 21 – temperatury powietrza o godz. 21, air temperature at 21 o'clock; H – średniej dobowej wilgotności względnej, average diurnal air relative humidity, H14 – wilgotności względnej powietrza o godz. 14, air relative humidity at 14 o'clock; H21 – wilgotności względnej powietrza o godz. 21, air relative humidity at 21 o'clock; z,H – zachmurzenia i średniej dobowej wilgotności względnej powietrza, cloudiness and average diurnal air relative humidity; z,H14 – zachmurzenia i wilgotności względnej powietrza o godz. 14, cloudiness and air relative humidity at 14 o'clock; z,Tp 14 – zachmurzenia i temperatury powietrza o godz. 14, cloudiness and air temperature at 14 o'clock

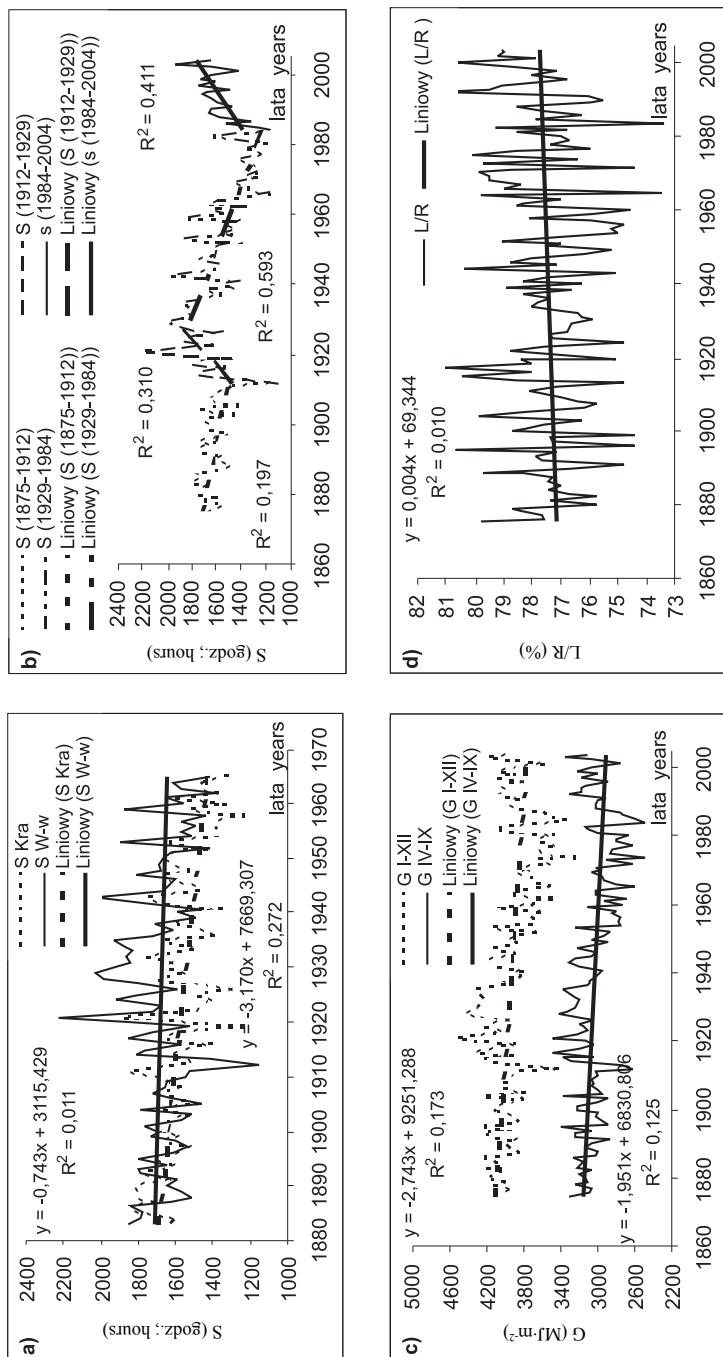
b) wykładnicze, w których usłonecznienie S jest funkcją kwadratową (...): exponential, in which sunshine duration S is the 2nd degree function (...) of: z^w – zachmurzenia; cloudiness

c) złożone, w których usłonecznienie S jest funkcją (...): mixed, in which sunshine duration S is a function (...) of: z^w, Tp; z^w, Tp21; z^w, H14

niewysokie współczynniki korelacji dla sum rocznych S z tych miast wynoszące 0,512 dla wielolecia 1891–1965 oraz 0,351 dla okresu 1891–1920. Niska wartość tego ostatniego być może wiąże się z „przesileniem” cyrkulacyjnym charakteryzującym lata 1911–1920 (wg Emmricha (15) w latach 1911–1914 wystąpiło w Europie maksimum hemisferycznych przepływów strefowych, poprzedzone i zakończone kilkuletnimi okresami bardzo niskich wartości wskaźnika cyrkulacji strefowej ZI). Za taką interpretacją przemawia m.in. skokowa zmiana z $r = 0,664$ dla lat 1891–1910 na $r = 0,249$ dla lat 1891–1911 i fakt, że w świetle relacji do przebiegu usłonecznienia i zachmurzenia w innych, położonych najbliżej stacjach śląskich i niemieckich nie wystąpiło wtedy we Wrocławiu tzw. zerwanie ciągłości serii. O różnicach pomiędzy zachmurzeniem Krakowa, Wrocławia, Pragi i Wiednia oraz kilkuletnim wyprzedzaniu przez trendy S we Wrocławiu tendencji solarnych w Krakowie pisze Morawska (31), ale przyczyn tego stanu rzeczy upatruje głównie w zróżnicowanym rozwoju tych miast, a zwłaszcza w ich uprzemysłowieniu.

DŁUGOOKRESOWE TRENDY SOLARNE I ICH KLIMATYCZNE ODNIESIENIA

W odtworzonych dla lat 1875–2004 przebiegach sum rocznych S we Wrocławiu-Swojcu wydzielono 4 podstawowe okresy zmian tendencji, które zaznaczono za pomocą cząstkowych trendów (rys. 3b): a) spadkowego z lat 1875–1912 ($R^2 = 0,20$), b) wzrostowego z lat 1912–1929 ($R^2 = 0,31$), c) spadkowego z lat 1929–1984 ($R^2 = 0,59$), d) wzrostowego z lat 1984–2004 ($R^2 = 0,41$). W okresie 1929–1984 wyróżnia się jeszcze podokres „przejściowy” lat 1966–1984 o braku wyraźnej tendencji kierunkowej. Podobne rozgraniczenie dotyczy sum rocznych i półrocznych G (7), z tym że pomiędzy okresem c i d pojawia się, silniejsza w półroczu zimowym niż letnim, cezurą roku 1974, tak że okres spadkowy obejmuje tu lata 1929–1974, a wzrostowy, szczególnie silny w latach 1985–2004, ma swój „wstępny” podokres lat 1974–1984 o bardzo słabej, nieistotnej statystycznie tendencji wzrostu (rys. 3c). Taki stan rzeczy jest konsekwencją quasi-sinusoidalnego, falowego charakteru zmian długookresowych S i G (5-7). Zrekonstruowane wartości z lat 1875–1890 oraz wartości pomierzone S i G w roku 2004 nie wprowadzają istotnych zmian (rys. 3b, 3c) do zaobserwowanej wcześniej na materiale lat 1891–2003 (5-7, 11, 13) sekularnej tendencji spadkowej analizowanych wskaźników warunków solarnych – słabej dla S (rys. 3a) i mocniejszej, istotnej statystycznie dla G . Dotyczy to także rozkładu sezonowego sum G , m.in. utrzymywania się słabego, na poziomie wciąż nieistotnym ($R^2 = 0,01$) trendu wzrostowego stosunku sum półrocza letniego (IV–IX) do sum rocznych G (rys. 3d). Szerzej tematykę tę poruszono we wcześniejszych opracowaniach (3, 7). Dodatkowe 17 lat danych wrocławskich pozwala jednak na wydłużenie okresu porównawczego (rys. 3a), a tym samym na szerszą interpretację klimatycznych warunkowań sekularnego trendu spadkowego S (lub G) i towarzyszącego mu wzrostu zachmurzenia obserwowanego nie tylko w Krakowie (29, 31, 32), Warszawie (34), Puławach (19), ale również w innych stacjach europejskich (9, 33, 39).



Rys. 3. Przebiegi i trendy liniowe: a) sum rocznych usłonecznienia rzeczywistego (S) w Krakowie (Kra) i Wrocławiu-Biskupinie (W-w) w latach 1884–1965; b) sum rocznych usłonecznienia rzeczywistego we Wrocławiu-Swojcu w latach 1875–2004 (okresy dla liniowych trendów cząstkowych: 1875–1912, 1912–1929, 1929–1984, 1984–2004); c) sum rocznych (G I–XII) oraz sum półroczja letniego (G IV–IX) promieniowania słonecznego całkowitego we Wrocławiu-Swojcu w latach 1875–2004 oraz d) przebieg i trend liniowy stosunku L/R (%) sum półrocznych IV–IX promieniowania słonecznego całkowitego (L) do jego sum rocznych (R) we Wrocławiu-Swojcu w latach 1875–2004

The courses and the linear trends of: a) annual sunshine duration sums (S) in Kraków (Kra) and Wrocław-Biskupin (W-w) in the years 1884–1965; b) annual sunshine duration sums in Wrocław-Swojec in the 1875–2004 years (the periods for the partial linear trends: 1875–1912, 1912–1929, 1929–1984, 1984–2004); c) annual (G I–XII) and warm half-year (G IV–IX) sums of global radiation in Wrocław-Swojec in the 1875–2004 years and d) the course and the linear trend of percentage relation L/R (%) of warm half-year IV–IX sums of global radiation (L) to its annual sums (R) in Wrocław-Swojec in the 1875–2004 years

W zachodniej Europie, na co wskazują dane holenderskie S z Groningen (1906–2003) tendencje te nieco różnią się długością okresów oraz strukturą sezonową, ale w ogólnych zarysach, zwłaszcza w odniesieniu do sum rocznych, są najprawdopodobniej podobne. Analiza ogólnie dostępnych danych internetowych z zasobów KNMI (<http://www.knmi.nl/voortl/kd/lijsten/daggem/etmgeg.cgi>) wykazuje, że w Groningen trend ujemny jest cechą wielolecia 1906–1993, a na poziomie istotnym ($\alpha = 0,05$) lat 1914–2001, przy czym szczególnie mocny jest w latach 1920–1988 ($R^2 = 0,22$). Rosnący trend cząstkowy S lat ostatnich, tak jak we Wrocławiu związany jest tam z przełomowym rokiem 1984. Dwa wybitnie skrajne lata: 1912 ($S = 789,8$ h) i 2003 ($S = 1976,2$ h) powodują, że w wieloleciu 1906–2003 trend liniowy w Groningen jest słabo, nieistotnie statystycznie ($R^2 = 0,01$) rosnący. Kontrast lat 1912 i 2003 obserwuje się także we Wrocławiu-Swojcu (odpowiednio: 1096,7 i 1951,8 h), ale tendencja spadkowa nie ulega zmianie, zatem decydujące są tu różnice S związane z rokiem 1912, a zwłaszcza jego okresem letnim. Być może, obok zmian klimatycznych wpływ na te różnice miał bardzo silny, sięgający wysoko w stratosferę, wybuch (6 VEI wg skali Smithsonian Institution) wulkanu Katmai w czerwcu 1912 roku na Alasce (36). Porównując trendy S z lat 1971–2000 w Polsce i Groningen Degirmendżić (8) zauważa, że na zachodzie Europy trwale wydają się dodatnie trendy usłonecznienia w okresie zimowym, które także występują w tym okresie we Wrocławiu i Szczecinie, podczas gdy na wschodzie Polski dominują trendy ujemne. Charakterystyczne, że wspomniane sezonowe różnice regionalne, odzwierciedlające wieloletnią specyfikę fluktuacji oceanizmu (lub kontynentalizmu) klimatycznego danego regionu, w tendencjach sum rocznych S są niwelowane i trendy tych sum dla wymienionego 30-lecia są podobne (trendy dodatnie).

Trendy te osiągają najwyższą wartość prawdopodobnie na tych obszarach Polski i Europy, w których tzw. przejściowość* klimatu jest największa. Podobnie powinno być z trendami cząstkowymi innych okresów i z trendami sekularnymi – ich najwyższe wartości, świadczące o wielkości kąta kierunkowego zmian (dodatnich lub ujemnych) powinny występować również na obszarach o największym stopniu przejściowości klimatu, czyli w centralnej Europie i nad południową Skandynawią, a najmniejsze na ich peryferiach (zachodnia Europa, Rosja). Nie przeczą temu wyniki przeprowadzonych przez Henderson-Sellers (20) oraz Sun i Groismana (38) analiz zmian zachmurzenia w XX wieku, które dokumentują niewielki spadek zachmurzenia (w różnych okresach analitycznych) w różnych częściach świata.

Na podstawie badań Sun i Groismana (38) oraz sugerowanego w III Raplocie IPCC wzrostu zachmurzenia nad Europą w II połowie minionego wieku Wibig

* Pojęcie przejściowości klimatu skojarzone jest tu przede wszystkim ze szczególną „wrażliwością” niektórych obszarów Europy na fluktuacje i trwalsze zmiany klimatyczne, co objawia się wysoką dynamiką krótko- i długookresowych wahań proporcji pomiędzy cechami oceanicznymi a kontynentalnymi klimatu. Takie ujęcie kwestii przejściowości klimatu ziem polskich łączy spostrzeżenie Kozuchowskiego (23), iż „pewną geograficzną osobliwością Polski lub szerzej – zlewiska Bałtyku – jest wybitna czułość na oddziaływania cyrkulacyjne” z poglądem Brysona (2), że „obszary klimatu przejściowego są dobrym poligonem badawczym zmian klimatycznych”.

(40) wyciąga wnioski o lokalnych uwarunkowaniach jako czynnika decydującym o zmianach zachmurzenia w Łodzi w latach 1931–2000, gdzie średnie roczne wartości zachmurzenia wykazują dla tego okresu trend wzrostowy. Powołuje się tu na spadek zachmurzenia w ostatniej dekadzie lat XX wieku, którego przyczynę dostrzega w reorganizacji uprzemysłowienia tego miasta. Zdaniem autorów tej pracy, którzy nie kwestionują pewnego wpływu zmian lokalnych, wspomniane długookresowe zmiany świadczą jednak przede wszystkim o determinowanych przez makroskalowe uwarunkowania klimatyczne sekularnych tendencjach wzrostu zachmurzenia w Polsce i Europie środkowej oraz odpowiadających im długookresowych tendencjach spadku sum S.

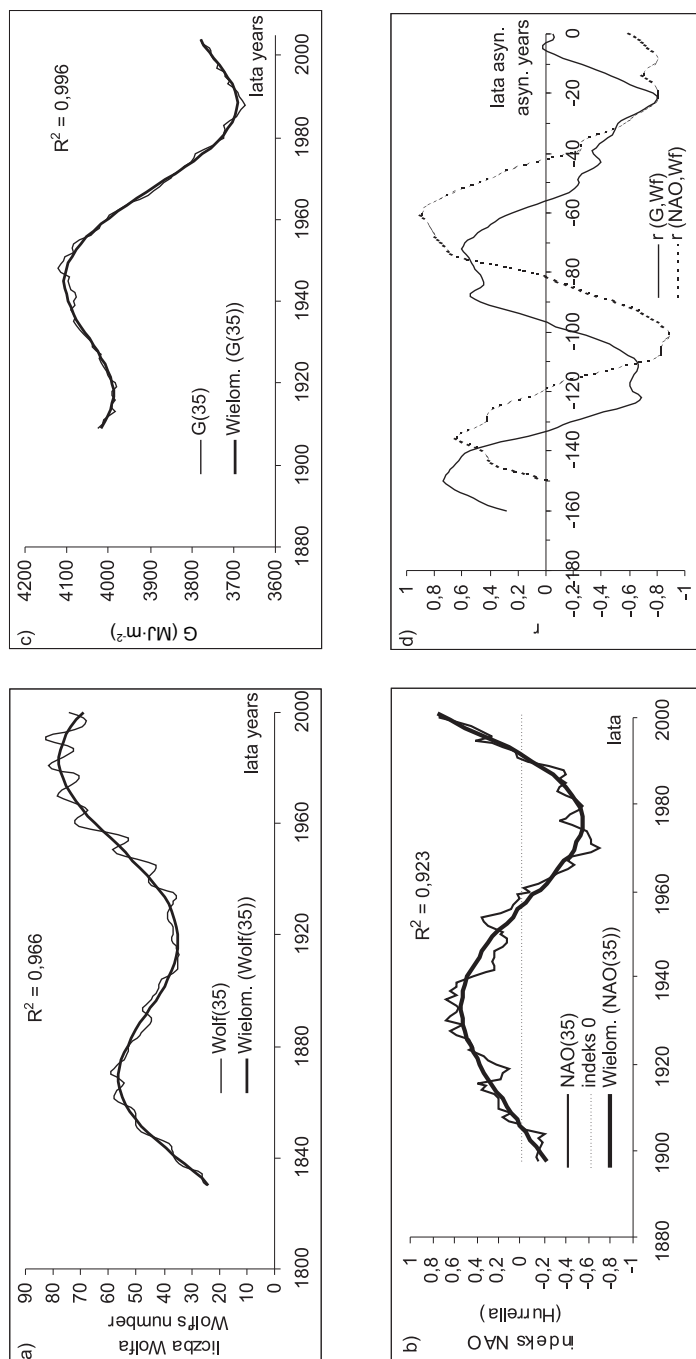
Powszechność zjawiska tych samych trendów sekularnych w Europie centralnej, bez względu na to czy mamy do czynienia z danymi ze stacji miejskich, pozamiejskich czy górskich (9, 10, 12, 21, 24, 25) oraz jego długotrwałość wskazuje bez wątplenia na makroskalowe, długookresowe zmiany klimatyczne jako jego zasadniczą przyczynę. Quasi-sinusoidalny charakter długookresowych zmian S i G, pozwalający wyróżnić krótsze, cząstkowe trendy wzrostu i spadku, jak wykazuje porównanie danych Wrocławia i Krakowa czy wymienionych wcześniej stolic europejskich, może różnić się zarówno amplitudą wahań, jak i co ważniejsze pewnym przesunięciem czasowym tych samych tendencji cząstkowych. To tłumaczy, notowane przez badaczy łódzkich (8, 35, 41), jednoczesne występowanie tendencji wzrostowych i spadkowych wśród badanych trendów usłonecznienia lub zachmurzenia w II połowie XX wieku w Polsce. Dodatkowym wyjaśnieniem jest często występujące zróżnicowanie co do początku i zakresu czasowego (od ok. 30–50-letniego) poddane go analizie tendencji w tym półwieczu. Jak zauważa wielu autorów, zachmurzenie i sprzężone z nim usłonecznienie są elementami klimatu kształtowanymi głównie przez ogólne procesy cyrkulacyjne, związane bezpośrednio z interakcjami ocean-atmosfera-kriosfera-ład. Konsekwencją powinna być nie tylko, widoczna w Polsce (8, 22, 37) i poza nią (9, 38, 39), ich makroskalowa zmienność przestrzenna, ale i syn- oraz asynchroniczne relacje (telekoneksje) z obszarem źródłowym tych procesów. Nie ulega wątpliwości, że pochodną, związanych głównie z obszarem Północnego Atlantyku (27, 28), długookresowych zmian makrocyrkulacyjnych są zarówno kilkudziesięcioletnie spadki usłonecznienia (1952–1991) i wzrost zachmurzenia (1947–1996) w Lublinie (16, 17) lub stacjach nadmorskich (30) czy północnej Polski (26), jak i 50-letnie (1951–2000) tendencje przeciwne obserwowane w Łodzi (35, 41), Krakowie (29) i na materiale z lat 1952–2001 w innych stacjach polskich (22). Przeciwność tych trendów cząstkowych jest więc pozorne, gdyż w ostatnich 2 dekadach lat tendencje te w całej Polsce przyjmują jednakowy charakter i różni je tylko czas zapoczątkowania oraz amplituda i fluktuacje zmian. O takim stanie rzeczy decydują zmiany klimatyczne (obserwowane m.in. jako przejście z fazy negatywnej do pozytywnej NAO) na przełomie lat 60. i 70. ubiegłego wieku, które widoczne są też we Wrocławiu w postaci wspomnianego wcześniej 18-letniego okresu przejściowego S (1966–1984) i zainicjowania pomiędzy latami 1974–1984 trwającego

wciąż, a silnego od roku 1985, trendu wzrostowego S i G. Wskazują one jednocześnie na fakt, że trendy S i G lat ostatnich są jedynie epizodem dłuższych i o przeciwnym charakterze zmian sekularnych. Te ostatnie wiążą swój początek ze schyłkiem tzw. małej epoki lodowej. Skojarzone z długookresowymi sekularnymi zmianami termicznymi, a szczególnie z silnym trendem wzrostowym temperatury powietrza w okresie zimowym, świadczą o wzrastającej roli adwekcji ciepła pochodzenia oceanicznego i zwrotnikowego (istotnego dla kształtowania termiki w okresie letnim) w bilansie cieplnym Polski i Europy środkowej.

TELEKONEKSJE PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO CAŁKOWITEGO Z NAO I AKTYWNOŚCIĄ SŁONECZNĄ (LICZBY WOLFA)

Na silne deterministyczne powiązania reżimu termicznego Atlantyku Północnego w okresie letnim z cyrkulacją w sezonie zimowym w Polsce i środkowej Europie zwraca uwagę Marsz (27). Okresowo mocne, synchroniczne i quasi-synchroniczne związki promieniowania całkowitego we Wrocławiu z różnymi wskaźnikami i fazami NAO przedstawiają autorzy we wcześniejszych pracach (4, 7). Przedmiotem ich zainteresowania były także korelacje asynchroniczne sum rocznych G z liczbami Wolfa (5). W pracach tych przewija się przekonanie o opóźnionych, telekonekcyjnych związkach G i innych elementów meteorologicznych z różnymi wskaźnikami długookresowych zmian klimatycznych i aktywności słonecznej. Decydują o tym, m.in. duża bezwładność termiczna oceanów, okresowe zmiany w rozkładzie prądów morskich oraz stowarzyszone z nimi zjawiska upwellingu i downwellingu (1), jak też złożone relacje oceanu i atmosfery z „magazynującą” dawne efekty opadowe i termiczne kriosferą (którą cechuje autonomiczny dynamizm, np. zjawiska searchingu lodowcowego). Kształtują one również, podbudowane dotychczasowymi analizami, przeświadczenie o znacznym stopniu determinizmu tych skomplikowanych, interakcyjnych zależności.

Przebiegi 35-letnich średnich konsekwentnych dla sum rocznych lub średnich rocznych wartości podstawowych wskaźników klimatycznego „odzewu” na bodziec solarny (liczba Wolfa, indeks zimowy NAO Hurrella, promieniowanie słoneczne całkowite we Wrocławiu-Swojcu), wygładzone wielomianem 6 stopnia, mają wyraźny charakter quasi-sinusoidalny (rys. 4a, 4b, 4c), lecz różnią się tendencjami. Liczby Wolfa (dane od roku 1801) świadczą o wzrastającym falowo trendzie wielomianowym (składającym się z cząstkowych trendów liniowych – wznoszących się do przegięcia grzbietu fali, a następnie opadających) aktywności słonecznej. Punkty zmian kierunkowych tego falowego biegu, istotne dla wydzielenia trendów cząstkowych, lokują się w latach 1866, 1918, 1982. W XIX stuleciu cechują zatem 88-letni cykl wiekowy o stromym okresie wzrostu liczącym tylko 36 lat, po którym następuje łagodniejszy 52 letni okres spadkowy. W XX wieku pojawia się dłuższy, bo aż 64-letni trend wzrostowy liczb Wolfa (mniej stromy niż w cyklu poprzedzającym), po którym być może wystąpi także dłuższy cząstkowy trend spadkowy. Wahania



Rys. 4. Przebiegi średnich rocznych wartości podstawowych wskaźników klimatycznego „odzewu” na bodziec solarny: a) liczba Wolfa, b) indeks zimowy NAO Hurrella, c) promieniowanie słoneczne całkowite we Wrocławiu-Swojcu wygładzone przy pomocy 35-letniej średniej ruchomej oraz wielomianu 6 stopnia (R^2 – współczynnik determinacji) oraz d) przebiegi asynchronicznych współczynników korelacji (r) liczb Wolfa (Wf) z promieniowaniem słonecznym całkowitym we Wrocławiu-Swojcu (G) oraz z indeksem zimowym NAO Hurrella (NAO)

The courses of average annual values of the basic indexes of climatic 'response' on the solar stimulant: a) Wolf's number, b) winter Hurrell's index NAO, c) global radiation in Wrocław-Swojec smoothed by means of the 35-year consecutive average values and the 6th order polynomial (Wielom.) (R^2 – determination coefficient) and d) the courses of asynchronous correlation coefficients (r) the Wolf's number (Wf) with global radiation in Wrocław-Swojec (G) and with winter Hurrell's index NAO (NAO)

wskaźnika zimowego NAO Hurrella w badanym 140-leciu (dane od 1864) cechuje również długookresowa falowa zmienność, ale wokół poziomu 0, co wynika z istoty tego parametru (standaryzowany wskaźnik odchylenia od wieloletnich średnich). Dwa pewne punkty przegięcia występują w latach 1933 i 1976, czyli wskazują jedynie na 43-letni okres spadkowy, który być może (przemawia za tym 7-letni ciąg podobnych wartości indeksu na poziomie ok. -0,2 w pobliżu 1900 roku, co może być sygnałem lokalizacji kolejnego miejsca przegięcia fali) jest poprzedzony tylko ok. 32–35-letnim okresem wzrostu. W takiej sytuacji długość fali cyklu wiekowego wynosiłaby ok. 75–78 lat i byłaby o 10–13 lat krótsza od 88-letniego cyklu wiekowego NAO wyznaczonego miejscami przecięcia jej quasi-sinusoidy z poziomem 0. Jeśli uznamy, że pomiędzy liczbami Wolfa a wskaźnikiem NAO Hurrella istnieje zależność odwrotnie proporcjonalna opóźniona o 15 lat w kulminacji fali NAO, a ok. 32–35 lat w tak wyznaczonej jej części początkowej oraz 6 lat w jej części końcowej, to okaże się, że stosunek długości kolejnych stron fali sekularnego cyklu liczb Wolfa do odpowiadających im stron fali cyklu NAO wynosi 1,49. Czy jest to zależność przypadkowa, czy też oddaje w sposób geometryczny rzeczywiste relacje fizyczne, będące efektem nierozpoznanego jeszcze mechanizmu transformacji aktywności słonecznej w długookresową dynamikę układów barycznych Północnego Atlantyku? Wszakże dynamika ta jest jedną z podstawowych cech hemisferycznego układu klimatycznego, który poprzez oddziaływania cyrkulacyjne jest bezpośrednio odpowiedzialny za klimat Europy i jego zmiany. Kontynuując rozważania hipotetyczne można sądzić, że skracanie cyklu wyjściowego jest w pewnej mierze efektem jego skrótu rotacyjnego (którego można się dopatrzeć porównując bieg fali z rys. 4b w stosunku do biegu fali z rys. 4a), dostosowawczego (pod względem geometrycznym) do cyklu NAO oraz przede wszystkim skomplikowanych relacji helio- i geofizycznych, na razie słabo rozpoznanych. Można także zasadnie postawić hipotezę, że skracanie opóźnienia w trakcie ok. 75–78-letniej fali cyklu wiekowego NAO w stosunku do przebiegu liczb Wolfa jest wskaźnikiem sposobu i tempa dostosowywania się układu klimatycznego do kolejnego sekularnego cyklu aktywności słonecznej. Dostrzec można tu ciąg rozwojowy, od wstępnego etapu jego przebudowy (opóźnienie maksymalne – ok. 33–35-letnie) poprzez etap szybkiego dostosowywania się w fazie wzrostowej NAO (opóźnienie 15-letnie w kulminacji) do wolniejszego w fazie spadkowej, która kończy się opóźnieniem 6-letnim.

Sumy G znamionuje silny sekularny trend spadkowy, na który składa się 72-letni cykl oznaczony przez lata 1916, 1945 (kulminacja cyklu) i 1988 (rys. 4c). Część wzrostowa cyklu ma tu tylko 29 lat, a opadająca 43 lata, czyli ten cykl wiekowy jest krótszy od odpowiedniego cyklu NAO prawdopodobnie o około 6 lat po jego stronie wzrostowej. Przy tych założeniach cykl dla G jest opóźniony o 12 lat w stosunku do cyklu NAO, począwszy od jego kulminacji do początku nowego cyklu. Z początkiem kolejnego cyklu wiąże się prawdopodobnie przejściowe zwiększenie opóźnienia o kilka lat potrzebnych do dostosowania się układu klimatycznego do stanu nowej równowagi w stosunku do wiekowych zmian bodźca solarnego.

Za taką hipotezą przemawiają jednakże tylko niektóre korelacje asynchroniczne 35-letnich konsekwentnych sum G oraz wartości zimowego wskaźnika NAO Hurrella z odpowiednimi sumami liczb Wolfa (rys. 3d). Na wykresie tych zależności korelacyjnych oś pozioma przedstawia lata opóźnienia (tzw. lata asynchroniczne) w stosunku do liczb Wolfa, a oś pionowa wartość współczynnika korelacji (r). Zwraca uwagę opóźnienie 7–9-letnie i 18–23-letnie przy silnych odwrotnych związkach korelacyjnych NAO z liczbą Wolfa ($r =$ od $-0,79$ do $-0,8$). Dla porównania, r dla korelacji synchronicznych wynosi w tym przypadku $-0,60$. Jeszcze silniejsze korelacje asynchroniczne, ale o znaku przeciwnym ($r > 0,87$), pojawiają się dopiero przy opóźnieniu 58–62 lat ($\max r = 0,90$ dla -60 lat), a relatywnie wysokie ich wartości ($r > 0,64$) występują przy opóźnieniu 53–75 lat. Wskazywałoby to na konieczność reinterpretacji przedstawionego wcześniej schematu relacji NAO do liczb Wolfa. W nowym ujęciu występuje współhistnienie i nakładanie się co najmniej 2 zależności wiekowych – o mniejszym i większym opóźnieniu. Sytuacja przypomina tu wzbudzenie i interferencję fali, z efektami jej potęgowania i wygaszania w czasie. Kulminacje tej fali występują przy opóźnieniach -20 , -60 , -101 ($r = -0,89$), -136 ($r = 0,65$) lat. Zatem obok odwrotnie proporcjonalnej występuje tu jeszcze istotniejsza zależność wprost proporcjonalna, ale opóźniona o ok. 60 lat, czyli punkt przegięcia fali wiekowego cyklu NAO z roku 1933 odpowiadałby odpowiedniej kulminacji liczb Wolfa w roku 1866 (opóźnienie 67 lat), a punkt przejścia do nowego cyklu wiekowego NAO z roku 1976 podobnemu punktowi z roku 1918 (opóźnienie 58-letnie). Z kolei prawdopodobny punkt zmiany kierunkowej NAO z lat 1898–1902 odpowiadałby zmianie wiekowej roku 1830 dla liczb Wolfa (opóźnienie ok. 68–72 lat). Przy takiej interpretacji wspomniane wcześniej procesy dostosowawcze do stanu nowej równowagi klimatycznej, widoczne w wiekowych zmianach NAO, przebiegałyby w ciągu ok. 75–78 lat cyklu, najszybciej w jego fazie opadającej (zmniejszenie opóźnienia o 9 lat), skracając początkowe opóźnienie o ok. 10–14 lat. Zmiana znaku zależności korelacyjnej NAO i liczb Wolfa (z $-$ na $+$ lub odwrotnie) pojawia się przy opóźnieniu o 42–43 lata, a następnie przy 82–83 oraz 120 i 150 latach (rys. 4d). Sytuacje te odpowiadają osłabieniu fali przy przenikaniu się w układzie klimatycznym co najmniej 2 fal czasowych będących „nośnikiem” sygnału radiacyjnego, prawdopodobnie fali synchronicznej (w skali klimatycznej, tj. sezonu, roku) z falą asynchroniczną (o opóźnieniu wieloletnim) lub fal o różnym opóźnieniu wieloletnim w stosunku do zmian aktywności słonecznej. Opóźnienia -42 i -120 lat rozpoczynają i kończą pełny cykl fali, który jest zgodny z długością przyjętego do analizy cyklu wiekowego NAO, wynoszącego ok. 78 lat.

Nieco odmienny charakter mają zależności sekularne G i liczb Wolfa. Najsilniejsze związki pojawiają się już po ok. -20 do -23 latach, a następne wiekowe kulminacje są już słabsze ($r = 0,60$ przy -72 , $r = -0,67$ przy -111 – -112 oraz $r = -0,73$ przy 149 – 150 latach opóźnienia). Znamienne jest także rozciągnięcie pierwszego cyklu tych zmian do ok. 90 lat, co w przybliżeniu odpowiada 88-letniej długości cyklu wiekowego liczb Wolfa. Zatem w przypadku G „bufor klimatyczny” zachowuje

tu wiekowy cykl aktywności słonecznej. Warto podkreślić także zgodność długości tego cyklu z 90-letnią sinusoidą Emmricha (15), która odpowiada sekularnemu cyklowi klimatycznemu na półkuli północnej.

Kulminację ($r = -0,80$) ok. -21 – -22-letniego opóźnienia G w stosunku do liczb Wolfa, tożsamą czasowo z podobną co do wartości kulminacją NAO, można łączyć z wyróżnionym wcześniej etapem szybkiego procesu dostosowawczego NAO do zmian wiekowych bodźca solarnego. Występuje ona na początku ok. 12–14-letniego okresu synchronicznej zgodności NAO i G (przy ich opóźnieniu od -20 do -33 lat w odniesieniu do liczb Wolfa). Wyraźnie zarysowuje się też opóźnienie 12–15-letnie pomiędzy NAO a G, na wykresie widoczne jako przesunięcie jednej krzywej korelacyjnej w stosunku do drugiej, które pojawia się po około 40 latach opóźnienia wskaźnika zimowego NAO Hurrella w stosunku do liczb Wolfa.

Obraz tych zależności i ich uwarunkowań nie jest więc jeszcze w pełni klarowny. Pozwala jednak na wyciągnięcie wniosku, że czynnik cyrkulacyjny, odpowiedzialny za warunki solarne Wrocławia i innych miejscowości jest nośnikiem przenikających się wzajemnie składowych: 1) aktualnej, czyli synchronicznej, z parametrami takimi jak zachmurzenie, usłonecznienie S i promieniowanie słoneczne całkowite G oraz 2) asynchronicznej, odpowiedzialnej za zmiany długookresowe, a zwłaszcza zmienność wiekową tych parametrów, która ma charakter quasi-sinusoidalnych zmian cyklicznych. Decyduje o tym opóźniona reakcja systemu klimatycznego na oddziaływanie sekularnych cykli aktywności słonecznej.

PODSUMOWANIE

Odtworzone i przeanalizowane w pracy wieloletnie serie sum miesięcznych usłonecznienia S i promieniowania całkowitego G we Wrocławiu należą, obok zrekonstruowanej przez Morawską (31, 32) krakowskiej serii S, do najdłuższych w Europie i na świecie ciągów charakteryzujących warunki solarne. Rekonstrukcja krakowska, w części dotyczącej usłonecznienia przed czerwcem 1883 roku, oparta jest jedynie na danych z zachmurzenia, co jest powszechnie stosowaną metodą, ale, jak wykazują to autorzy na danych wrocławskich, daleką od doskonałości.

W opracowaniu zwrócono uwagę na ważną rolę temperatury i wilgotności względnej powietrza we wzorach regresji do obliczania usłonecznienia na podstawie danych z zachmurzenia. Zrekonstruowane, częściowo z wykorzystaniem tych wzorów, 130-letnie (1875–2004) przebiegi S i G we Wrocławiu-Swojcu pozwoliły uznać, że cechujące XX wiek liniowe trendy spadkowe mają swoje, co najmniej 30-letnie, przedłużenie. Przeprowadzone porównania z innymi stacjami Polski i Europy środkowej dały podstawę do uznania tych trendów oraz podporządkowanych im tendencji krótkookresowych o zmiennym ukierunkowaniu za istotne znamiona makroskalowych zmian klimatycznych o charakterze wiekowym.

Spadkowe trendy analizowanych elementów meteorologicznych mają charakter quasi-sinusoidalny i wiążą swój początek ze schyłkiem tzw. małej epoki lodowej. Skojarzone z długookresowymi sekularnymi zmianami termicznymi, a szczególnie z silnym trendem wzrostowym temperatury powietrza w okresie zimowym, świadczą o wzrastającej roli adwekcji ciepła pochodzenia oceanicznego i zwrotnikowego w bilansie cieplnym Polski i Europy środkowej. Obszary te charakteryzuje największa w Europie „wrażliwość” na dokonujące się zmiany, gdyż położone są w strefie klimatu przejściowego, czyli największej dynamiki zmian pomiędzy cechami oceanicznymi a kontynentalnymi. Ta zmienność i będące jej odzwierciedleniem zróżnicowanie czasowe i przestrzenne warunków solarnych dały asumpt do dyskusji problemu telekoneksji i opóźnienia reakcji systemu klimatycznego na wyjściowy bodziec solarny. Stwierdzono, że w przypadku promieniowania całkowitego we Wrocławiu „bufor klimatyczny” zachowuje wiekowy cykl aktywności słonecznej. Występuje tu także zgodność długości tego cyklu z 90-letnią sinusoidą Emmricha, która odpowiada sekularnemu cyklowi klimatycznemu na półkuli północnej.

Wraz z klimatyczną interpretacją rysujących się trendów i wyników analizy widmowej (7) przeprowadzone badania warunków solarnych Wrocławia i jego odniesień długookresowych i przestrzennych rozszerzają zakres poznawczy, nie tylko zmienności lokalnej, rozważanych elementów meteorologicznych. Umożliwiają także spojrzenie od strony wieloletnich zmian radiacyjnych na dokonujące się od schyłku tzw. małej epoki lodowej zmiany klimatyczne w Europie centralnej. Ma to istotne znaczenie dla tworzenia doskonalszych modeli klimatycznych, a tym samym dla konstrukcji bardziej wiarygodnych od dotychczasowych długoterminowych prognoz agrometeorologicznych dla Polski.

Trzeba jednak mieć na uwadze, że poruszona problematyka jest niezwykle złożona, a szereg kluczowych zagadnień dotyczących transformacji impulsu solarnego w systemie klimatycznym jest dotąd nierozpoznanych. Nadal nie jest rozstrzygnięty spór dotyczący wpływu antropopresji oraz aktywności wulkanicznej na zmiany klimatyczne i wciąż zbyt mało wiemy o „buforującej” roli czynnika biologicznego. Wiedza o stosunkach aktywności słonecznej łączy się tu nierozdzielnie z postępami wiedzy przyrodniczej. Jej poszerzanie wymaga zatem kontynuacji, w tym i pokrewnym zakresie, szeroko pojętych badań klimatologicznych, a szczególnie dalszych badań specjalistycznych (helio- i geofizycznych, paleogeograficznych, geologicznych, biologicznych i in.) oraz różnych przedsięwzięć interdyscyplinarnych.

LITERATURA

1. Barry R.G., Carleton A.M.: Synoptic and dynamic climatology. Routledge, London, New York, 2001.
2. Bryson R.: A Perspective on Climate Change. *Science*, 1974, **184(4138)**: 753-760.
3. Bryś K., Bryś T.: Wahania natężenia całkowitego promieniowania słonecznego w 55-letniej serii wrocławskiej (1946-2000). *Uniw. Warszawski, Wydz. Geogr. i St. Region., Pr. i St. Geogr.*, 2001, **29**: 161-171.

4. Bryś K., Bryś T.: Wpływ wahań NAO na zmienność warunków wilgotnościowych, radiacyjnych, dynamicznych i ewaporacyjnych we Wrocławiu-Swojcu w latach 1946-2000. W: *Oscylacja Północnego Atlantyku i jej rola w kształtowaniu zmienności warunków klimatycznych i hydrologicznych Polski*. Akad. Morska, Gdynia, 2002, 147-160.
5. Bryś K., Bryś T.: Fluctuations of global solar radiation in the 1901-2000 years at Wrocław and their relations to Wolf's number and circulation changes. W: *Man and climate in the 20th century*. Acta Univ. Wratisl. 2542, St. Geogr., 2003, **75**: 189-202.
6. Bryś K., Bryś T.: Dynamika wieloletnich zmian parowania wskaźnikowego oraz klimatycznych bilansów wodnych we Wrocławiu i jej uwarunkowania. W: *Bilanse wodne ekosystemów rolniczych*. Monogr. pod red. M. Rojka, Wyd. AR Wrocław, 2004, 145-160.
7. Bryś K., Bryś T.: Zmienność klimatu solarnego Wrocławia w latach 1891-2003. W: *Zintegrowany monitoring środowiska przyrodniczego. Funkcjonowanie geosystemów Polski w warunkach zmian klimatu i różnokierunkowej antropopresji*. Pod red. A. Kostrzewskiego i R. Kolandera, UAM Poznań, Gł. Insp. Ochr. Środ., 2005, 399-408.
8. Degirmendžić J.: Zmiany usłonecznienia w Polsce i ich uwarunkowania cyrkulacyjne. W: *Skala, uwarunkowania i perspektywy współczesnych zmian klimatycznych w Polsce*. Pod red. K. Kożuchowskiego. Zakł. Dynamiki Środ. i Bioklimat. UŁ, Łódź, 2004, 9-23.
9. Dobesch H.: On the variations of sunshine duration in Austria. *Theor. Appl. Climatology*, 1992, **46**: 33-38.
10. Dubicka M.: Zmienność zachmurzenia w Karkonoszach w ostatnim stuleciu. W: *Zmiany i zmienność klimatu Polski*. Ogólnopol. Konf. Nauk., Łódź, 4-6 XI 1999, 57-64.
11. Dubicka M., Karal J., Ropuszyński P.: Usłonecznienie we Wrocławiu w latach 1981-1992 na tle stuletniej serii obserwacyjnej. Acta Univ. Wratisl. 1705, Prace Inst. Geogr. Seria C, Meteor. i Klimat., 1995, **II**: 5-21.
12. Dubicka M., Limanówka D.: Zmienność zachmurzenia i usłonecznienia w Sudetach i Karpatach oraz na ich przedpolu. Acta Univ. Wratisl. 1590. Pr. Inst. Geogr. Seria C, Meteorologia i Klimatologia, 1994, **I**: 45-60.
13. Dubicka M., Pyka J.: Wybrane zagadnienia klimatu Wrocławia w XX wieku. *Uniw. Warszawski, Prace i Studia Geogr.*, 2001, **29**: 101-112.
14. Dziewulski W.: O przebiegu rocznym usłonecznienia w Krakowie, Zakopanem i Lwowie. Sprawozdanie Komisji Fizyograficznej PAU, 1917, **51**: 18-42.
15. Emmrich R.: 92 Jahre nordhemisphärischer Zonalindex. Eine Trendbetrachtung. *Met. Rundsch.*, 1991, **43**: 160-169.
16. Gluza A., Filipiuk K.: Usłonecznienie w Lublinie w latach 1952-1991. *Wiad. IMGW*, 1995, **1**: 91-101.
17. Gluza A., Kaszewski B.M.: Zachmurzenie ogólne nieba w Lublinie (1947-1996). Acta Univ. Nic. Copernici. Geografia XXXI – Nauki Mat.-Przyr., 2000, **106**: 129-140.
18. Gorczyński W.: O przebiegu rocznym i dziennym usłonecznienia w Krakowie. Sprawozdanie Tow. Nauk. Warszawskiego, 1910, **3**: 162-178.
19. Górski T., Górka K.: Usłonecznienie w Puławach w ciągu lat 1923-1992. Acta Univ. Nic. Copernici. Geografia XXXI – Nauki Mat.-Przyr., 2000, **106**: 141-156.
20. Henderson-Sellers A.: Continental cloudiness changes this century. *Geo J.*, 1992, **27**: 255-262.
21. Horecka V.: Trend of sunshine in Slovakia. W: *Climatic change in the historical and the instrumental periods*. Red. R. Brazdil, Masaryk Univ., Brno, 1990, 246-248.
22. Koźmiński Cz., Michalska B.: Zmienność usłonecznienia rzeczywistego w Polsce. Acta Agroph., 2004, **3(2)**: 291-305.
23. Kożuchowski K.: Cyrkulacyjne czynniki klimatu Polski. *Czas. Geogr.*, 2003, **74(1-2)**: 93-105.
24. Limanówka D., Ustrnul Z.: Changes of sunshine in the altitude profile of the Polish Western Carpathians. *Zesz. Nauk. UJ*, 1993, **95**: 115-124.
25. Limanówka D., Ustrnul Z.: Zmienność zachmurzenia w profilu pionowym polskich Karpat. W: *Działalność naukowa profesora Władysława Gorczyńskiego i jej kontynuacja*. UMK, Toruń, 2001, 131-138.

26. Marciniak K., Wójcik G.: The variation of sunshine duration in the middle part of northern Poland during the period 1946-1989. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 1991, **396**: 109-115.
27. Marsz A.: O oceanicznych uwarunkowaniach cyrkulacyjnego i termicznego charakteru zimy w Polsce i środkowej Europie. Akademia Morska, Gdynia, 2005.
28. Marsz A., Styszyńska A.: Oscylacja Północnego Atlantyku a temperatura powietrza nad Polską. WSM, Gdynia, 2001.
29. Matuszko D.: Variability of cloudiness in Cracow during the 20th century. W: Man and climate in the 20th century. *Acta Univ. Wratisl. 2542, St. Geograf.*, 2003, **75**: 158-170.
30. Miętus M., Owczarek M.: Variability of mean annual amplitude of air temperature in relation to the mean cloudiness on the Polish coast since 1945. W: Climate variations in Europe. *Publ. of the Academy of Finland*, 1994, **3/94**: 128-137.
31. Morawska M.: Zachmurzenie i usłonecznienie Krakowa w latach 1859-1958. *Prace PIHM*, 1963, **81**: 2-46.
32. Morawska-Horawska M.: Tendencje zachmurzenia i usłonecznienia Krakowa w latach 1861-1990. W: *Działalność naukowa profesora Władysława Gorczyńskiego i jej kontynuacja*. UMK Toruń, 2002, 341-351.
33. Papež A.: Pokles slonečniho svitu vlivem znečišteni ovsduši v Praze na Karlove. *Meteorol. Zpravy*, 1973, **XXVI**: 136-140.
34. Podogrocki J.: Z badań usłonecznienia w Warszawie. W: *Działalność naukowa prof. Władysława Gorczyńskiego i jej kontynuacja*. UMK Toruń, 2002, 147-152.
35. Podstawczyńska A.: Variability of sunshine duration in Łódź in 1951-2000. W: Man and climate in the 20th century. *Acta Univ. Wratisl. 2542, St. Geogr.*, 2003, **75**: 282-291.
36. Schönwiese Ch.: *Klimat i człowiek*. Wyd. Pruszyński i S-ka, Warszawa, 1997.
37. Stenz E.: Zachmurzenie Polski. *Przegląd Meteorologiczny i Hydrograficzny*, 1952, 1-2.
38. Sun B., Groisman P. J.: Cloudiness variations over the former Soviet Union. *Int. J. Climatol.*, 2000, **20**: 1097-1111.
39. Weber G.R.: Spatial and temporal variation of sunshine in the Federal Republic of Germany. *Theor. Appl. Climatology*, 1990, **41**: 1-9.
40. Wibig J.: Cloudiness variability in Łódź between 1931 and 2000. W: Man and climate in the 20th century. *Acta Univ. Wratisl. 2542, St. Geogr.*, 2003, **75**: 292-303.
41. Wibig J.: Zachmurzenie w Łodzi w latach 1951-2000. W: 100 lat obserwacji meteorologicznych w Łodzi. *Łódz. Tow. Nauk., Acta Geogr. Lodz.*, 2005, **89**: 115-127.

THE VARIABILITY OF SOLAR CONDITIONS FOR THE WROCLAW CLIMATE IN THE YEARS 1875–2004

Summary

The changes of solar radiation influx onto the terrestrial surface are an important factor, which forms the climate's dynamics. It is important to study long-term global solar radiation fluctuations with the aim of creating climatic models that are more efficient. The finding of an answer for the question regarding a long-term regularity of radiation changes in the scale of not only a regional level and its reasons possess here the pivotal importance. The analytical possibilities are reduced by a lack of permanent, long measured series. The existing studies regarding the solar climate first use the series from many years' of sunshine duration and cloudiness. The series allows the possibility to reconstruct accurately by using the Black's formula, monthly, and annual global radiation sums from the duration of the sunshine. The paper presents an all-important role for the relative humidity and air temperature in regression formulas by calculating the sunshine duration on the basis of cloudiness data. The reconstructed 130-year (1875–2004) course of sunshine duration S and global radiation G in Wrocław – Swojec, obtained partly by means of formulas, gave the possibility to acknowledge that the linear

decrease trends of S and G, which is a characteristic for the XX century, also it possess a minimum 30-year continuation. The achieved comparisons with other meteorological stations in Poland and central Europe gave the basis to admit the trends and short-term tendencies, which possess various directions and are subordinated of them, as essential indicators of a macro-scale climatic changes and holds a secular character. The descending trends of the analysed parameters possess a quasi-sinusoidal character and join the end of the so-called "little ice age." The ones connected with long-term secular thermal changes, especially with the strong ascending trend of air temperatures in the winter period, testify to an increasing role of the heat advection of an oceanic and a tropical origin in heat balance of Poland and of central Europe. The areas are characterised by the biggest in Europe "sensitivity" on the occurred changes, because the areas are situated in the zone of an intermediate climate, i.e., the biggest dynamics of variations between oceanic and continental features. The variability and its temporal image along with spatial differences of solar climate, have given an occasion to discuss the problems of teleconnexion and delay of climatic system reaction on the solar stimulant. It has been stated, that in the instance of solar radiation in Wrocław, the "climatic buffer" remains the secular cycle of solar radiation. The harmony for the length the cycle with the 90-year Emmerich's sinusoid, which images the secular climatic cycle in the northern hemisphere has also been found here.

Praca wpłynęła do Redakcji 11 I 2006 r.