

**ZMIANY TEMPERATURY POWIETRZA I OPADÓW ATMOSFERYCZNYCH  
W POLSCE W OKRESIE XVI-XX WIEKU\***

*Rajmund Przybylak, Gabriel Wójcik*  
*Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu*  
*Instytut Geografii*  
*Jacek Majorowicz*  
*Northern Geothermal ltd*  
*Edmonton Kanada*

**Wstęp**

Wiedza na temat zmian klimatu w dziejach Ziemi, szczególnie w ostatnim tysiącleciu, jest niezwykle ważna. Po pierwsze, jest ona niezbędna do określenia zakresu naturalnej zmienności poszczególnych elementów klimatu. Najbardziej wiarygodnie zmiany te można wyznaczyć w okresie, w którym działalność człowieka w małym stopniu wpływała modyfikująco na klimat i z którego dostępne są liczne i dobrej jakości dane pośrednie (ang. *proxy data*) o klimacie. Warunki te najlepiej spełnia okres minionego tysiąclecia do ok. 1850 r., czyli do rozpoczęcia tzw. okresu przemysłowego. Po drugie, wiedza ta jest także konieczna do weryfikacji modeli klimatycznych oraz ustalenia czynników kształtujących klimat w tym czasie.

Aktualna nasza wiedza na temat zmian klimatu w Polsce w ostatnim tysiącleciu jest zróżnicowana. Jest ona najlepsza o okresie obserwacji instrumentalnych. W ostatniej dekadzie XX wieku włożono wiele wysiłku w celu uzyskania jednorodnych serii temperatury powietrza. W wyniku tych prac istnieje obecnie co najmniej 10 takich serii (Górski, Marciniak 1992; Miętus 1996, 1998; Głowicki 1997; Trepńska 1997; Lorenc 2000; Vizi i in. 2000/2001). Najcenniejsze z nich są najdłuższe serie z Warszawy (od 1779 r.) i z Krakowa (1792 r.). Duże skorelowanie temperatury powietrza na obszarze Polski pozwala na użycie dwóch ostatnich serii temperatury do charakterystyki warunków termicznych w całej Polsce.

Wiedza o zmianach klimatu w okresie przedinstrumentalnym w Polsce jest natomiast raczej ograniczona. Do 1999 r. dostępne były dwa podstawowe źródła danych pośrednich: historyczne i dendrometryczne. Źródła historyczne, najogólniej mówiąc, są całkiem dobre, zarówno pod względem jakości, jak też ilości. Więcej szczegółów na ten

---

\* Opracowanie wykonano w ramach realizacji projektu badawczego KBN nr 6 P04E 022 16

temat można znaleźć w opracowaniu Sadowskiego (1991). Do tej pory zostały jednak one w niewielkim tylko stopniu wykorzystane do rekonstrukcji pogody i klimatu w Polsce. W większości opracowań i artykułów (np. Semkiewicz 1922; Polackówna 1925; Maruszczak 1991; Sadowski 1991; Bokwa, Limanówka, Wibig 2001) warunki klimatyczne są omawiane w sposób ogólny, przeważnie na podstawie częstości występowania okresów roku (najczęściej zim i lat) charakteryzujących się ekstremalnymi warunkami pogodowymi. W ostatnich latach została podjęta próba rekonstrukcji warunków klimatycznych w sposób ilościowy, jednak tylko w krótkim okresie (Limanówka 2000). Brak jest wciąż kompleksowego wykorzystania wszystkich dostępnych źródeł historycznych do rekonstrukcji klimatu w całym, lub znacznej części, omawianym okresie.

W ostatniej dekadzie XX wieku nastąpił znaczny postęp w badaniach dendrochronologicznych. W tym okresie powstała znaczna liczba regionalnych dendrochronologii, która w przypadku np. sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) wyniosła 136 (Zielski i in. 2001) pokrywając całą Polskę. Ten sam zespół badawczy wyróżnił na obszarze Polski 9 regionów dendroklimatycznych (Wilczyński i in. 2001, rys. 11). Jednak, mimo dużej liczby danych dendrochronologicznych, były one – podobnie jak wspomniane wcześniej źródła historyczne – rzadko wykorzystywane do rekonstrukcji klimatu Polski. W zasadzie do tej pory jedynie Bednarz (1996) przedstawił taką rekonstrukcję z obszaru Parku Narodowego Babiej Góry. Pozostałe prace z tego zakresu zawierają ogólne, natury jakościowej, uwagi na temat klimatu różnych obszarów Polski oparte na korelacjach między indeksami rocznych przyrostów drzew a poszczególnymi elementami klimatycznymi (np. Bednarz 1984; Zielski 1997; Krawczyk, Krąpiec 1999; Wilczyński 1999; Wójcik i in. 1999, 2000).

Począwszy od 1999 r., tj. od momentu rozpoczęcia naszego projektu badawczego, w ramach którego powstała również niniejsza praca, do rekonstrukcji klimatu Polski zostały po raz pierwszy wykorzystane dane geotermiczne. Do tej pory zostały przygotowane 3 rekonstrukcje temperatury powierzchni gruntu: z Polski Południowo-Zachodniej (Wójcik i in. 1999), z Polski Północnej (Wójcik i in. 2000) oraz z obszaru całej Polski z wyłączeniem gór (Majorowicz i in. 2001).

Celem tego artykułu jest przedstawienie wstępnych wyników badań dotyczących rekonstrukcji klimatu Polski w czasie ostatnich 500 lat przy wykorzystaniu danych dendrochronologicznych oraz rekonstrukcji temperatury powierzchni gruntu na podstawie danych geotermicznych z zastosowaniem nowej, dotąd nie stosowanej, metody opracowanej przez Harrisa i Chapmana (1998).

Kwerenda źródeł historycznych nie została jeszcze ukończona, dlatego też wyniki tych badań przedstawimy w kolejnych naszych artykułach.

### Dane i metody

Do rekonstrukcji klimatu Polski na podstawie danych dendrochronologicznych użyto standaryzowanej chronologii sosny zwyczajnej z regionu kujawsko-pomorskiego od 1500 r., która została omówiona we wcześniejszych naszych pracach (Zielski 1997; Wójcik i in. 1999, 2000). Jak wynika z przeprowadzonych badań statystycznych, przyrost roczny pierścieni drzew zależy w największym stopniu od średniej miesięcznej temperatury w lutym i marcu oraz w nieco mniejszym stopniu od temperatury w styczniu i kwietniu. W odniesieniu tych miesięcy uzyskano statystycznie istotne korelacje dodatnie. Analogiczne korelacje, jednak znacznie słabsze, stwierdzono także między szerokością pierścieni drzew a opadami atmosferycznymi w czerwcu i lipcu na obszarach nizinnych (więcej szczegółów zawierają prace Zielskiego 1997 oraz Wójcika i in. 1999, 2000). Z podanych względów przedstawione w tym artykule rekonstrukcje dotyczą tylko średniej temperatury okresu styczeń-kwiecień. Natomiast rekonstrukcje warunków klimatycznych w oparte na indeksach, których zasady konstrukcji omówiono dalej, dostarczają także informacji o opadach pierwszej połowy lata (czerwiec-lipiec).

Procedury kalibracji i weryfikacji zostały przeprowadzone przy wykorzystaniu z jednej strony wspomnianej dendrochronologii sosny zwyczajnej i – z drugiej strony – danych instrumentalnych. Kalibrację przeprowadzono na podstawie danych z lat 1921-1970, a ich weryfikację wykonano na podstawie lat 1871-1920. Rekonstruowano temperaturę powietrza na podstawie serii danych z Bydgoszczy oraz serii średnich obszarowych obliczonych z 3 stacji: Warszawy, Bydgoszczy i Gdyni. Warunki klimatyczne danego roku wpływają na przyrost roczny sosny zarówno w tym samym roku, jak i w następnym, dlatego też w poszukiwaniach funkcji przejścia od danych dendrochronologicznych do danych klimatycznych wykorzystano istniejące między nimi relacje. Opisano je stosując regresję wielokrotną.

Następnym etapem badań było jednoczesne zrekonstruowanie warunków termicznych późnej zimy/wczesnej wiosny i opadów pierwszej połowy lata. W tym celu, na podstawie analizy warunków termicznych (średnia obszarowa temperatura powietrza) i opadowych (sumy opadów z Bydgoszczy) w wymienionych wyżej przedziałach czasu, zostało wyróżnionych 5 kategorii lat, które oznaczono indeksami od 1 do 5. W pierwszym etapie każdemu indywidualnemu rokowi przypisano odpowiednią liczbę punktów według następujących kryteriów:

1. Seria średniej obszarowej temperatury powietrza:

Kryterium	Liczba punktów	Charakterystyka sezonu
$x < m - 1 SD$	1	chłodny
$m - 1 SD < x < m + 1 SD$	2	normalny
$x > m + 1 SD$	3	ciepły

gdzie:  $x$  – średnia temperatura powietrza z okresu od stycznia do kwietnia w danym roku,  
 $m$  – średnia wieloletnia temperatura powietrza z okresu od stycznia do kwietnia,  
 1861-1991,  
 $SD$  – odchylenie standardowe średniej temperatury powietrza z okresu od stycznia do  
 kwietnia, 1861-1991.

2. Opady atmosferyczne w Bydgoszczy:

Kryterium	Liczba punktów	Charakterystyka sezonu
$y < m - 1 SD$	1	suchy
$m - 1 SD < y < m + 1 SD$	2	normalny
$y > m + 1 SD$	3	wilgotny

gdzie:  $y$  – średnia suma opadów z czerwca i lipca w danym roku,  
 $m$  – średnia wieloletnia suma opadów z czerwca i lipca, 1861-1991,  
 $SD$  – odchylenie standardowe sumy opadów z czerwca i lipca, 1861-1991.

W drugim etapie zsumowano punkty z każdego roku i na ich podstawie wyróżniono 5 kategorii lat:

1. od stycznia do kwietnia chłodno i czerwiec i lipiec suche,
2. a) od stycznia do kwietnia w normie i czerwiec i lipiec suche lub b) od stycznia do kwietnia chłodno i czerwiec i lipiec w normie,
3. a) od stycznia do kwietnia w normie i czerwiec i lipiec w normie lub b) od stycznia do kwietnia ciepło i czerwiec i lipiec suche lub c) od stycznia do kwietnia chłodno i czerwiec i lipiec wilgotne,
4. a) od stycznia do kwietnia ciepło i czerwiec i lipiec w normie lub b) od stycznia do kwietnia w normie i czerwiec i lipiec wilgotne,
5. od stycznia do kwietnia ciepło i czerwiec i lipiec wilgotne.

Otrzymaną w powyższy sposób serię indeksów z okresu 1861-1991 poddano procedurze kalibracji w odniesieniu do danych dendrochronologicznych oraz ich weryfikacji analogicznie jak serię temperatury powietrza. Wszystkie rekonstrukcje, jak również dane obserwacyjne, zostały przedstawione w postaci 11-letnich średnich ruchomych.

Rekonstrukcje temperatury powierzchni gruntu w funkcji czasu metodą geotermiczną mają ogólnie niską rozdzielczość czasową, która dodatkowo stopniowo maleje, im starszy okres bierzemy pod uwagę. Wynika to z dyfuzyjnego charakteru zaniku wraz z głębokością „sygnału temperaturowego” idącego od powierzchni Ziemi. W efekcie zrekonstruowana temperatura powierzchni gruntu, uzyskana za pomocą powszechnie stosowanej metody inwersji Shena i Becka (1991), jest uśredniana w coraz dłuższych odcinkach czasu, im dalej się cofamy. Z tego względu Harris i Chapman (1998) zaproponowali modyfikację tej metody, biorąc pod uwagę najbardziej realną możliwość zastosowania metody geotermicznej do ustalenia średniej temperatury powierzchni gruntu w przedziale czasu poprzedzającym dane

instrumentalne (metoda POM: *ang. preobservational mean temperature*). W przyjętym modelu zakłada się, że w okresie pomiarów instrumentalnych zrekonstruowana temperatura powierzchni gruntu jest taka sama jak temperatura powietrza zmierzona na standardowej stacji meteorologicznej. Natomiast dla okresu przed pierwszym pomiarem w serii pomiarowej temperatury powietrza szuka się takiej średniej wartości temperatury, która najlepiej przybliży przebieg anomalii temperatury skał wraz z głębokością wyznaczoną z wykonanych profili termicznych w otworach. Anomalie temperatury skał na różnych głębokościach uzyskane z zastosowaniem tego modelu są porównywane iteracyjnie (stosując metodę kolejnych przybliżeń, prowadzącą do uzyskania najmniejszych rozbieżności między modelowanym profilem temperatury a profilem zmierzonym) z jej anomaliami obliczonymi z pomiarów temperatury w otworach. W niniejszej pracy podjęto próbę określenia wartości temperatury powierzchni gruntu tuż przed pierwszym zapisem temperatury powietrza z obserwacji meteorologicznych (1779 AD) w homogenicznej serii warszawskiej.

W opracowaniu tym wybrano 13 ciągłych profili temperatury skał, które wykonano w otworach o ustalonym reżimie termicznym do głębokości kilkuset metrów (ten sam zbiór otworów uzgodniono w pracy Majorowicza i in. 2001) przy użyciu komercyjnych aparatów karotażowych. Powyższe dane z wyszczególnionych w poniższym zestawieniu otworów zostały nam udostępnione przez archiwum Państwowego Instytutu Geologicznego w Warszawie:

Nazwa otworu	$\varphi$	$\lambda$
1. Lubawka	50°41'47"N	16°01'17"E
2. Marianka	54°04'36"N	19°38'32"E
3. Narejki	53°07'10"N	23°50'50"E
4. Rajsk	52°50'40"N	23°08'52"E
5. Boguszyn	50°27'58"N	16°42'15"E
6. Łąka	50°00'00"N	18°30'00"E
7. Narol	50°23'06"N	23°15'51"E
8. Ptaszkowo	54°26'45"N	19°37'23"E
9. Grabowiec 2	50°52'54"N	23°36'05"E
10. Grabowiec 4	50°47'42"N	23°40'43"E
11. Dębowiec	49°49'30"N	18°46'23"E
12. Połczyn Zdrój	53°46'13"N	16°05'22"E
13. Unisław	50°42'03"N	16°16'09"E

Wybór tych otworów przeprowadzono na podstawie dostępnych danych archiwalnych posługując się następującymi kryteriami: 1) ustalony stan równowagi termicznej w całej badanej części otworu; 2) brak zaburzeń hydrogeologicznych w otworze i w strefie przyotworowej; 3) dobry standard jakości profilowania karotażowego temperatury w otworze.

Obliczono anomalie temperatury na różnej głębokości na wszystkich tych profilach terenowych. Anomalie te określono jako różnice między temperaturą zmierzoną w otworze a temperaturą wynikającą z wglębnego strumienia cieplnego, na który zmiany klimatyczne ostatnich kilkuset lat miały minimalny (bliski zeru) wpływ. Z obliczeń wynika, że poniżej głębokości 250 m zmiany są w granicach błędu pomiarowego lub poniżej.

### Wyniki i dyskusja

**Rekonstrukcje temperatury powietrza i opadów atmosferycznych uzyskane na podstawie danych dendrochronologicznych.** Z wyznaczonych związków statystycznych w okresie kalibracyjnym (1921-1970) między rocznymi szerokościami pierścieni drzew i temperaturą powietrza w Bydgoszczy i osobno uśrednioną temperaturą obszarową wynika, iż w obydwu przypadkach temperatura tłumaczy nieznacznie więcej, niż 40% zmienności przyrostu rocznego sosny z danego roku ( $t$ ) i z roku następnego ( $t + 1$ ). Jest to o przeszło 20% więcej niż uzyskał Bednarz (1996). Wyznaczone równania regresji wielokrotnej mają postać:

1.  $X_t = -1,779 + 7,740D_t - 4,700D_{t+1}$ , (temperatura w Bydgoszczy)
2.  $X_t = -1,875 + 7,611D_t - 4,608D_{t+1}$  (temperatura uśredniona obszarowo),

gdzie:  $X_t$  – średnia temperatura z okresu od stycznia do kwietnia w roku  $t$ ,

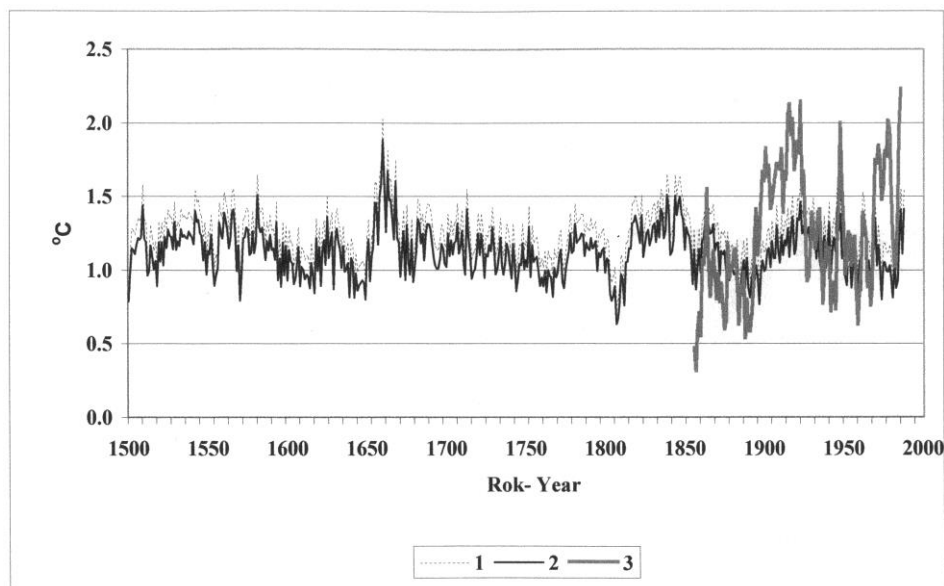
$D_t$  – indeks przyrostu rocznego drzewa w roku  $t$ ,

$D_{t+1}$  – indeks przyrostu rocznego drzewa w następnym roku  $t + 1$ .

Obliczone z powyższych równań wartości temperatury powietrza z okresu 1871-1920 jest dość silnie skorelowana ze zmierzonymi wartościami temperatury (współczynniki korelacji w obydwu przypadkach wyniosły 0,57). Można zatem uznać, iż przedstawione na rys. 1 rekonstrukcje temperatury powietrza są w dużym stopniu wiarygodne.

Jak widać z rysunku, obydwie rekonstrukcje temperatury powietrza są podobne. Wyższe wartości temperatury otrzymano w przypadku rekonstrukcji, na podstawie danych z Bydgoszczy. Analizując przebiegi rekonstruowanej temperatury można wyróżnić 5 zasadniczych przedziałów czasu, w których koniec zimy/początek wiosny był cieplejszy: 1530-1590, 1660-1680 (najcieplejszy w całej rekonstrukcji), 1820-1850, 1910-1940 i od ok. 1985 r. Natomiast temperatura w tym okresie roku poniżej normy wystąpiła w przedziałach lat: 1500-1510, 1600-1650, 1750-1770, 1800-1810, 1880-1900 i 1950-1980. Zdecydowanie najchłodniej było w pierwszym i czwartym wymienionym przedziale. W obydwu przypadkach ochłodzenia były gwałtowne i krótkotrwałe (rys. 1). Uzyskane wyniki odnoszące się do regionu kujawsko-pomorskiego w wielu miejscach są rozbieżne z rekonstrukcją temperatury okresu czerwca i lipca z Parku Narodowego w Babiej Górze zaprezentowaną przez Bednarza (1996). Zapewne jest to związane z niedoskonałościami zastosowanych metod rekonstrukcji, z różnymi okresami roku

oraz także różnymi obszarami (nizinny i górski), dla których je przeprowadzono. Ponadto Bednarz (1976) w swojej rekonstrukcji wykorzystał świerk (*Picea abies* (L.) Karst.).



Rys. 1. Rekonstrukcja średniej temperatury powietrza w okresie od stycznia do kwietnia w Polsce w latach 1500-1994 na podstawie standaryzowanej chronologii szerokości pierścieni drzew sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.)  
1 – rekonstrukcja oparta na kalibracji wykonanej na podstawie serii temperatury z Bydgoszczy, 2 – rekonstrukcja oparta na kalibracji wykonanej na podstawie serii temperatury obszarowej obliczonej z danych z Warszawy, Bydgoszczy i Gdyni, 3 – średnia temperatura obszarowa od stycznia do kwietnia obliczona z danych z Warszawy, Bydgoszczy i Gdyni

Fig. 1. A reconstruction of mean January-April air temperature in Poland for the period 1500-1994 using a standardised chronology of Scots pine tree-ring widths (*Pinus sylvestris* L.)

1 – reconstruction using for calibration air temperature series taken exclusively from Bydgoszcz, 2 – reconstruction using for calibration areally-averaged air temperatures from Warsaw, Bydgoszcz and Gdynia, 3 – mean January-April areally-averaged air temperature from Warsaw, Bydgoszcz and Gdynia

Podobne związki korelacyjne wyjaśniające zmienność przyrostów rocznych słoju drzew uzyskano biorąc pod uwagę skonstruowane i wcześniej omówione indeksy. Procedury kalibracji przeprowadzono na podstawie dwóch okresów: 1. 1871-1920 i 2. 1921-1970. Związki zostały opisane następującymi równaniami regresji wielokrotnej:

$$1. \quad X_{t1} = -0,502 + 3,361D_t - 0,889D_{t+1} + 1,040D_{t+2}$$

$$2. \quad X_{t2} = 1,259 + 3,007D_t - 0,765D_{t+1} - 0,569D_{t+2}$$

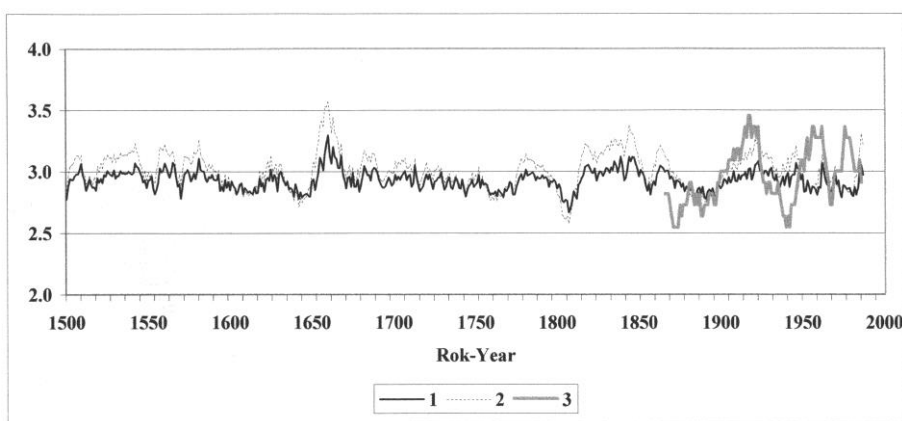
gdzie:  $X_{t1}$  i  $X_{t2}$  – wartości indeksów opisujących klimat w roku  $t$ ,

$D_t$  – indeks przyrostu rocznego drzewa w roku  $t$ ,

$D_{t+1}$  – indeks przyrostu rocznego drzewa w roku  $t+1$ ,

$D_{t+2}$  – indeks przyrostu rocznego drzewa w roku  $t+2$ .

Weryfikacje zrekonstruowanych na podstawie powyższych równań indeksów w odniesieniu do rzeczywistych indeksów przeprowadzono odpowiednio na podstawie okresów 1921-1970 i 1871-1920. Podobnie jak w przypadku rekonstrukcji temperatury powietrza, zgodność zrekonstruowanych serii z rzeczywistymi jest dość duża (współczynniki korelacji w granicach 0,5-0,6). Wyniki rekonstrukcji indeksów, przedstawiono w postaci wykresów ruchomych średnich 11-letnich na rys. 2. Wszystkie wartości powyżej 3 reprezentują okresy, w których występuje przewaga lat określonych jako kategorie 4 i 5, a wartości poniżej 3 reprezentują okresy z przewagą lat należących do kategorii 1 i 2. Z analizy danych nieuśrednionych wynika, że w okresie 1500-1994 dominowały lata przeciętne (kategoria 3, ok. 57% przypadków). Podobnie było też w okresie 1861-1991, dla którego skonstruowano te indeksy na podstawie danych temperatury i opadów atmosferycznych. Częstość wystąpienia poszczególnych kategorii lat była w tym okresie następująca: 1 – 2 przypadki, 2 – 30, 3 – 74 (56%), 4 – 22 i 5 – 3 przypadki.



Rys. 2. Rekonstrukcje średniej temperatury powietrza w okresie styczeń-kwiecień i opadów atmosferycznych w okresie czerwiec-lipiec w Polsce w latach 1500-1992 przy zastosowaniu prostych indeksów

1 – rekonstrukcja oparta na kalibracji przeprowadzonej na podstawie okresu 1921-1970, 2 – rekonstrukcja oparta na kalibracji przeprowadzonej na podstawie okresu 1871-1920, 3 – indeksy wyznaczone dla okresu 1861-1991 na podstawie średniej temperatury obszarowej okresu styczeń-kwiecień obliczonej z danych z Warszawy, Bydgoszczy i Gdyni oraz sumy opadów atmosferycznych w Bydgoszczy w okresie czerwiec-lipiec

Fig. 2. Reconstruction of mean January-April air temperature and June-July atmospheric precipitation in Poland for the period 1500-1992 using simple indices

1 – reconstruction has been carried out on the basis of calibration conducted for the period 1921-1970, 2 – reconstruction has been done on the basis of calibration conducted for the period 1871-1920, 3 – indices determined for the period 1861-1991 on the basis of mean areally-averaged January-April air temperature using data from Warsaw, Bydgoszcz and Gdynia along with June-July totals of atmospheric precipitation from Bydgoszcz

Obydwie prezentowane rekonstrukcje są podobne pod względem występowania wartości maksymalnych i minimalnych, jednak w rekonstrukcji opartej na okresie kalibracyjnym 1871-1920 większa jest zmienność indeksów. Porównując te rekonstrukcje z poprzednimi, prezentowanymi na rys. 1, widzimy, że ogólnie przebiegi ich są podobne.



Zgodnie z wcześniejszymi obliczeniami korelacyjnymi można stwierdzić, że temperatura w okresie od stycznia do kwietnia jest czynnikiem dominującym, gdy chodzi o przyrost roczny pierścieni sosny zwyczajnej na Nizinie Polskiej. Uwzględnienie opadów czerwca i lipca, wyjaśniających nieduży procent wariacji przyrostów rocznych drzew, w małym stopniu zmieniło przebieg rekonstruowanych wartości. Z pewnością wpływa na to też zastosowana metoda opisu klimatu za pomocą indeksów, która jest raczej daleka od doskonałości. Nie ma jednak innej możliwości uwzględnienia jednoczesnego wpływu dwóch elementów klimatycznych, tak aby powstała rekonstrukcja, oparta na procedurze kalibracyjnej wykorzystującej istniejące związki między nimi i szerokościami pierścieni drzew, można było interpretować w sposób w miarę jednoznaczny.

#### **Rekonstrukcja temperatury powierzchni gruntu na podstawie danych geotermicznych.**

Termiczna „pamięć” ziemi pod jej powierzchnią pozwala na zrekonstruowanie długookresowych zmian temperatury powierzchni Ziemi. W ostatnich dekadach coraz szerzej zaczęto stosować metodę opartą na inwersji anomalii temperatury skał z głębokością na podstawie profili temperatury mierzonej w otworach wiertniczych (np. Lachenbruch, Marshall 1986; Majorowicz, Šafanda 1998, 2001; Skinner, Majorowicz 1999; Pollack, Huang 2000; Wójcik i in. 1999, 2000; Majorowicz i in. 2001).

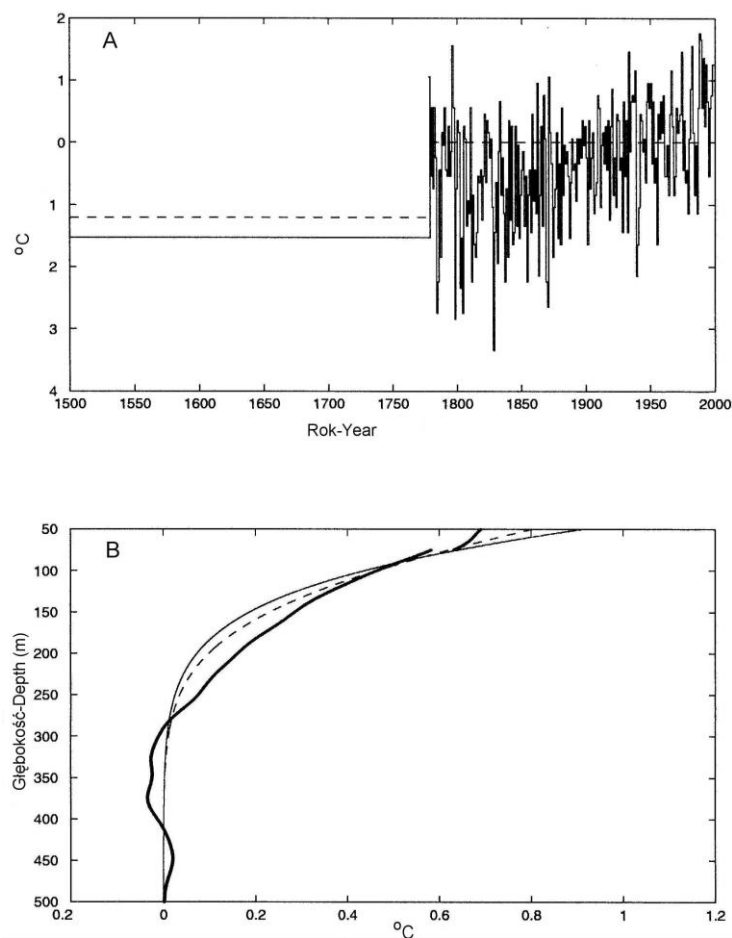
W pierwszej naszej pracy z tego zakresu przedstawiono rekonstrukcje zmian temperatury powierzchni gruntu uzyskane na podstawie wykonanych profili geotermicznych z 10 otworów z Polski Południowo-Zachodniej, które jednocześnie charakteryzowały się ustalonym stanem równowagi geotermicznej (Wójcik i in. 1999). Uzyskano średnie ocieplenie gruntu na tym obszarze w ciągu ostatnich 100 lat (0,7-0,95°C) porównywalne zarówno ze wzrostem uśrednionej obszarowo (0,5-0,6°C; Berlin, Warszawa, Lipsk, Wrocław, Praga), jak i z pojedynczych stacji (0,7-0,9°C) rocznej temperatury powietrza. W kolejnej pracy (Wójcik i in. 2000) przedstawiono porównanie wstępnej rekonstrukcji zmian temperatury powierzchni gruntu na podstawie wyselekcjonowanych 5 otworów (przyrost temperatury ok. 1,5°C w okresie 1500-1980) w Polsce Północnej z podobnymi rekonstrukcjami z terenu zachodniej Białorusi (zmiana ok. 1°C) (Zui 1999), z danymi średnich rocznych wartości temperatury powietrza (Berlin, Sztokholm, Warszawa, Ryga, Wilno) oraz z danymi dendrochronologicznymi (Litwa, region Dolnej Wisły, Brandenburgia, Gotlandia). Zauważone duże rozbieżności między indywidualnymi rekonstrukcjami temperatury powierzchni Ziemi uzyskanymi na podstawie wykonanych inwersji temperatury skał zmierzonych w 5 otworach z Polski Północnej wskazały na potrzebę bardziej rygorystycznej selekcji danych geotermicznych pod względem ich dokładności oraz możliwych zaburzeń hydrodynamicznych w strefie otworowej. Majorowicz i in. (2001), rozszerzając analizę o dodatkowe otwory, podjęli próbę wykorzystania metody inwersji temperatury w profilach geotermicznych, opracowanej przez Shena i Becka (1991) oraz Shena i in. (1995), do rekonstrukcji historii temperatury powierzchni gruntu

w Polsce w okresie XVI-XX w. Wyniki tej rekonstrukcji dotyczącej ostatnich 200 lat porównano z homogeniczną serią średniej rocznej temperatury powietrza w Warszawie (Lorenz 2000). Do analizy wybrano 13 ciągłych profili termicznych wykonanych metodą profilowań karotażowych na terenie całej Polski. Porównano je z 10 wcześniej analizowanymi profilami temperatury z głębokością z Polski Południowo-Zachodniej (Wójcik i in. 1999), gdzie pomiary wykonano punktowo. Analiza ta wskazuje na bardzo dobrą zgodność rekonstrukcji na podstawie danych z otworów na Niżu Polskim z serią warszawską.

Rozkład pionowy średniej anomalii temperatury skał obliczony z uśrednienia anomalii uzyskanych z 13 wyselekcjonowanych do niniejszej pracy otworów pokazano na rys. 3B (gruba linia ciągła). Uśrednione dodatkowo anomalie w górnej części profilu temperatury świadczą o ostatnim ociepleniu.

Wyniki rekonstrukcji temperatury powierzchni gruntu z okresu przed 1779 r. wykonane metodą Harrisa i Chapmana (1998) przedstawiono na rys. 3A. Pokazany przebieg temperatury powietrza w Warszawie oraz najbardziej prawdopodobny (odpowiadający najlepszemu przybliżeniu obserwowanej anomalii ze wzrostem głębokości) „poziom” średniej temperatury powierzchni gruntu poprzedzającej okres obserwacji (linia ciągła). Modelowi temu odpowiada zmiana temperatury ze wzrostem głębokości (rys. 3B, cienka linia ciągła), która przybliży (rozbieżności mniejsze niż  $0,07^{\circ}\text{C}$ , a więc mniej niż błąd pomiarowy) anomalie temperatury z głębokością według danych obserwowanych (rys. 3B, gruba linia ciągła). Uzyskana różnica między średnią temperaturą z okresu 1951-1981 a średnią temperaturą przed okresem obserwacyjnym (przed 1779) jest równa  $1,53^{\circ}\text{C}$ . Dla porównania pokazano również prosty model zmiany skokowej (linia przerywana), który również dobrze przybliży zmiany anomalii termicznej ze zmianą głębokości (rys. 3A).

Powyższe modelowanie wskazuje, że współczesny „poziom” średniej temperatury rocznej powietrza w Polsce jest znacznie wyższy ( $>1,5^{\circ}\text{C}$ ) od średniego poziomu temperatury powierzchni gruntu w latach 1500-1778. Ta różnica jest dużo większa niż podobna jej wartość obliczona z pomiarów geotermicznych w otworach zlokalizowanych w strefie umiarkowanej na półkuli północnej ( $0,7^{\circ}\text{C}$ , Harris, Chapman 2001). Jest ona również wyższa od tej, którą otrzymaliśmy dla obszaru Polski stosując metodę Shena (ok.  $0,9^{\circ}\text{C}$ , Majorowicz i in. 2001). Wydaje się, że jedną z przyczyn rozbieżności wyników uzyskanych dla obszaru Polski mogą być różnice w założeniach obu metod. Metoda Harrisa i Chapmana jest oparta na założeniu, że zakres zmian temperatury powierzchni gruntu w okresie obserwacji instrumentalnych jest taki sam jak temperatury powietrza zmierzonej na stacji meteorologicznej. W metodzie Shena natomiast rekonstrukcje zmian temperatury powierzchni gruntu otrzymano na podstawie wykonanych pomiarów temperatury skał w otworach do głębokości kilkuset metrów. Porównanie w ten sposób zrekonstruowanej średniej temperatury powierzchni gruntu z ostatnich 200 lat z serią temperatury powietrza w Warszawie wykazało, iż wzrost temperatury gruntu w tym czasie był mniejszy średnio o  $0,3^{\circ}\text{C}$ .



Rys. 3. Rekonstrukcje zmian temperatury powierzchni gruntu (rysunek A) w okresie 1500-2000 uzyskane na podstawie dopasowywania do krzywej reprezentującej średnie anomalie temperatury z głębokością (rysunek B, gruba krzywa) obliczone na podstawie 13 profili temperatury. Dopasowywanie wykonano stosując dwa modele:

1. prosty model skokowej zmiany temperatury powierzchni gruntu (linia przerywana)
2. model dwuczłonowy składający się z krzywej prezentującej zmiany temperatury powierzchni gruntu w okresie obserwacji instrumentalnych, 1779-2000 (przyjęto, iż jej wartości są takie same jak temperatury powietrza w Warszawie) oraz zrekonstruowanego średniego poziomu temperatury powierzchni gruntu w okresie 1500-1778, (cienka linia ciągła)

Pozostałe objaśnienia w tekście.

Fig. 3. A reconstruction of ground surface temperature changes (figure A) for the period 1500-2000 obtained on the basis of adjustments to curves representing mean temperature anomalies with depth (figure B, thick curve) calculated using 13 temperature profiles. The adjustment has been carried out using two models:

1. A simple model of abrupt temperature changes in ground surface temperature (dashed line);
2. A binary model with curve presenting ground surface temperature changes during a period of instrumental observations from 1779-2000 (based on the assumption that the values are the same as those for air temperature in Warsaw), along with a reconstruction of the mean level of ground surface temperature for the period 1500-1778 (thin continuous line)

For other explanations see text.

Tłumaczy to tylko część różnicy istniejącej między rekonstrukcjami temperatury gruntu uzyskanymi z zastosowaniem metod Harrisa i Chapmana (1,5°C) oraz Shena (0,9°C). Średni „poziom” zrekonstruowanej temperatury gruntu przed okresem obserwacji instrumentalnych jest też znacznie niższy przy zastosowaniu metody Harrisa i Chapmana. Dla pełnego wyjaśnienia przyczyn wspomnianej rozbieżności wyników należy, naszym zdaniem, sprawdzić, czy założenie Harrisa i Chapmana, iż zmiany temperatury powietrza są takie same jak zmiany temperatury gruntu, jest słuszne w odniesieniu do obszaru Polski.

### Podziękowanie

Dziękujemy doktorowi J. Szewczykowi z Państwowego Instytutu Geologicznego w Warszawie za pomoc w uzyskaniu archiwalnych danych pomiarowych (profilowania termiczne). Dziękujemy także doktorowi R. Harrisowi za udostępnienie swojej metody do rekonstrukcji temperatury powierzchni gruntu na podstawie danych geotermicznych.

### LITERATURA

- Bednarz Z., 1984, *The comparison of dendroclimatological reconstructions of summer temperatures from the Alps and Tatra Mountains from 1741-1965*. Dendrochronologia, 2, 367-389.
- Bednarz Z., 1996, *June-July temperature variations for the Babia Góra National Park, southern Poland, for the period 1650-1910*. Zesz. Nauk. UJ, 102, 523-529.
- Bokwa A., Limanówka D., Wibig J., 2001, *Pre-instrumental weather observations in Poland in the 16th and 17th centuries*. [W:] P.D. Jones, A.E.J. Ogilvie, T.D. Davies i K.R. Briffa (red.), *History and climate, memories of the future*. Kluwer Academic Publishers, 9-28.
- Głowicki B., 1998, *Wieloletnia seria pomiarów temperatury powietrza na Śnieżce*. [W:] Mat. sesji nauk „Geoekologiczne problemy Karkonoszy”, 1, Przysiek, Wyd. Acarus, Poznań.
- Górski T., Marciniak K., 1992, *Temperatura powietrza w Puławach w ciągu lat 1871-1990. I Średnia temperatura miesięczna*. Pam. Puławski, Prace IUNG, 100, 7-26.
- Harris R.N., Chapman D.S., 1998, *Geothermics and climate change. 2. Joint analysis of borehole temperature and meteorological data*. J. Geophys. Res., 103, 7371-7383.
- Krawczyk A.J., Krąpiec M., 1999, *Rekonstrukcja paleoklimatu Małopolski na podstawie sekwencji przyrostów rocznych dębów*. Geologia, 25, 305-319.
- Lachenbruch A.H., Marshall B.V., 1986, *Changing climate: geothermal evidence from permafrost in the Alaskan Arctic*. Science 234, 689-696.
- Limanówka D., 2000, *The transformation of thermal descriptive characteristics in Cracow from 16th century into the quantitative evaluation*. [W:] *Reconstructions of climate and its modelling*. Instytut Geografii Uniwersytetu Jagiellońskiego, Prace Geograficzne, 107, 113-117.
- Lorenc H., 2000, *Studia nad 220-letnią (1779-1998) serią temperatury powietrza w Warszawie oraz ocena jej wiekowych tendencji*. Mat. Bad., Seria: Meteorologia, 31, ss. 104.
- Majorowicz J.A., Šafanda J., 1998, *Ground surface temperature history from the inversions of underground temperatures – a case study of the Western Canadian sedimentary basin*. Tectonophysics, 291, 287-298.
- Majorowicz J.A., Šafanda J., 2001, *Composite surface temperature history from simultaneous inversion of borehole temperatures*. Global Planet. Change, 29, (3-4).
- Majorowicz J.A., Šafanda J., Przybylak R., Wójcik G., 2001, *Rekonstrukcja zmian temperatury powierzchni gruntu w Polsce w ostatnim 500-leciu na podstawie profili geotermicznych*. Przegl. Geof., 4.

- Maruszczak H., 1991, *Tendencje do zmian klimatu w ostatnim tysiącleciu*. [W:] L. Starkeł (red.), *Geografia Polski – środowisko przyrodnicze*. Wyd. Nauk. PWN, 182-190.
- Miętus M., 1996, *Zmienność temperatury i opadów w rejonie polskiego wybrzeża Morza Bałtyckiego i jego spodziewany przebieg do roku 2030*. Mat. Bad. IMGW, Ser. Meteorologia, 26, ss. 72.
- Miętus M., 1998, *O rekonstrukcji i homogenizacji wieloletnich serii średniej temperatury ze stacji w Gdańsku-Wrzeszczu 1851-1995*. Wiad. IMGW, 21, 41-63.
- Polackówna M., 1925, *Wahania klimatyczne w Polsce w wiekach średnich*. Prace Geogr. Inst. E. Romera, Lwów, ss. 80.
- Pollack H.N., Huang S., 2000, *Climate reconstruction from subsurface temperatures*. Annual Review Earth Planet. Sci., 28, 339-365.
- Sadowski M., 1991, *Variability of extreme climatic events in Central Europe since the 13th century*. Z. Meteorol., 41, 350-356.
- Semkowicz W., 1922, *Zagadnienie klimatu w czasach historycznych*. Przegl. Geogr., 3, 18-42.
- Skinner W.R., Majorowicz J., 1999, *Regional climatic warming and associated twentieth century land cover changes in North-Western North America*. Clim. Res., 12, 39-52.
- Shen P.Y., Beck A.E., 1991, *Least squares inversion of borehole temperature measurements in functional space*. J. Geophys. Res., 96, 19965-19979.
- Shen P.Y., Pollack H.N., Huang S., Wang K., 1995, *Effects of subsurface heterogeneity on the inference of climatic change from borehole temperature data: model studies and field examples from Canada*. J. Geophys. Res., 100 (B4), 6383-6396.
- Trepińska J. (red.), 1997, *Wahania klimatu w Krakowie (1792-1995)*. Instytut Geogr. UJ, Kraków, ss. 204.
- Wilczyński S., 1999, *Dendroklimatologia sosny zwyczajnej (Pinus sylvestris L.) z wybranych stanowisk w Polsce*. maszynopis pracy doktorskiej wykonanej w Zakładzie Klimatologii Leśnej Akademii Rolniczej w Krakowie.
- Vizi Z., Marciniak K., Przybylak R., Wójcik G., 2001, *Homogenisation of seasonal and annual air temperature series from Bydgoszcz and Toruń*. Annales Univ. M. Curie-Skłodowska, LV/LVI, 43, Lublin, 357-367.
- Wilczyński S., Krąpiec M., Szychowska-Krąpiec E., Zielski A., 2001, *Regiony dendroklimatyczne sosny zwyczajnej (Pinus sylvestris L.) w Polsce*. Sylwan, 8, 53-61.
- Wójcik G., Majorowicz J.A., Marciniak K., Przybylak R., Šafanda J., Zielski A., 1999, *Temperatura powietrza w Polsce południowo-zachodniej w świetle danych klimatologicznych, geotermicznych i dendroklimatologicznych*. [W:] *Zmiany i zmienność klimatu Polski*. Ogólnopolska Konferencja Naukowa Łódź, 4-6 listopada 1999, ISBN 83-85176-70-5, 305-315.
- Wójcik G., Majorowicz J.A., Marciniak K., Przybylak R., Šafanda J., Zielski A., 2000, *The last millenium climate change in Northern Poland derived from well temperature profiles, tree-rings and instrumental data*. [W:] *Reconstructions of climate and its modelling*. Instytut Geogr. UJ, Prace Geograficzne, 107, 137-148.
- Zielski A., 1997, *Uwarunkowania środowiskowe przyrostów radialnych sosny zwyczajnej (Pinus sylvestris L.) w Polsce Północnej na podstawie wielowiekowej chronologii*. Wydawnictwo UMK, Toruń, ss. 127.
- Zielski A., Krąpiec M., Wilczyński S., Szychowska-Krąpiec E., 2001, *Chronologie przyrostów radialnych sosny zwyczajnej w Polsce*. Sylwan, 5, 105-119.
- Zui V.I., 1999, *Climate change in Belarus derived from thermograms*. Lithosphere, 10-11, 105-112.

*Rajmund Przybylak, Gabriel Wójcik*  
*Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu*  
*Instytut Geografii*  
*Jacek Majorowicz*  
*Northern Geothermal Ltd*  
*Edmonton Kanada*

**CHANGES IN AIR TEMPERATURE AND ATMOSPHERIC PRECIPITATION IN POLAND  
FROM THE 16<sup>TH</sup> TO THE 20<sup>TH</sup> CENTURY**

*SUMMARY*

The first part of the paper presents a brief account of the current state of knowledge concerning climatic changes in Poland from the 16<sup>th</sup> to the 20<sup>th</sup> century. The paper then goes on to describe the data used and the methodology applied for the reconstruction of air temperature and precipitation as well as for ground surface temperature (GST). A standardised tree-ring width chronology of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) has been used to reconstruct the first two climatic elements. On the other hand, the GST history has been reconstructed using a new method developed by Harris and Chapman (1998).

Response function calculations conducted for trees growing in Poland (except in mountainous regions) reveal a statistically significant correlation between the annual ring widths of the Scots pine on the one hand and, on the other hand, the monthly mean air temperatures, particularly from February and March, but also from January and April. A statistically significant correlation with June-July precipitation was also found. Therefore, the only reconstructions which were possible were 1) mean January-April air temperature, and 2) indices constructed based on January-April air temperature and June-July precipitation. The results of these reconstructions and the reconstruction of annual GST for the last five centuries are shown in Figs 1-3, respectively.

The following periods featured a warm late winter/early spring and humid June and July: 1530-1590, 1660-1680 (the warmest period), 1820-1850, 1910-1940 and after 1985. On the other hand, a cold January-April and dry June and July occurred in the following periods: 1500-1510, 1600-1650, 1750-1770, 1800-1810, 1880-1900 and 1950-1980. GST reconstruction shows that its average pre-instrumental level (1500-1778) is about 1.5°C lower than mean air temperature for the period 1951-1981.