

Zapis w przyrostach drzew zmian środowiska górskiego Tatr na tle obszarów górskich Europy Centralnej

Ryszard J. Kaczka¹, Sławomira Pawełczyk²

¹ Wydział Nauk o Ziemi, Uniwersytet Śląski, Sosnowiec

² Instytut Fizyki, Politechnika Śląska, Gliwice

e-mail: ryszard.kaczka@us.edu.pl, Sławomira.Pawełczyk@polsl.pl

Słowa kluczowe: górna granica lasu, Tatry, dendrochronologia, świerk

Keywords: timberline, Tatras, dendrochronology, spruce

przez wystąpienie synchronicznych redukcji szerokości przyrostów czasowo upodobniła przebieg wszystkich czterech chronologii.

Streszczenie

Analiza rocznych przyrostów drzew jest jedną z najbardziej dokładnych i najszerzej stosowanych metod rekonstrukcji środowiska w strefie klimatów umiarkowanych. Czynniki klimatyczne, głównie temperatura powietrza zapisują się w przyrostach drzew rosnących w ekotonie górnej granicy lasu. Badania dendrochronologiczne dotyczące zapisu klimatu Europy Centralnej bazują głównie na Alpach, pozostałe obszary górskie takie jak Sudety i Karpaty są stosunkowo mało pod tym kątem przebadane. Celem badań było: (i) opracowanie chronologii regionalnych reprezentujących główne regiony górskie Europy Centralnej, (ii) analiza związku szerokości przyrostów świerka pospolitego (*Picea abies* L. Karst) z temperaturą powietrza, (iii) określenie czasowej i przestrzennej zmienności telekoneksji poszczególnych chronologii z Tatrami, jako elementem o centralnym położeniu geograficznym.

Chronologie świerkowe z górnej granicy lasu w Tatrach charakteryzują się wyrazistym sygnałem klimatycznym. W przyrostach tych drzew zapisuje się temperatura dwóch najcieplejszych w tym regionie miesięcy, czerwca i lipca.

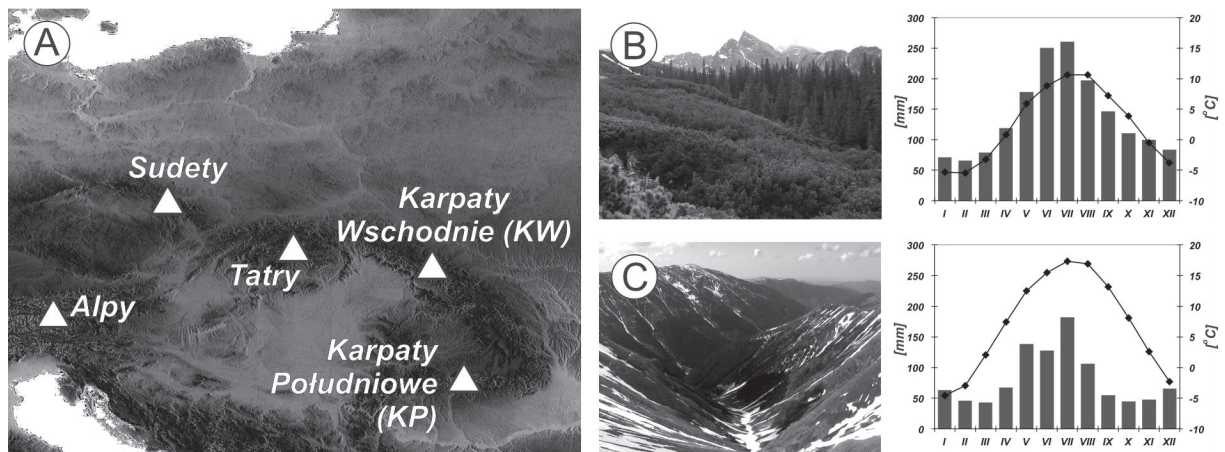
Silna telekoneksja z pozostałymi stanowiskami z najbliższego otoczenia (Sudety, Karpaty Wschodnie) wskazuje, że chronologie te stanowią dobre źródło informacji do rekonstrukcji klimatu Europy Centralnej. Telekoneksja z chronologiami z innych regionów górskich jest zmienna w czasie i wskazuje na istotny wpływ lokalnych czynników. Najstabilniejszy w czasie jest związek chronologii tatrzańskich z dwoma najbliższymi: Sudety, Karpaty Wschodnie. W pierwszej połowie XIX wieku chronologie z Sudetów, Karpat Wschodnich, Alp i Tatr wykazują duże wzajemne podobieństwo. Koincydencja czynników zewnętrznych o charakterze globalnym (MEL, minimum Dalthona i erupcja wulkanu Tambora), po-

Wstęp

Analiza rocznych przyrostów drzew jest jedną z najbardziej dokładnych i najszerzej stosowanych metod rekonstrukcji środowiska w strefie klimatów umiarkowanych. W szerokości słoików, ich strukturze, składzie chemicznym oraz izotopowym zapisują się zmiany związane z wahaniami klimatu, zanieczyszczeniami i inną działalnością człowieka, katastrofami ekologicznymi etc (Schweingruber 1996). Badania dendrochronologiczne dotyczące zapisu warunków klimatycznych i jego wykorzystania w rekonstrukcjach zmian środowiska są przeprowadzane zarówno w skali lokalnej, regionalnej jak globalnej (Briffa et al., 2002; Büntgen et al., 2007; Wilson et al., 2007). Analizy dendroklimatyczne pozwalają nie tylko rekonstruować wahania klimatu dla ostatnich stuleci ale również prognozować zmienność środowiska związaną ze zmianami klimatu (Fritts, 1976; Briffa et al., 2002; Wilson et al., 2007).

Większość dotychczasowych badań dendrochronologicznych w Karpatach i Sudetach charakteryzowało się studiowaniem jednego tylko stanowiska i gatunku. Badania dotyczyły zidentyfikowania związku rocznych przyrostów z warunkami meteorologicznymi oraz rekonstrukcji klimatu w odniesieniu do Alp jako repera, pomijając z powodu małej ilości dostępnych danych relacje między stanowiskami w obrębie samych Karpat (Bednarczyk, 1984; Sander et al., 1995; Szychowska-Krapiec, 1998; Kaczka, 2004). Stosunkowo niedawno zapoczątkowano kompleksowe podejście do zagadnień dendroklimatycznych w tym regionie (Kaczka, Büntgen, 2006; Büntgen et al., 2007). A ich wyniki tych badań stanowią pierwsze próby określenia przestrzennych i czasowych zmian zapisu klimatu w przyrostach drzew i zastosowania tych rekonstrukcji szerszej skali (Wilson et al., 2007).

Celem badań było porównanie zapisu przemian środowiska górskiego w Tatrach, Sudetach, Karpatach Wschodnich, Południowych oraz Alpach w oparciu o analizy



Ryc. 1. Teren badań: a) położenie obszarów górskich, z których pochodzą regionalne chronologie świerka pospolitego *Picea abies* L. Karst, b) górna granica lasu w Tatrach (Las Gąsienicowy) i diagram klimatyczny z Hala Gąsienicowej (1520 m n.p.m.), c) górna granica lasu w Karpatach Południowych (Retezat) i diagram klimatyczny z Paltinis (1454 m n.p.m.)

Fig. 1. Studied area: a) the locations of studied mountains represented by regional spruce chronologies, b) timberline zone in Tatras (Las Gąsienicowy), climadiagram of Hala Gąsienicowa (1520 m ASL), c) timberline zone in Southern Carpathians (Retezat Mts.), climadiagram of Paltinis (1454 m ASL)

szerokości przyrostów świerka pospolitego *Picea abies* L. Karst, gatunku dominującego w górach Europy Centralnej (ryc. 1). Studia czasowej i przestrzennej zmienności podobieństwa sygnału zapisanego w szerokościach przyrostów koncentrowały się wokół Tatr zlokalizowanych w centrum badanego obszaru.

Metody badań

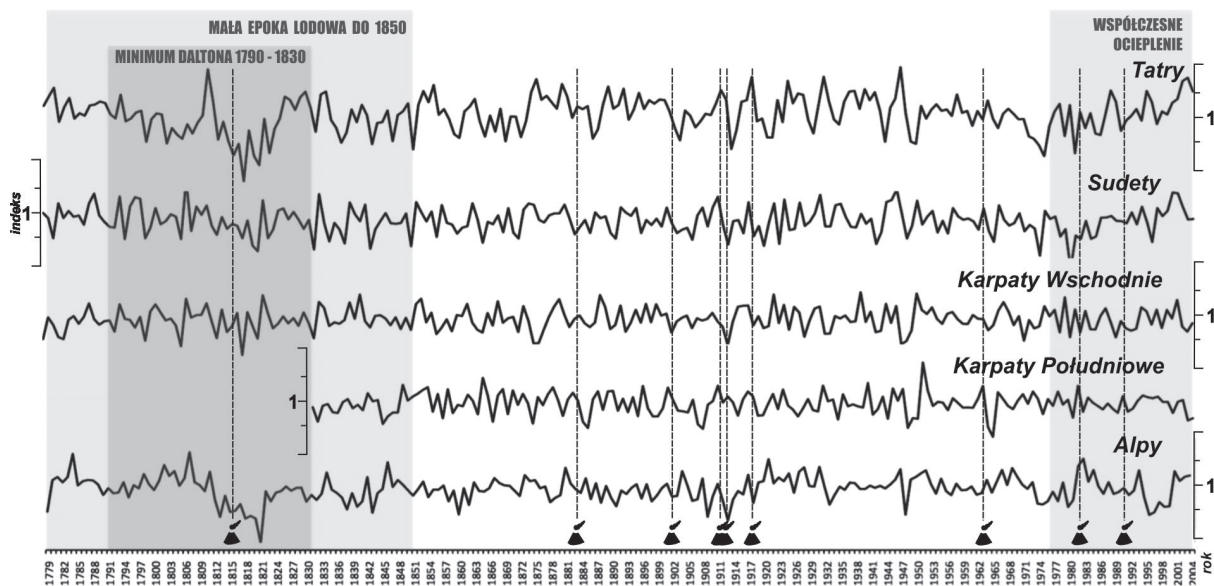
Badania opierały się na standardowych technikach dendroklimatycznych (Fritts, 1976). Prace terenowe były poprzedzone przygotowaniem kameralnymi, których celem było wstępne wyselekcjonowanie, na podstawie materiałów kartograficznych i literatury, optymalnych stanowisk badawczych, uwzględniających wymagania dotyczące naturalnego i homogenicznego charakteru lasu (Zielski, Krąpiec, 2004). Analizy bazowały na próbach będących odwiertami pobranymi świdrem rdzeniującym Presslera ze świerków rosnących w pasie górnej granicy lasu. Próby zostały odpowiednio przygotowane i szerokości przyrostów rocznych drewna wtórnego zmierzono z dokładnością do 0,05 mm. Wyniki pomiarów zweryfikowano przy zastosowaniu narzędzi statystycznych (program Cofecha) oraz sprawdzono wizualnie (program TSAP). Chronologie lokalne i regionalne przygotowano w programie Arstan, zgodnie z standardową procedurą zindeksowania i budowy chronologii rezydualnych.

Analizy przeprowadzono na podstawie regionalnych chronologii dla obszarów górskich Europy Centralnej: 1) Sudety (Śnieżka, Śnieżnik), 2) Tatry, 3) Karpaty Wschodnie (Czarnohora, Gorgany), 4) Karpaty Południowe (Fogarasze, Retezat), 5) Alpy. W analizach wpływu klimatu na szerokości przyrostów wykorzystane zostały dane z globalnej bazy danych klimatycznych CRU TS 3.0 (Mitchell, Jones, 2005).

Wyniki badań

Analiza ponad 3000 prób pozwoliła na budowę pięciu chronologii regionalnych rozumianych jako regionalne uśrednione sekwencje przyrostów rocznych danego gatunku wyodrębnione dla większego obszaru (Zielski, Krąpiec, 2004). Sięgają one do 1794 roku (z wyjątkiem Karpat Południowych – 1829). Zestawienie chronologii rezydualnych dla badanych obszarów na tle ponadregionalnych zdarzeń o charakterze nagłych zjawisk (erupcje wulkaniczne) lub dłużej trwających fluktuacji klimatycznych przedstawia rysunek 2. Wszystkie chronologie sięgają do schyłku małej epoki lodowej¹ (Bradley, Jones, 1992) i synchronicznego z nim minimum Daltona (1790–1830). Okres ten charakteryzował się małą aktywnością Słońca, co znajdowało swój wyraz w niewielkiej ilości plam słonecznych (Wagner, Zorita, 2005). Kolejnym powszechnie występującym okresem jest współczesne ocieplenie klimatu. W analizowanym okresie miały również miejsce pojedyncze zdarzenia, których skutki miały znaczenie dla klimatu. Do głównych z nich zaliczyć można silne erupcje wulkanów, w wyniku których duże ilości pyłów i gazów dostawały się do atmosfery i prowadziły do krótkotrwałego ochłodzenia (Briffa et al., 2004). Przykładem takiego zdarzenia o globalnych konsekwencjach była erupcja wulkanu Tambora 10 kwietnia 1815. Pod wpływem pyłów, które dostały się to strato-

¹ Ze względu na szerszy terytorialnie zasięg analiz porównawczych przybliżony koniec małej epoki lodowej przyjęto za rok 1850 (ryc. 2). Należy pamiętać, że A. Kotarba (2004) na podstawie szczegółowych badań w Tatrach przesuwając jej zakończenie do 1925 roku podkreślając jej odmienny charakter, m.in. proponując termin *tatrzańską małą epoką lodową*.



Ryc. 2. Regionalne chronologie rezydualne dla świerka pospolitego na tle dłużej trwających zjawisk klimatycznych o zasięgu globalnym (mała epoka lodowa, minimum Dalthona, współczesne ocieplenie). Sygnatury nad osią x oznaczają dodatkowo erupcje wulkaniczne mające ponadregionalne znaczeniu w kształtowaniu klimatu: Tambora (1815), Krakatau (1883), St Maria (1902), Taal (1911), Katamai (1912), Hekla (1917), Agung (1963), El Chicho (1982), Pinatubo (1991)

Fig. 2. The five regional chronologies in comparison with climate events of global character (LIA, Dalton's minimum, recent climate warming) and major volcanic eruptions: Tambora (1815), Krakatau (1883), St Maria (1902), Taal (1911), Katamai (1912), Hekla (1917), Agung (1963), El Chicho (1982), Pinatubo (1991)

sfer, w następnych latach obserwowano ochłodzenie, które zapisało się również w słojach drzew w różnych częściach północnej półkuli (Briffa et al., 1998). Charakterystyczna była, rozpoznana w Tatrach przez Bednarza (Bednarz, Trepinska, 1992) depresja w przyrostach rocznych limby związana z rokiem bez lata (1816).

Wpływ klimatu na wzrost drzew w ekotonie górnej granicy lasu był szeroko studiowany w górach Europy (Bednarz, 1984, Sander et al., 1995; Szychowska-Krapiec, 1998; Frank, Esper, 2005; Kaczka, Beutgen, 2006). Dla drzew rosnących w ekotonie górnej granicy lasu

wyraźna jest zależność szerokości przyrostów od klimatu: pozytywnego wpływu temperatury i negatywnego opadów w okresie letnim. Ciężkość okresu letniego jest najistotniejszym elementem kontrolującym wzrost drzew, czynnikiem pluwialny jest mniej znaczący i nie jest w tym opracowaniu dyskutowany. Zgodność z tym ogólnym modelem (Fritts, 1976) wykazuje chronologia rezydualna z Tatr. Analiza związku szerokości przyrostów z temperaturą powietrza wykazuje, że jedynie dla miesięcy letnich (czerwiec i lipiec) wartości współczynnika korelacji Pearsona są istotne statystycznie (na poziomie 0,01)



Ryc. 3. Wpływ średniej miesięcznej i sezonowej temperatury powietrza na szerokości przyrostów pięciu analizowanych chronologii rezydualnych. Pozioma linia przerywana wyznacza poziom istotności statystycznej 0,01

Fig. 3. Monthly and seasonal growth response of the five spruce residual chronologies to temperature. Horizontal dashed lines denote the 0.01 significance level

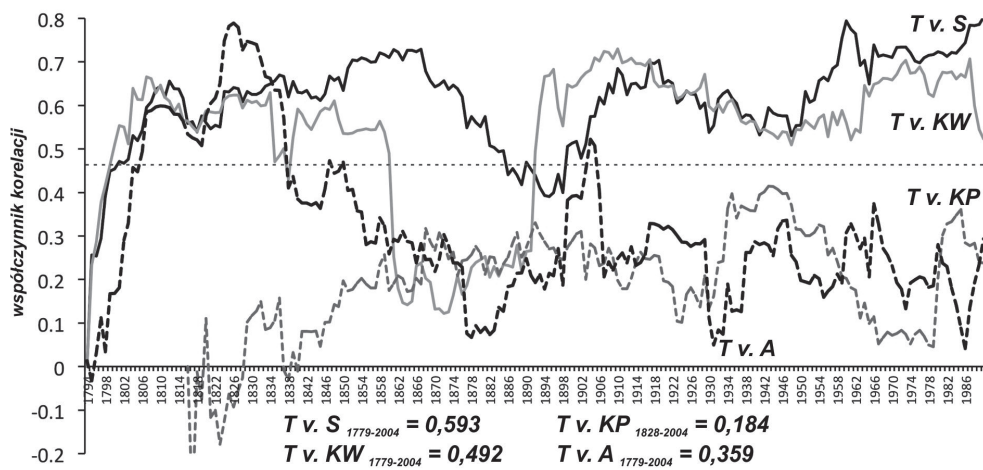
i osiągają duże wartości (ryc. 3). Największą wartość wykazuje przedział czasowy czerwiec–lipiec (wsp. korelacji = 0,55), reprezentujący okres, kiedy kambium prowadzi najintensywniejszą produkcję komórek drewna wtórnego. Zbliżony model zależności od klimatu wykazuje chronologia reprezentująca Sudety. Dla niej również zarejestrowano duży wpływ temperatury powietrza w lecie, z maksymalną wartością dla okresu czerwiec–lipiec (wsp. korelacji = 0,54). Świerki rosnące w pasie górnej granicy lasu w Alpach znajdują się pod podobnym wpływem ciepłoty lata. Szerokość przyrostów najsilniej zależy od temperatury powietrza w lipcu (wsp. korelacji = 0,51), co różni ten obszar od Tatr i Sudetów gdzie wyższa korelacja została uzyskana dla czerwca (odpowiednio 0,47 i 0,44). Zestawienie wyników dla dwóch najcieplejszych miesięcy (czerwiec–lipiec) wskazuje jednak na podobny w Alpach jak w dwóch poprzednich regionach zapis dendroklimatyczny (wsp. korelacji = 0,51) co jest zbliżone z wynikami wcześniejszych badań (Frank, Esper, 2005). Porównanie chronologii, drugiego co do odległości z Tatrami regionu, Karpat Wschodnich z lokalnymi warunkami termicznymi wskazuje inne charakter zależności. Wpływ temperatury dla świerków z tego regionu wydaje się mniejszy, najsilniejsza jest korelacja szerokości przyrostów z ciepłotą pojedynczego miesiąca, czerwca (wsp. korelacji = 0,36). Charakterystyczne jest pojawienie się związku z temperaturą jesieni poprzedniego roku (dla października poprzedniego roku wsp. korelacji = 0,34). Dla całego lata zależność ta jest mniejsza (dla okresu czerwiec–lipiec wsp. korelacji = 0,32).

Wzrost świerków w Karpatach Południowych wykazuje znacznie mniejszą zależność od czynników klimatycznych, dotyczy to również (nie prezentowanych tutaj) wpływu opadów (Kaczka, Beuntgen, 2006). Stanowiska z tego regionu mogą reprezentować dyskusowaną współ-

ześnie tendencję (tzw. *divergence problem*) do osłabienia zapisu dendroklimatycznego (Wilson et al., 2007).

Na duże podobieństwo wyników analiz dendroklimatycznych Tatr i Sudetów wpływa nie tylko stosunkowo niewielka odległość między tymi regionami (~290 km) ale również podobne kształtowanie warunków pogodowych lata przez polarno-morskie masy powietrza napływające z tego samego, zachodniego kierunku. Sudecka chronologia regionalna nie wykazuje osłabienia związku z czynnikami klimatycznymi pomimo, że w drugiej połowie XX wieku kondycja borów świerkowych była tam silnie obniżona w wyniku działania zanieczyszczeń, głównie kwaśnych deszczy (Sander et al., 1995; Grodzińska, Szrek-Lukaszewska, 1997). Należy podkreślić, że w skład budowanej w 2009 roku chronologii weszły drzewa, które przetrwały okres zamierania świerczyn górskich w Sudetach i obecnie są ekologicznymi beneficjentami m.in. obniżenia konkurencji o światło. Odmienność intensywności i charakteru wpływu klimatu na szerokości przyrostów dla chronologii z Karpat Wschodnich ma złożone przyczyny. W tej części Karpat silniej zaznacza się wpływ kontynentalizmu a co za tym idzie inne masy powietrza mają wpływ na warunki pogodowe w okresie letnim. Nie można wykluczyć, że i w tym przypadku występuje osłabienie zapisu dendroklimatycznego związane z fizjologiczną reakcją świerków na ocieplenie klimatu.

Pomimo zbliżonej wrażliwości na czynniki klimatyczne oraz występowania ponadregionalnych wpływów zgodność przebiegu chronologii w badanym okresie jest zróżnicowana (ryc. 4). Najsilniejszą telekoneksję posiadają, chronologie najbliższe sobie geograficznie, Tatry i Sudety (wsp. korelacji = 0,59). Najmniejsze podobieństwo z Tatrami wykazała chronologia z Karpat Południowych (wsp. korelacji = 0,18). Jest to związane z odmiennością cech dendroklimatycznych tego regionu i znacz-



Ryc. 4. Czasowa zmienność telekoneksji między Tatrami i pozostałymi regionami mierzona współczynnikiem korelacji konsekwentnej obliczonej dla 31-letnich ruchomych przedziałów, poziomą linią przerywaną oznaczono istotność statystyczną na poziomie 0,01. Pod wykresem wartości współczynnika korelacji dla całego (podanego w indeksie) analizowanego okresu

Fig. 4. Spatial correlation characteristics of the five spruce regional chronologies as a function of time (31 years' moving correlation). Horizontal dashed lines denote the 0.01 significance level

nie większej odległości (520 km). Telekoneksja pomiędzy Tatrami a Karpatami Wschodnimi (wsp. korelacji = 0,49, przy odległości 340 km) i Alpami (wsp. korelacji = 0,36, przy odległości 780 km) jest znacznie silniejsza. Wskaźniki te nie pozostają stabilne w całym analizowanym czasie (1794–2004). Czasowa zmienność synchroniczności w okresie określano z zastosowaniem korelacji konsekwentnej dla 31-letniego ruchomego przedziału. Podobnie jak w przypadku innych analiz największe podobieństwo z Tatrami wykazują Sudety. Obie chronologie posiadają istotną statystycznie korelację w niemal całym badanym okresie. Wyjątkiem jest przełom XVIII i XIX wieku oraz koniec XIX wieku. Warty podkreślenia jest duże (największe ze wszystkich analizowanych chronologii i okresów) podobieństwo chronologii sudeckiej i tatrzańskiej dla drugiej połowy XX wieku. Synchroniczność ta wskazuje na oddziaływanie wspólnego czynnika kontrolującego produkcję przyrostów. Odpowiedź na pytanie czy jest to zapis ocieplenia czy zwiększenia zanieczyszczeń wymaga dalszych badań. Chronologia z Karpat Wschodnich, podobnie jak wszystkie, wykazuje niską korelację z Tatrami na przełomie XVIII i XIX wieku. W późniejszym okresie podobieństwo jest duże z wyraźnym załamaniem w drugiej połowie XIX w. Od końca XIX wieku korelacja z Tatrami ponownie osiąga wartości istotne statystycznie i w XX w. jej przebieg jest analogiczny do wyników korelacji Tatry–Sudety. Pomimo stosunkowo dużej całościowej korelacji chronologii alpejskiej z tatrzańską (wsp. korelacji = 0,36) niemal dla całego badanego okresu korelacja krocząca jest niska i nie osiąga progu istotności statystycznej. Wyjątkiem jest okres na początku XIX w. kiedy to chronologie z Sudeców, Karpat Wschodnich, Alp i Tatr wykazują największe wzajemne podobieństwo. Jest to koniec MEL, kiedy to wystąpiło minimum Daltona i erupcja wulkanu Tambora. Koincydencja tych czynników zewnętrznych mogła, poprzez wymuszenie synchronicznych redukcji szerokości przyrostów czasowo upodobnić przebieg wszystkich czterech chronologii. Wyjątkiem pozostaje chronologia z Karpat Południowych, która dla całego badanego okresu nie wykazuje istotnego statystycznie podobieństwa do Tatr.

Wnioski

1. Chronologia świerkowa z górnej granicy lasu w Tatrach charakteryzuje się wyrazistym sygnałem klimatycznym. W przyrostach tych drzew zapisuje się temperatura dwóch najcieplejszych w tym regionie miesięcy, czerwca i lipca.

2. Silna telekoneksja z pozostałymi stanowiskami z najbliższego otoczenia (Sudety, Karpaty Wschonie) wskazuje, że chronologie te stanowią dobre źródło informacji do rekonstrukcji klimatu Europy Centralnej.

3. Korelacja konsekwentna między stanowiskami jest zmienna w czasie. Najstabilniejszy w czasie jest związek chronologii tatrzańskich z dwoma najbliższymi: Sudety, Karpaty Wschodnie. Zmienność w czasie telekoneksji

sygnalizuje na istotność innych niż wskazane globalne zjawiska klimatycznych i wymaga dalszych badań nad wpływem lokalnych czynników, kontrolujących wzrost świerczyn w ekotonie górnej granicy lasu.

Podziękowania

Autorzy gorąco dziękują dr Ulfowi Beungen (Swiss Federal Research Institute WSL) za udostępnienie danych dotyczących szerokości przyrostów świerków z górnej granicy lasu z 24 stanowisk w Alpach.

Badania były finansowane z projektu badawczego MNiSW N N305 155737 *Drzewa jako archiwum izotopowe klimatu i wpływu człowieka na środowisko dla obszarów górskich Europy Środkowej*.

Tree-ring records of mountain environment changes in Tatra and other mountain regions in Central Europe

Annually resolved tree-ring width measurements are widely used to reconstruct past variations in local- to hemispheric-scale temperatures. Those proxies are generally derived from trees located at high elevations. For Central Europe, multi-centennial tree-ring records and network analyses are predominantly derived from the Alps, whereas only few data are available from the Giant Mts. and the Carpathian arc. Some other studies have analyzed the growth/climate response at the local-scale however, studies considering the entire region mountain system are broadly missing. Here we (i) developed a tree-ring width (TRW) network of ten high-elevation spruce (*Picea abies* L. Karst) site chronologies for all major mountain regions in Central Europe, (ii) detailed its growth/climate response, (iii) analyzed spatial correlation as a function of time.

The study revealed that chronology from Tatra is characterized by a high internal signal strength and a high response to summer temperatures. The similar are chronologies from Giant Mts., Alps and Eastern Carpathians. The chronology from Southern Carpathians shows a reduced internal signal strength and a reduced response to summer temperatures. The chronologies from Giant Mts., Alps and Eastern Carpathians revealed changing in time, but mostly significant correlation with chronology from Tatra. The beginning of 19th century was the period of the highest synchronicity between all four chronologies. The external climatic factors as LIA, Dalton minimum and Tambora eruption influenced tree growth in the global scale and resulted in this similarity.

Literatura

Bednarz Z., Trepinska J., 1992. Climatic conditions of 1815 and 1816 from tree-ring analysis in the Tatra mountains. [w:] Harington CR (red.). The year without a summer? World climate in 1816, Ottawa, Canadian Museum of Nature: 418–421.

- Bednarz Z., 1984. The comparison of dendroclimatological reconstructions of summer temperatures from the Alps and Tatra Mountains from 1741–1965. *Dendrochronologia* 2: 63–72.
- Bradley R.S., Jones P.D., 1992. When was the „Little Ice Age“? Proceedings of the International Symposium on the Little Ice Age Climate. Department of Geography, Tokyo Metropolitan University, 1992: 1–4.
- Briffa K.R., Osborn T.J., Schweingruber F.H., Jones P.D., Shiyatov S.G., Vaganov E.A., 2002. Tree-ring width and density around the Northern Hemisphere: Part 1, local and regional climate signals. *The Holocene*, 12: 737–757.
- Briffa T., Osborn J., Schweingruber F.H., 2004. Large-scale temperature inferences from tree rings: a review. *Global and Planetary Change*, 40: 11–26.
- Briffa K.R., Jones P.D., Schweingruber F.H., Osborn T.J., 1998. „Influence of volcanic eruptions on Northern Hemisphere summer temperature over 600 years“, *Nature* 393: 450–455.
- Büntgen U., David F.C., Kaczka R.J., Verstege A., Zwi-jacz-Kozica T. & Esper J., 2007. Growth/climate response of a multi-species tree-ring network in the Western Carpathian Tatra Mountains, Poland and Slovakia, *Tree Physiology* 27: 689–702.
- Bytnerowicz A., Godzik B., Grodzińska K., Frączek W., Musselman R., Manning W., Badea O., Popescu F., and Fleischer P., 2004. Ambient ozone in forests of the Central and Eastern European Mountains. *Environmental Pollution*, 130, 1: 5–16.
- Frank D., Esper J., 2005. Characterization and climate response patterns of a high-elevation, multi-species tree-ring network in the European Alps, *Dendrochronologia* 22, 2: 107–121.
- Fritts H.C., 1976, *Tree rings and climate*. London, Academic Press, 567 s.
- Grodzińska K., Szrek-Lukaszewska G., 1997. Polish mountain forests: past, present and future, *Environmental Pollution*, 98, 3: 369–374.
- Kaczka R.J., 2004. Dendrochronologiczny zapis zmian klimatu Tatr od schyłku małej epoki lodowej (na przykładzie Doliny Gąsienicowej). [w:] Kotarba A. (red.), *Rola małej epoki lodowej w przekształcaniu środowiska przyrodniczego Tatr*, *Prace Geograficzne*, 197: 87–113.
- Kaczka R.J., Büntgen U., 2006. Spatial autocorrelation and growth/climate response of a high elevation spruce network along the Carpathian arc., „TRACE“, 5: 103–112.
- Kotarba A., 2004. Zdarzenia geomorfologiczne w Tatrach Wysokich podczas małej epoki lodowej, [w:] Kotarba A. (red.), *Rola małej epoki lodowej w przekształcaniu środowiska przyrodniczego Tatr*, *Prace Geograficzne*, 197: 9–56.
- Krapiec M., Zielski A., 2004. *Dendrochronologia*. Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN, 328 s.
- Mitchell T.D., Jones P.D., 2005. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids Int, *J. Climatology*, 25, 693–712, Doi: 10.1002/joc.1181.
- Sander C., Eckstein D., Kyncl J., Dobry J., 1995. The growth of spruce (*Picea abies* (L. Karst.) in the Krkonosel – (Giant) Mts. as indicated by ring width and wood density, *Ann. Sci. Forest*, 52: 401–410.
- Schweingruber F.H., 1996. *Tree rings and environment – dendrochronology*. Bern, Haupt, 609 s.
- Szychowska-Krapiec E., 1998. Spruce chronology from Mt. Pilsko area (Zywiec Beskid Range) 1641–1995 AD. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Earth Sciences*, 46: 75–86.
- Wagner S., Zorita E., 2005. The influence of volcanic, solar and CO₂ forcing on the temperatures in the Dalton Minimum (1790–1830): a model study. *Climate Dynamics* (2005), 25: 205–218.
- Wilson R., D'Arrigo R., Buckley B., Büntgen U., Esper J., Frank D., Luckman B., Payette S., Vose R., Youngblut D., 2007. A matter of divergence: Tracking recent warming at hemispheric scales using tree ring data, *J. Geophys. Res.*, 112, D17103, doi:10.1029/2006JD008318.