

Zróznicowanie sygnału klimatycznego w przyrostach sosny zwyczajnej *Pinus sylvestris* L. z lasów klasy *Erico-Pinetea* w Tatrach

Łukasz Brzęk, Ryszard J. Kaczka, Barbara Czajka

Abstrakt. Dla oceny charakteru i siły związku wzrostu sosny zwyczajnej *Pinus sylvestris* z warunkami klimatycznymi w Tatrach przeprowadzono badania na sześciu stanowiskach. Wszystkie one reprezentują las sosnowy z klasy *Erico-Pinetea* – niewielkie zadrzewienia zlokalizowane na kulminacjach skałek węglanowych. Opracowano sześć stanowiskowych chronologii rezydualnych, które zestawiono z danymi klimatycznymi dotyczącymi temperatury, opadów, indeksu intensywności suszy Palmera oraz prężności pary wodnej. Wszystkie chronologie korelują z prężnością pary wodnej dla okresu letniego i indeksem Palmera dla okresu styczeń–marzec. Zależność szerokości przyrostów od temperatury jest bardzo zmienna między stanowiskami, a opadów – jest najczęściej nieistotna statystycznie. Rezultaty tych analiz, podobnie jak analizy skupień metodą Warda wskazują, że mimo podobieństwa siedlisk sosen w Tatrach ich wzrost jest bardzo indywidualny.

Słowa kluczowe: Karpaty Zachodnie, dendroklimatologia

Abstract. Complex climate/growth response of Scots pine *Pinus sylvestris* L. in the *Erico-Pinetea* forests in the Tatra Mountains. To assess the character and strength of the response of *Pinus sylvestris* to climate in the Tatras six sites were investigated. All of them represent the *Erico-Pinetea* forest – small patches of trees growing on the dry cliffs. The site residual chronologies were computed and compared with temperature, precipitation, Palmer's index, and vapour pressure. All sites reveal significant correlation with vapour pressure during summer and Palmer index in the end of the winter. The response to temperature is complex, whereas the correlation with precipitation is generally weak. The results of climate/growth response and Ward's hierarchical clustering shows very complex behaviour of investigated species although the ecological characteristics of all sites in the Tatras are very similar.

Key words: Western Carpathians, dendroclimatology

Wstęp

Naturalne lasy sosnowe *Erico-Pinion* (Perzanowska 2010) uznawane przez wielu badaczy za relikтовую pozostałość postglacjalnej sukcesji (Zajączkowski 1936, 1949; Zarzycki 1982; Holeksa 1992; Obidowicz 1996; Zwijacz-Kozica 1998). Zajmują niewielkie enklawy w Karpatach Zachodnich, m.in. w: Pieninach, Tatrach, Górach Chochozańskich, Małej Fatrze i Górach

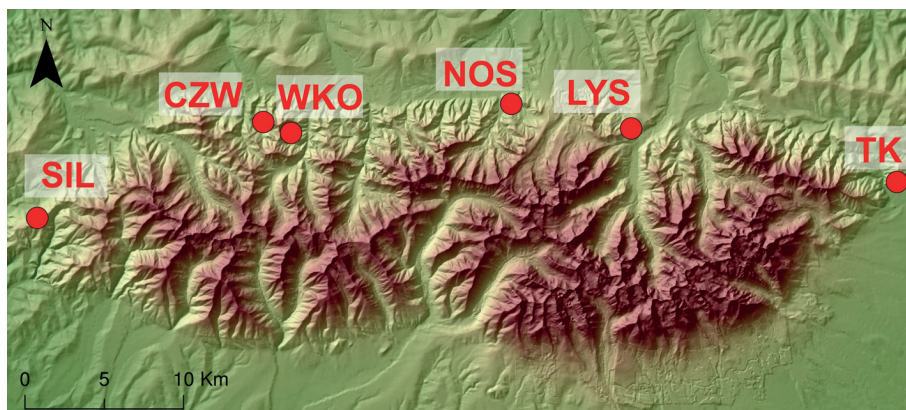
Strażowskich. Ich obecność w tych pasmach związana jest z węglanowym podłożem (wapień, dolomit), południową ekspozycją i niewielkimi (ok. 1000–1200 m n.p.m.) wysokościami (Łysek 1974). W paśmie Tatr można je spotkać w reglowej części, wzdłuż głównej osi masywu.

Do tej pory badania nad wpływem czynników klimatycznych na przyrosty roczne drzew w Karpatach Zachodnich prowadzone były głównie dla świerka (Bednarz 1984; Szychowska-Krapiec 1998; Kaczka i Buntgen 2006; Buntgen i in. 2007), limby (Bednarz 1984) i jodły (Feliksik 1987, 1993). Sosna zwyczajna jest gatunkiem rzadziej niż świerk występującym w górach oraz mniej wrażliwym na elementy klimatu niż limba. Badania porównawcze dotyczące wrażliwości klimatycznej sosen były prowadzone w Karpatach i Sudetach (Majewski 2001; Wilczyński i Skrzyżzewski 2003; Wilczyński 2005). Badania dotyczące wrażliwości klimatycznej sosen tatrzańskich przeprowadzone były dla drzew rosnących w polskiej części Tatr (Kaczka i in. 2012). Przeprowadzono także badania dotyczące odmiennych cech morfologicznych populacji reliktowych sośnin i dynamiki ich wzrostu (Zajączkowski 1949, Urbaniak i in. 2008). Postawiono tezę o dwóch typach *Pinus sylvestris* tworzących populacje na Łysej Skale i w Wielkich Koryciskach. Tę pierwszą reprezentują sosny typu *polonica*, a drugą – typu *meridialis*. Ten ostatni wywodzi się z sosen z południa Europy, a typ *polonica* jest pozostałością ostatniego interglacjalu z najbliższej położonego przyczółka na przedpolu Karpat (Staszkiwicz 1961, 1993; Urbaniak i in. 2008).

Celem badań było określenie głównych czynników klimatycznych kontrolujących wzrost sosny pospolitej w lasach klasy *Erico-Pinetea* z Tatr ze szczególnym uwzględnieniem zmian przestrzennych.

Material i metody

Badania dotyczyły sosen rosnących na sześciu stanowiskach (ryc. 1) położonych w Tatrach polskich i słowackich (tab. 1). Są one zlokalizowane na stromych i częściowo skalistych stokach dolin (TK, SIL) lub urwistych wierzchołkach regli (LYS, NOS, WKO, CZW). Z każdego stanowiska pobrano za pomocą świdra przyrostowego Presslera minimum 50 rdzeni, które przygotowano według standardowych procedur dendrochronologicznych. Pomiary szerokości przyrostów wykonano przy pomocy programów CooRecorder firmy Cybis Elektronik & Data AB (www.cybis.se). Poprawność pomiarów sprawdzono w programie COFECHA (Grissino-Mayer 2001), a chronologie rezydualne wykonano w programie ARSTAN, wykorzystując indeksację za pomocą algorytmu Reinscha dla wartości parametru $s = 150$ (Cook 1987). Przygotowano sześć takich chronologii (minimalna replikacja wynosiła 5 prób), z których najstarsza osiągnęła długość 291, a najmłodsza 79 lat (tab. 1). Następnie sprawdzono korelacje stanowiskowych chronologii rezydualnych ze średnią miesięczną temperaturą powietrza, miesięczną sumą opadów oraz prężnością pary wodnej (ilość wilgoci dostępnej w powietrzu). Uwzględniono także współczynnik intensywności suszy Palmera PDSI (Palmer 1965). W analizach wpływu klimatu na przyrost radialny sosny zwyczajnej wykorzystano przestrzennie uśrednione dane gridowe CRU TS 3.1 (Harris i in. 2013) pozyskane dla okresu 1932–2008. W celu określenia podobieństw reakcji między analizowanymi danymi wykorzystano analizę skupień metodą Warda.



Ryc. 1. Lokalizacja stanowisk badawczych w Tatrach
Fig. 1. Location of sampling sites in the Tatra Mountains

Tab. 1. Charakterystyka stanowisk badawczych
Table 1. Characteristic of study sites

Nazwa	Położenie (szczyt – dolina)	Kraj	Wysokość n.p.m.	Ekspozycja	Długość chronologii
TK	Palenica Lendacka (Tatrzańska Kotlina) – Dol. Kotliny	Słowacja	900	SW	1759–2013
LYS	Łysa Skalka – Dol. Białki	Polska	1100	SE	1717–2008
NOS	Nosal – Dol. Bystrej	Polska	1200	S	1932–2011
WKO	Wielkie Koryciska – Dol. Chochołowaka	Polska	1050	S	1883–2009
CZW	Czaplowy Wierch – Dol. Juraniowa	Słowacja	1050	S	1829–2013
SIL	Golica Huciańska – Dol. Sucha Sielnicka	Słowacja	1000	SE	1816–2013

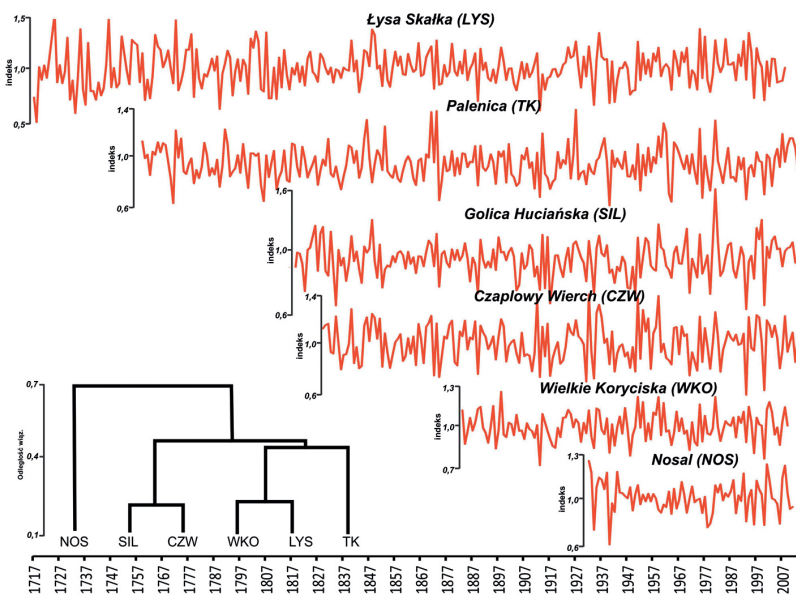
Wyniki

Sześć badanych chronologii sosny zwyczajnej, pomimo sporych odległości między stanowiskami, wykazuje duże podobieństwo. Jest to widoczne zarówno w ich przebiegu (ryc. 2), jak i w wartościach współczynników korelacji (tab. 2). Waha się on od 0,77 dla Wielkich Korycisk (WKO) i Czaplowego Wierchu (CZW), a więc stanowisk położonych najbliżej siebie (około 2,5 km w linii prostej), do 0,34 dla Nosala (NOS) i Doliny Suchej Sielnickiej (SIL) (oddalonych o 30 km). Należy zaznaczyć, że populacja sosen na szczycie Nosala jest najmłodsza (tab. 1), a korelacja utworzonej dla niej chronologii z resztą chronologii stanowiskowych jest

najniższa (od 0,39 do 0,53). Chronologie z najbardziej skrajnych stanowisk SIL i TK (około 53 km) wykazują nieco większą zgodność w przebiegu niż TK z najbliższym sąsiednim stanowiskiem na Łysych Skałkach (odległość około 15 km) – wartości współczynnika korelacji wynoszą odpowiednio 0,61 i 0,55. Duże zróżnicowanie podobieństwa pomiędzy chronologiami stanowiskowymi badanych populacji dobrze obrazuje analiza skupień metodą Warda (ryc. 2). Chronologie z WKO i CZW chociaż najlepiej korelują ze sobą w analizie skupień, znajdują się w innych grupach. Analiza Warda grupuje stanowiska ściślej pod względem geograficznym, ale i tu stanowisko NOS wyróżnia się na tle wszystkich populacji.

Tab. 2. Podobieństwa chronologii wyrażone wartościami współczynnika korelacji dla okresu 1932–2008
Table 2. The matrix of coefficient correlation between site chronologies for the period of 1932–2008

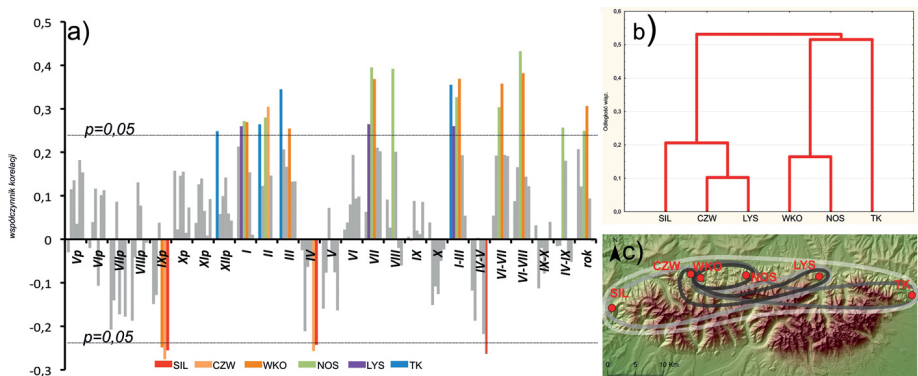
	LYS	WKO	NOS	TK	CZW	SIL
LYS		0,74	0,52	0,55	0,75	0,63
WKO			0,53	0,60	0,77	0,57
NOS				0,39	0,50	0,34
TK					0,58	0,61
CZW						0,74
SIL						



Ryc. 2. Chronologie standardowe reprezentujące sześć stanowisk sosen zwyczajnych w Tatrach oraz analiza ich podobieństwa przeprowadzona metodą skupień Warda

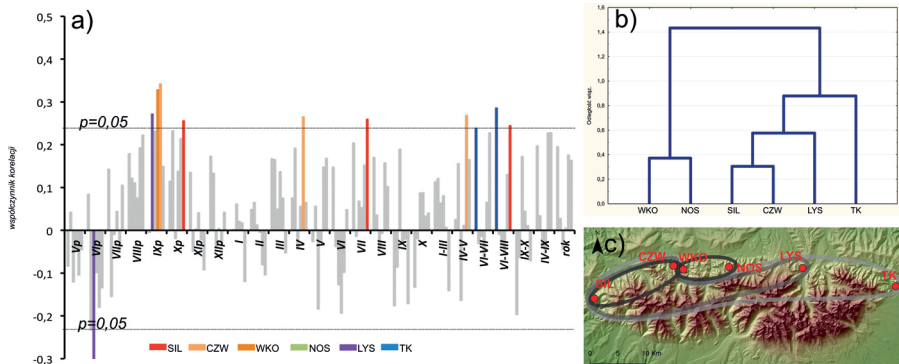
Fig. 2. Standard chronologies for six investigated pine sites in the Tatras and Ward's hierarchical clustering

Sześć analizowanych drzewostanów sosnowych zajmujących siedliska o podobnych cechach geobotanicznych wykazuje duże zróżnicowanie zarówno jeśli chodzi o wrażliwość na badane elementy klimatu, jak i przestrzenne zróżnicowanie tej cechy. Zestawienie chronologii rezydualnych ze średnimi miesięcznymi temperaturami (ryc. 3a), pozwala zidentyfikować pozytywną i istotną statystycznie korelację z termiką okresu letniego (czerwiec–sierpień) dla WKO i NOS oraz negatywną korelację z temperaturą kwietnia i okresu kwiecień–maj dla sosen z SIL i CZW. Poza dwoma najbardziej zachodnimi stanowiskami (SIL, CZW) wszystkie pozostałe populacje pozytywnie korelują z temperaturą okresu styczeń–marzec. Także temperatury wrześnie poprzedniego roku zaznaczają się negatywnym wpływem na szerokości przyrostów sosen na stanowiskach WKO, CZW i SIL. Na podstawie analizy skupień możliwe jest wydzielenie dwóch grup (ryc. 3). W pierwszej znajdują się CZW, LYS i SIL, w drugiej WKO, NOS i TK (kolejność wg podobieństwa). Co istotne, stanowiska leżące najbliżej siebie, czyli CZW i WKO, których chronologie rezydualne najlepiej korelowały ze sobą znalazły się w osobnych grupach. Reakcja badanych populacji sosny na ten element klimatu jest bardzo zróżnicowana.



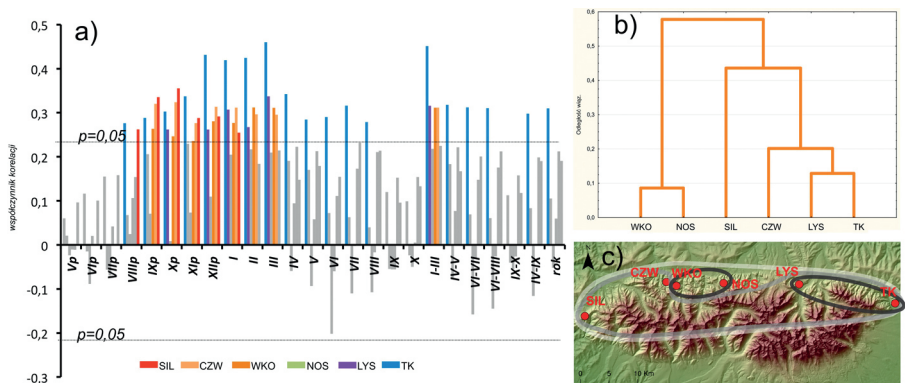
Ryc. 3. Korelacja szerokości przyrostów rocznych (chronologie rezydualne) i średniej miesięcznej temperatury powietrza (a) oraz analiza wyników metodą skupień Warda (b), wraz z jej przestrzennym obrazem (c) *Fig. 3.* Correlation coefficient between tree-ring width (residual chronologies) and mean monthly temperature (a) and Ward's hierarchical clustering with the geographical visualization (c)

Wpływ opadów jest podobnie złożony, ale charakteryzuje się mniejszym znaczeniem (ryc. 4a). Pozytywne oddziaływanie opadów okresu czerwiec–sierpień zaznacza się dla chronologii ze stanowisk TK i SIL. Opady okresu kwiecień–maj są istotne statystycznie jedynie dla stanowiska CZW. Dla stanowisk LYS, WKO i CZW zaznaczył się wpływ opadów wrześnie poprzedniego roku, a na LYS również negatywna korelacja z opadami czerwca poprzedniego roku. Wyniki analizy skupień oraz przestrzenny rozkład podobieństwa wpływu opadów między stanowiskami (ryc. 4) rysuje się nieco inaczej niż dla relacji z temperaturą powietrza. W grupie pierwszej znalazły się stanowiska WKO i NOS, pozostałe stworzą osobny klastery. Ich kolejność jest jednak inna: SIL, CZW, LYS oraz TK, czyli stanowisko które znajdowało się uprzednio w drugim zbiorze (porównaj ryc. 3c).



Ryc. 4. Korelacja szerokości przyrостów rocznych (chronologie rezydualne) i miesięcznych sum opadów (a) oraz analiza wyników metodą skupień Warda (b), wraz z jej przestrzennym obrazem (c)
Fig. 4. Correlation coefficient between tree-ring width (residual chronologies) and monthly sum of precipitation (a) and Ward's hierarchical clustering (b) with its geographical visualisation (c)

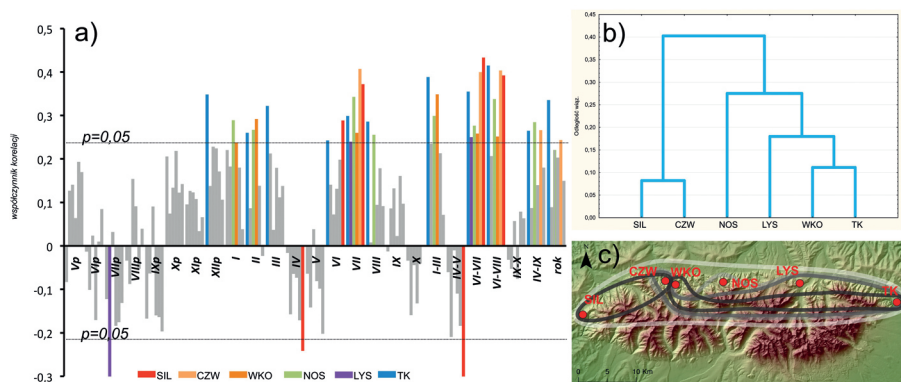
Wpływ wskaźnika intensywności suszy Palmera zaznacza się we wszystkich przebadanych populacjach sosen z wyjątkiem NOS (ryc. 5a). Stanowiskiem najlepiej korelującym z tym parametrem jest populacja położona na stoku Palenicy Lendackiej (TK). Wykazuje ona pozytywną korelację zarówno z okresem lata (czerwiec–sierpień), jak i wiosny (kwiecień–maj), podczas gdy sosny z pozostałych stanowisk wykazują istotną reakcję dla PDSI w okresie styczeń–marzec (poza NOS i SIL) oraz pozostałymi miesiącami zimowymi (poprzedni grudzień–bieżący luty; poza NOS). Wynika z tego, że dla pięciu z sześciu stanowisk istotny jest wpływ PDSI w okresie zimy, co wskazuje na wrażliwość badanych sosen na niedobór wody na początku okresu wegetacyjnego. Wyniki analizy skupień (ryc. 5b) i ich przestrzenna wizualizacja (ryc. 5c)



Ryc. 5. Korelacja szerokości przyrостów rocznych (chronologie rezydualne) i indeksu Palmera PDSI (a) oraz analiza wyników metodą skupień Warda (b), wraz z jej przestrzennym obrazem (c)
Fig. 5. Correlation coefficient between tree-ring width (residual chronologies) and Palmer's index PDSI (a) and Ward's hierarchical clustering (b) with its geographical visualisation (c)

wskazuje na podobne grupy, gdzie WKO i NOS tworzą jedno skupienie, a reszta stanowisk drugie. Jednak tym razem w grupie drugiej podobieństwo między stanowiskami jest przeciwne do wyników poprzedniej analizy. Kolejność jest więc następująca: LYS i TK tworzą bardzo podobną parę, do której dołączone jest CZW i w ostatniej kolejności SIL.

Prężność pary wodnej jest jedynym z badanych elementów klimatu, który wyraźnie wpływa na wzrost drzew na wszystkich sześciu stanowiskach, a sygnał jest synchroniczny dla wszystkich chronologii (ryc. 6a). Ilość pary wodnej w okresie czerwiec–sierpień, a szczególnie w lipcu, wykazuje duże znaczenie dla wzrostu drzew (wartość współczynnika korelacji od 0,25 dla LYS do 0,43 dla SIL). W okresie kwiecień–maj negatywną korelację odnotowano dla drzew ze stanowiska SIL. Sosny rosnące w warunkach siedliskowych charakteryzowanych jako zbliżone do kserotermicznych, nie wykazały istotnej zależności przyrostów rocznych od opadów. Jednak na wszystkich stanowiskach zaznaczył się wpływ prężności pary wodnej. Może to sugerować, że głównym źródłem zasilania w wodę, dla badanych drzew są opady poziome – kondensacja pary wodnej na ściółce oraz samych roślinach. Wyniki analizy skupień (ryc. 6b) i przestrzenny jej obraz (ryc. 6c) okazują się znacząco odmienne od poprzednich. Pierwszy zbiór tworzą dwa najbardziej zachodnie stanowiska, czyli SIL i CZW. W skład zbioru drugiego wchodzi TK, WKO, LYS i NOS.



Ryc. 6. Korelacja szerokości przyrostów rocznych (chronologie rezydualne) i prężności pary wodnej (a) oraz analiza wyników metodą skupień Warda (b), wraz z jej przestrzennym obrazem (c)

Fig. 6. Correlation coefficient between tree-ring width (residual chronologies) and vapour pressure (a) and Ward's hierarchical clustering (b) with its geographical visualisation (c)

Uzyskane wyniki zdają się potwierdzać odrębność reliktowych populacji sosen tatrzańskich na gruncie analiz dendroklimatycznych. Uzupełniając tym samym badania określające różnice w budowie drzew i dynamice ich wzrostu (Zajączkowski 1949; Urbaniak i in. 2008). Duża zmienność odpowiedzi na klimat między analizowanymi stanowiskami górskich sosen przemawia na korzyść tezy mówiącej o możliwości różnego pochodzenia tych drzew zasiedlających Tatry w okresie postglacjalnej sukcesji. Trudo jednak jednoznacznie wyróżnić podział na dwa odrębne typy *polonica* i *meridialis* (Staszkiwicz 1993).

Wnioski

- Badane stanowiska sosny zwyczajnej w Tatrach wykazują zróżnicowaną wrażliwość na wszystkie cztery analizowane elementy klimatu. Największe znaczenie dla ich wzrostu mają czynniki związane z dostępnością wilgoci – prężność pary wodnej oraz indeks suszy Palmera. Nie jest to jednak bezpośredni wpływ opadów atmosferycznych (z wyjątkiem Nosala).
- Długotrwały niedostatek wilgotności, wyrażony indeksem suszy Palmera, wpływa podobnie na pięć z sześciu badanych stanowisk dla okresu styczeń–marzec. Szerokość przyrostów sosen ze wszystkich stanowisk wykazuje pozytywną korelację z prężnością pary wodnej w okresie letnim (czerwiec–sierpień).
- W zależności od stanowiska, temperatura powietrza końca zimy (TK, LYS, NOS, WKO) oraz lata (NOS, WKO) sprzyja wzrostowi promieniowemu badanych sosen. Stanowiska zlokalizowane w zachodniej części badanego terenu nie wykazują związku z temperaturą (SIL, CZW).
- W analizie przestrzennej reakcji drzew na cztery elementy klimatu trudno odnaleźć jednoznaczne geograficzne prawidłowości.

Podziękowania

Badania zostały przeprowadzone dzięki pomocy i życzliwości pracowników Tatrzańskiego Parku Narodowego. Badania były finansowane z Polsko-Szwajcarskiego Programu Badawczego FLORIST „Zagrożenie powodziowe na przedpolu Tatr” (Flood risk on the northern foothills of the Tatra Mountains) PSPB-153/2010. Część danych została zebrana i opracowana w ramach pracy magisterskiej Łukasza Brzeka.

Literatura

- Bednarz Z. 1984. The comparison of dendroclimatological reconstructions of summer temperatures from the Alps and Tatra Mountains from 1741–1965. *Dendrochronologia*, 2: 63–72.
- Buntgen U., Frank C.D., Kaczka R.J., Versteeg A., Zwiacz-Kozica T., Esper J. 2007. Growth responses to climate in a multi – species tree – ring network in the Western Carpathian Tatra Mountains, Poland and Slovakia. *Tree Physiology*, 27: 689–702.
- Cook E.R. 1987. The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bulletin*, 47: 37–59.
- Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H. 2013. Updated high resolution grids of monthly climatic observations—the CRU TS3. 10 Dataset. *International Journal of Climatology*, 34: 623–642.
- Feliksik E. 1987. Wyniki porównań krzywych dendrochronologicznych jodły z wybranych stanowisk w Polsce. *Sylwan*, 131: 49–56.
- Feliksik E. 1993. Teleconnection of the radial growth of fir (*Abies Alba* Mill) within central Europe. *Dendrochronologia*, 11: 171–175.
- Grissino-Mayer H.D. 2001. Evaluating crossdating accuracy: A manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Research*, 57: 205–221.
- Holeksa J. 1992. Rodzime drzewa tatrzańskie. Sosna zwyczajna. *Tatry*, 3: 6–7.

- Kaczka R.J., Brzęk Ł., Czajka B. 2012. Wpływ czynników klimatycznych na wzrost sosny pospolitej w Tatrach Regłowych. *Studia i Materiały CEPL, Rogów*, 30 (1): 84–90.
- Kaczka R.J., Buntgen U. 2007: Spatial autocorrelation and growth/climate response of a high elevation spruce network along the Carpathian arc. *Tracce*, 6: 103–112.
- Łysek S. 1974. Sosna *Pinus sylvestris* L. *Studia Ośrodka Dokumentacji Fizjograficznej PAN*, 3: 87–110.
- Majewski A. 2001. Sygnał klimatyczny w słojach przyrostów rocznych sosny pospolitej (*Pinus sylvestris*) występującej w Karpatach. Praca magisterska, Katedra Klimatologii Leśnej AR, Kraków.
- Obidowicz A. 1996. Połodowcowa historia szaty roślinnej. W: Mirek Z. (red.). *Przyroda Tatrzańskiego Parku Narodowego*. TPN, Zakopane – Kraków: 229–236.
- Palmer W.C., 1965: Meteorological drought. U. S. Dept. of Commerce, Washington, DC Weather Bureau Research PaDer. 45.
- Perzanowska J. 2010. Górskie reliktowe laski sosnowe Erico-Pinion. W: Mróz W. (red.). *Monitoring siedlisk przyrodniczych. Przewodnik metodyczny, GIOŚ, Warszawa, cz. I*: 32–58.
- Staszkievicz J. 1961. Zmienność współczesnych i kopalnych szyszek sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.). *Fragmenta Floristica Geobotanica*, 7: 97–160.
- Staszkievicz J. 1993. Od trzeciorzędu do holocenu. W: Białobok S., Boratyński A., Bugała (red.). *Biologia sosny zwyczajnej*. Wydawnictwo Sorus, Poznań-Kornik: 11–17.
- Szychowska-Krąpiec E. 1998. Spruce Chronology from Mt Pilsko Area. (Żywiec Beskid Range) 1641–1995 AD. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Earth Sciences*, 46 (2): 75–86.
- Urbaniak L., Chudzińska E., Fąferek S. 2008 Differentiation of *Pinus sylvestris* populations of the Tatra Mts. and the Tuchola forest expressed in the needle anatomical traits. *Dendrobiology*, 60: 35–43.
- Wilczyński S., Skrzyżewski J. 2003. Dendrochronology of Scot pine (*Pinus sylvestris*) in the mountains of Poland. *Journal of Forest Science*, 49 (3): 95–103.
- Wilczyński S. 2005. Regiony dendroklimatyczne sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris*) w Karpatach Polskich. *Acta Agraria et Silvustria*, 43: 43–54.
- Zajęzkowski M. 1936. O południowej granicy zasięgu sosny pospolitej w Polsce i o występowaniu reliktywnej sosny w Karpatach polskich. *Prace Roln. – Leśne PAU*, 20.
- Zajęzkowski M. 1949. Studia nad sosną zwyczajną w Tatrach i Pieninach *Prace Roln. – Leśne PAU*, 20.
- Zarzycki K. (red.). 1982 *Przyroda Pienin w obliczu zmian*. *Studia Naturae. Ser. B*: 1–578.
- Zwijacz-Kozica T. 1998. Występowanie sosny zwyczajnej *Pinus sylvestris* L. w Tatrzańskim Parku Narodowym. *Parki Narodowe i Rezerваты Przyrody Białowieża*, 17 (2): 55–68.

Lukasz Brzęk, Ryszard J. Kaczka, Barbara Czajka

Uniwersytet Śląski, Wydział Nauk o Ziemi

lu.brzek@gmail.com

ryszard.kaczka@us.edu.pl

barczajka@wp.pl