

PRACE GEOGRAFICZNE

zeszyt 169, 2022, 69–85

doi: 10.4467/20833113PG.22.016.17117

Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ

Komisja Geograficzna, Polska Akademia Umiejętności

Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego

**REGIONY DENDROKLIMATYCZNE  
MODRZEWIA EUROPEJSKIEGO  
(*LARIX DECIDUA MILL.*) W POLSCE**

*Norbert Szymański* , *Sławomir Wilczyński*

**Dendroclimatic regions of European larch  
(*Larix decidua Mill.*) in Poland**

*Abstract:* The purpose of the study was to determine the dendroclimatic regions in Poland, based on the analysis of the similarity of the annual growth rhythm of trees of 19 European larch populations, which is the reaction of trees to the pressure of the climatic factor. Tree-ring widths were taken as a measure of this reaction. For each population (site), a mean tree-ring chronology was created that covered the period 1957–2016. Its values were converted into incremental indices. Then, 19 indexed chronologies were included in the principal component analysis (PCA) to identify their common features and group them. As a result, three dendroclimatic regions were distinguished, which coincide with the area of lowlands (Pojezierze Południowobałtyckie and Niziny Środkowopolskie), uplands (Wyżyna Krakowsko-Częstochowska and Wyżyna Małopolska) and mountain areas (the Sudetes and the Western Carpathians). To identify climatic elements that had a significant impact on the size of the radial growth of larch in the dendroclimatic regions, the values of the main components (PC1, PC2, PC3) were correlated with the climatic parameters. Analogously, these analyzes were performed for three regional chronologies which were created by averaging the site indexed chronologies for a given region (group). The size of radial increments of all larch populations was found to be positively affected by low temperature and high rainfall in September in the year preceding growth, as well as high temperature in March and May and high rainfall in July in the year of ring formation. In turn, the high temperature in November of the previous year had a positive effect on the growth of larches growing in the lowlands and uplands and

had a negative effect on the growth of larches in the mountains. High temperature and low rainfall in June had a positive effect on the growth of larches from the mountains, compared to those from the lowlands and uplands. Low temperature and high rainfall in October in the previous year and high rainfall in May in the year of ring deposition had a positive effect on the growth of larches in the uplands.

*Keywords:* tree-ring, radial growth, climate-growth relationship, climate sensitivity, dendrochronology

*Zarys treści:* Celem pracy było wyznaczenie regionów dendroklimatycznych na obszarze Polski na podstawie analizy podobieństwa corocznego rytmu przyrostowego drzew 19 populacji modrzewia europejskiego, będącego reakcją przyrostową drzew na presję czynnika klimatycznego. Za miarę tej reakcji przyjęto szerokości tworzonych przez drzewa słoików drewna. Dla każdej populacji stworzono stanowiskową chronologię szerokości słoików obejmującą okres 1957–2016. Jej wartości przeliczono na indeksy przyrostowe. Następnie 19 stanowiskowych chronologii indeksowanych włączono do analizy głównych składowych (PCA) w celu zidentyfikowania ich wspólnych cech i pogrupowania. W rezultacie wyróżniono trzy regiony dendroklimatyczne, które pokrywają się z obszarem nizin (Pojezierzy Południowobałtyckich i Nizin Środkowopolskich), wyżyn (Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej oraz Małopolskiej) oraz gór (Sudetów i Karpat Zachodnich). W celu zidentyfikowania elementów klimatycznych, które miały istotny wpływ na wielkość przyrostów radialnych modrzewi w regionach dendroklimatycznych, skorelowano wartości głównych składowych (PC1, PC2, PC3) z parametrami klimatycznymi. Analogicznie analizy wykonano dla trzech chronologii regionalnych, które powstały poprzez uśrednienie stanowiskowych chronologii indeksowanych z danego regionu (grupy). Stwierdzono, że pozytywny wpływ na wielkość przyrostów radialnych wszystkich populacji modrzewia miała niska temperatura i wysokie opady we wrześniu w roku poprzedzającym przyrost, a także wysoka temperatura marca i maja oraz wysokie opady w lipcu w roku formowania słoika. Z kolei wysoka temperatura listopada poprzedniego roku miała pozytywny wpływ na przyrost modrzewi rosnących na nizinach i wyżynach, natomiast negatywny wpływ na przyrost modrzewi w górach. Pozytywny wpływ na przyrost modrzewi z gór, w przeciwieństwie do tych z nizin i wyżyn, miała wysoka temperatura i niskie opady w czerwcu. Niska zaś temperatura i wysokie opady w październiku w poprzednim roku oraz wysokie opady w maju w roku odkładania słoika korzystnie oddziaływały na przyrost modrzewi na wyżynach.

*Słowa kluczowe:* słoik drewna, przyrost radialny, relacja klimat–przyrost, wrażliwość klimatyczna, dendrochronologia

## Wstęp

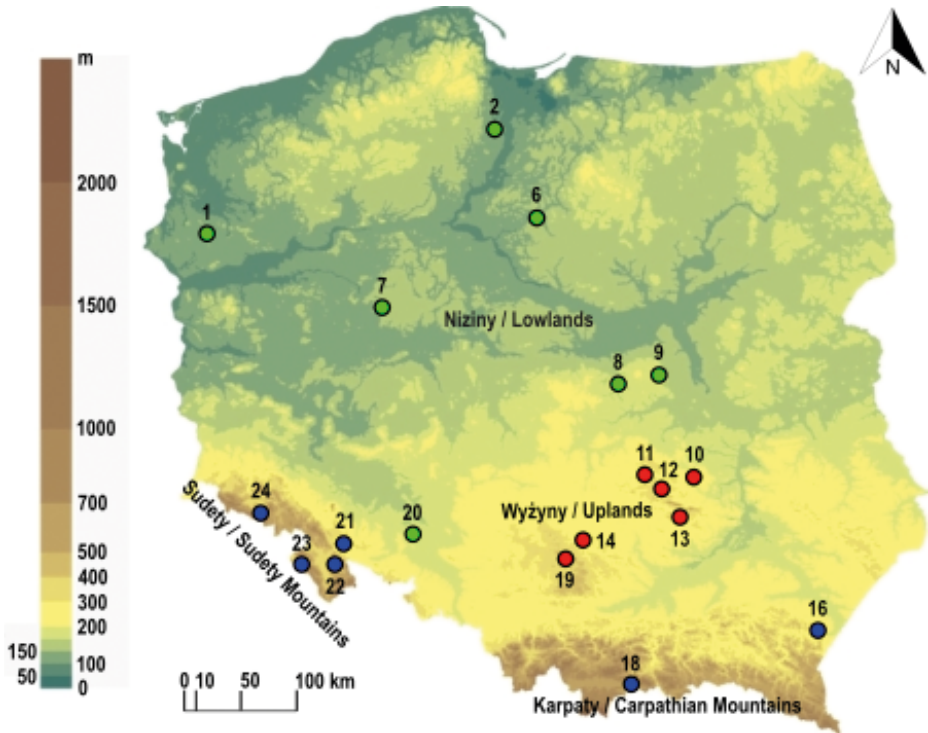
Przy tworzeniu regionalizacji fizycznogeograficznych czy przyrodniczo-leśnych Polski za czynnik przewodni najczęściej przyjmowane jest zróżnicowanie geologiczno-geomorfologiczne oraz klimatyczne, które modyfikuje stosunki wodne i glebowe, co prowadzi do wytworzenia się specyficznych zbiorowisk roślinnych. Regionalizacje te opisują przestrzenną zmienność walorów przyrodniczych do celów planowania

gospodarki przestrzennej oraz leśnej naszego kraju (Kondracki 2000; Zielony, Kliczkowska 2010; Solon i in. 2018). Regionalizacje klimatyczne pokazują przestrzenną zmienność kompleksu elementów klimatycznych (Romer 1949), czy też zmienność częstości występowania różnych typów pogody (Woś 1993). To właśnie warunki klimatyczne są najważniejszym czynnikiem, obok warunków glebowych, determinującym rozwój i wzrost drzew (Fritts 1976). Połączenie aspektu biologicznego środowiska przyrodniczego, jakim są procesy fizjologiczne drzew, znajdujące odbicie w wielkości tworzonych przez nie słoju drewna oraz aspektu fizycznego, jakim są zmieniające się z roku na rok warunki meteorologiczne, pozwala na wyznaczenie obszarów jednorodnych pod względem reakcji przyrostowych drzew danego gatunku, tzw. regionów dendroklimatycznych. Drzewo jest zatem żywą stacją meteorologiczną rejestrującą w sposób ciągły w trakcie swojego życia warunki meteorologiczne panujące w miejscu jego wzrostu. W Polsce takie regiony wyznaczono dla sosny zwyczajnej (Wilczyński i in. 2001; Wilczyński 2005), świerka pospolitego (Koprowski i Zielski 2006; Koprowski 2012b; Wilczyński, Szymański 2014) i daglezi zielonej (Feliksik, Wilczyński 2004, 2007). Identyfikowanie regionów dendroklimatycznych dla różnych gatunków drzew może być pomocne przy analizowaniu i prognozowaniu zagrożeń dla drzew związanych ze zmianami klimatycznymi, a także przy planowaniu gospodarki leśnej w celu utrzymania optymalnego potencjału produkcyjnego drzewostanów w przyszłości. Wyniki dotychczasowych badań dotyczących relacji klimat–przyrost drewna modrzewi rosnących na obszarze Polski wskazują na występowanie regionalnego zróżnicowania rytmu przyrostowego tego gatunku uwarunkowanego specyficznymi cechami klimatu (Danek 2009; Wilczyński 2011; Koprowski 2012a; Danek i in. 2017, 2018, 2021; Szymański, Wilczyński 2021). Wyniki tych badań spowodowały, że badaniami objęto niemal cały obszar Polski w celu wyznaczenia regionów dendroklimatycznych dla tego cennego gospodarczo gatunku drzewa.

Celem pracy było wyznaczenie regionów dendroklimatycznych na obszarze Polski na podstawie cech przyrostowych modrzewia europejskiego oraz zidentyfikowanie elementów klimatycznych, które miały istotny wpływ na wielkość przyrostów drewna modrzewi w różnych częściach Polski.

## Metody

Przedmiotem badań były modrzewie w wieku powyżej 100 lat rosnące w 19 drzewostanach rozlokowanych w różnych częściach Polski (ryc. 1). Drzewostany reprezentowały wszystkie regiony klimatyczne, oprócz regionu Klimatów Pojeziernych (Romer 1949), oraz położone były na wysokości od 60 do 650 m n.p.m., więc



Ryc. 1. Położenie badanych drzewostanów modrzewia europejskiego (punkty) w Polsce. Kolorem zielonym oznaczono populacje modrzewia z nizin, czerwonym – z wyżyn, niebieskim – z gór. Numerację drzewostanów przyjęto z Ogólnopolskiego Doświadczenia Proweniencyjnego 1967: 1 – Myślibórz, 2 – Pelplin, 6 – Tomkowo, 7 – Czarniejewo, 8 – Rawa Mazowiecka, 9 – Grójec, 10 – Marcule, 11 – Skarżysko, 12 – Bliżyn, 13 – Chełmowa Góra, 14 – Moskorzew, 16 – Hołubla, 18 – Krościenko nad Dunajcem, 19 – Pilica, 20 – Prószków, 21 – Henryków, 22 – Kłodzko, 23 – Szczytna, 24 – Kowary (Kocięcki 1977)

Fig. 1. Location of the studied stands of European larch (dots) in Poland. The green colour marks larch populations from the lowlands, red – from the uplands and blue – from the mountains. The numbering of stands was adopted from the National Provenance Experiment 1967: 1 – Myślibórz, 2 – Pelplin, 6 – Tomkowo, 7 – Czarniejewo, 8 – Rawa Mazowiecka, 9 – Grójec, 10 – Marcule, 11 – Skarżysko, 12 – Bliżyn, 13 – Chełmowa Góra, 14 – Moskorzew, 16 – Hołubla, 18 – Krościenko nad Dunajcem, 19 – Pilica, 20 – Prószków, 21 – Henryków, 22 – Kłodzko, 23 – Szczytna, 24 – Kowary (Kocięcki 1977)

Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem podkładu mapowego z Wikimedia Commons (2022).

Source: own work based on a map layer from Wikimedia Commons (2022).

reprezentowały prawie połowę zasięgu wysokościowego tego gatunku. Drzewostany te stanowiły źródło nasion, z których w 1967 r. założono Ogólnopolskie Doświadczenie Proweniencyjne (Kocięcki 1977). Ich charakterystyka jest zawarta w naszej wcześniejszej pracy (Szymański, Wilczyński 2021).

W poszczególnych drzewostanach pobrano świdrem przyrostowym po 2 wywierty z 20 modrzewi na wysokości 1,3 m pnia, wzdłuż osi wschód–zachód. Wybrano drzewa dorodne (najlepszej jakości hodowlanej), należące do warstwy drzew panujących, charakteryzujące się równomiernie rozwiniętą koroną. Wywierty oszlifowano i zeskanowano skanerem optycznym z rozdzielczością 2400 dpi. Na obrazach graficznych wywiertów pomierzono szerokości słoików rocznych z dokładnością do 0,01 mm za pomocą programu komputerowego CooRecorder 7.8. Poprawność datowania słoików sprawdzono za pomocą programu COFECHA (Holmes 1986). Zidentyfikowano brakujące słoiki i podwójne („falszywe”), których pomiary poprawiono. W każdym roku uśredniono szerokości słoików 20 drzew i stworzono tzw. stanowiskową chronologię reprezentującą coroczne zmiany wielkości średnich szerokości słoików każdej populacji cząstkowej modrzewi, obejmującą wspólny dla wszystkich drzew okres 1957–2016. Z analiz wyłączono okres młodociany drzew, w którym silna konkurencja między nimi powoduje ich chaotyczny przyrost radialny, zakłócający sygnał klimatyczny zapisywany w słoikach. Wartości szerokości słoików chronologii stanowiskowych indeksowano, obliczając indeksy przyrostowe, tzw. czułości roczne ( $c_i$ ) według formuły:

$$c_i = 2 \cdot (x_i - x_{i-1}) \cdot (x_i + x_{i-1})^{-1}$$

gdzie:  $x_i$  – szerokość słoika w roku  $i$ ,  $x_{i-1}$  – szerokość słoika w roku poprzednim.

W ten sposób zredukowano zmienność długookresową chronologii szerokości słoików spowodowaną przez czynniki nieklimatyczne i uwypuklono ich coroczną zmienność, kształtowaną głównie przez zmieniające się z roku na rok warunki meteorologiczne (Fritts 1976). Łącznie skonstruowano 19 indeksowanych chronologii stanowiskowych, obejmujących wspólny okres 1958–2016. Dla każdej chronologii obliczono podstawowe wskaźniki dendroklimatyczne, aby ocenić ich jakość i przydatność do badań: średni współczynnik korelacji między osobniczymi chronologiami ( $r_{bt}$ ), średni współczynnik korelacji osobniczych chronologii z chronologią stanowiskową ( $r_{wm}$ ), wskaźnik reprezentatywności (EPS) (Wigley i in. 1984), wskaźnik siły sygnału klimatycznego (SNR), (De Witt, Ames 1978). Dla każdej chronologii obliczono również średnią czułość (MS), charakteryzującą przeciętną dynamikę zmian wielkości słoików z roku na rok, czyli tzw. przeciętną wrażliwość drzew na presję czynników o działaniu krótkookresowym, w tym głównie czynnika meteorologicznego.

$$MS = \sum_{i=1}^n |c_i| \cdot (n - 1)^{-1}$$

gdzie:  $n$  – długość (liczba lat) chronologii,  $c_i$  – wartość średniej czułości rocznej w roku  $i$  w chronologii (Fritts 1976).

W celu ustalenia, czy chronologie stanowiskowe modrzewia różnią się wartością  $MS$ , zastosowano test rozsądnie istotnej różnicy (RIR) Tukeya ( $\alpha = 0,05$ ) (Hill, Lewicki 2006).

Grupy stanowiskowych chronologii (populacji) zidentyfikowano na podstawie cech ich przebiegu oraz elementów klimatycznych kształtujących ich przebieg, wykorzystując analizę głównych składowych (PCA), w której zmiennymi były indeksowane chronologie stanowiskowe. Chronologie te zostały przekształcone w nowy zestaw zmiennych, tzw. główne składowe. Na podstawie wykresu osypiska do dalszych analiz włączano trzy pierwsze główne składowe (PC1, PC2 i PC3), opisujące największy odsetek zmienności chronologii (Hill, Lewicki 2006). Pierwsza składowa uwypuklała wspólne cechy wszystkich analizowanych chronologii, natomiast kolejne – wspólne cechy dla pewnych grup chronologii (populacji). Na podstawie położenia chronologii względem ładunków czynnikowych (współczynników korelacji chronologii z poszczególnymi głównymi składowymi) wyróżniono grupy chronologii (populacji modrzewi). Analizę składowych głównych wykorzystywano z powodzeniem do identyfikacji populacji drzew o podobnym rytmie przyrostowym (Richter i in. 1991; Mäkinen i in. 2000; Wilczyński, Szymański 2014; Feliksik, Wilczyński 2004, 2007; Mazza i in. 2014; Roibu i in. 2017).

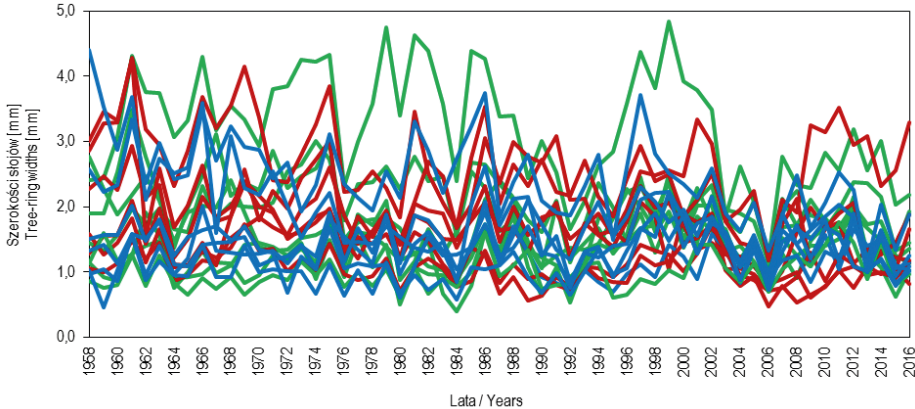
W celu identyfikacji elementów klimatycznych opisywanych przez trzy składowe główne obliczono współczynniki korelacji liniowej Pearsona między ich wartościami a średnimi miesięcznymi temperaturami powietrza oraz miesięcznymi sumami opadów atmosferycznych z lat 1957–2016. Następnie skorelowano wartości indeksowanych chronologii utworzonych dla poszczególnych grup (regionów) z wyżej wymienionymi parametrami klimatycznymi. W analizach korelacji uwzględniono okres od września roku poprzedzającego przyrost do września roku formowania słoja. Jest to okres najbardziej niewralgiczny w rytmie życiowym modrzewia, czyli okres od formowania się pąków przyszłorocznych organów wegetatywnych i generatywnych do zakończenia przyrostu na grubość. Dla regionu nizinnego wykorzystano uśrednione dane klimatyczne ze stacji meteorologicznych IMGW w Gorzowie Wielkopolskim, Warszawie, Grudziądzu, w przypadku gór uśredniono dane ze stacji IMGW w Przemyślu, Krościenku nad Dunajcem, Karpaczu i Kłodzku. Dane ze stacji IMGW w Kielcach posłużyły do analizy chronologii z regionu wyżynnego. Podobny przebieg krzywych pokazujących średnie miesięczne temperatury oraz sumy miesięczne opadów na uśrednianych stacjach meteorologicznych w okresie

1957–2016 oraz istotna w każdym przypadku korelacja między nimi pozwoliły na uśrednienie danych. Wykorzystywanie stacji ponadregionalnych (hipotetycznych) z powodzeniem było stosowane w badaniach dendroklimatycznych nad sosną w Hiszpanii (Richter i in. 1991), dębem (Ważny 1990) oraz świerkiem i modrzewiem w Polsce (Koprowski, Zielski 2006; Koprowski 2012b).

## Wyniki i dyskusja

Stanowiskowe chronologie szerokości słoików opisują przeciętny coroczny rytm przyrostowy 20 drzew każdej z 19 populacji cząstkowych modrzewia (ryc. 2). Charakteryzują się one trendem spadkowym związanym głównie ze zwiększającym się obwodem pnia oraz zmiennością średniookresową wywołaną np. konkurencją drzew, przerzedzaniem drzewostanu cięciami, zanieczyszczeniami powietrza. Z kolei stanowiskowe chronologie indeksowane mają wyeksponowaną coroczną zmienność wielkości przyrostów radialnych, determinowaną w głównej mierze przez zmieniającą się z roku na rok warunki meteorologiczne (Fritts 1976).

Wysokie wartości wskaźników  $r_{bt}$  (0,42–0,60),  $r_{wm}$  (0,66–0,78) oraz EPS (0,93–0,97) wskazują, że stworzone chronologie cechują się odpowiednią jakością do przepro-



Ryc. 2. Stanowiskowe chronologie szerokości słoików modrzewia. Oznaczenia chronologii jak na ryc. 1

Fig. 2. Site chronologies of tree-ring widths of larch. The chronologies were marked as in the fig. 1

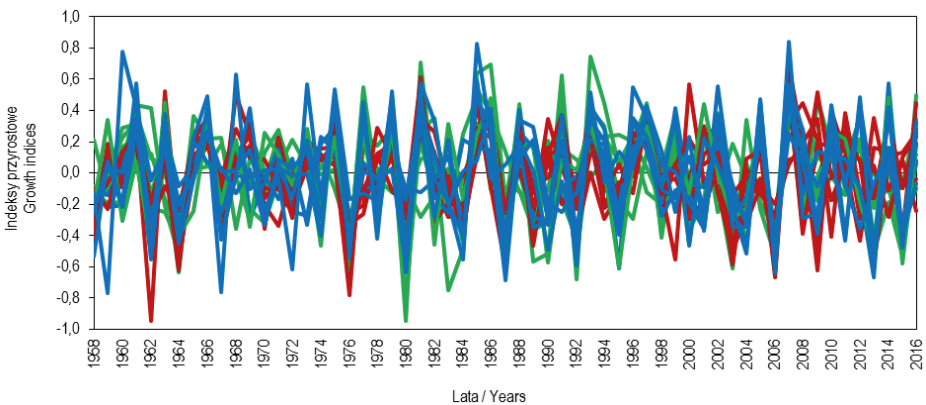
*Źródło:* opracowanie własne.

*Source:* own work.

wadzenia analiz dendroklimatycznych. Wartości średniej czułości (MS) wahały się od 0,19 do 0,31 (ryc. 3). Są to zatem wartości typowe dla modrzewi rosnących w Polsce (Danek 2009; Wilczyński 2010; Danek i in. 2017, 2018), przy czym wartości dla modrzewi nizinnych nie były dotąd publikowane. Wartości MS były istotnie ( $p < 0,05$ ) najwyższe u modrzewi w górach (0,27–0,31), a istotnie ( $p < 0,05$ ) najniższe u modrzewi na wyżynach (0,19–0,23). U modrzewi z nizin mieściły się one zakresie 0,23–0,26. Oznacza to, że u modrzewi górskich zachodziły najbardziej dynamiczne zmiany przyrostu z roku na rok. Zatem klimat górski jest najbardziej bodźcowy dla modrzewia, zaś najmniej klimat wyżyn. Jest to zgodne z wcześniejszymi wynikami, w których porównywano potomstwo badanych w niniejszej pracy modrzewi, rosnące na powierzchniach doświadczalnych zlokalizowanych na nizinach, wyżynach i w górach (Szymański, Wilczyński 2021).

Analiza głównych składowych 19 stanowiskowych chronologii indeksowanych wykazała, że trzy pierwsze główne składowe wyjaśniały 65% całkowitej ich zmienności, w tym PC1 – 51%, PC2 – 8% i PC3 – 6% (ryc. 4). Wszystkie chronologie stosunkowo silnie i dodatnio korelowały z pierwszą główną składową, zatem PC1 opisywała czynnik, który miał podobny wpływ na coroczną zmienność wielkości przyrostów radialnych wszystkich badanych populacji cząstkowych modrzewi.

Wyniki analizy korelacji PC1 z parametrami klimatycznymi, pokazały, że składowa ta istotnie ( $p < 0,05$ ), dodatnio korelowała z sumą opadów września roku



Ryc. 3. Stanowiskowe chronologie indeksowane modrzewia. Oznaczenia chronologii jak na ryc. 1

Fig. 3. Site indexed chronologies of larch. The chronologies were marked as in the fig. 1

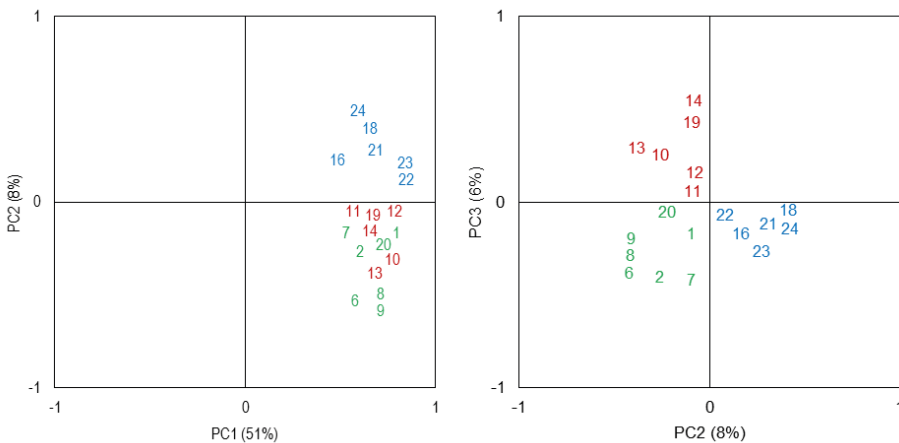
Źródło: opracowanie własne.

Source: own work.



poprzedzającego przyrost, średnią temperaturą marca i maja oraz sumą opadów lipca roku formowania słoja, natomiast korelowała ona ujemnie ze średnią temperaturą wrzesnia poprzedniego roku (ryc. 5). Związki wymienionych parametrów klimatycznych i trzech regionalnych chronologii modrzewi z nizin, wyżyn oraz gór były istotne ( $p < 0,05$ ) i miały ten sam kierunek jak ustalone na podstawie analizy korelacji PC1 (ryc. 6).

Powyższe wyniki analiz korelacji pozwalają sformułować biologiczne zależności relacji klimat–przyrost. Obfitujący w opady i chłodny wrzesień oznacza niską ewapotranspirację, która sprzyja gromadzeniu wody w glebie, więc drzewa mogą kontynuować rozbudowę systemu korzeniowego, jednocześnie kończy się aktywność podziałowa kambium waskularnego, a drzewa odkładają substancje zapasowe w miękiszu (Fayle 1968; Hoffmann, Lyr 1973). Należy dodać, że w takich warunkach modrzew tworzy głównie pąki organów wegetatywnych na niekorzyść pąków kwiatowych (Owens, Molder 1979), co powoduje mniejszą ilość szyszek na drzewach w następnym roku (Chałupka 1975; Fober 1976), a wiadomo, że obfite owocowanie osłabia przyrost na grubość (Chałupka i in. 1976). Ważnym czynnikiem korzystnie wpływającym na przyrost drewna u modrzewi był począ-

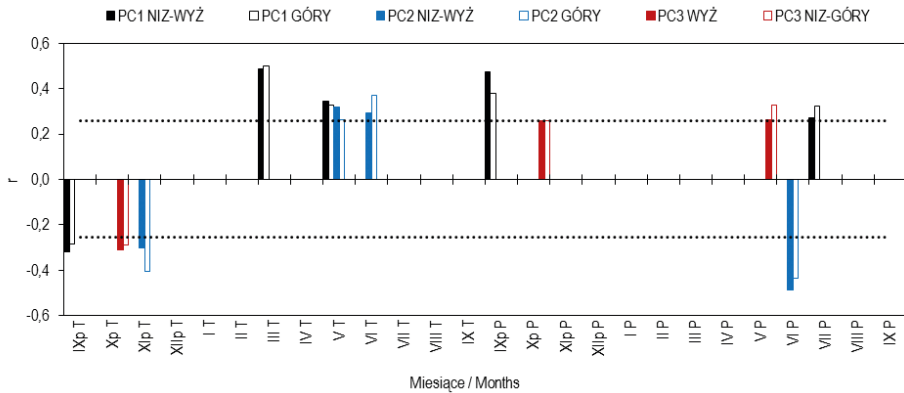


Ryc. 4. Położenie stanowiskowych chronologii indeksowanych modrzewia względem ładunków PC1, PC2 i PC3. Oznaczenia chronologii jak na ryc. 1.

Fig. 4. Positions of site indexed chronologies of larch in relation to the loadings of PC1, PC2 and PC3. The chronologies were marked as in the fig. 1

Źródło: opracowanie własne.

Source: own work.



Ryc. 5. Istotne ( $p < 0,05$ ) współczynniki korelacji ( $r$ ) między wartościami PC1, PC2 i PC3 a średnią miesięczną temperaturą powietrza ( $T$ ) i miesięczną sumą opadów atmosferycznych ( $P$ ) na nizinach ( $NIZ$ ), wyżynach ( $WYŻ$ ) i w górach ( $GÓRY$ ). Wartości krytyczne przy  $\alpha = 0,05$  – przerywane linie

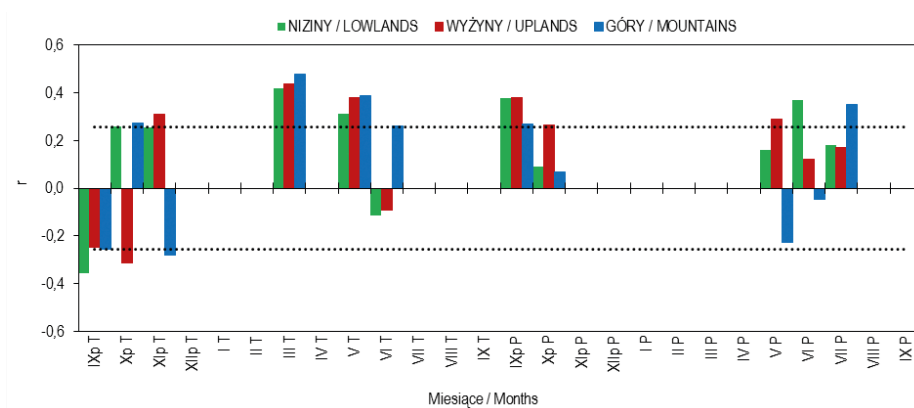
Fig. 5. Significant ( $p < 0.05$ ) correlation coefficients ( $r$ ) between the scores of PC1, PC2, PC3 and the mean monthly air temperature ( $T$ ) and total monthly precipitation in the lowlands ( $NIZ$ ), uplands ( $WYŻ$ ) and mountains ( $GÓRY$ ). Critic values for  $\alpha = 0.05$  – dashed lines

Źródło: opracowanie własne.

Source: own work.

tek okresu wegetacyjnego modelowany przez temperaturę marca. Im zima była krótsza, tym modrzewie rozpoczynały wcześniej wegetację i produkcję auksyn stymulujących podziały kambium waskularnego (Rötzer i in. 2004; Begum i in. 2013). Obfite opady w lipcu przyczyniały się do intensywnego przepływu wody wraz substancjami pokarmowymi do komórek drewna u tego silnie transpirującego gatunku drzewa. Pod wpływem wysokiego ciśnienia wody wywieranego na ścianę komórkową następuje odkształcenie się komórek kambium, a w konsekwencji ich wzmożony podział i wzrost (Jones 1998). Duża ilość wody w tym okresie jest szczególnie potrzebna, ponieważ modrzew tworzy wtedy znaczną ilość jeszcze szerokich komórek słoja (Nadezdin 1971).

Druą składowa (PC2) podzieliła chronologię na dwie odrębne grupy (ryc. 4). W skład pierwszej wchodziły chronologie populacji modrzewia z terenów górskich, natomiast drugą grupę tworzyły chronologie populacji z nizin i wyżyn. Chronologie górskich populacji dodatkowo korelowały z PC2, natomiast chronologie z nizin i wyżyn korelowały z nią ujemnie. PC2 opisywała zatem czynnik, na który modrzewie z wyróżnionych dwóch grupy odmiennie reagowały. Okazało się, że PC2 istotnie



Ryc. 6. Istotne ( $p < 0,05$ ) współczynniki korelacji ( $r$ ) między indeksowanymi chronologiami modrzewia z nizin, wyżyn i gór a średnią miesięczną temperaturą powietrza ( $T$ ) i miesięczną sumą opadów atmosferycznych ( $P$ ). Wartości krytyczne przy  $\alpha = 0,05$  – przerywane linie

Fig. 6. Significant ( $p < 0.05$ ) correlation coefficients ( $r$ ) between the indexed chronologies of larch (from the lowlands – NIZINY, uplands – WYŻYNY and mountains – GÓRY) and the mean monthly air temperature ( $T$ ) and total monthly precipitation. Critic values for  $\alpha = 0.05$  – dashed lines

Źródło: opracowanie własne.

Source: own work.

( $p < 0,05$ ), ujemnie korelowała ze średnią temperaturą listopada w poprzednim roku i sumą opadów czerwca roku tworzenia słoja, natomiast dodatnio korelowała ona ze średnią temperaturą maja i czerwca roku tworzenia słoja (ryc. 5). Koresponduje to z przedstawionymi na rycinie 6 wynikami, które wskazują na dodatni związek pomiędzy temperaturą listopada i opadami czerwca a przyrostem modrzewi z wyżyn i nizin, natomiast na negatywny związek wielkości przyrostu modrzewi z gór z tymi parametrami klimatycznymi. Ponadto związek pomiędzy przyrostem modrzewi z gór a temperaturą czerwca był dodatni, a w przypadku modrzewi z nizin i wyżyn był on ujemny. Istotne, lecz różniące się co do wielkości, współczynniki korelacji między PC1 i PC2 a średnią temperaturą maja wskazują na większą wrażliwość na ten element meteorologiczny modrzewi rosnących w górach niż w pozostałej części Polski (ryc. 5 i 6). Na nizinach i wyżynach, w przeciwieństwie do obszarów górskich, zasoby wody w glebie są relatywnie mniejsze. Niska temperatura w maju i czerwcu, a zatem mniejsza ewapotranspiracja, zapobiegała zbytnej utracie wody przez drzewa, co mogłoby spowodować zahamowanie ich przyrostu na grubość (Major i Johnsen 2001; Pilcher i Oberhuber 2007). Z kolei w górach, wody w glebie jest pod dostatkiem,

ale maj i czerwiec często są miesiącami stosunkowo chłodnymi, w których występują późne przymrozki. Zaś drzewa rosnące w zimnym klimacie na dużej wysokości nad poziomem morza wymagają dużej ilości ciepła w okresie intensywnych podziałów komórek kambium (Rossi i in. 2007, 2008).

Trzecia składowa (PC3) także podzieliła chronologie na dwie grupy (ryc. 4), przy czym pierwszą grupę stanowiły chronologie populacji modrzewia z wyżyn, a w skład drugiej wchodziły chronologie populacji z gór i nizin. Chronologie populacji z wyżyn dodatkowo korelowały z PC3, a chronologie z gór i nizin korelowały z nią ujemnie. Opisowała ona zatem czynnik, na który modrzewie z wyżyn inaczej reagowały niż modrzewie z dwóch pozostałych regionów. PC3 istotnie ( $p < 0,05$ ) ujemnie korelowała ze średnią temperaturą października poprzedniego roku, natomiast dodatnio z sumą opadów października poprzedniego roku oraz z maja roku odkładania słoja (ryc. 5). Wyniki zaprezentowane na rycinie 6 potwierdzają, że wysoka temperatura października korzystnie oddziaływała na wielkość przyrostu modrzewi na nizinach i w górach, a niekorzystnie na wielkość przyrostu modrzewi z wyżyn. Związki te można tłumaczyć tym, że przy wysokiej temperaturze jesienią, w warunkach krótkiego dnia, szybciej drewnieją pędy drzew, stając się mniej wrażliwe na jesienne przyrozki i mrozy zimowe (Simak 1970). W konsekwencji drzewa są w lepszej kondycji przyrostowej na początku następnego okresu wegetacyjnego. Fakt ten nie był tak istotny dla modrzewi z wyżyn, które wykazują wysoką odporność na wczesne przymrozki, a także ich potomstwo rosnące na powierzchniach doświadczalnych w różnych częściach Europy (Hunter-Blair 1948; Göhrn 1956; Križan 1975). Ponadto wysokie opady w październiku poprzedniego roku mają silniejszy, pozytywny wpływ na przyrost modrzewi z wyżyn niż nizin i gór (ryc. 6). Może to wynikać z tego, że modrzewie wykazują specyficzną fizjologiczną strategię utrzymania wzrostu w suchym okresie wegetacyjnym. Wiosną podczas intensywnego wzrostu wykorzystują one zapasy wody zgromadzone w glebie pod koniec jesieni i zimą (Levesque i in. 2013). Zgromadzenie dużej ilości wody w glebie również zapewnia drzewom większą odporność na mrozy w zimie (Jaworski 2011). Jak wspomniano wcześniej, modrzewie z gór wymagały dużej ilości ciepła i mniej obfitych opadów w maju niż te rosnące na nizinach i wyżynach, aby tworzyć szerokie słoje (ryc. 6). Może to wynikać z tego, że na obszarach górskich wraz ze wzrostem wysokości nad poziomem morza maleje pozytywny wpływ opadów na wzrost drzew, a wzrasta rola temperatury powietrza, która jest tam zbyt niska, stanowiąc czynnik ograniczający wzrost drzew (Fritts 1976).

Na koniec warto dodać, że badania wykorzystujące analizę głównych składowych do oceny rytmu przyrostowego drzew, pozwoliły na wyróżnienie dwóch obszarów dendrochronologicznie jednorodnych dla sosen w Hiszpanii (północnego i południowego), które były głównie spowodowane przestrzenną i wysokościową zmiennością warunków pluwialnych (Richter i in. 1991). Dwa tego typu obszary (północny i południowy) wyróżniono również dla świerka pospolitego w Finlandii (Mäkinen i in. 2000) – były

one związane z przestrzennym rozkładem średniej temperatury zimy. W przypadku jodły pospolitej we Włoszech wydzielono region zachodni i wschodni (Mazza i in. 2014), a u buka zwyczajnego w Rumunii – region górski, wyżynny i wschodni, które były związane z odmiennością warunków termiczno-pluwialnych wiosny i lata. Odmienne warunki termiczno-pluwialne lata przyczyniły się do zróżnicowania rytmu przyrostowego, a w konsekwencji chronologii, daglezi zielonej w Polsce, gdzie wyróżniono cztery regiony dendroklimatyczne: pojezierny, nizinny, wyżynno-podgórski oraz karpacko-sudecki (Wilczyński, Feliksik 2007). Obszar Polski okazał się wystarczająco zróżnicowany klimatycznie również dla modrzewia, co zostało odzwierciedlone w jego aktywności przyrostowej poprzez odmienne reakcje głównie na warunki termiczno-pluwialne poprzedniej jesieni oraz przełomu wiosny i lata w roku formowania słoja drewna.

## Podsumowanie i wnioski

Opierając się na cechach corocznego rytmu zmian wielkości przyrostów radialnych modrzewia europejskiego wyróżniono na obszarze Polski trzy regiony dendroklimatyczne, które pokrywają się z trzema obszarami o cechach klimatu nizin, wyżyn oraz gór. W tych trzech regionach warunki termiczno-pluwialne są na tyle odmienne, że w sposób charakterystyczny potrafią modyfikować aktywność przyrostową rosnących tam modrzewi.

Czynnikiem różnicującym reakcje przyrostowe modrzewi z regionu górskiego i nizinno-wyżynnego były warunki termiczno-pluwialne początku lata (czerwca) roku odkładania słoja, a także warunki termiczne późnej jesieni (listopada) roku poprzedzającego przyrost. Z kolei czynnikiem różnicującym reakcje przyrostowe modrzewi z regionu wyżynnego w stosunku do modrzewi z pozostałej części Polski były opady występujące w maju w roku tworzenia się słoja oraz temperatura i opady w październiku w poprzednim roku.

Głównymi czynnikami modelującymi zmienność szerokości słoików drewna populacji modrzewia europejskiego bez względu na region ich występowania były warunki termiczne marca i maja oraz pluwialne lipca w roku formowania słoja, a także warunki termiczno-pluwialne września roku poprzedzającego formowanie słoja.

## Podziękowania

Praca powstała w wyniku realizacji projektu badawczego o nr 2015/19/N/NZ9/00625 finansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki.

## Acknowledgement

This research was financed by the National Science Centre, Poland (grant number: 2015/19/N/NZ9/00625).

## Literatura

- Begum S., Nakaba S., Yamagishi Y., Oribe Y., Funada R., 2013, *Regulation of cambial activity in relation to environmental conditions: understanding the role of temperature in wood formation of trees*, *Physiologia Plantarum*, 147, 46–54. DOI: 10.1111/j.1399-3054.2012.01663.x.
- Chałupka W., 1975, *Wpływ czynników klimatycznych na urodzaj szyszek u świerka pospolitego (Picea abies (L.) Karst.) w Polsce*, *Arboretum Kórnickie*, 20, 213–225.
- Chałupka W., Giertych M., Królikowski Z., 1976, *The effect of cone crops on growth in Scots pine on tree diameter increment*, *Arboretum Kórnickie*, 21, 361–366.
- Danek M., 2009, *Wpływ warunków klimatycznych na szerokość przyrostów rocznych modrzewia (Larix decidua Mill.) rosnącego w północnej części województwa małopolskiego*, *Sylwan*, 153(11), 768–776. DOI: 10.26202/sylwan.2009051.
- Danek M., Chuchro M., Walanus A., 2017, *Variability in larch (Larix decidua Mill.) tree-ring growth response to climate in the Polish Carpathian Mountains*, *Forests*, 8(10), 354. DOI: 10.3390/f8100354.
- Danek M., Chuchro M., Walanus A., 2018, *Tree-ring growth of larch (Larix decidua Mill.) in the Polish Sudetes – the influence of altitude and site-related factors on the climate–growth relationship*, *Forests*, 9(11), 663. DOI: 10.3390/f9110663.
- Danek M., Chuchro M., Danek T., 2021, *Extreme growth reaction of larch (Larix decidua Mill.) from the Polish Sudetes and Carpathians: spatial distribution and climate impact*, *Trees*, 35, 211–229. DOI: 10.1007/s00468-020-02029-z.
- De Witt E., Ames M., 1978, *Tree-ring chronologies of eastern North America*, *Chronology Series*, 1, 1–42.
- Fayle D.C.F., 1968, *Radial Growth in Tree Roots – Distribution, Timing, Anatomy*, Technical report No. 9, University of Toronto, Faculty of Forestry, Toronto.
- Feliksik E., Wilczyński S., 2004, *Regiony dendroklimatyczne daglezji zielonej (Pseudotsuga menziesii (Mirb.) Franco) w Polsce*, *Sylwan* 148(12), 23–30. DOI: 10.26202/sylwan.9200423.
- Feliksik E., Wilczyński S., 2007, *Local chronologies and regional diversity of dendrochronological signal of Douglas fir in Poland*, *Geochronometria* 26, 69–80. DOI: 10.2478/v10003-007-0008-z.
- Fober H., 1976, *Relation between climatic factors and Scots pine (Pinus sylvestris) cone crops in Poland*, *Arboretum Kórnickie*, 21, 367–374.
- Fritts H.C., 1976, *Tree rings and climate*, Academic, London.
- Göhrn V., 1956, *Provenienschforsög med Laerk*, *Det Forstlige Forsögsvaesen i Danmark*, 23 (1), 1–124.
- Hill T., Lewicki P., 2006, *Statistics, Methods and Applications*, StatSoft, Tulsa, OK, USA.
- Hoffmann G., Lyr H., 1973, *Charakterisierung des Wachstumsverhaltens von Pflanzen durch Wachstumsschemata*, *Flora*, 162, 81–98.
- Holmes R.L., 1986, *Quality control of crossdating and measuring a user manual for program COFECHA*, [w:] R.L. Holmes, R.K Adams, H.C. Fritts (red.), *Tree-ring chronologies of Western North America: California, Eastern Oregon and Northern Great Basin*, *Chronology Series* 6, University of Arizona, Tucson, 41–49.

- Hunter-Blair J., 1948, *The polish larch (Larix decidua var. polonica)*, Scottish Forestry, 3/4, 21–25.
- Jaworski A., 2011, *Hodowla lasu. Tom III. Charakterystyka hodowlana drzew i krzewów leśnych*, PWRiL, Warszawa.
- Jones H., 1998, *Stomatal control of photosynthesis and transpiration*, Journal of Experimental Botany, 49, 387–398.
- Kocięcki S., 1977, *Badania nad wzrostem i formą modrzewia i przydatnością różnych pochodzeń w poszczególnych krainach przyrodniczo-leśnych*, Dokumentacja IBL, Warszawa.
- Kondracki J., 2000, *Geografia regionalna Polski*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Koprowski M., Zielski A., 2006, *Dendrochronology of Norway spruce (Picea abies (L.) Karst.) from two range centres in lowland Poland*, Trees, 20 (3), 383–390. DOI: 10.1007/s00468-006-0051-9.
- Koprowski M., 2012a, *Long-term increase of March temperature has no negative impact on tree-rings of European larch (Larix decidua) in lowland Poland*, Trees, 26, 1895–1903. DOI: 10.1007/s00468-012-0758-8.
- Koprowski M., 2012b, *Spatial distribution of introduced Norway spruce growth in lowland Poland: the influence of changing climate and extreme weather events*, Quaternary International, 283, 139–146. DOI: 10.1016/j.quaint.2012.04.020.
- Križan P., 1975, *Testovanie rozdielov v mrazuздornosti medzi vybranými provenienciami (Larix decidua Mill.) na medzinarodnej proveniencnej ploche, založenej r. 1958/1959 na Podbanskom. Premennivast leśnych dreвин*, Vedecke Prace VULH vo Zvolene, Zvolene.
- Lévesque M., Saurer M., Siegwolf R., Eilmann B., Brang P., Bugmann H., Rigling A., 2013, *Drought response of five conifer species under contrasting water availability suggests high vulnerability of Norway spruce and European larch*, Global Change Biology, 19(10), 3184–3199. DOI: 10.1111/gcb.12268.
- Major J.E., Johnsen K.H., 2001, *Shoot water relations of mature black spruce families displaying a genotype × environment interaction in growth rate. III. Diurnal patterns as influenced by vapour pressure deficit and internal water status*, Tree Physiology, 21, 579–587. DOI: 10.1093/treephys/21.9.579.
- Mäkinen H., Nöjd P., Mielikäinen K., 2000, *Climatic signal in annual growth variation of Norway spruce (Picea abies) along a transect from central Finland to the Arctic timberline*, Canadian Journal of Forest Research, 30 (5), 769–777. DOI: 10.1139/x00-005.
- Mazza G., Gallucci V., Manetti M.C., Urbinati C., 2014, *Climate–growth relationships of silver fir (Abies alba Mill.) in marginal populations of Central Italy*, Dendrochronologia, 32, 181–190. DOI: 10.1016/j.dendro.2014.04.004.
- Owens J.N., Molder M., 1979, *Bud development in Larix occidentalis. II. Cone differentiation and early development*, Canadian Journal of Botany, 57, 1557–1572. DOI: 10.1139/b79-194.
- Nadezdin V.V., 1971, *Effect of seed provenance on the height growth of larch in the conifer*, Izd-vo Akademii Nauk SSSR, Moscow.
- Pichler P., Oberhuber W., 2007, *Radial growth response of coniferous forest trees in an inner Alpine environment to heat-wave in 2003*, Forest Ecology and Management, 242, 688–699. DOI: 10.1016/j.foreco.2007.02.007.

- Richter K., Eckstein D. Holmes R.L., 1991, *The dendrochronological signal of pine trees (Pinus spp.) in Spain*, Tree Ring Bulletin, 51, 1–13.
- Roibu C.-C., Popa I., Kirchhefer A.J., Palaghianu C., 2017, *Growth responses to climate in a tree-ring network of European beech (Fagus sylvatica L.) from the eastern limit of its natural distribution area*, Dendrochronologia, 42, 104–116. DOI: 10.1016/j.dendro.2017.02.003.
- Romer E., 1949, *Regiony klimatyczne Polski*, Prace Wrocławskiego Towarzystwa Naukowego, seria B, 16, 5–27.
- Rossi S., Deslauriers A., Anfodillo T., Carraro V., 2007, *Evidence of threshold temperatures for xylogenesis in conifers at high altitudes*, Oecologia, 152, 1–12. DOI: 10.1007/s00442-006-0625-7.
- Rossi S., Deslauriers A., Gričar J., Seo J.-W., Rathgeber C.B.K., Anfodillo T., 2008, *Critical temperatures for xylogenesis in conifers of cold climates*, Global Ecology and Biogeography, 17, 696–707. DOI: 10.1111/j.1466-8238.2008.00417.x.
- Rötzer T., Grote R., Pretzsch H., 2004, *The timing of bud burst and its effect on tree growth*, International Journal of Biometeorology, 48, 109–118. DOI: DOI: 10.1007/s00484-003-0191-1.
- Simak M., 1970, *Photo- and thermoperiodic response of different Larch provenances (Larix decidua Mill.)*, Studia Forestalia Suecica, 86.
- Solon J., Borzyszkowski J., Bidłasik M., Richling A., Badora K., Balon J., Brzezińska-Wójcik T., Chabudziński Ł., Dobrowolski R., Grzegorzczak I., Jodłowski M., Kistowski M., Kot R., Krąż P., Lechnio J., Macias A., Majchrowska A., Malinowska E., Migoń P., Myga-Piątek U., Nita J., Papińska E., Rodzik J., Strzyż M., Terpiłowski S., Ziaja W., 2018, *Physico-geographical mesoregions of Poland: Verification and adjustment of boundaries on the basis of contemporary spatial data*, Geographia Polonica 91 (2), 143–170. DOI: 10.7163/GPol.0115.
- Szymański N., Wilczyński S., 2021, *Radial growth response of European larch provenances to interannual climate variation in Poland*, Forests, 12, 334. DOI: 10.3390/f12030334.
- Ważny T., 1990, *Aufbau und Anwendung der Dendrochronologie für Eichenholz in Polen*, Universität Hamburg, Hamburg.
- Wikimedia Commons, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Poland-hipsometric\\_map.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Poland-hipsometric_map.jpg) (13.01.2022).
- Wigley T.M.L., Briffa K.R., Jones P.D., 1984, *On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology*, Journal of Applied Meteorology and Climatology, 23, 201–213. DOI: 10.1175/1520-0450(1984)023<0201:OTAVOC>2.0.CO;2.
- Wilczyński S., 2005, *Regiony dendroklimatyczne sosny zwyczajnej (Pinus sylvestris L.) w Karpatach Polskich*, Acta Agraria et Silvestria, Series Silvestris, 43, 43–54.
- Wilczyński S., 2010, *Uwarunkowania przyrostu radialnego wybranych gatunków drzew z Wyżyny Kieleckiej w świetle analiz dendroklimatologicznych*, Zeszyty Naukowe UR w Krakowie, Rozprawy, 464(341).
- Wilczyński S., Krąpiec M., Szychowska-Krąpiec E., Zielski A., 2001, *Regiony dendroklimatyczne sosny zwyczajnej (Pinus sylvestris L.) w Polsce*, Sylwan, 145 (8), 53–61.
- Wilczyński S., Szymański N., 2014, *Pionowe strefy oraz piętra dendroklimatyczne w Beskidach Zachodnich*, Sylwan, 158 (6), 463–472. DOI: 10.26202/sylwan.2013138.



- Woś A., 1993, *Regiony klimatyczne polski w świetle częstości występowania różnych typów pogody*, Zeszyty Instytutu Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN, 20.
- Zielony R., Kliczkowska A., 2010, *Regionalizacja przyrodniczo-leśna Polski 2010*, CEPL, Warszawa.

*Norbert Szymański*  
*Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie*  
*Wydział Leśny*  
*Katedra Ekologii i Hodowli Lasu*  
*al. 29 Listopada 46, 31-425 Kraków*  
*norbert.szymanski@urk.edu.pl*  
*ORCID: 0000-0001-8777-8541*

*Sławomir Wilczyński*  
*Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie*  
*Wydział Leśny*  
*Katedra Ochrony Ekosystemów Leśnych*  
*al. 29 Listopada 46, 31-425 Kraków*  
*slawomir.wilczynski@urk.edu.pl*  
*ORCID: 0000-0002-5913-5618*

