

Sygnal klimatyczny w przyroście radialnym wybranych iglastych gatunków drzew w Leśnym Zakładzie Doświadczalnym Rogów

Climate signal in the radial growth of selected coniferous species
from the Forest Experimental Station in Rogów

Szymon Bijak

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Wydział Leśny, Samodzielna Pracownia
Dendrometrii i Nauki o Produkcyjności Lasu, ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa

Tel. +48 22 5938093; e-mail: szymon.bijak@wl.sggw.pl

Abstract. I present dendroclimatological analysis of coniferous tree species growing under the same environmental conditions in the WULS-SGGW Forest Experimental Station in Rogów (51° 49' N, 19° 53' E, ca. 190 m a.s.l). The study focuses on silver fir, European larch, Scots pine and Douglas fir. For each species, tree-ring width and annual sensitivity chronologies were developed for the period 1931–2010. Analysed species show considerable similarity of their radial increment course (GLK up to 67%, the t-value of 3,5–9,5). The relationship obtained for the influence of climate conditions on radial growth of these species is typical of the relationships reported from other locations in lowland Poland. Late winter and early spring temperature, especially during February–March, is the main factor affecting tree-ring formation. The general relationship demonstrates that this seasonal thermal limitation operates at an inter-regional and interspecific level in determining the growth of coniferous tree species in Poland. Whereas, the dependence of these species on precipitation is much less significant.

Key words: dendroclimatology, Scots pine, silver fir, European larch, Douglas fir, central Poland

1. Wstęp

Wzrost drzew, w tym ich przyrost na grubość, jest procesem złożonym. Struktura, gęstość, a przede wszystkim szerokość słoja przyrostu rocznego są wypadkową wzajemnego oddziaływania wielu różnych, nieraz przeciwstawnych czynników i relacji „środowisko – roślina” (Schweingruber 1996; Zielski, Krąpiec 2004). Na aktywność komórek kambium, i co za tym idzie tworzenie przyrostu, wpływ mają zarówno siły przyrody, jak i działalność człowieka. W formowaniu przyrostu rocznego drzew istotne znaczenie ma zwłaszcza dynamika warunków meteorologicznych, charakteryzujących się znacznymi wahaniami z miesiąca na miesiąc, a także z roku na rok (Fritts 1976; Schweingruber 1996). Odpowiedź drzew na warunki wpływające na wzrost przejawia się w krótkookresowej reakcji przyrostowej. Róż-

nice w jej przebiegu między poszczególnymi gatunkami wynikają z odmiennej wrażliwości na czynnik klimatyczny, która dodatkowo jest modelowana przez wiek, genom, cechy miejsca wzrostu oraz różne zdarzenia losowe (Fritts 1976; Schweingruber 1996; Wilczyński 2010)

Wiedza dotycząca wpływu środowiska naturalnego na funkcjonowanie drzew jest jednym z głównych wymagań właściwego prowadzenia gospodarki leśnej. Wiąże się to z podstawową rolą, jaką warunki siedliskowe, w tym szczególnie klimatyczne, odgrywają w kształtowaniu wzrostu i przyrostu poszczególnych gatunków. Obserwowane w ostatnim czasie zmiany klimatu powodują zmiany relacji między wzrostem drzew a czynnikami go kształtującymi. Efekty tych zmian są także widoczne w tendencjach wzrostowych poszczególnych gatunków drzewiastych, co bezpośrednio przekłada się

na możliwości produkcyjne ekosystemów leśnych (Spiecker et al. 1996; Jaworski 2003a, b). Jak zauważają Chmura i inni (2010), zmieniające się warunki środowiskowe nie tylko powodują zmiany w samych zbiorowiskach roślinnych, lecz także pociągają za sobą istotne przemiany w leśnictwie oraz dziedzinach gospodarki z nim związanych. Kwestie te sprawiają, że badania wpływu warunków klimatycznych na przyrost drzew zyskują na znaczeniu, a ich wyniki powinny znaleźć zastosowanie w praktyce.

Studia nad wpływem warunków klimatycznych na przyrost radialny drzew leśnych rozpoczęto w Polsce w połowie XX wieku (Zielski, Krapiec 2004) i jak dotąd analizami objęto większość najważniejszych rodzimych gatunków drzew oraz wybrane gatunki introdukowane. Badania dotyczyły przede wszystkim sosny zwyczajnej – najpopularniejszego gatunku drzew leśnych w naszym kraju. Wpływ warunków meteorologicznych na szerokość słoików przyrostu rocznego u tego gatunku badali m.in. Feliksik i Wilczyński (1996), Zielski (1997), Wilczyński (1999), Wilczyński i inni (2001), a także Cedro (2001, 2004). Modrzew europejski był przedmiotem zainteresowania Feliksika (1992), Feliksika i Wilczyńskiego (1998b) oraz Danek (2009) i Koprowskiego (2012). Z kolei jodłą zajmowali się, np. Feliksik (1990), Koprowski i Gławenda (2007), a także Bijak (2010) oraz Bronisz i inni (2010). Z gatunków obcych najobszerniej pod względem dendrochronologicznym poznana jest dagleżja zielona (Feliksik, Wilczyński 2004, 2008, 2009).

Z powodu odmiennych zasobów genetycznych poszczególne gatunki mogą różnie reagować na warunki środowiskowe, w tym parametry klimatyczne, dlatego też cenne są porównawcze badania reakcji dendroklimatycznej (Opała 2009). Dotychczasowe polskie prace w tym zakresie obejmowały między innymi analizę wpływu warunków klimatycznych na przyrost sosny, jodły i buka w Świętokrzyskim Parku Narodowym (Feliksik et al. 2000) oraz w Ojcowskim Parku Narodowym (Opała 2009), świerka, sosny i modrzewia na Pogórze Wilamowickim (Feliksik, Wilczyński 1998a), a także jodły i modrzewia w Nadleśnictwie Zagnańsk (Wilczyński, Wertz 2012). Porównanie zależności „klimat – przyrost” rodzimych i obcych gatunków drzew zostało przeprowadzone dla sosny, różnych świerków, jodły i dagleżji na Pomorzu przez Feliksika i Wilczyńskiego (2009), dla sosny, dagleżji i dębów na Pomorzu Zachodnim – Cedro (2004), a dla dębu czerwonego i szypułkowego w Rogowie – Bijaka i innych (2012a, b).

Celem pracy było poznanie przebiegu przyrostu radialnego wybranych gatunków iglastych (jodły, modrzewia, sosny i dagleżji) rosnących w tych samych warunkach środowiskowych w Leśnym Zakładzie Doświadczalnym (LZD) Rogów oraz porównanie relacji między przyrostem na grubość a czynnikami klimatycznymi.

2. Materiał i metody

Materiał badawczy zebrano jesienią 2010 r. na terenie Leśnego Zakładu Doświadczalnego SGGW w Rogowie (51°49' N, 19°53' E, ok. 190 m n.p.m). Teren badań zlokalizowany jest na wschodnim krańcu Wzniesień Łódzkich, stanowiących część Wzniesień Południowomazowieckich (Kondracki 2000). Według rejonizacji przyrodniczo-leśnej Tramplerera i innych (1990) LZD w Rogowie znajduje się na północnych krańcach Krainy Małopolskiej, w Dzielnicy Łódzko-Opoczyńskiej, Mezoregionu Sieradzko-Łódzkiego. W podłożu przeważają polodowcowe utwory złożone z glin i piasków zwałowych, na których wykształciły się żyzne, ale kwaśne gleby płowe. Poziom wody gruntowej jest bardzo niski, często poza zasięgiem korzeni drzew. Okres wegetacji trwa przeciętnie 205–215 dni. Średnia roczna suma opadów wynosi 591 mm, z czego niecałe 65% przypada na okres wegetacyjny. Średnia roczna temperatura powietrza wynosi 7,5°C. Najzimniejszym miesiącem jest styczeń (średnia miesięczna temperatura powietrza wynosi –2,7°C), a najcieplejszym – lipiec (17,6°C).

W drzewostanach doświadczalnych wybrano po jednym stanowisku jodły pospolitej (*Abies alba* Mill.), modrzewia europejskiego (*Larix decidua* Mill.) i sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.), a na terenie Arboretum – dagleżji zielonej (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). Wybrano drzewostany o możliwie zbliżonym wieku. W efekcie badane drzewa miały ok. 60–65 (modrzew, sosna) i 70–80 (jodła, dagleżja) lat. Badane gatunki rosły na siedlisku lasu świeżego (Lśw) i mieszanego świeżego (LMśw). Na każdej powierzchni wytypowano po 15 zdrowych i dominujących okazów o prawidłowo wykształconej koronie i braku oznak chorobowych. Z pierśnicy tych drzew pobrano świdrem Presslera po jednym wywiercie dordzeniowym. Po przesuszeniu i wyszlifowaniu powierzchni w celu zwiększenia kontrastu między poszczególnymi słojami, zebrane wywierty zostały zeskanowane (rozdzielczość 1200 dpi) skanerem EPSON Expression 10000XL. Szerokość słoików rocznych zmierzono z dokładnością do 0,01 mm, korzystając z powstałych w ten sposób plików graficznych za pomocą programu CooRecorder (www.cybis.se). Następnie uzyskany materiał wydatowano (poszczególnym słoikom rocznym przypisano konkretne lata kalendarzowe), a w programie CDdendro (www.cybis.se) sprawdzono poprawność wykonanych pomiarów i oceniono podobieństwo chronologii z poszczególnych drzew w obrębie gatunku (wartość t , współczynnik GLK; Cook, Briffa 1990). Sekwencje najmniej podobne do pozostałych, a więc mogące zakłócić tzw. wspólny sygnał, wyłączone z dalszej analizy.

W celu eliminacji wpływu wieku drzew oraz by wydobyc zachodzące w rytmie rocznym zmiany dyna-

miki przyrostu grubości, na podstawie uzyskanej szerokości słoju rocznych, opracowano serie indeksów przyrostowych uwypuklających krótkookresową reakcję przyrostową poszczególnych gatunków. Dla każdego analizowanego drzewa obliczono dla każdego roku wartość czułości rocznej (c_i) według wzoru (Fritts 1976; Cook, Briffa 1990; Wilczyński 2010):

$$c_i = 2 \frac{x_i - x_{i-1}}{x_i + x_{i-1}}$$

gdzie x_i oraz x_{i-1} są szerokościami słoja przyrostu rocznego w dwóch kolejnych latach.

Jednorodność utworzonych w powyższy sposób chronologii czułości, określającą także ich reprezentatywność oraz część „wspólnego sygnału” zawartego w powstałych na ich podstawie chronologiach gatunkowych oceniono, wyliczając wartość wskaźnika EPS (Expressed Population Signal; Wigley et al. 1984). Za minimalną wartość EPS wskazującą na przydatność chronologii do analiz dendroklimatologicznych przyjęto 0,85 (Mäkinen, Vanninen 1999; Wilczyński 2010). Dokonano także oceny podobieństwa reakcji przyrostowej pomiędzy badanymi gatunkami. Jako miary podobieństwa chronologii zastosowano wartość t oraz współczynnik GLK. Wartość t jest ilościowym wskaźnikiem podobieństwa dwóch chronologii i jest wyliczana analogicznie jak w teście Studenta (Cook, Briffa 1990; Zielski, Krąpiec 2004). Z kolei współczynnik GLK (współbieżności) w jakościowy sposób opisuje podobieństwo dwóch sekwencji szerokości przyrostu rocznego. Jego wartość równa się udziałowi przypadków reakcji przyrostowej o takim samym charakterze (wzrost lub spadek szerokości słoja z roku na rok) we wspólnym dla obu chronologii okresie (Cook, Briffa 1990; Zielski, Krąpiec 2004).

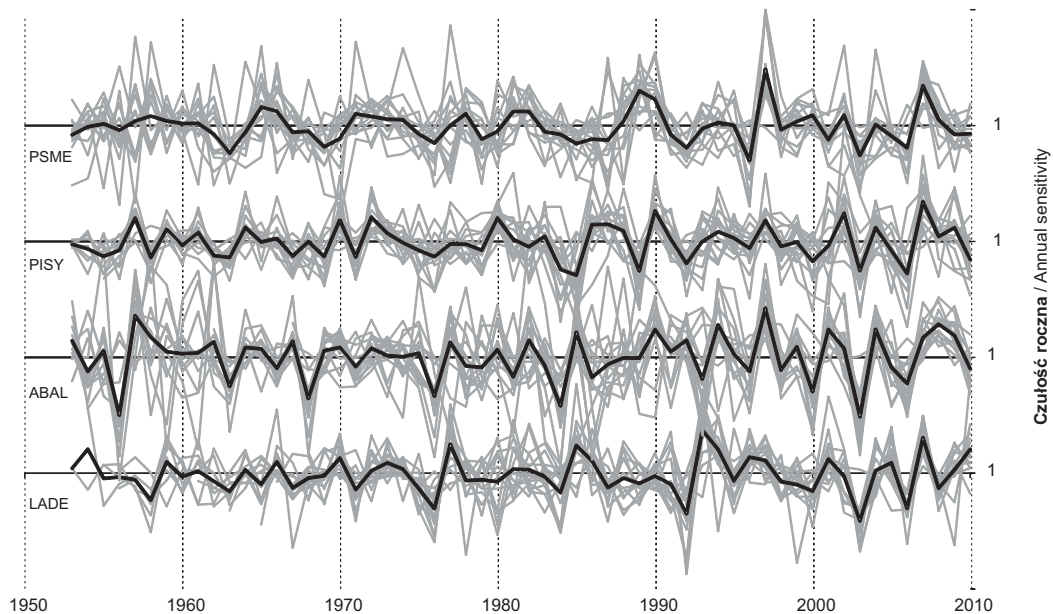
Wpływ warunków klimatycznych na przyrost badanych gatunków na grubość określono na podstawie tzw. funkcji odpowiedzi (ang. *response function*), która w modelu regresji i korelacji wielorakiej wiąże indeks przyrostowy (zmienna zależna) z parametrami klimatycznymi (zmiennie wyjaśniające) (Fritts 1976; Briffa, Cook 1990). Obliczenia wykonano w programie DendroClim2002 (Biondi, Waikul 2004). Jako dane wejściowe wykorzystano serie czułości rocznej oraz średnie miesięczne wartości temperatury powietrza, temperatury minimalnej i maksymalnej oraz miesięczne sumy opadów atmosferycznych od czerwca roku poprzedzającego formowanie się słoja do września roku tworzenia przyrostu (16 miesięcy). Tak przyjęty zakres umożliwia uwzględnienie w ocenie relacji między przyrostem grubości a czynnikami klimatycznymi wpływu poprzedzającego okresu wegetacyjnego oraz czasu, w którym rośliny wchodzi w okres spoczynku zimowego (Fritts 1976). Analizę dendroklimatologiczną przeprowadzono

dla lat 1953–2010, czyli okresu wspólnego dla wszystkich analizowanych gatunków (58 lat). Dane klimatyczne pochodziły z prowadzonej przez Katedrę Hodowli Lasu SGGW w Warszawie stacji meteorologicznej znajdującej się na terenie LZD w Rogowie.

3. Wyniki

Opracowane chronologie wybranych iglastych gatunków drzew rosnących na terenie LZD w Rogowie obejmują okres 1931–2010. Najdłuższe sekwencje parametrów słoja przyrostu rocznego zestawiono dla dąglezji zielonej, najkrótsze zaś – dla modrzewia europejskiego (tab. 1). Przez transformację serii szerokości przyrostów rocznych w serie czułości zredukowano wpływ zmienności średnio- oraz długookresowej, a wydobyto zmienność krótkookresową, związaną przede wszystkim z czynnikiem klimatycznym. Znaczne zróżnicowanie wartości indeksów przyrostowych w poszczególnych latach (ryc. 1) świadczy o indywidualnej reakcji poszczególnych drzew na presję czynników środowiskowych. Jednakże uzyskane dla chronologii gatunkowych wartości EPS wskazują na zbliżoną odpowiedź drzew w obrębie gatunku (tab. 1). Najwyższą jednorodnością corocznych zmian przyrostu na grubość cechowały się sosna i dąglezja (EPS>0,92), najmniejszą zaś – jodła (EPS=0,88). Zarówno średnie wartości EPS, jak i wartości wyliczone w ruchomym oknie 30-letnim przekraczały progową wartość 0,85, co świadczy o przydatności zestawionych chronologii czułości rocznej do analiz dendroklimatologicznych.

Zarówno wartości t , jak i wartości współczynnika GLK wskazują na pewne międzygatunkowe podobieństwo przebiegu przyrostu grubości analizowanych iglastych gatunków drzew w LZD Rogów (ryc. 1; tab. 2). W przypadku chronologii rzeczywistych (nieprzekształcone szerokości słoju) wartość t wahała się od 3,5 do 9,5. Najmniej zbliżone do sekwencji innych gatunków były chronologie jodłowe, a najbardziej podobne do pozostałych gatunków pod względem zmian przyrostu na grubość były sosna i dąglezja. Podobny obraz uzyskano na podstawie analizy wartości współczynnika GLK. Według tego kryterium największym podobieństwem do pozostałych gatunków odznaczała się sosna (tab. 2). W przypadku chronologii indeksowanych (serie czułości rocznej) wartości t były o wiele niższe niż w chronologiach rzeczywistych (średnio 2-/3-krotnie). Przy mniej więcej o połowę niższych wartościach t , współczynnik GLK dla chronologii indeksowanych przyjmuje wartości niemalże równe tym dla chronologii rzeczywistych (tab. 2). Świadczy to o podobnym charakterze jakościowym reakcji badanych gatunków na zmieniające się z roku na rok warunki klimatyczne.



Rycina 1. Serie czułości rocznej badanych iglastych gatunków drzew z LZD Rogów – pojedyncze drzewa (szary) i średnia dla gatunku (czarny)

Figure 1. Series of annual sensitivity of analysed coniferous species from Rogów FRS – individual trees (grey) and average for a species (black)

ABAL – *Abies alba*, LADE – *Larix decidua*, PISY – *Pinus sylvestris*, PSME – *Pseudotsuga menziesii*

Tabela 1. Podstawowe charakterystyki opisowe chronologii badanych gatunków iglastych z LZD Rogów

Table 1. Basic descriptive features of chronologies of analysed coniferous species from Rogów FRS

Gatunek Species	Liczba drzew Number of trees	Okres Time span	Mediana długości chronologii Chronology median length		mTRW (SD) [mm]	r_{bar}^*	EPS*
ABAL	15	1939–2010	66		2,26 (1,33)	0,331	0,881
LADE	15	1953–2010	53		3,12 (1,85)	0,412	0,913
PISY	15	1946–2010	58		2,13 (1,12)	0,467	0,929
PSME	14	1931–2010	70		3,66 (1,68)	0,466	0,924

mTRW (SD) – średnia szerokość słoja rocznego z odchyleniem standardowym w nawiasie / mean tree-ring width with standard deviation in parenthesis;

* wartości r_{bar} i EPS podano dla serii indeksów przyrostowych / values given for series of increment indices

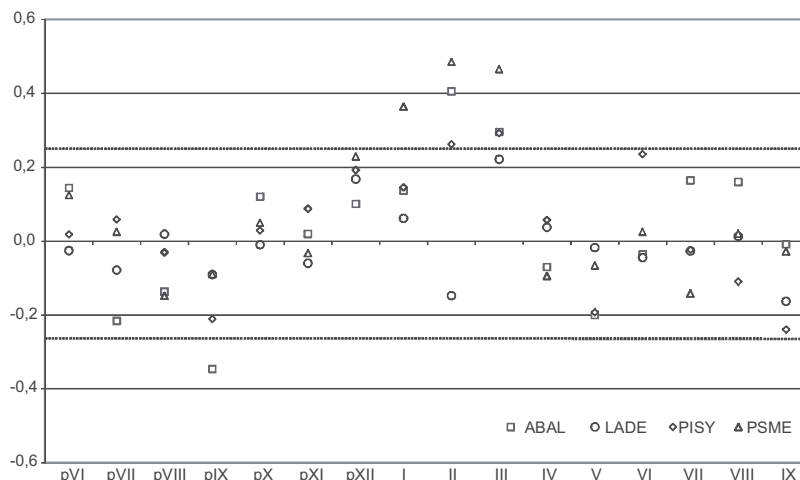
Oznaczenia gatunków jak na rycinie 1 / Species abbreviations as in Figure 1

Tabela 2. Podobieństwo (wartość t – lewa dolna część, współczynnik GLK – prawa górna część) rzeczywistych i indeksowanych chronologii badanych gatunków

Table 2. Similarity (t -values – left bottom part, GLK coefficient – right upper part) of raw and index chronologies of analysed species

	Chronologia rzeczywista Tree-ring width chronology				Chronologia indeksowana Indexed chronology				
	ABAL	LADE	PISY	PSME	ABAL	LADE	PISY	PSME	
ABAL	×	53%	67%	58%	ABAL	×	61%	66%	58%
LADE	3,5	×	67%	54%	LADE	2,9	×	66%	57%
PISY	3,9	9,5	×	67%	PISY	2,9	2,0	×	63%
PSME	6,9	5,4	8,8	×	PSME	3,6	1,6	3,1	×

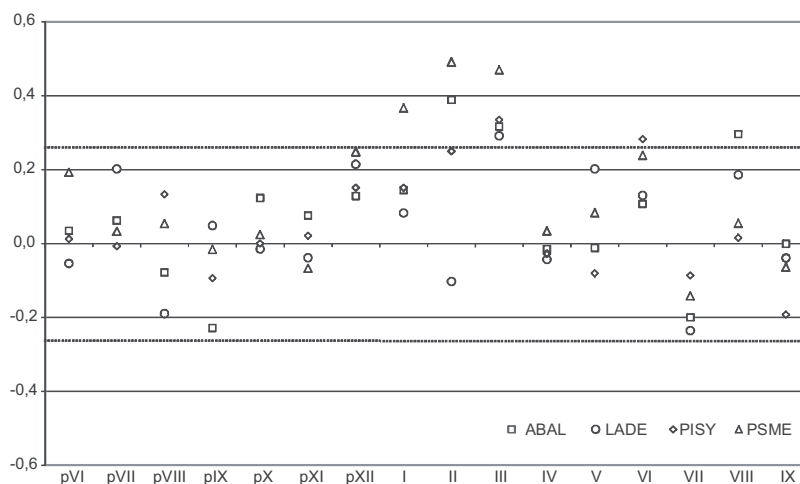
Oznaczenia gatunków jak na rycinie 1 / Species abbreviations as in Figure 1



Rycina 2. Wartości współczynnika korelacji między średnią miesięczną temperaturą powietrza a serią czułości rocznej dla badanych iglastych gatunków drzew z LZD Rogów: kropkowane linie – próg istotności na poziomie 0,05; pVI, ..., pXII – miesiące roku poprzedzającego odłożenie słoja

Figure 2. Correlation coefficients between mean monthly air temperature and series of annual sensitivity for analysed coniferous species from Rogów FRS: dashed horizontal lines – significance level ($p=0.05$); pVI, ..., pXII – months of the year prior to tree-ring formation;

ABAL – *Abies alba*, LADE – *Larix decidua*, PISY – *Pinus sylvestris*, PSME – *Pseudotsuga menziesii*

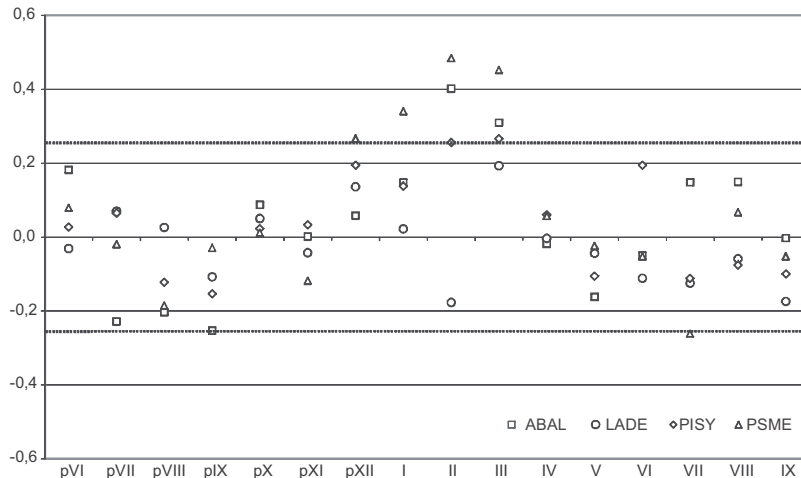


Rycina 3. Wartości współczynnika korelacji między średnią miesięczną minimalną temperaturą powietrza a serią czułości rocznej dla badanych iglastych gatunków drzew z LZD Rogów. Oznaczenia jak na rycinie 2

Figure 3. Correlation coefficients between mean monthly minimum air temperature and series of annual sensitivity for analysed coniferous species from Rogów FRS. Denotes as in figure 2

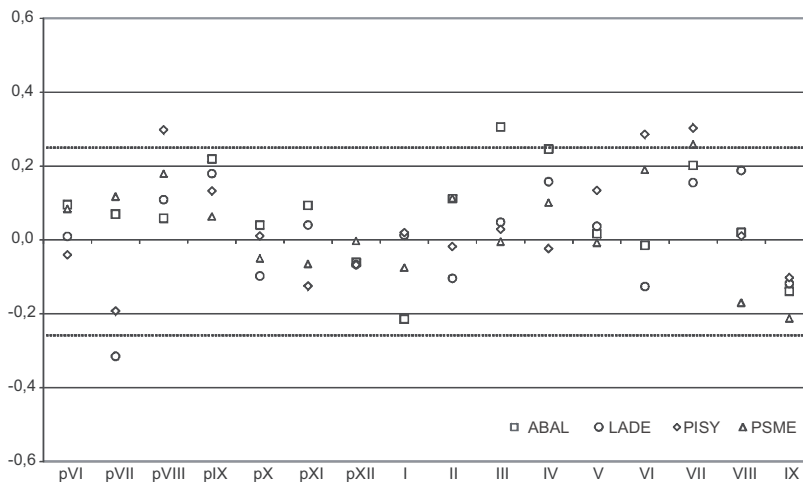
Największe znaczenie w kształtowaniu szerokości słoja badanych gatunków drzew iglastych rosnących w LZD Rogów należy przypisać warunkom termicznym. Rola opadów atmosferycznych w tym procesie była zdecydowanie mniejsza. W przypadku wszystkich gatunków, poza modrzewiem, na proces tworzenia słoja przyrostu rocznego w największym stopniu wpływała termika okresu zimowego i przedwiośnia. Prawidłowość ta odnosi się zarówno do średniej temperatury powietrza (ryc. 2), jak i warunków ekstremalnych – średniej tempe-

ratury minimalnej (ryc. 3) i maksymalnej (ryc. 4). Istotne współczynniki korelacji między tymi parametrami klimatycznymi a seriami czułości rocznej stwierdzono w lutym i marcu w roku tworzenia słoja. Najwyższe wartości ($r > 0,45$) obserwowano w przypadku dąglezi. Warunki termiczne okresu wegetacyjnego oraz poprzedniego roku praktycznie nie wpływały na reakcję przyrostową badanych drzew. Jedynie u jodły stwierdzono istotną negatywną zależność przyrostu w roku następnym od średniej temperatury września. O ile odpowiedź bada-



Rycina 4. Wartości współczynnika korelacji między średnią miesięczną maksymalną temperaturą powietrza a serią czułości rocznej dla badanych iglastych gatunków drzew z LZD Rogów. Oznaczenia jak na rycinie 2.

Figure 4. Correlation coefficients between mean monthly maximum air temperature and series of annual sensitivity for analysed coniferous species from Rogów FRS. Denotes as in figure 2.



Rycina 5. Wartości współczynnika korelacji między średnią miesięczną sumą opadów atmosferycznych a serią czułości rocznej dla badanych iglastych gatunków drzew z LZD Rogów. Oznaczenia jak na rycinie 2.

Figure 5. Correlation coefficients between mean monthly precipitation and series of annual sensitivity for analysed coniferous species from Rogów FRS. Denotes as in figure 2

nych gatunków na warunki termiczne była zbliżona, szczególnie w przypadku czynników najbardziej wpływających na szerokość słoja, to zaobserwowano znaczne zróżnicowanie wpływu opadów atmosferycznych. Największe znaczenie miały one u sosny. Istotne, dodatnie współczynniki korelacji stwierdzono latem (czerwiec, lipiec) roku tworzenia się słoja oraz w sierpniu roku poprzedniego (ryc. 5). U jodły zapotrzebowanie na wodę w postaci deszczu najważniejsze było na przedwiośniu (marzec-kwiecień). W przypadku modrzewia istotna okazała się korelacja indeksów przyrostowych i opadów w lipcu roku poprzedzającego wykształcenie słoja, a w

przypadku daglezi – w lipcu roku odłożenia przyrostu (ryc. 5).

4. Dyskusja

Relacje między przyrostem drzew a czynnikami go kształtującymi przekładają się na tendencje wzrostowe poszczególnych gatunków, a co za tym idzie i na możliwości produkcyjne ekosystemów leśnych (Speieker et al. 1996; Jaworski 2003a, b). Wszelkie zmiany w tym zakresie będą powodować nie tylko zmiany w samych

zbiorowiskach roślinnych, ale i w leśnictwie oraz dziedzinach gospodarki z nim związanych (Chmura et al. 2010). Analiza dendroklimatologiczna pozwala ustalić charakter relacji między warunkami klimatycznymi a aktywnością kambium. Może być wykorzystywana do poznania wymagań ekologicznych poszczególnych gatunków drzew oraz oceny wpływu warunków siedliskowych na ich wzrost i przyrost (Fritts 1976; Briffa, Cook 1990; Schweingruber 1996). W przypadku gatunków obcych może stanowić narzędzie do oceny stopnia ich aklimatyzacji.

Podobieństwo uzyskanych chronologii analizowanych iglastych gatunków drzew rosnących w LZD Rogów świadczy o zbliżonym charakterze ich reakcji na zmieniające się z roku na rok warunki klimatyczne. Głównym czynnikiem wpływającym na przyrost grubości tych drzew była termika końca zimy i wczesniej wiosny. Podobne obserwacje, lecz dla szerszego zestawu gatunków rosnących w Nadleśnictwie Sławno na Pomorzu, zostały poczynione przez Feliksika i Wilczyńskiego (2009). Zbliżone wyniki uzyskała także Cedro (2004) dla sosny i daglezi z Pomorza Zachodniego. Stwierdzone w prezentowanych badaniach relacje „klimat – przyrost” poszczególnych gatunków zasadniczo znajdują potwierdzenie w wynikach wcześniejszych analiz wpływu warunków klimatycznych na aktywność kambium gatunków drzewiastych w Polsce. Jednakże położenie Leśnego Zakładu Doświadczalnego SGGW w Rogowie na granicy naturalnego występowania niektórych z nich przekłada się na lokalną specyfikę tych zależności.

Otrzymane wyniki dotyczące roli klimatu w kształtowaniu przyrostu rocznego sosny wpisują się w dotychczasowe ustalenia w tym zakresie zarówno na nizinach (Zielski 1997; Cedro 2004; Koprowski et al. 2012), jak i w górach (Wilczyński et al. 2001) oraz całej Polsce (Wilczyński et al. 2001; Zielski et al. 2010). Za główny czynnik ograniczający wzrost sosny uznaje się niską temperaturę w okresie luty – marzec. Takie same wyniki otrzymano w przypadku *Pinus sylvestris* rosnącej w Rogowie. Świadczy to o ponadregionalnym charakterze i znaczeniu termiki końca zimy i przedwiośnia, jeżeli chodzi o aktywność kambium tego gatunku. Spośród analizowanych gatunków największą zależność przyrostu rocznego od opadów atmosferycznych stwierdzono właśnie u sosny (ryc. 5). Pozytywna rola obfitych opadów w okresie wegetacyjnym (maj-lipiec) została także stwierdzona u sosen badanych na Pomorzu Zachodnim przez Cedro (2001, 2004) i w północnej Polsce (Koprowski et al. 2012). Wyniki otrzymane w niniejszych badaniach są o tyle zastanawiające, że sosna jest gatunkiem o szerokim zakresie wymagań wilgotnościowych i w znacznej mierze zajmuje siedliska suche. Stanowisko w Rogowie zlokalizowane jest na

siedlisku Lśw i LMśw. Te typy siedliskowe lasu cechują się wilgotnością wystarczającą lub nawet przewyższającą standardowe zapotrzebowania sosny. Niewykluczone, że na stosunki wodne badanej sosny wpływają inne, niezidentyfikowane czynniki.

W przypadku modrzewia uzyskane wyniki znajdują potwierdzenie we wcześniejszych studiach nad wpływem klimatu na przyrost roczny tego gatunku, szczególnie na obszarze nizinym Polski. Zarówno Oleksyn i Fritts (1991), jak i Danek (2009) oraz Koprowski (2012) podkreślają, że temperatura zimy i przedwiośnia nie jest dla modrzewia czynnikiem istotnie wpływającym na proces formowania słoja przyrostu rocznego. Autorzy ci wiążą ten fakt ze znaczą mrozoodpornością tego gatunku wynikającą z niskiej zimowej zdolności transpiracyjnej (Olaczek 1986). Jednakże badane modrzewie wykazują istotną pozytywną korelację z temperaturą minimalną marca (ryc. 3), co może świadczyć o tym, że mimo dużej odporności na mróz gatunek ten preferuje jednak okres przedwiośnia pozbawiony przymrozków. Stwierdzona przez Danek (2009) oraz Danek i Danek (2011) istotna rola termiki czerwca nie znajduje potwierdzenia w przypadku drzew rosnących w Rogowie. Niewykluczone, że modrzew znajduje w tym regionie swoje optimum wymagań względem temperatury. Chociaż takiemu stwierdzeniu mogą przeczyć wartości współczynnika korelacji między indeksami przyrostowymi a wartościami temperatury minimalnej w okresie wegetacyjnym (ryc. 3). Nie są one co prawda istotne statystycznie, ale wskazują na zapotrzebowanie tego gatunku na ciepło w okresie aktywności kambium, co częściowo widoczne jest także w wynikach prezentowanych dla północnej Małopolski przez Danek (2009). Dotychczasowe analizy dendroklimatologiczne stwierdzają istotny wpływ opadów atmosferycznych na przyrost radialny modrzewia w Polsce (Oleksyn, Fritts 1991; Feliksik 1992; Feliksik, Wilczyński 1998a, b; Danek 2009, Koprowski 2012). Szerokość słoju przyrostu rocznego badanych modrzewi z Rogowa wydaje się nie zależeć od ilości wilgoci docierającej w postaci deszczu. Jedyną istotną korelację stwierdzono w przypadku lipca roku poprzedniego. Jej negatywny charakter można wiązać z tym, że roślina „inwestuje” dostępną wilgoć w tworzenie bieżącego przyrostu, a nie w pączki, z których będzie czerpać substancje odżywcze w roku następnym.

Zależność przyrostu radialnego jodeł od temperatury w okresie zimy i przedwiośnia została stwierdzona w różnych regionach Polski. Na znaczenie termiki tego okresu w kształtowaniu przyrostu *Abies alba* uwagę zwracał Feliksik (1990). Pozytywną korelację między temperaturą lutego i marca a szerokością słoja przyrostu rocznego u jodeł rosnących na północy kraju, poza naturalnym zasięgiem występowania tego gatunku, stwier-

dzili Koprowski i Gławenda (2007). Według Bijaka (2010) w zimowych i przedwiosennych mrozach należy upatrywać przyczyn negatywnych lat wskaźnikowych u jodeł z Pojezierza Kaszubskiego. Znajduje to potwierdzenie w prezentowanych w tej pracy wysokich i istotnych współczynnikach korelacji serii czułości rocznej i temperatury minimalnej oraz maksymalnej (ryc. 3, 4). Z kolei Feliksik i inni (2000) otrzymali dla Świętokrzyskiego Parku Narodowego (ŚPN) rezultaty zbliżone do wyżej opisanych. Co ciekawe, badający niezbyt odległe od ŚPN jedliny Nadleśnictwa Zagnańsk Bronisz i inni (2010) stwierdzili zupełnie odmienny charakter relacji „temperatura – przyrost”. Według ich obserwacji korelacja między temperaturą marca a indeksami przyrostowymi miała charakter negatywny. Autorzy ci podkreślali także istotną rolę termiki okresu wegetacyjnego, a szczególnie lata, co znajduje potwierdzenie w pracach Feliksika (1990). Stwierdzony przez nich ograniczający wzrost wpływ temperatury powietrza można tłumaczyć przesuszaniem gruntu, efektem czego może być deficyt tak potrzebnej w tym czasie roślinom wilgoci (Bernadki 2008). Prawie całkowity brak relacji między przyrostem a sumą opadów obserwowany był także w północnej Polsce, poza zasięgiem jodły, na pojezierzach Iławskim (Koprowski, Gławenda 2007) i Kaszubskim (Bijak 2010), a także w Rogowie, gdzie jodła występuje na granicy swojego naturalnego zasięgu. Tam brak istotnego wpływu opadów może wynikać z ich dostatecznej ilości i właściwego rozmieszczenia w ciągu roku oraz z faktu, że granica ta jest wyznaczona warunkami termicznymi.

W obrębie naturalnego zasięgu występowania w Ameryce Północnej dąglezja zajmuje siedliska skrajnie różniące się pod względem wilgotności i termiki, czego efektem jest znaczne zróżnicowanie odporności tego gatunku na susze i mróz (Bellon et al. 1977). Szeroki zakres czynników klimatycznych, wpływających na wzrost dąglezji w Polsce, stwierdzili Feliksik i Wilczyński (2004). Jednakże termika okresu zimowego, a szczególnie lutego i marca, wydaje się być ponadregionalnym determinantem przyrostu tego gatunku na grubość. Obserwacje te znalazły potwierdzenie w bardziej szczegółowych analizach wspomnianych autorów (Feliksik, Wilczyński 2008, 2009) oraz Cedro (2004, 2006). Relacje „klimat – przyrost” dąglezji z Rogowa wpisują się w schemat zależności wzrostu tego gatunku od warunków klimatycznych w Polsce. Wśród badanych gatunków iglastych to właśnie dąglezje w największym stopniu reagowały na warunki cieplne okresu końca zimy i przedwiośnia (ryc. 2–4). Świadczy to o dużej wrażliwości tego obcego dla naszych warunków przyrodniczych gatunku na klimat, szczególnie zaś na mrozy w okresie przed rozpoczęciem wegetacji. Zależność przyrostu badanych osobników *Pseudotsuga*

menziesii od opadów częściowo pokrywa się z obserwacjami Feliksika i Wilczyńskiego (2004). Szczególne znaczenie czynnik ten ma w regionach o niskich opadach i ogólnym deficycie wody w bilansie wilgoci. Do takich obszarów należą Wzniesienia Łódzkie. W pozostałych regionach (np. na Pomorzu) obserwuje się istotną pozytywną korelację przyrostu z opadami w lutym i marcu (Cedro 2004, 2006; Feliksik, Wilczyński 2008). Takiej zależności nie stwierdzono w niniejszych badaniach. Zapewne, tak jak w przypadku jodły, ten brak istotnego wpływu opadów może wynikać z ich dostatecznej ilości i właściwego rozłożenia w ciągu roku.

Przyczyn obserwowanej zależności przyrostu badanych gatunków iglastych od temperatury okresu luty – marzec należy upatrywać w fizjologii roślin. Mroźna zima osłabia tempo procesów fizjologicznych, szczególnie wpływa na równowagę między procesami asymilacji i oddychania (Żelawski 1967; Szaniawski et al. 1977). Co prawda niektóre gatunki, np. modrzew, dzięki niskiej zimowej zdolności transpiracyjnej cechują się mrozoodpornością (Olaczek 1986), jednakże przemrożenie gleby, co jest bardzo prawdopodobne szczególnie w przypadku braku pokrywy śnieżnej, może doprowadzić, zwłaszcza na przedwiośniu, do pojawiania się suchofizjologicznej, co z kolei może skutkować uszkodzeniem tkanek roślinnych (Szymański 1986). Dodatkowo, na co zwraca uwagę Chałupka (1977), niska temperatura w tym okresie hamuje aktywność pąków i igieł w produkcji fitohormonów, obniżając efektywność procesów metabolicznych i ksylogenezy. Z tego powodu aktywność kambium nie dość że zaczyna się później, to jeszcze odbywa się z mniejszą intensywnością i skutecznością, nic zatem dziwnego, że drzewa wytwarzają węższe słoje przyrostu rocznego.

5. Podsumowanie

Badane iglaste gatunki drzew w LZD Rogów wykazują spore podobieństwo dynamiki zmian przyrostu grubości, które jednak wydaje się być bardziej efektem zależności taksonomicznych niż proveniencyjnych. Introdukowana dąglezja dobrze zaadaptowała się do lokalnych warunków wzrostu i prezentuje przebieg zmian przyrostu rocznego zbliżony do rodzimych gatunków drzew. Uzyskany obraz wpływu warunków klimatycznych na przyrost radialny, rosnących w LZD Rogów, sosny, jodły, modrzewia oraz dąglezji jest typowy dla relacji dendroklimatologicznych obserwowanych u tych gatunków na innych stanowiskach w nizinnej części Polski, gdzie głównym czynnikiem wpływającym na szerokość słoja przyrostu rocznego jest temperatura okresu zimowego i przedwiośnia. Świadczy to o ponad-

regionalnym i międzygatunkowym charakterze i znaczeniu warunków termicznych tego okresu w kształtowaniu przyrostu iglastych gatunków drzewiastych rosnących w Polsce.

Podziękowania

Praca zrealizowana w ramach grantu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr N N309 170639 pt. „Wpływ warunków klimatycznych na przyrost oraz aktywność kambialną rodzimych i obcych gatunków drzew w LZD Rogów”.

Literatura

- Bellon S., Tumiłowicz J., Król S. 1977. Obce gatunki drzew w gospodarstwie leśnym. Warszawa, PWRiL, 267 s. ISBN 00-01-13477-9.
- Bernadzi E. 2008. Jodła pospolita – ekologia, zagrożenia, hodowla. Warszawa, PWRiL. ISBN 978-83-09-01028-9.
- Bijak Sz. 2010. Tree-ring chronology of silver fir and its dependence on climate of the Kaszubskie Lakeland (northern Poland). *Geochronometria*, 35: 91–94.
- Bijak Sz., Bronisz A., Bronisz K. 2012a. Wpływ czynników klimatycznych na przyrost radialny dębu szypułkowego i czerwonego w LZD Rogów. *Studia i Materiały CEPL w Rogowie*, 14/1 (30): 121–128.
- Bijak Sz., Bronisz A., Bronisz K. 2012b. Wpływ ekstremalnych warunków klimatycznych na przyrost radialny dębu czerwonego *Quercus rubra* w LZD Rogów. *Studia i Materiały CEPL w Rogowie*, 14/4 (33): 163–170.
- Biondi F., Waikul K. 2004. DendroClim2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers and Geosciences*, 30: 303–311.
- Briffa K., Cook E. R. 1990. Methods of response function analysis, w: Cook E., Kairiukstis L. *Methods of dendrochronology. Applications in the Environmental Sciences*. Dordrecht, Boston Kluwer Academic Publishers: 240–247. ISBN 0-7923-0586-8.
- Bronisz A., Bijak Sz., Bronisz K. 2010. Dendroklimatologiczna charakterystyka jodły pospolitej (*Abies alba* Mill.) na terenie Gór Świętokrzyskich. *Sylvan*, 154(7): 463–470.
- Cedro A. 2001. Dependence of radial growth of *Pinus sylvestris* L. from western Pomerania on the rainfall and temperature conditions. *Geochronometria*, 20: 69–74.
- Cedro A. 2004. Zmiany klimatyczne na Pomorzu Zachodnim w świetle analizy sekwencji przyrostów rocznych sosny zwyczajnej, daglezi zielonej i rodzimych gatunków dębów. Oficyna IN PLUS. ISBN 83-89402-03-3.
- Cedro A. 2006. Influence of thermic and pluvial conditions on the radial increments of *Pseudotsuga menziesii* Franco from Western Pomerania, Poland, w: Heinrich I., Gärtner H., Monbaron M., Schleser G. (red.). TRACE – Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology 4: 132–140.
- Chałupka W. 1977. Zagadnienia fizjologii wzrostu i rozwoju, w: Nasze Drzewa Leśne. Świerk pospolity. Warszawa-Poznań, PWN: 153–198.
- Chmura D. J., Howe G. T., Anderson P. D., St. Clair J. B. 2010. Przystosowanie drzew, lasów i leśnictwa do zmian klimatycznych. *Sylvan* 154(9): 587–602.
- Cook E. R., Briffa K. 1990. Data analysis, w: Cook E., Kairiukstis L. *Methods of dendrochronology. Applications in the Environmental Sciences*. Dordrecht, Boston, Kluwer Academic Publishers: 99–162. ISBN 0-7923-0586-8.
- Danek M. 2009. Wpływ warunków klimatycznych na szerokość przyrostów rocznych modrzewia (*Larix decidua* Mill.) rosnącego w północnej części województwa małopolskiego. *Sylvan*, 153(11): 768–776.
- Danek M., Danek T. 2011. Zastosowanie alternatywnych metod przetwarzania danych w analizie dendroklimatologicznej modrzewia *Larix decidua* Mill. Z Polski południowej. *Sylvan*, 155(3): 147–158.
- Feliksik E. 1990. Badania dendroklimatologiczne dotyczące jodły (*Abies alba* Mill.) występującej na obszarze Polski. *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej w Krakowie*, 151.
- Feliksik E. 1992. Wpływ warunków klimatycznych na wielkość przyrostów radialnych modrzewia europejskiego (*Larix decidua* Mill.) występującego w Karpatach. *Sylvan*, 136(5): 61–67.
- Feliksik E., Wilczyński S. 1996. Dendrochronologiczna charakterystyka sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) z Kotliny Kłodzkiej i Karpat. *Sylvan*, 140(9): 77–84.
- Feliksik E., Wilczyński S. 1998a. Wpływ temperatury i opadów na przyrost roczny drewna świerka, sosny i modrzewia występujących w leśnictwie Pierściec u podnóża Pogórza Wilamowickiego. *Prace Komitetu Zagospodarowania Ziem Górskich PAN*, 44: 77–86.
- Feliksik E., Wilczyński S. 1998b. Wpływ warunków termicznych i pluwialnych na przyrost drewna modrzewi (*Larix decidua* Mill.). *Sylvan*, 142(3): 85–90.
- Feliksik E., Wilczyński S. 2001. Influence of temperature and rainfall on the increment width of native and foreign tree species from the Istebna Forest District. *Folia Forestalia Polonica*, ser. A. 43: 103–114.
- Feliksik E., Wilczyński S. 2004. Klimatyczne uwarunkowania przyrostu radialnego daglezi zielonej (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) rosnącej na obszarze Polski. *Sylvan*, 148(12): 31–38.
- Feliksik E., Wilczyński S. 2008. Sygnał klimatyczny w słojach *Picea sitchensis* (Bong.) Carriere oraz *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. *Sylvan*, 152(6): 3–13.
- Feliksik E., Wilczyński S. 2009. The effect of climate on tree-ring chronologies of native and nonnative tree species growing under homogenous site conditions. *Geochronometria*, 33: 49–57.
- Feliksik E., Wilczyński S., Podlaski R. 2000. Wpływ warunków termiczno-pluwialnych na wielkość przyrostów radialnych sosny (*Pinus sylvestris* L.), jodły (*Abies alba* Mill.) i buka (*Fagus sylvatica* L.) ze Świętokrzyskiego Parku Narodowego. *Sylvan*, 144(9): 53–64.
- Fritts H. C. 1976. Tree rings and climate. London-New York-San Francisco, Academic Press.
- Jaworski A. 2003a. Zmiany tendencji wzrostowych głównych lasotwórczych gatunków drzew w Europie i obszarach

- górkich Polski oraz ich przyczyny. Część I. Zmiany tendencji wzrostowych. *Sylvan*, 147(6): 99–106.
- Jaworski A. 2003b. Zmiany tendencji wzrostowych głównych lasotwórczych gatunków drzew w Europie i obszarach górskich Polski oraz ich przyczyny. Część II. Przypuszczalne przyczyny zmian tendencji wzrostowych. *Sylvan*, 147(7): 69–74.
- Kondracki J. 2000. Geografia regionalna Polski. Warszawa, PWN. ISBN 83-01-13897-1.
- Koprowski M. 2012. 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., Gławenda K. 2007. Dendrochronologiczna analiza przyrostów rocznych jodły pospolitej (*Abies alba* Mill.) na Pojezierzu Olsztyńskim (Nadleśnictwo Wichrowo). *Sylvan*, 151(11): 35–40.
- Koprowski M., Przybylak R., Zielski A., Pospieszynska A. 2012. Tree rings of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) as a source of information about past climate in northern Poland. *International Journal of Biometeorology*, 56: 1–10. DOI: 10.1007/s00484-010-0390-5.
- Mäkinen H., Vanninen P. 1999. Effect of sample selection on the environmental signal derived from tree-ring series. *Forest Ecology and Management*, 113: 83–89.
- Olażek R. 1986. Zarys ekologii i fitocenologii, w: S. Białobok (red.) *Modrzewie Larix* Mill. Warszawa-Poznań, PWN: 379–440.
- Oleksyn J., Fritts H. C. 1991. Influence of climatic factors upon tree rings of *Larix decidua* and *L. decidua* × *L. kaempferi* from Pulawy, Poland. *Trees*, 5: 75–82.
- Opała M. 2009. Wpływ warunków klimatycznych na kształtowanie się szerokości przyrostu rocznego *Fagus sylvatica*, *Pinus silvestris* i *Abies alba* z Ojcowskiego Parku Narodowego. *Prądnik. Prace i Materiały Muzeum im. Prof. Wł. Szafera*, 19: 231–230.
- Schweingruber F. H. 1996. Tree Rings and Environment – Dendroecology. Berne, Paul Haupt Publishers. ISBN 3258054584.
- Spiecker H., Mielikainen K., Kohl M., Skovsgaard J. P. (red.). 1996. Growth trends in European forests. European Forest Institute, Research Report 5, Springer-Verlag, Heidelberg.
- Szaniawski R., Żelawski W., Wierzbicki B. 1977. Wymiana gazowa i gospodarka wodna, w: *Nasze Drzewa Leśne. Świerk pospolity*. Warszawa-Poznań, PWN: 131–152.
- Szymański S. 1986. Ekologiczne podstawy hodowli lasu. Warszawa, PWRiL. ISBN 83-09-01728-6.
- Trampler T., Kliczkowska A., Dmyterko E., Sierpińska A. 1990. Regionalizacja przyrodniczo-leśna Polski na podstawach ekologiczno-fizjograficznych. Warszawa, PWRiL, 159 s.
- 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 Climate and Applied Meteorology*, 23: 201–213.
- Wilczyński S. 1999. Wpływ klimatu na przestrzenne zróżnicowanie reakcji przyrostowych sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.), w: Feliksik E. Klimatyczne uwarunkowania życia lasu. Wrocław, Polskie Towarzystwo Ludoznawcze: 197–203.
- Wilczyński S. 2010. Uwarunkowania przyrostu radialnego wybranych gatunków drzew z Wyżyny Kieleckiej w świetle analiz dendroklimatologicznych. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Rolniczego im. Hugona Kollątaja w Krakowie, Rozprawy*: 464 (341): 1–221.
- Wilczyński S., Krapiec M., Szychowska-Krapiec E., Zielski A. 2001. Regiony dendroklimatyczne sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) w Polsce. *Sylvan* 145(8): 53–61.
- Wilczyński S., Wertz B. 2012. Sygnał klimatyczny w seriach przyrostów radialnych jodły pospolitej oraz modrzewia europejskiego. *Studia i Materiały CEPL w Rogowie* 14/1 (30): 66–74.
- Zielski A. 1997. Uwarunkowania środowiskowe przyrostów radialnych sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) w Polsce Północnej na podstawie wielowiekowej chronologii. Toruń, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika.
- Zielski A., Krapiec M. 2004. Dendrochronologia. Warszawa, PWN, 328 s. ISBN 830114226X.
- Zielski A., Krapiec M., Koprowski M. 2010. Dendrochronological data, w: Przybylak R., Majorowicz J., Brazdil R., Kejna M. (red.). The Polish climate in the European context: an historical overview. Springer: 191–217. DOI: 10.1007/978-90-481-3167-9.
- Żelawski W. 1967. Wymiana gazowa i bilans wodny igliwia, w: *Zarys fizjologii sosny zwyczajnej*. Warszawa – Poznań, PWN: 33–94.

Climate signal in the radial growth of selected coniferous species from the Forest Experimental Station in Rogów

Szymon Bijak✉

Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Faculty of Forestry, Laboratory of Dendrometry and Forest Productivity,
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa, Poland.

✉ Tel. +48 22 5938093, e-mail: szymon.bijak@wl.sggw.pl

Abstract. I present dendroclimatological analysis of coniferous tree species growing under the same environmental conditions in the WULS-SGGW Forest Experimental Station in Rogów (51°49' N, 19°53' E, ca. 190 m a.s.l.). The study focuses on silver fir, European larch, Scots pine and Douglas fir. For each species, tree-ring width and annual sensitivity chronologies were developed for the period 1931–2010. Analysed species show considerable similarity of their radial increment course (GLK up to 67%, the t-value of 3,5–9,5). The relationship obtained for of the influence of climate conditions on radial growth of these species is typical of the relationships reported from other locations in lowland Poland. Late winter and early spring temperature, especially during February–March, is the main factor affecting tree-ring formation. The general relationship demonstrates that this seasonal thermal limitation operates at an inter-regional and interspecific level in determining the growth of coniferous tree species in Poland. Whereas, the dependence of these species on precipitation is much less significant.

Key words: dendroclimatology, Scots pine, silver fir, European larch, Douglas fir, central Poland

1. Introduction

The growth of trees, including increase of their diameter, is a complex process. The structure, density and above all the width of a tree-ring are the result of mutual interaction of many different, sometimes contradictory factors and relationships between the environment and a plant (Schweingruber 1996; Zielski, Krapiec 2004). Both natural forces and human activity have influence on cambium activity and, what comes with it, on tree growth. Dynamics of weather conditions, characterised by significant monthly and annual fluctuations is an important factor that shapes the radial growth of a tree (Fritts 1976; Schweingruber 1996). Trees response to factors influencing their growth can be observed in short-term increment reaction. The discrepancies in this process between particular species result from different sensitivity to climatic factor, which is also modelled by age, genes,

site characteristics and different random incidents (Fritts 1976; Schweingruber 1996; Wilczyński 2010).

Knowledge about impact of natural environment on the functioning of trees is one of the main requirements of proper forest management. This is because of the basic role that habitat, especially climatic conditions, plays in the formation of growth of particular species. Recently observed climate changes cause changes in relations between tree growth and factors shaping it. These effects can be also observed in growth trends of particular species, which has direct influence on the production capacity of forest ecosystems (Spiecker et al. 1996; Jaworski 2003a, b). As Chmura et al. (2010) report, changing environmental conditions not only cause changes in plant communities, but also in forestry and the business related with it. These issues show that research on the influence of climate conditions on tree growth is gaining importance and its results should be used in practice.

Studies on the impact of climate conditions on radial growth of forest trees began in Poland in the middle of XXth century (Zielski, Krąpiec 2004) and so far most of the native species along with the selected introduced ones were analysed. Research focused mainly on Scots pine – the most popular forest tree species in Poland. The influence of weather conditions on tree-ring widths for this species was researched by Feliksik and Wilczyński (1996), Zielski (1997), Wilczyński (1999), Wilczyński et al. (2001) and Cedro (2001, 2004). Dendroclimatology of European larch was studied by Feliksik (1992), Feliksik and Wilczyński (1998b), Danek (2009) and Koprowski (2012). As for fir, studies were conducted by Feliksik (1990), Koprowski and Gławenda (2007), Bijak (2010) and Bronisz et al. (2010). Douglas fir is the most widely recognised introduced tree species in terms of dendroclimatological investigations (Feliksik, Wilczyński 2004, 2008, 2009).

Because of the different genes, reactions to environmental factors, including climate parameters, can be different for particular species, therefore comparative studies on dendroclimatological reaction are valuable (Opała 2009). Previous Polish works in this area contained, inter alia, analysis of the impact of climate conditions on growth of pine, fir and beech in Świętokrzyski National Park (Feliksik et al. 2000) and in Ojcowski National Park (Opała 2009), spruce, pine and larch at Pogórze Wilamowickie (Wilamowickie Foothills) (Feliksik, Wilczyński 1998a), and fir and larch in Zagnańsk Forest District (Wilczyński, Wertz 2012). Comparison of ‘climate – growth’ relationships for both native and introduced species was carried out for Scots pine, different spruces and Douglas fir in Pomorze (Pomerania) by Feliksik and Wilczyński (2009), for Scots pine, Douglas fir and oaks in Pomorze Zachodnie (Western Pomerania) by Cedro (2004), and for red and pedunculate oaks in Rogów by Bijak et al. (2012a, b).

The objective of this study was to recognise the radial growth pattern of the selected coniferous species (fir, larch, pine and Douglas fir) growing under the same environmental conditions in the Forest Experimental Station in Rogów, and to compare relationship between their radial growth and environmental factors.

2. Material and methods

The research material was collected in autumn 2010 in the area of Forest Experimental Station (FES) in Rogów (51°49'N, 19°53'E, ca 190 m a.s.l.). Study site was

located at the eastern outskirts of Wzniesienia Łódzkie (Łódzkie Hills) a region, which is a part of Wzniesienia Południowomazowieckie (Południowomazowieckie Hills) (Kondracki 2000). According to nature-forest zoning by Trampler et al. (1990), FES in Rogów is located at the northern edge of Kraina Małopolska (Małopolska Land), in Łódzko-Opoczyński District of Sieradzko-Łódzki mesoregion. Bedrock consists mostly of glacial formations made of clays and sands, where fertile, but acid luvisols had been formed. Ground water level is very low, often too low for trees roots. Vegetation period lasts 205-215 days on average. Average annual precipitation is 591 mm, of which less than 65% falls during the vegetation period. Average annual temperature is 7,5°C. January is the coldest month with average monthly temperature equal to -2,7°C, while July is the hottest one (17,6°C).

In the experimental stands of FES in Rogów, we selected one stand for silver fir (*Abies alba* Mill.), European larch (*Larix decidua* Mill.) and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). In the Arboretum, one site for Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) was chosen. The investigated stands were about 60-65 (larch, pine) and 70-80 (fir, Douglas fir) years old. Studied species grew on a fresh deciduous forest and fresh mixed deciduous forest habitats. 15 healthy and dominating individuals with correctly formed crown were selected at each site. One increment core per tree was taken from diameter at breast height. After drying the samples and grinding their surface with the purpose to increase the contrast between particular rings, the collected cores were scanned (1200 DPI resolution) with an EPSON Expression 10000XL scanner. Tree-ring widths were measured with an accuracy of 0,01 mm using the graphic files in Coorecorder (www.cybis.se). Next, material was cross-dated (particular years were assigned to respective annual rings) and measurement accuracy was checked in CDdendro software (www.cybis.se). Similarity of developed chronologies was assessed (*t*-value, GLK coefficient; Cook, Briffa 1990). Sequences of the least similarity to the others, thereby enabling addition of noise to the so-called ‘common signal’, were excluded from further analysis.

In order to eliminate influence of trees age and to examine interannual variability in diameter growth dynamics, we developed series of incremental indices based on tree-ring widths. Indices emphasise short-term incremental reaction for particular species. Value of annual sensitivity (c_t) for each analysed tree was

calculated using the following formula (Fritts 1976; Cook, Briffa 1990; Wilczyński 2010):

$$c_i = 2 \frac{x_i - x_{i-1}}{x_i + x_{i-1}}$$

where x_i and x_{i-1} stands for tree-ring width in the following two years.

Uniformity of developed sensitivity chronologies, indicating their representativeness and part of ‘common signal’ expressed by species chronologies, was assessed with EPS index (Expressed Population Signal; Wigley et al. 1984). Threshold of EPS = 0,85 was taken as a minimum value indicating usefulness of a chronology in dendroclimatological analysis (Mäkinen, Vanninen 1999; Wilczyński 2010). Similarity of incremental reaction between investigated species was also rated. GLK coefficient and t -values were taken as its measures. Gleichläufigkeit coefficient (GLK) describes similarity of two tree-ring width sequences in a qualitative way. Its value equals the share of cases of incremental reactions of the same character (raise or drop of ring’s width in interannual scale) in a common period for both chronologies. The latter index is a quantitative indicator for similarity of two chronologies and is calculated analogously as Student’s test statistics (Cook, Briffa 1990; Zielski, Krapiec 2004).

The influence of climate conditions on radial increment of analysed species was investigated based on the so-called response function, which is a multiple regression and correlation model that connects increment index (dependent variable) with climate parameters (explaining variable) (Fritts 1976; Briffa, Cook 1990). Calculations were carried out in DendroClim2002 (Biondi, Waikul 2004). Series of annual sensitivity were taken as an input data as well as average, minimal and maximal monthly temperature and monthly precipitation for the period from July in the year preceding ring formation to September in the year of current increment (16 months). Hence the defined temporal range of climate data enables assessment of the relationship between radial growth and climatic factors also in vegetation period and time just prior to the winter dormancy period (Fritts 1976). Dendroclimatological analysis was carried out for years 1953–2010, common interval for all analysed species (58 years). Climate data came from meteorological station located in FES in Rogów and maintained by the Department of Forest Silviculture WULS-SGGW.

3. Results

Chronologies elaborated for analysed coniferous trees growing in the area of FES in Rogów cover the period of 1931–2010. The longest sequences of tree-ring parameters were specified for Douglas fir, while the shortest ones for European larch (Table 1). Transformation of tree-ring width series into sensitivity sequences reduced the influence of mid- and long-term variability, while short-term variability related mostly to climate factor was enhanced. Significant variability of increment indexes in particular years (Fig. 1) illustrates that particular trees show individual response to environmental factors pressure. However, EPS values received for species chronologies show congenial response within the species (Table 1). The highest uniformity of radial increment pattern can be observed for pine and Douglas fir (EPS>0,92), the lowest one for fir (EPS=0,88). Both the average values EPS and values calculated in 30 years period exceeded threshold values 0,85, which confirms usefulness of compiled annual sensitivity chronologies for dendroclimatological analysis.

Both t -values and GLK coefficient indicates some interspecific similarity in the radial growth of analysed coniferous species in FES Rogów (Fig. 1; Table 2). In the case of raw tree-ring width chronologies, the t -value varied from 3,5 to 9,5. Fir chronologies were the least similar to other species sequences, while Scots pine and Douglas fir series resemble other species the most. GFK coefficient analysis gave similar result. According to this criterion, Scots pine was the most similar to other species (Table 2). In the case of annual sensitivity series, the t -values were lower than that in raw chronologies (on average 2/3-times lower). Values of GLK coefficient for indexed chronologies were almost equal to those for raw chronologies, while that of t -values amounted to about half of them (Table 2). This shows similar qualitative character of studied species reactions to interannual changes of climate conditions.

The most important role in the formation of the tree ring of the studied coniferous species growing in the area of FES in Rogów should be assigned to thermal conditions. The role of precipitations in this process was much smaller. For all species, except larch, thermal conditions in winter and early spring had the biggest influence on the formation of annual growth ring. This was observed for both mean temperature (Fig. 2) as well as extreme conditions – average minimum (Fig. 3) and maximum (Fig. 4) temperature. Significant

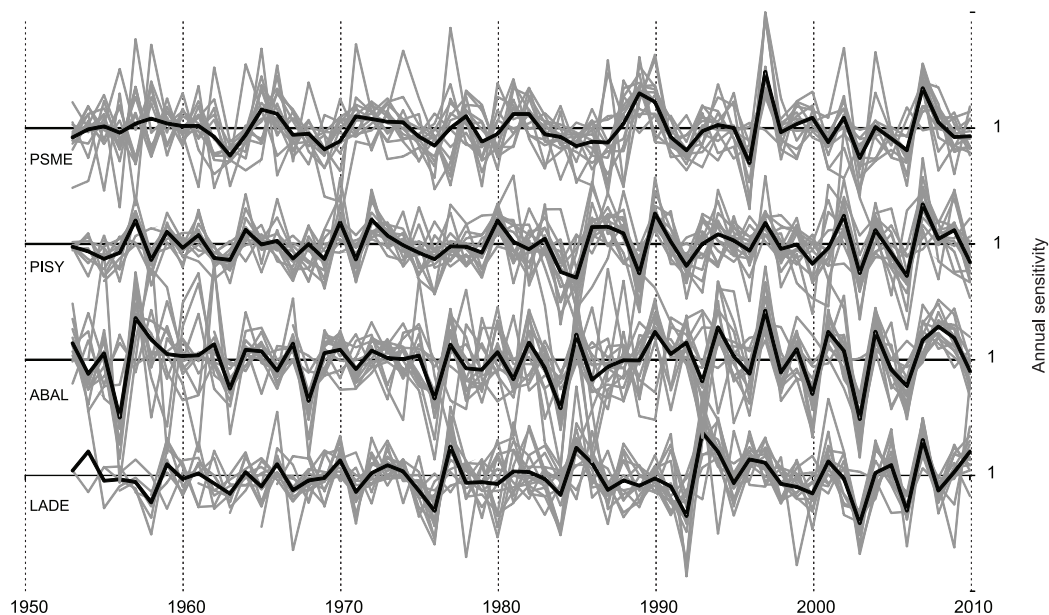


Figure 1. Series of annual sensitivity of analysed coniferous species from Rogów FES – individual trees (grey) and average for a species (black):

ABAL – *Abies alba*, *LADE* – *Larix decidua*, *PISY* – *Pinus sylvestris*, *PSME* – *Pseudotsuga menziesii*

Table 1. Basic descriptive features of chronologies of analysed coniferous species from Rogów FES

Species	Number of trees	Time span	Chronology median length	mTRW (SD) [mm]	r_{bar}^*	EPS*
ABAL	15	1939–2010	66	2,26 (1,33)	0,331	0,881
LADE	15	1953–2010	53	3,12 (1,85)	0,412	0,913
PISY	15	1946–2010	58	2,13 (1,12)	0,467	0,929
PSME	14	1931–2010	70	3,66 (1,68)	0,466	0,924

mTRW (SD) – mean tree-ring width with standard deviation in parenthesis;

r_{bar} and EPS – values given for series of increment indices

Species abbreviations as in Figure 1

Table 2. Similarity (*t*-values – left bottom part, GLK coefficient – right upper part) of raw and index chronologies of analysed species

	Tree-ring width chronology				Indexed chronology				
	ABAL	LADE	PISY	PSME	ABAL	LADE	PISY	PSME	
ABAL	x	53%	67%	58%	ABAL	x	61%	66%	58%
LADE	3,5	x	67%	54%	LADE	2,9	x	66%	57%
PISY	3,9	9,5	x	67%	PISY	2,9	2,0 x	x	63%
PSME	6,9	5,4	8,8	x	PSME	3,6	1,6	3,1	x

Species abbreviations as in Figure 1

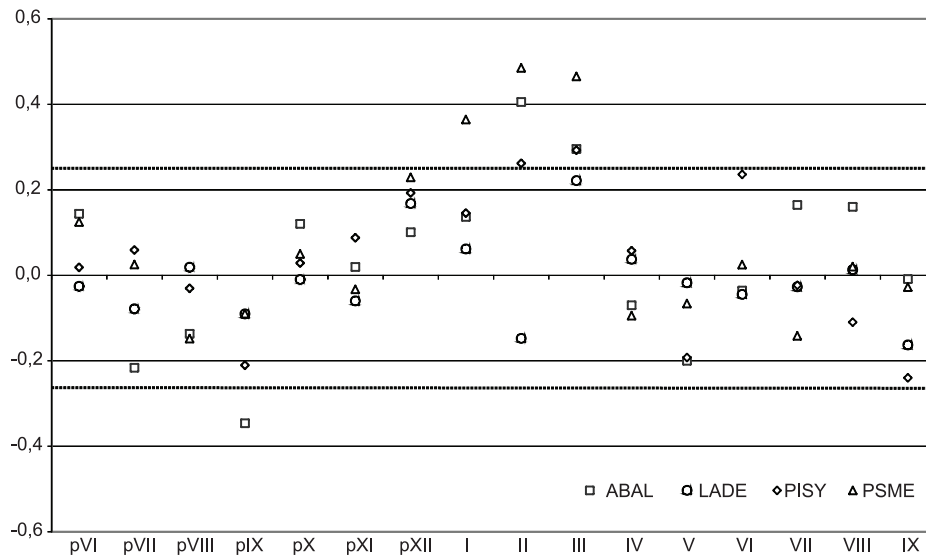


Figure 2. Correlation coefficients between mean monthly air temperature and series of annual sensitivity for analysed coniferous species from Rogów FES: dashed horizontal lines – significance level ($p=0.05$); pVI, ..., pXII – months of the year prior to tree-ring formation; ABAL – *Abies alba*, LADE – *Larix decidua*, PISY – *Pinus sylvestris*, PSME – *Pseudotsuga menziesii*

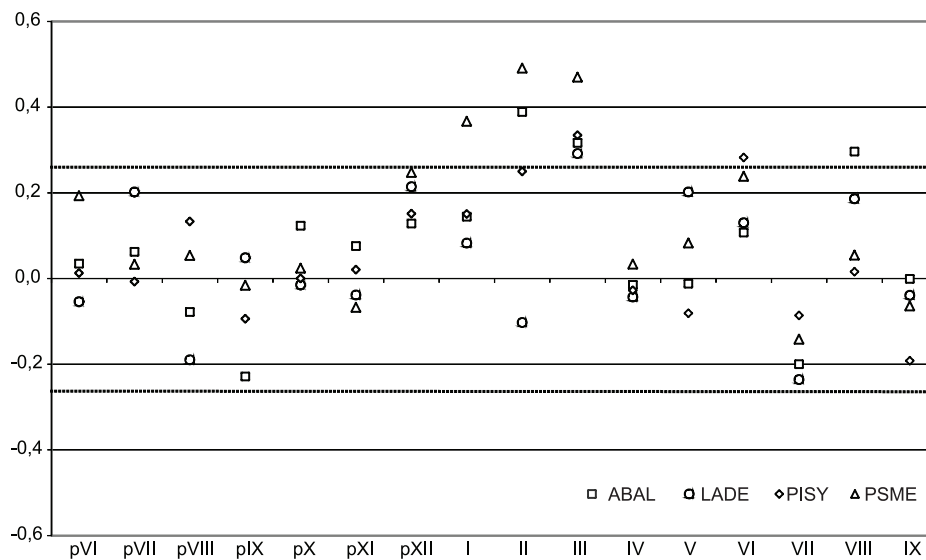


Figure 3. Correlation coefficients between mean monthly minimum air temperature and series of annual sensitivity for analysed coniferous species from Rogów FES. Denotes as in Figure 2

correlation coefficients between these climate parameters and series of annual sensitivity were found in February and March of the year of tree-ring formation. The highest values ($r>0.45$) were observed for Douglas fir. Thermal conditions of vegetation period and previous year had no influence on growth reaction for the studied trees. Only for silver fir, significant negative correlation between

growth in the following year and average temperature in September was found. While response of studied species to thermal conditions was similar, especially in the case of factors with biggest influence on tree-ring width, significant differences were observed for the influence of precipitation. Rainfall was the most important for Scots pine. Significant positive correlations were observed

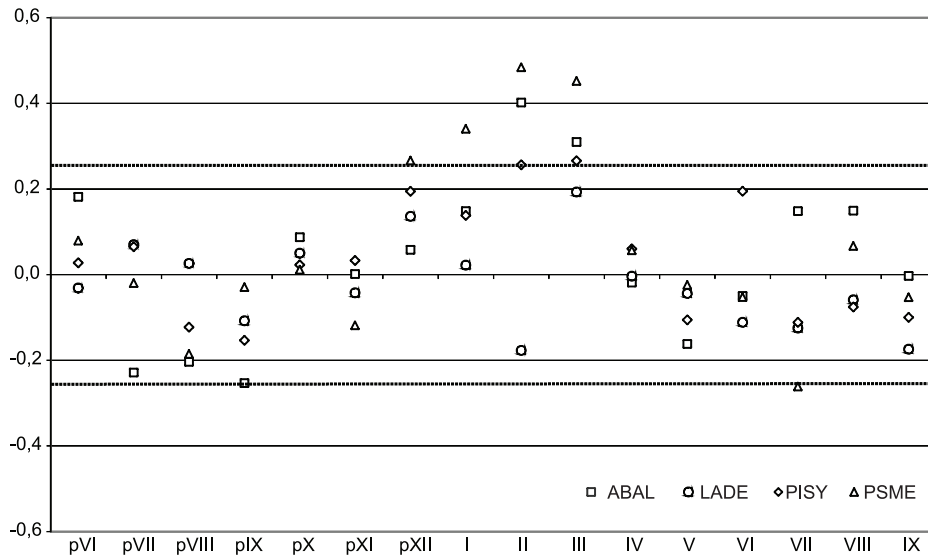


Figure 4. Correlation coefficients between mean monthly maximum air temperature and series of annual sensitivity for analysed coniferous species from Rogów FES. Denotes as in Figure 2

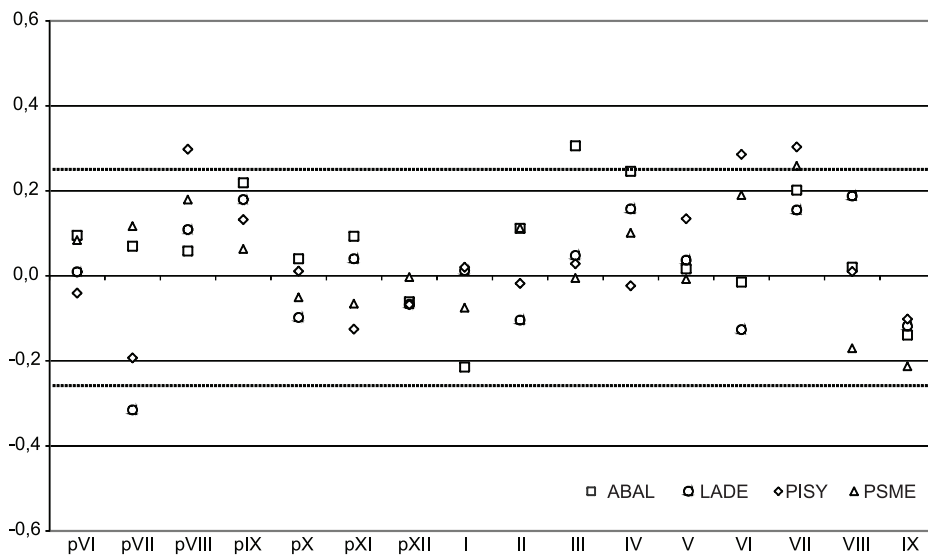


Figure 5. Correlation coefficients between mean monthly precipitation and series of annual sensitivity for analysed coniferous species from Rogów FES. Denotes as in Figure 2

during the summer (June, July) of the current growth year and in August of the previous year (Fig. 5). Silver fir shows the highest demand for water in the form of rain in early spring (March-April). In the case of larch, correlation between increment indexes and precipitation was important in July of the year prior to the annual ring formation, while for Douglas fir also in July, but in the year of growth (Fig. 5).

4. Discussion

Relations between growth of trees and factors forming it have direct influence on the growth trends of particular species, and thus on forest ecosystems production capacity (Spiecker et al. 1996; Jaworski 2003a, b). All changes within this range would cause change not only in plant communities, but also in

forestry and fields of economics related to it (Chmura et al. 2010). Dendroclimatological analysis allows us to determine the nature of relation between the climate conditions and cambium activity. It can also be used to learn ecologic demands of particular species of trees and to assess the influence of site conditions on their growth and increment (Fritts 1976; Briffa, Cook 1990; Schweingruber 1996). For the introduced species, it can be a useful tool to rate the extent of their acclimatisation.

Similarity of chronologies built for analysed coniferous species from FES in Rogów points on close character of their reactions to interannual variability of climate conditions. The main factor influencing the radial growth of these trees was temperature of late winter and early spring. Similar observations for a wider range of species from the Sławno Forest District in northern Poland were made by Feliksik and Wilczyński (2009). Cedro (2004) also received analogous results for Scots pine and Douglas fir in north-west Poland. Climate – growth relationships for particular species found in presented studies are consistent with the results of former analysis of influence of climate conditions on cambium activity of trees in Poland. However, location on Forest Experimental Station SGGW in Rogów, at the edge of natural distribution of some of them translates into local specificity for these dependencies.

Presented results referring to the role of climate in the formation of tree-ring of Scots pine are similar to existing findings in this area at lowland (Zielski 1997; Cedro 2004; Koprowski et al. 2012), in the mountains (Wilczyński et al. 2001) as well as in the area of whole Poland (Wilczyński et al. 2001; Zielski et al. 2010). Low temperature in the period of February – March was determined as the main factor limiting the growth of Scots pine. Exactly the same results were received for *Pinus sylvestris* in Rogów. This confirms the supra-regional nature and prominence of temperature of late winter and early spring, in terms of cambium activity of this species. Among the analysed species, the biggest dependency of annual increment on precipitation was found for Scots pine (Fig. 5). Positive role of heavy rainfall during vegetation period (May–July) was also found for pines studied in north-west Poland by Cedro (2001, 2004) and in northern Poland by Koprowski et al. (2012). Results received in these studies are bothersome as pine is a species with wide range of humidity demand and is mostly found at dry sites. Study site in Rogów is located on the fresh habitats. These forest site types are characterised by humidity, which is sufficient or even superior to the standard requirements of Scots pine. It

cannot be excluded that some other unidentified factors have influence on water relations for studied pines.

In the case of larch, the received results confirm former studies on climate influence on annual increment for this species, especially at lowland Poland. Oleksyn and Fritts (1991), Danek (2009) and Koprowski (2012) point out that temperature of winter and early spring is not a factor significantly influencing the process of tree-ring formation for larch. All these authors relate this fact to significant frost-resistance of this species, which is caused by low transpiration capacity in the winter (Ołaczek 1986). However, studied larches showed significant positive correlation to minimum temperature in March (Fig. 3), which may point to the fact that despite big resistance to frost this species prefer period of early spring without ground frosts. Significant role of temperature in June observed by both Danek (2009) and Danek and Danek (2011) was not confirmed in case of trees from Rogów. It is possible that larch in this region finds its optimal temperature requirements. Such a statement can be declined by values of correlation coefficient between increment indexes and minimum temperature in the vegetation period (Fig. 3). They are not statistically significant, but point to the need of warmth for this species in the period of cambium activity what is partially visible also in the results presented for southern Poland by Danek (2009). Previous dendroclimatological analysis states the significant influence of precipitation on radial increment of larch in Poland (Oleksyn, Fritts 1991; Feliksik 1992; Feliksik, Wilczyński 1998a, b; Danek 2009, Koprowski 2012). Tree-ring widths of the studied larches from Rogów seem to be independent on humidity coming from rainfalls. The only significant correlation was found for July in the previous year. Its negative nature in the formation of current increment can be related to the fact that plant ‘invests’ in available humidity in this process and not in buds, from which it will take nutrients in the following year.

Dependence of silver fir radial increment on temperature of winter and early spring was found in different regions of Poland. Feliksik (1990) pointed out that thermal conditions of this period are quite important in forming *Abies alba* increment. Positive correlation between temperature in February and March and tree-ring width for this species in northern Poland, outside its natural range, was found by Koprowski and Gławenda (2007). According to Bijak (2010), winter and early spring frosts were the cause of negative pointer years for silver fir from Pojezierze Kaszubskie (Kaszubskie Lakeland). This statement is confirmed by high and

significant correlation coefficients between annual sensitivity series and both minimum and maximum temperature presented in this study (Fig. 3, 4). Feliksik et al. (2000) reported similar results for Świętokrzyski National Park. However, Bronisz et al. (2010), who studied silver fir stands in Zagnańsk Forest District located not far from Świętokrzyski National Park, found completely different nature of temperature – increment relation. According to their observation, correlation between March temperature and incremental indexes was negative. Authors also emphasise the significant role of thermal conditions in vegetation period, especially in the summer, which is confirmed by Feliksik (1990). Growth limiting influence of temperature can be explained by soil desiccation, often resulting in deficit of humidity which is crucial for plants during that time (Bernadzki 2008). In addition, almost no relation between precipitation and fir growth was observed in northern Poland (Koprowski, Gławenda 2007; Bijak 2010). Similarly to these places, silver fir in Rogów is on the border of its range. Lack of significant influence of precipitation may be caused by sufficient amount and proper distribution within the year or by the fact that this distribution border is caused by thermal conditions. Within its natural range in North America, Douglas fir grows on sites extremely different in terms of humidity and thermal conditions, which causes significant variability of resistance to frost and droughts for this species (Bellon et al. 1977). Wide range of climate factors, influencing growth of Douglas fir in Poland, was found by Feliksik and Wilczyński (2004). However, thermal conditions in the winter, especially in February and March, seem to be supra-regional determinant of radial increment for this species. These observations were confirmed by a more detailed analysis by Feliksik and Wilczyński (2008, 2009) as well as Cedro (2004, 2006). ‘Climate – increment’ relations for Douglas fir from Rogów seem to fit the scheme of dependence of this species increment on climate conditions in Poland. Among the studied coniferous species, it is the Douglas fir that responded to thermal conditions of late winter and early spring the most (Fig. 2–4). This shows high sensitivity towards climate conditions exhibited by species that is foreign to our environmental conditions, especially for frosts in the period before vegetation. Dependence of increment of investigated *Pseudotsuga menziesii* individuals on precipitation partially covers observations made by Feliksik and Wilczyński (2004). This factor has special meaning in the regions with low amount of precipitation and general deficit in humidity

balance. Wzniesienia Łódzkie (Łódzkie Hills) is one of such regions. In northern Poland, significant positive correlation with precipitation in February and March was observed (Cedro 2004, 2006; Feliksik, Wilczyński 2008). Such dependence was not found in this study. Probably, similar as for silver fir, lack of significant influence of precipitation may be caused by sufficient amount and proper distribution within a year.

Causes for the observed dependence of studied coniferous species increment on temperature in February–March should be found in plants physiology. Cold winter slows down physiological processes, especially influencing the balance between processes of assimilation and breathing (Żelawski 1967; Szaniawski et al. 1977). Although some species, e.g. larch, are frost-resistant because of their low transpiring capacity during the winter (Olaczek 1986), the soil frost, which is quite possible especially in case of lack of snow, may cause, particularly in the early spring, physiological drought that can further cause damages in plant tissues (Szymański 1986). Additionally, as pointed by Chałupka (1977), low temperature in this period inhibits the activity of buds and needles in the production of phytohormones, decreasing the effectiveness of metabolic processes and xylogenesis. For this reason, cambium activity not only starts later, but is also less intensive and less efficient, so no wonder then that trees produce narrower rings.

5. Summary

Investigated coniferous species from Forest Experimental Station in Rogów (central Poland) express quite high similarity of radial increment dynamics, which seems to be more an effect of taxonomic dependences than provenience. Introduced Douglas fir adapted very well to local growth conditions and growth pattern similar to native coniferous species. Obtained picture of influence of climate conditions on radial growth of Scots pine, silver fir, European larch and Douglas fir is typical for dendroclimatological relations observed for these species on the other sites in the lowland part of Poland, where temperature in winter and early spring is the main factor influencing radial growth. This proves that the thermal conditions of this period have supra-regional and interspecies influence on the process of tree-ring formation of coniferous trees species in Poland.

Acknowledgements

Studies conducted within grant from the Ministry of Science and Higher Education N N309 170639 ‘Impact of climate conditions at growth and cambium cells activity of native and introduced trees species in LZD Rogów’.

References

- Bellon S., Tumiłowicz J., Król S. 1977. Obce gatunki drzew w gospodarstwie leśnym. Warszawa, PWRiL, 267 s. ISBN 00-01-13477-9.
- Bernadzki E. 2008. Jodła pospolita – ekologia, zagrożenia, hodowla. Warszawa, PWRiL. ISBN 978-83-09-01028-9.
- Bijak Sz. 2010. Tree-ring chronology of silver fir and its dependence on climate of the Kaszubskie Lakeland (northern Poland). *Geochronometria*, 35: 91–94.
- Bijak Sz., Bronisz A., Bronisz K. 2012a. Wpływ czynników klimatycznych na przyrost radialny dębu szypułkowego i czerwonego w LZD Rogów. *Studia i Materiały CEPL w Rogowie*, 14/1 (30): 121–128.
- Bijak Sz., Bronisz A., Bronisz K. 2012b. Wpływ ekstremalnych warunków klimatycznych na przyrost radialny dębu czerwonego *Quercus rubra* w LZD Rogów. *Studia i Materiały CEPL w Rogowie*, 14/4 (33): 163–170.
- Biondi F., Waikul K. 2004. DendroClim2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers and Geosciences*, 30: 303–311.
- Briffa K., Cook E. R. 1990. Methods of response function analysis, in: Cook E., Kairiukstis L. Methods of dendrochronology. Applications in the Environmental Sciences. Dordrecht, Boston Kluwer Academic Publishers, s. 240–247. ISBN 0-7923-0586-8.
- Bronisz A., Bijak Sz., Bronisz K. 2010. Dendroklimatologiczna charakterystyka jodły pospolitej (*Abies alba* Mill.) na terenie Gór Świętokrzyskich. *Sylwan*, 154 (7): 463–470.
- Cedro A. 2001. Dependence of radial growth of *Pinus sylvestris* L. from western Pomerania on the rainfall and temperature conditions. *Geochronometria*, 20: 69–74.
- Cedro A. 2004. Zmiany klimatyczne na Pomorzu Zachodnim w świetle analizy sekwencji przyrostów rocznych sosny zwyczajnej, daglezi zielonej i rodzimych gatunków dębów. Oficyna IN PLUS. ISBN 83-89402-03-3.
- Cedro A. 2006. Influence of thermic and pluvial conditions on the radial increments of *Pseudotsuga menziesii* Franco from Western Pomerania, Poland, in: Heinrich I., Gärtner H., Monbaron M., Schleser G. (ed.). TRACE – Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology 4: 132–140.
- Chafupka W. 1977. Zagadnienia fizjologii wzrostu i rozwoju, in: Nasze Drzewa Leśne. Świerk pospolity. Warszawa–Poznań, PWN, p. 153–198.
- Chmura D. J., Howe G. T., Anderson P. D., St. Clair J. B. 2010. Przystosowanie drzew, lasów i leśnictwa do zmian klimatycznych. *Sylwan* 154 (9): 587–602.
- Cook E. R., Briffa K. 1990. Data analysis, in: Cook E., Kairiukstis L. Methods of dendrochronology. Applications in the Environmental Sciences. Dordrecht, Boston, Kluwer Academic Publishers, p. 99–162. ISBN 0-7923-0586-8.
- 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.
- Danek M., Danek T. 2011. Zastosowanie alternatywnych metod przetwarzania danych w analizie dendroklimatologicznej modrzewia *Larix decidua* Mill. Z Polski południowej. *Sylwan*, 155 (3): 147–158.
- Feliksik E. 1990. Badania dendroklimatologiczne dotyczące jodły (*Abies alba* Mill.) występującej na obszarze Polski. *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej w Krakowie*, 151.
- Feliksik E. 1992. Wpływ warunków klimatycznych na wielkość przyrostów radialnych modrzewia europejskiego (*Larix decidua* Mill.) występującego w Karpatach. *Sylwan*, 136 (5): 61–67.
- Feliksik E., Wilczyński S. 1996. Dendrochronologiczna charakterystyka sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) z Kotliny Kłodzkiej i Karpat. *Sylwan*, 140 (9): 77–84.
- Feliksik E., Wilczyński S. 1998a. Wpływ temperatury i opadów na przyrost roczny drewna świerka, sosny i modrzewia występujących w leśnictwie Pierściec u podnóża Pogórza Wilamowickiego. *Prace Komitetu Zagospodarowania Ziemi Górskich PAN*, 44: 77–86.
- Feliksik E., Wilczyński S. 1998b. Wpływ warunków termicznych i pluwialnych na przyrost drewna modrzewia (*Larix decidua* Mill.). *Sylwan*, 142 (3): 85–90.
- Feliksik E., Wilczyński S. 2001. Influence of temperature and rainfall on the increment width of native and foreign tree species from the Istebna Forest District. *Folia Forestalia Polonica*, ser. A. 43: 103–114.
- Feliksik E., Wilczyński S. 2004. Klimatyczne uwarunkowania przyrostu radialnego daglezi zielonej (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) rosnącej na obszarze Polski. *Sylwan*, 148 (12): 31–38.
- Feliksik E., Wilczyński S. 2008. Sygnał klimatyczny w słojach *Picea sitchensis* (Bong.) Carriere oraz *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. *Sylwan*, 152 (6): 3–13.
- Feliksik E., Wilczyński S. 2009. The effect of climate on tree-ring chronologies of native and nonnative tree species growing under homogenous site conditions. *Geochronometria*, 33: 49–57.

- Feliksik E., Wilczyński S., Podlaski R. 2000. Wpływ warunków termiczno-pluwialnych na wielkość przyrostów radialnych sosny (*Pinus sylvestris* L.), jodły (*Abies alba* Mill.) i buka (*Fagus sylvatica* L.) ze Świętokrzyskiego Parku Narodowego. *Sylwan*, 144 (9): 53–64.
- Fritts H. C. 1976. *Tree rings and climate*. London-New York-San Francisco, Academic Press.
- Jaworski A. 2003a. Zmiany tendencji wzrostowych głównych lasotwórczych gatunków drzew w Europie i obszarach górskich Polski oraz ich przyczyny. Część I. Zmiany tendencji wzrostowych. *Sylwan*, 147 (6): 99–106.
- Jaworski A. 2003b. Zmiany tendencji wzrostowych głównych lasotwórczych gatunków drzew w Europie i obszarach górskich Polski oraz ich przyczyny. Część II. Przypuszczalne przyczyny zmian tendencji wzrostowych. *Sylwan*, 147 (7): 69–74.
- Kondracki J. 2000. *Geografia regionalna Polski*. Warszawa, PWN. ISBN 83-01-13897-1.
- Koprowski M. 2012. 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., Gławenda K. 2007. Dendrochronologiczna analiza przyrostów rocznych jodły pospolitej (*Abies alba* Mill.) na Pojezierzu Olsztyńskim (Nadleśnictwo Wichrowo). *Sylwan*, 151 (11): 35–40.
- Koprowski M., Przybylak R., Zielski A., Pospieszynska A. 2012. Tree rings of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) as a source of information about past climate in northern Poland. *International Journal of Biometeorology*, 56: 1–10. DOI: 10.1007/s00484-010-0390-5.
- Mäkinen H., Vanninen P. 1999. Effect of sample selection on the environmental signal derived from tree-ring series. *Forest Ecology and Management*, 113: 83–89.
- Olaczek R. 1986. Zarys ekologii i fitocenologii, in: S. Białobok (ed.) *Modrzewie Larix* Mill. Warszawa–Poznań, PWN, s. 379–440.
- Oleksyn J., Fritts H. C. 1991. Influence of climatic factors upon tree rings of *Larix decidua* and *L. decidua* × *L. kaempferi* from Pulawy, Poland. *Trees*, 5: 75–82.
- Opała M. 2009. Wpływ warunków klimatycznych na kształtowanie się szerokości przyrostu rocznego *Fagus sylvatica*, *Pinus silvestris* i *Abies alba* z Ojcowskiego Parku Narodowego. *Prądnik. Prace i Materiały Muzeum im. Prof. Wł. Szafera*, 19: 231–230.
- Schweingruber F. H. 1996. *Tree Rings and Environment – Dendroecology*. Berne, Paul Haupt Publishers. ISBN 3258054584.
- Spiecker H., Mielikainen K., Kohl M., Skovsgaard J. P. (ed.). 1996. *Growth trends in European forests*. European Forest Institute, Research Report 5, Springer-Verlag, Heidelberg.
- Szaniawski R., Żelawski W., Wierzbicki B. 1977. Wymiana gazowa i gospodarka wodna, in: *Nasze Drzewa Leśne. Świerk pospolity*. Warszawa-Poznań, PWN, p. 131–152.
- Szymański S. 1986. *Ekologiczne podstawy hodowli lasu*. Warszawa, PWRiL. ISBN 83-09-01728-6.
- Trampler T., Kliczkowska A., Dmyterko E., Sierpińska A. 1990. Regionalizacja przyrodniczo-leśna Polski na podstawach ekologiczno-fizjograficznych. Warszawa, PWRiL, 159 p.
- 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 Climate and Applied Meteorology*, 23: 201–213.
- Wilczyński S. 1999. Wpływ klimatu na przestrzenne zróżnicowanie reakcji przyrostowych sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.), in: Feliksik E. *Klimatyczne uwarunkowania życia lasu*. Wrocław, Polskie Towarzystwo Ludoznawcze, p. 197–203.
- Wilczyński S. 2010. Uwarunkowania przyrostu radialnego wybranych gatunków drzew z Wyżyny Kieleckiej w świetle analiz dendroklimatologicznych. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Rolniczego im. Hugona Kollątaja w Krakowie, Rozprawy*: 464 (341): 1–221.
- Wilczyński S., Krapiec M., Szychowska-Krapiec E., Zielski A. 2001. Regiony dendroklimatyczne sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) w Polsce. *Sylwan* 145 (8): 53–61.
- Wilczyński S., Wertz B. 2012. Sygnał klimatyczny w seriach przyrostów radialnych jodły pospolitej oraz modrzewia europejskiego. *Studia i Materiały CEPL w Rogowie* 14/1 (30): 66–74.
- Zielski A. 1997. Uwarunkowania środowiskowe przyrostów radialnych sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) w Polsce Północnej na podstawie wielowiekowej chronologii. Toruń, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika.
- Zielski A., Krapiec M. 2004. *Dendrochronologia*. Warszawa, PWN, 328 s. ISBN 830114226X.
- Zielski A., Krapiec M., Koprowski M. 2010. Dendrochronological data, in: Przybylak R., Majorowicz J., Brazdil R., Kejna M. (ed.). *The Polish climate in the European context: an historical overview*. Springer, p. 191–217. DOI: 10.1007/978-90-481-3167-9.
- Żelawski W. 1967. Wymiana gazowa i bilans wodny igliwia, in: *Zarys fizjologii sosny zwyczajnej*. Warszawa-Poznań, PWN, p. 33–94.