

SŁAWOMIR WILCZYŃSKI

Zapis zmian zachodzących w środowisku przez sosnę zwyczajną oraz sosnę Banksa*

Record of the changes in environment by Scots pine and Jack pine trees

ABSTRACT

Wilczyński S. 2020. Zapis zmian zachodzących w środowisku przez sosnę zwyczajną oraz sosnę Banksa. Sylwan 164 7): 583-593. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylwan.2020040>.

The aim of the study was to investigate how industrial pollutants and change of thermal conditions of winter season in the second half of the 20th century affected the basal area increment (*BAI*) and the climatic signal in the *BAI* chronologies of *Pinus sylvestris* and *Pinus banksiana*. Samples were collected from 21 trees of both species growing in the Chrzanów Forest District (50°20' N, 19°47' E) which is located between the Upper Silesian and Krakow Industrial Regions. Two cores were taken from each tree. Tree-ring widths were measured at the cores and the *BAI* for each year in the period 1930-2016 was calculated. The growth reductions of both pine species in the years 1951-1970, increasing of diversity of growth reactions from year to year and also reduction of strength of climatic signal in the period 1963-1994 may have been caused by industry pollution. The reduction of wood growth, the increase of the diversity of short-term incremental reactions and also the reduction of strength of the climatic signal were greater in Jack pine. This indicates that Scots pine was more resistant to pollution. As an industrial production declined and environmentally friendly technologies were introduced in the 1990s homogeneity of growth reactions and strength of dependence between *BAI* and climate parameters in both species increased. A significant increase in the strength of the relationship between January temperature and *BAI* of Scots pine and Jack pine was observed in the early 2000s. This may suggest that the vegetation season starts already in January in the study area.

KEY WORDS

basal area increment, growth reduction, pollution, air temperature, dendroclimatology

ADDRESSES

Sławomir Wilczyński – e-mail: slawomir.wilczynski@urk.edu.pl

Katedra Ochrony Ekosystemów Leśnych, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie; al. 29 Listopada 46, 31-425 Kraków

Wstęp

Emitowane przez przemysł toksyczne substancje zakłócają procesy fizjologiczne zachodzące w drzewach, co powoduje, że kambium waskularne zmniejsza intensywność podziałów lub nawet przestaje się dzielić [Bytnerowicz 1996; Percy, Ferretti 2004]. Tlenki siarki, dostając się do wnętrza liści i igieł, zaburzają proces transpiracji oraz przyswajanie dwutlenku węgla [L'Hirondelle, Addison 1985]. Z kolei pyły, pokrywając aparat asymilacyjny, ograniczają dopływ promieniowania słonecz-

*Badania sfinansowano z subwencji Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego dla Uniwersytetu Rolniczego im. Hugona Kołłątaja w Krakowie na rok 2020.

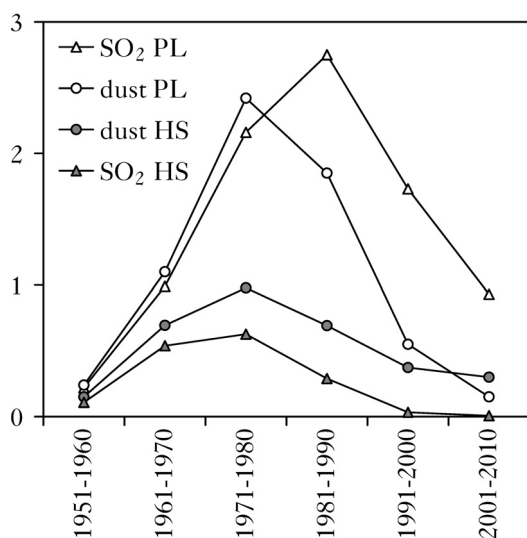
nego oraz hamują wymianę gazową [Emberson 2003]. Skutkiem działania obu tych substancji jest ograniczenie procesu fotosyntezy, a w konsekwencji zmniejszanie przez drzewa produkcji drewna.

Wyniki dotychczasowych badań dendrochronologicznych wskazują, że sosna zwyczajna jest wrażliwa na zanieczyszczenia przemysłowe, które powodują u niej redukcję przyrostu drewna [Nöjd, Reams 1996; Szychowska-Krapiec, Wiśniewski 1996; Krapiec, Szychowska-Krapiec 2001; Juknys i in. 2002; Wilczyński 2006; Danek 2007; Malik i in. 2011, 2012; Stravinskiene i in. 2013; Sensuła i in. 2015, 2016; Sensuła, Wilczyński 2017; Bijak, Sobajtis 2018]. Badania te opierały się na obserwacji zmian wielkości przyrostów radialnych, które u drzew iglastych cechują się po stosunkowo wczesnej kulminacji trendem spadkowym, wynikającym głównie ze zwiększającego się obwodu pnia. Trudno jest więc ustalić w sposób jednoznaczny wpływ samych zanieczyszczeń na przyrost drzew. Fakt ten zmuszał badaczy do poszukiwania różnych metodycznych rozwiązań tego problemu [Schweingruber i in. 1985; Cook 1987; Warren 1989; Sutherland, Martin 1990]. W przeciwieństwie do przyrostu radialnego bieżący przyrost pola powierzchni przekroju drewna cechuje się trendem wzrostowym [Borowski 1974]. Ewentualne spadki wielkości tego parametru we wczesnej fazie wzrostu drzew mogą okazać się dobrym wskaźnikiem sygnalizującym osłabienie ich kondycji przyrostowej.

Introdukowana do Europy pod koniec XVIII wieku sosna Banksa (*Pinus banksiana* Lamb.) uznawana jest za gatunek o niewielkich wymaganiach troficznych, odporny na mrozy zimowe, susze oraz na zanieczyszczenia przemysłowe. Stąd też sadzono ją głównie na wydmach, nieużytkach oraz na terenach objętych szkodliwym oddziaływaniem przemysłu [Bellon i in. 1977; Bugała 2000].

W drugiej połowie XX wieku ilość emitowanych zanieczyszczeń przez szybko rozwijający się przemysł dynamicznie rosła (ryc. 1). Równoległe zachodziły zmiany warunków klimatycznych, w tym coraz wcześniej rozpoczynał się okres wegetacyjny [Durló i in. 2004; Chojnacka-Oźga, Oźga 2015], którego początek ma istotny pośredni wpływ na ilość drewna odkładanego przez sosnę zwyczajną oraz sosnę Banksa [Hofgaard i in. 1999; Tardif, Conciatori 2001; Pederson i in. 2004; Wilczyński 2010; Cedro i in. 2013].

Powstaje pytanie: jak drzewa obu gatunków sosny zareagowały na zmiany powyższych, odmiennych w swoim charakterze elementów środowiska?



Ryc. 1.

Emisja SO₂ i pyłów (dust) [Mt] z Huty Sendzimir w Krakowie (HS) oraz w Polsce (PL) w kolejnych dekadach
SO₂ and dust emissions [Mt] of Sendzimir Steelworks in Krakow (HS) and in Poland (PL) for consecutive decades

Celem pracy było zbadanie i porównanie reakcji przyrostowych sosny zwyczajnej oraz sosny Banksa, wyrażonych za pomocą różnych wskaźników, na tle zmieniającej się w czasie ilości emitowanych przez przemysł zanieczyszczeń oraz zmian warunków termicznych sezonu zimowego. Przyjęto następujące hipotezy: i) zanieczyszczenia przemysłowe miały negatywny wpływ na wielkość przyrostu pola przekroju drewna obu gatunków sosny oraz na stopień jednorodności ich corocznych reakcji przyrostowych, ii) zakłócały one także relacje pomiędzy wielkością przyrostu drewna obu gatunków sosny a temperaturą powietrza miesięcy zimowych, iii) sosna Banksa wykazuje większą odporność na zanieczyszczenia, oraz iv) wzrost temperatury powietrza panującej w styczniu znalazł odbicie w ilości odkładanego przez obie sosny drewna.

Material i metody

Badania przeprowadzono na terenie Nadleśnictwa Chrzanów, którego obszar w drugiej połowie XX wieku był szczególnie dotknięty przez imisje z zakładów przemysłowych Krakowa, Górnego Śląska, Oświęcimia i Olkusza. Ilość emitowanych dwutlenku siarki oraz pyłów rosła w tym czasie w Polsce dynamicznie, osiągając kulminację w latach 70. i 80. Na początku lat 90. nastąpiło wyraźne zmniejszenie wielkości emisji, a zatem i szkodliwych dla drzew imisji (ryc. 1). Analiza temperatury powietrza wykazała, że na badanym obszarze zimy stawały się coraz cieplejsze i krótsze. W latach 1930-2016 średnia temperatura stycznia wzrosła przeciętnie o 3,0°C, lutego o 2,3°C, natomiast marca o 2,4°C (ryc. 2). Od połowy lat 70. ubiegłego wieku średnia temperatura stycznia oraz nieco później także lutego coraz częściej osiągały stosunkowo wysokie, dodatnie wartości, natomiast średnia marca coraz rzadziej spadała poniżej zera (ryc. 2).

W oddziale 68c (50°20'N, 19°47' E) wybrano po 21 drzew sosny zwyczajnej (PISY) oraz sosny Banksa (PIBA) należących do najwyższych klas Krafta. Rosły one w zmieszaniu na siedlisku boru mieszanego świeżego. Z ich pni pobrano dordzeniowo na wysokości 1 m po dwa wywierty na osi północ-południe. Na skanach wywiertów pomierzono szerokość słoików rocznych drewna za pomocą programów CooRecorder i CDendro (www.cybis.se). Poprawność datowania słoików zweryfikowano za pomocą programu Cofecha [Holmes 1983]. Z powodu mechanicznego uszkodzenia w trakcie transportu jednego z wywiertów pozostawiono do dalszych analiz po 20 rdzeni, aby ich liczba u obu gatunków sosny była równa. Następnie szerokość słoików dwóch wywiertów każdego drzewa uśredniono w każdym roku i obliczono wartość przyrostu powierzchni pola przekroju [cm²] w kolejnych latach (*BAI*; basal area increment):

$$BAI_i = \pi r_i^2 - \pi r_{i-1}^2$$

gdzie:

- r_i – średni promień od rdzenia do końcowego brzegu słoika wytworzonego w roku i ,
- r_{i-1} – promień mierzony do brzegu poprzedniego słoika.

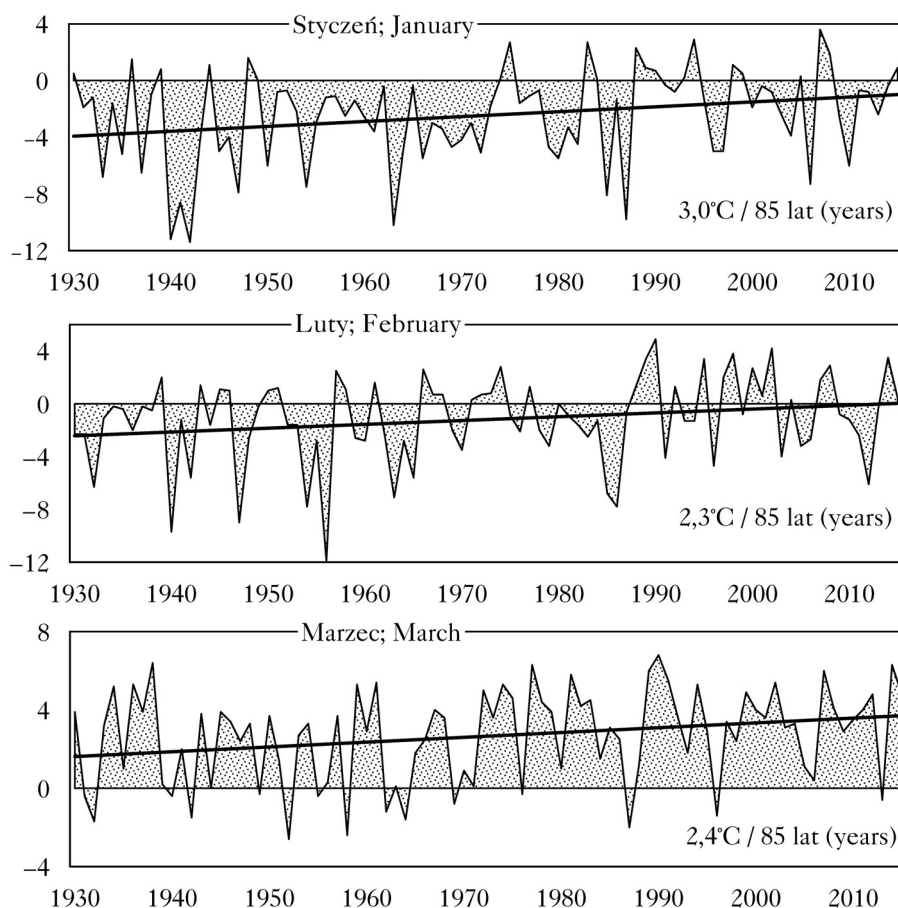
W celu wyekspozowania corocznej zmienności *BAI* jego wartości indeksowano za pomocą algorytmu:

$$BAII_i = 3 \cdot BAI_i / (BAI_{i-1} + BAI_i + BAI_{i+1}),$$

gdzie:

- BAII* – indeks przyrostu pola powierzchni słoika (ang. basal area increment index),
- i – dany rok,
- $i-1$ – rok poprzedni,
- $i+1$ – rok następny.

W ten sposób dla każdego drzewa skonstruowano chronologię osobniczą bieżącego przyrostu pola przekroju (*BAI_i*) oraz chronologię indeksów przyrostowych (*BAII_i*). Wartości *BAI* oraz *BAII*



Ryc. 2.

Średnia temperatura powietrza [°C] w styczniu, lutym i marcu w latach 1930-2016 wraz z linią i wartością trendu

Mean air temperature [°C] in January, February and March in the period 1930-2016 and trend line and value

drzew każdej populacji uśredniono w każdym roku, tworząc stanowiskowe chronologie obu rodzajów, które obejmowały wspólny dla wszystkich drzew okres 1930-2016. Następnie obliczono średnie współczynniki korelacji Pearsona (r_{bt}) wszystkich par osobniczych chronologii *BaII* w 31-letnich interwałach (duża próba) oraz dla porównania w 20-letnich interwałach przesuwanych o jeden rok, począwszy od okresu 1930-1960 (oraz 1931-1950), a kończąc na okresie 1986-2016 (oraz 1997-2016). Dzięki temu można uzyskać informację o zmianach w czasie stopnia jednorodności corocznych reakcji przyrostowych drzew i ustalić czas występowania długookresowych zakłóceń w środowisku życia drzew [Briffa i in. 1987].

Siłę relacji pomiędzy średnią temperaturą miesięcy zimowych a wartościami *BaI* oszacowano, obliczając współczynniki korelacji bootstrapowej pomiędzy wartościami chronologii indeksowanych *BaII* i średnią miesięczną temperaturą stycznia, lutego oraz marca w kolejnych 31-letnich interwałach. W tym celu wykorzystano program komputerowy DendroClim2002 [Biondi, Waikul 2004]. Wartości miesięczne temperatury powietrza użyte w analizach stanowiły średnie z danych pochodzących z najbliższych stacji meteorologicznych IMGW w Krakowie i Katowicach, położo-

nych po obu stronach stanowiska badawczego. Dodatkowo dla obu gatunków sosny i dla tych samych 31-letnich interwałów obliczono wskaźnik SNR (signal to noise ratio), który wyraża siłę sygnału klimatycznego zawartego w chronologiach. Wartość SNR zależy od liczby serii tworzących chronologię i informuje o udziale zmienności wysokiej częstotliwości chronologii, kształtowanej głównie przez czynnik klimatyczny, w stosunku do zmienności długookresowej – tzw. szumów pozaklimatycznych [Wigley i in. 1984; Briffa, Jones 1990].

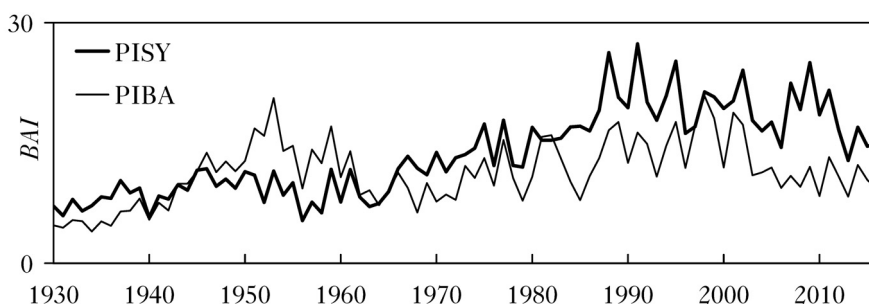
Wyniki

Po początkowym wzroście przyrostu pola powierzchni drewna, trwającym przez nieco ponad 20 lat życia drzew, nastąpił jego spadek. Przypadł on na połowę lat 50. ubiegłego wieku, przy czym w przypadku sosny Banksa był silniejszy i trwał dłużej (ryc. 3). W połowie lat 60. sosna zwyczajna ponownie zaczęła zwiększać przyrost drewna. Z kolei u sosny Banksa wzrost *BAI* rozpoczął się dopiero w końcu lat 70. Zatem wzrost *BAI* u obu gatunków sosny nastąpił w okresie, kiedy wielkość emisji przemysłowych silnie rosła (ryc. 1). Bieżący przyrost pola powierzchni obu gatunków sosny osiągnął naturalną kulminację na początku lat 90. ubiegłego wieku (ryc. 3).

Współzmiennosc chronologii *BAI* (r_{bt}) sosny zwyczajnej utrzymuje się na stosunkowo wysokim poziomie do końca lat 70. ubiegłego wieku, i to zarówno w 31-letnich, jak i 20-letnich interwałach, po czym gwałtownie maleje do roku 1994, a następnie ponownie rośnie. Głębszy spadek wartości wskaźnika r_{bt} obserwowano w przypadku interwałów 20-letnich (ryc. 4). Podobnie było w przypadku sosny Banksa. Wyraźny spadek wartości wskaźnika r_{bt} zaczął się u niej już w połowie lat 60. i był silniejszy niż u sosny zwyczajnej (ryc. 4).

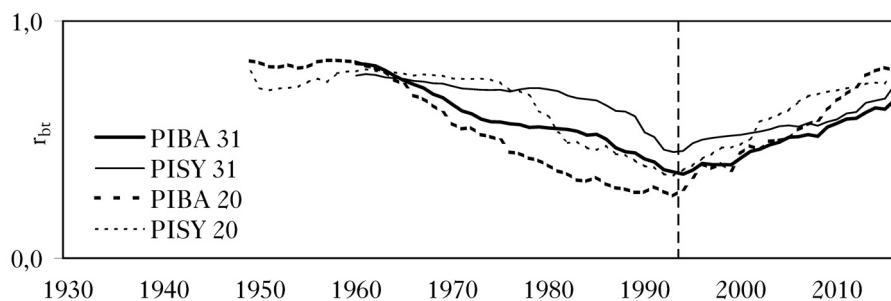
W latach 1930-1985 istotny wpływ na zmienność pola powierzchni przekroju drewna obu gatunków sosny miała średnia temperatura marca oraz lutego, przy czym w przypadku sosny Banksa był on słabszy (ryc. 5). Następnie wartości współczynników korelacji gwałtownie maleją i osiągają minimum na początku lat 90., zatem odnoszą się do okresu 1963-1994 (ryc. 5), w którym emisja zanieczyszczeń przemysłowych była największa (ryc. 1). Współzmiennosc wartości *BAI* obu gatunków sosny i średniej temperatury stycznia na początku badanego okresu utrzymuje się na niskim, nieistotnym statystycznie poziomie. Około 2000 roku jest ona już istotna, a 10 lat później wyższa niż w przypadku temperatury marca oraz lutego (ryc. 5).

Zmiany wartości SNR ściśle korespondują ze zmianami wartości r_{bt} oraz siłą korelacji wskaźników *BAI* ze średnią temperaturą miesięcy zimowych (ryc. 6). SNR osiąga najniższe wartości w okresie 1963-1994, przy czym silniejszy i dłużej trwający spadek wartości SNR cechuje sosnę Banksa (ryc. 6). W jej przypadku wartość SNR obniżyła się aż 9-krotnie: z 98 w 1959 roku do 11



Ryc. 3.

Chronologia przyrostu pola przekroju (*BAI* [cm²]) sosny zwyczajnej (PISY) oraz sosny Banksa (PIBA)
Chronology of the basal area increment (*BAI* [cm²]) of Scots (PISY) and Jack (PIBA) pines

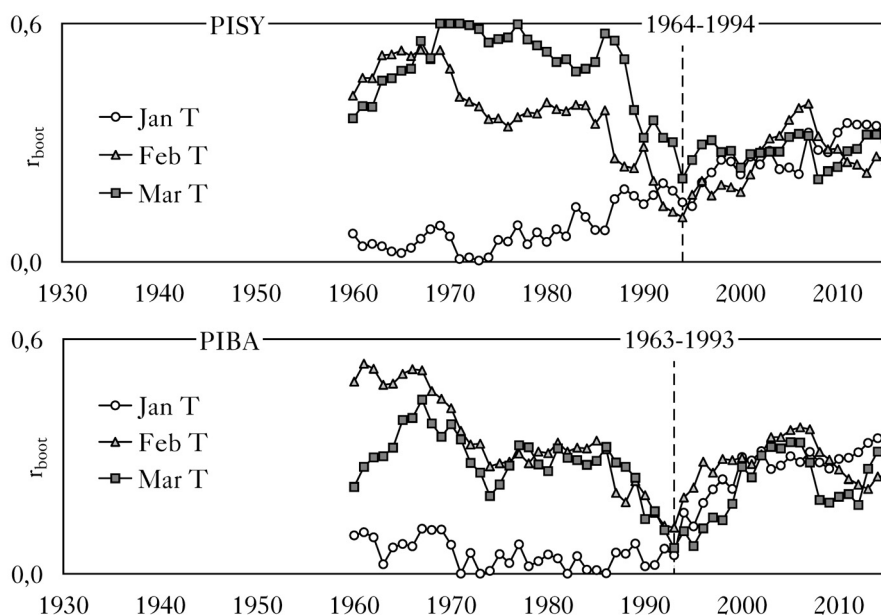


Ryc. 4.

Średnia wartość współczynnika korelacji (r_{bt}) chronologii *BAII* drzew obliczona dla 31-letnich (od 1930-1960 do 1986-2016) oraz 20-letnich interwałów (od 1930-1949 do 1997-2016)

Mean correlation coefficients (r_{bt}) between *BAII* chronology of trees calculated in consecutive 31-year (from 1930-1960 to 1986-2016) and 20-year (from 1930-1949 to 1997-2016) intervals

wartości współczynnika korelacji zapisano na końcu każdego okresu
values of correlation coefficient are plotted at the end of each interval



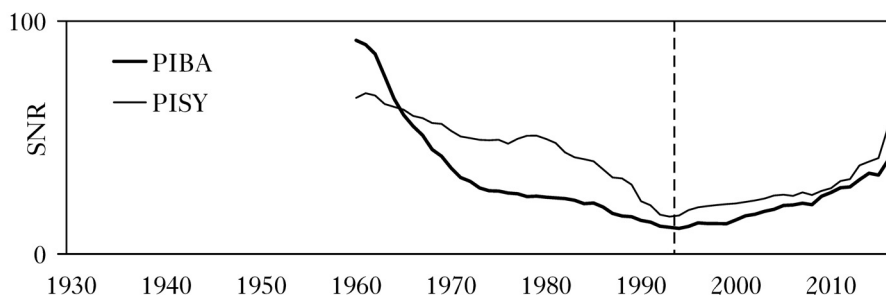
Ryc. 5.

Współczynniki korelacji bootstrapowej stanowiskowych chronologii *BAII* ze średnią temperaturą stycznia (Jan T), lutego (Feb T) i marca (Mar T) liczone dla 31-letnich ruchomych interwałów

Bootstrap correlation coefficients between site *BAII* chronologies and mean temperature in January (Jan T), February (Feb T) and March (Mar T) calculated in consecutive 31-year intervals from 1930-1960 to 1986-2016

wartości istotne ($\alpha < 0,05$) oznaczono na czarno
significant values ($\alpha < 0,05$) marked as black

w roku 1994, natomiast w przypadku sosny zwyczajnej 4,3-krotnie: z 69 w 1961 roku do 16 w 1993 roku. Wynika stąd, że malał także wpływ na przyrost badanych sosen innych elementów klimatycznych, nieuwzględnionych w badaniach. Od połowy lat 90. SNR zaczyna ponownie rosnąć (ryc. 6), podobnie jak wskaźnik r_{bt} .



Ryc. 6.

Wskaźniki SNR obliczone dla 31-letnich interwałów od 1930-1960 do 1986-2016
 SNR coefficients calculated in consecutive 31-year intervals from 1930-1960 to 1986-2016

Dyskusja

Spadek wielkości bieżącego przyrostu pola przekroju drewna zaobserwowany zaraz po 20 roku życia drzew, szczególnie silny w przypadku sosny Banksa, należy uznać za nietypowe zjawisko. Parametr ten cechuje się bowiem stałym wzrostem oraz bardzo późną kulminacją [Erteld, Hengst 1966]. U sosny zwyczajnej kulminacja przypada przeciętnie na 74 rok życia [Borowski 1974], czyli podobnie jak w przypadku badanych w pracy sosen, u których naturalną kulminację *BAI* obserwujemy na początku lat 90. ubiegłego wieku, kiedy większość z nich miała około 75 lat. Spadek przyrostu drewna w tak młodym wieku można wiązać z negatywnym wpływem na drzewa rosnących w tym czasie emisji zanieczyszczeń przemysłowych. Po około 15 latach sosna zwyczajna ponownie zaczęła zwiększać przyrost drewna, pomimo że emisja nadal rosła. W przypadku sosny Banksa przyrost drewna pozostawał w tym czasie nadal na niskim poziomie. Powstaje pytanie: dlaczego sosna zwyczajna rozpoczęła proces rewitalizacji przyrostowej w czasie, gdy poziom zanieczyszczeń zwiększał się?

Wyniki dotychczasowych badań wskazują, że redukcja przyrostu radialnego przez sosnę zwyczajną na obszarze Polski trwała na ogół do początku lat 80. XX wieku [Szychowska-Krąpiec, Wiśniewski 1996; Krąpiec, Szychowska-Krąpiec 2001; Wilczyński 2006, 2010; Sensuła i in. 2016, Sensuła, Wilczyński 2017]. Można przypuszczać, że proces wydzielania się oraz usuwania osłabionych i chorych drzew powodował, że w drzewostanach pozostawały najsilniejsze osobniki, które są obecnie przedmiotem badań. Zatem ich pozycja biosocjalna, a więc dostęp do światła i wody, poprawiały się poprzez zmniejszenie się konkurencji, co skutkowało wzrostem przyrostu drewna. Taką interpretację sugerują także wyniki innych badań [Sutherland, Martin 1990; Hirano, Morimoto 1999; Wilczyński, Gołąb 2001; Bijak, Mądrzak 2016]. Okazuje się, że im większa jest redukcja przyrostu drewna u drzew rosnących pod presją zanieczyszczeń przemysłowych, tym silniejszy jest potem proces ich rewitalizacji [Feliśnik, Wilczyński 2003; Wilczyński, Feliśnik 2005; Sensuła i in. 2017; Sensuła, Wilczyński 2017]. Drugim stwierdzonym w pracy czynnikiem mogącym stymulować przyrost drewna u sosny zwyczajnej było coraz wcześniejsze rozpoczynanie się sezonu wegetacyjnego [Durło i in. 2004; Chojnacka-Oźga, Oźga 2015]. Przyrost drewna sosny zwyczajnej do połowy lat 80. był silniej związany z temperaturą lutego i marca niż w przypadku sosny Banksa. Coraz wyższa temperatura pod koniec sezonu zimowego przyspieszała zapewne aktywację procesów fizjologicznych, w tym produkcję hormonów wzrostowych, stymulujących następnie podziały kambium waskularnego drzew. Te korzystne dla wzrostu sosny zwyczajnej procesy mogły zniwelować negatywny wpływ na jej przyrost szkodliwych emisji. Pole

przekroju poprzecznego drewna rodzimej sosny szybko „zareagowało” na poprawę warunków siedliskowych. W przypadku sosny Banksa proces ten był wolniejszy.

Wskaźnikiem informującym o występowaniu zakłóceń w środowisku, mających swoje przełożenie na zachowania przyrostowe drzew, jest stopień jednorodności corocznych reakcji przyrostowych [Briffa i in. 1987]. Obydwa gatunki sosny cechowały się wysoką niejednorodnością corocznych reakcji przyrostowych w latach 1963-1994. Osłabione przez imisje drzewa nie były w stanie jednakowo reagować na sygnały płynące ze strony warunków pogodowych. Jeszcze silniejszy spadek wartości wskaźnika r_{bt} odnotowano, gdy liczony był on dla okresów 20-letnich. Świadczy to, że najsilniejsze zakłócenia we wzroście badanych sosen miały miejsce w latach 1974-1993, czyli w czasie, gdy poziom emisji zanieczyszczeń był najwyższy. Podobne wnioski płyną z badań dotyczących reakcji przyrostowych sosny zwyczajnej rosnącej w Sudetach oraz na Górnym Śląsku pod presją zanieczyszczeń przemysłowych [Wilczyński 2006; Sensuła i in. 2016, 2017]. Należy jednak dodać, że niejednorodność reakcji przyrostowych drzew rośnie również wskutek przeprowadzonych cięć pielęgnacyjnych, a także w okresach, gdy wartości elementów meteorologicznych, istotnych dla ich wzrostu, mieszczą się w granicach uznawanych za przeciętne. Jednak w takich przypadkach zakłócenia te trwają rok lub co najwyżej kilka lat [Wilczyński, Gołąb 2001; Wilczyński 2010].

Głębszy i dłużej trwający spadek pola powierzchni przekroju pni, jednorodności corocznych reakcji przyrostowych oraz siły sygnału klimatycznego zawartego w chronologii *BaII* sosny Banksa może świadczyć, że gatunek ten jest bardziej wrażliwy na zanieczyszczenia przemysłowe niż sosna zwyczajna. Na wrażliwość sosny Banksa na dwutlenek siarki wskazują badania L’Hirondello i Addisona [1985]. Wynika z nich, że wraz ze wzrostem ekspozycji na SO_2 w jej igłach dochodzi do znacznych zakłóceń procesów biochemicznych i fizjologicznych oraz destrukcji tych organów. Cechuje się ona także stosunkowo wysoką wrażliwością na letnie susze połączone z wysoką temperaturą [Savva i in. 2008; Mamet i in. 2015]. Jednak Copenheaver i in. [2006] wskazują, że wraz z wiekiem sosna Banksa staje się coraz mniej wrażliwa na niesprzyjające warunki siedliskowe.

Rejestrowany od połowy lat 90. XX wieku wzrost wartości wskaźników opisujących reakcje przyrostowe badanych drzew wskazuje na poprawę kondycji przyrostowej obu gatunków sosny i ponowne ich uwarżliwienie na naturalny czynnik, jakim są warunki meteorologiczne. Należy podkreślić, że powolny wzrost jednorodności reakcji przyrostowych u obu gatunków sosny oraz siły sygnału klimatycznego w 31-letnich interwałach wynikał z faktu, że okres ten obejmował zawsze pewną liczbę lat przed 1990 rokiem. Potwierdzają to wartości wskaźnika r_{bt} obliczone dla 20-letnich interwałów, które znacznie dynamiczniej rosną od połowy lat 90. i szybko osiągają wartości, jakie były notowane przed okresem silnego wzrostu emisji zanieczyszczeń.

Interesujący jest fakt, że obydwie gatunki sosny w podobny sposób zareagowały na wzrost temperatury powietrza w styczniu, która do pewnego momentu nie stanowiła istotnego czynnika wpływającego na zmienność wielkości przyrostu drewna. W przypadku sosny Banksa pierwszy raz istotną statystycznie korelację pomiędzy wielkością *BaI* a średnią temperaturą stycznia stwierdzono około 2000 roku, czyli faktycznie dotyczyło to okresu 1970-2000 i kolejnych interwałów, natomiast u sosny zwyczajnej nastąpiło to nieco później. Pierwsze stosunkowo wysokie, dodatnie wartości średniej temperatury stycznia zaobserwowano już w latach 70. XX wieku. Temperatura powietrza panująca w tym dotychczasowym miesiącu zimowym zaczyna być zatem prawdopodobnie jednym z czynników uruchamiających procesy biochemiczne i fizjologiczne stymulujące wcześniejsze podziały kambium waskularnego u obu gatunków sosny.

Wnioski

- ✦ Uzyskane wyniki potwierdzają zasadność stosowania wskaźników opisujących w różny sposób zachowanie przyrostowe drzew w identyfikacji występowania i zmian czynników środowiskowych mających wpływ na ich kondycję przyrostową.
- ✦ Sosna zwyczajna oraz sosna Banksa, rosnąc pod presją zanieczyszczeń przemysłowych, zredukowały w różnym stopniu wielkość poprzecznego pola powierzchni drewna, wzrosła też niejednorodność ich corocznych reakcji przyrostowych, zmniejszyła się ich wrażliwość na czynnik termiczny końca zim, a w konsekwencji siła sygnału klimatycznego zawartego w chronologiach. Szczególnie negatywny wpływ zanieczyszczeń przemysłowych na powyższe parametry widoczny był w przypadku sosny Banksa. Zatem hipoteza o wysokiej odporności na zanieczyszczenia przemysłowe tego gatunku nie potwierdziła się.
- ✦ Poprawa warunków mikrosiedliskowych oraz stwierdzone w pracy coraz cieplejsze i krótsze zimy zniwelowały u sosny zwyczajnej niekorzystny wpływ zanieczyszczeń przemysłowych na wielkość przyrostu drewna. Z kolei stopień jednorodności corocznych reakcji przyrostowych oraz siła sygnału klimatycznego pozostawały u obu gatunków sosny na niskim poziomie przez cały okres wzmózonych emisji, czyli w latach 1963-1994.
- ✦ Na początku lat 90. obydwa gatunki sosny weszły w fazę rewitalizacji. Kulminację osiągnął u nich wtedy bieżący przyrost pola powierzchni drewna, wzrosła jednorodność corocznych reakcji przyrostowych, zwiększyła się ponownie ich wrażliwość na temperaturę miesięcy zimowych oraz wzrosła siła sygnału klimatycznego zawartego w ich chronologiach.
- ✦ Sosna zwyczajna oraz sosna Banksa zareagowały także na zwiększanie się temperatury powietrza panującej w styczniu. W ostatnich latach zaczęła być ona ważnym pośrednim czynnikiem wpływającym na ilość odkładanego przez nie drewna.

Literatura

- Bellon S., Tumiłowicz J., Król S. 1977. Obce gatunki drzew w gospodarstwie leśnym. PWRiL, Warszawa.
- Bijak S., Mądrzak P. 2016. Reakcja przyrostowa drzewostanów bukowych w Nadleśnictwie Cewice na zabiegi hodowlane. *Studia i Materiały CEPL* 48: 166-172.
- Bijak S., Sobajtis K. 2018. Wpływ zanieczyszczeń z fabryki płyt wiórowych w Szczecinku na przyrost radialny sosny zwyczajnej. *Studia i Materiały CEPL* 57: 65-74.
- Biondi F., Waikul K. 2004. DENDROCLIM2002: AC++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers & Geosciences* 30: 303-311.
- Borowski M. 1974. Przyrost drzew i drzewostanów. PWRiL, Warszawa.
- Briffa K., Jones P. D. 1990. Basic chronology statistics and assessment. W: Cook E. R., Kairiukstis L. A. [red.]. *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 137-152.
- Briffa K. R., Wigley T. M. L., Jones P. D. 1987. Standardization and the preparation of chronologies some contrasting approaches. Towards an objective approach to standardization. W: Kairiukstis L., Bednarz Z., Feliksik E. [red.]. *Methods of dendrochronology. Proceedings of the Task Force Meeting on Methodology of Dendrochronology. East/West Approaches*. 2-6 June, Krakow, Poland. 69-86.
- Bugała W. 2000. Drzewa i krzewy. PWRiL, Warszawa.
- Bytnerowicz A. 1996. Physiological aspects of air pollution stress in forests. *Phyton-Horn* 36: 15-22.
- Cedro A., Bosiacka B., Mysliwy M. 2013. Dendrochronological analysis of three pine species used as pioneer species to stabilize the coastal dunes of the southern Baltic Coast. *Baltic Forestry* 19 (2): 226-235.
- Chojnacka-Ożga L., Ożga W. 2015. Przestrzenna i czasowa zmienność długości meteorologicznego okresu wegetacyjnego w północno-wschodniej Polsce. W: Lorenc H., Ustrnul Z. [red.]. *Klimat a społeczeństwo i gospodarka*. PTG, IMiGW PIB, Warszawa. 129-144.
- Cook E. R. 1987. The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bulletin* 47: 37-59.
- Copenheaver C. A., Pokorski E. A., Curie J. E., Abrams M. D. 2006. Causation of false ring formation in *Pinus banksiana*: A comparison of age, canopy class, climate and growth rate. *Forest Ecology and Management* 236 (2-3): 348-355. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.09.020>.

- Danek M. 2007. The influence of industry on Scots Pine stands in the south-eastern part of the Silesia-Krakow Upland (Poland) on the basis of dendrochronological analysis. *Water Air Soil Pollution* 185: 265-277.
- Durlo G., Wilczyński S., Feliksik E. 2004. Wieloletnia zmienność czasu trwania meteorologicznego okresu wegetacji na Kopciowej w Beskidzie Sądeckim. *Acta Agraria et Silvestria Series Silvestris* 42: 23-33.
- Emberson L. 2003. Air pollution impacts on crops and forests: an introduction. W: Emberson L., Ashmore M., Murray F. [red.]. *Air Pollution Impacts on Crops and Forests: A Global Assessment*. Imperial College Press, London. 3-29.
- Ertel W., Hengst E. 1966. *Waldetragslehre*. Radebeul, Neumann Verlag.
- Feliksik E., Wilczyński S. 2003. Tree-rings as indicators of environmental change. *Electronic Journal of Polish Agricultural University*, ser. *Forestry* 6 (2).
- Hirano T., Morimoto K. 1999. Growth reduction of the Japanese black pine corresponding to an air pollution episode. *Environmental Pollution* 106: 5-12.
- Hofgaard A., Tardif J., Bergeron Y. 1999. Dendroclimatic response of *Picea mariana* and *Pinus banksiana* along a latitudinal gradient in the eastern Canadian boreal forest. *Canadian Journal of Forest Research* 29 (9): 1333-1346. DOI: <https://doi.org/10.1139/x99-073>.
- Holmes R. L. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43: 69-78.
- Juknys R., Stravinskiene V., Vencloviene J. 2002. Tree-ring analysis for the assessment of anthropogenic changes and trends. *Environmental Monitoring and Assessment* 77: 81-97.
- Krapiec M., Szychowska-Krapiec E. 2001. Tree-ring estimation of the effect of industrial pollution on pine (*Pinus sylvestris*) and fir (*Abies alba*) in the Ojców National Park (southern Poland). *Nature Conservation* 58 (1): 33-42.
- L'Hirondelle S. J., Addison P. A. 1985. Effects of SO₂ on leaf conductance, Xylem tension, Fructose and sulphur levels of Jack pine seedlings. *Environmental Pollution* 39 A: 373-386.
- Malik I., Danek M., Marchwińska-Wyrwał E., Danek T., Wistuba M., Krapiec M. 2012. Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) growth suppression and adverse effects on human health due to air pollution in the Upper Silesian Industrial District (USID), southern Poland. *Water, Air and Soil Pollution* 223: 3345-3364.
- Malik I., Wistuba M., Danek M., Danek T., Krapiec M. 2011. Wpływ emisji zanieczyszczeń atmosferycznych przez zakłady chemiczne w Tarnowskich Górach (północna część Wyżyny Śląskiej) na szerokość przyrostów rocznych sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.). *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych* 47: 9-21.
- Mamet D. S., Chun K. P., Metsaranta J. M., Barr A. G., Johnstone J. F. 2015. Tree rings provide early warning signals of jack pine mortality across a moisture gradient in the southern boreal forest. *Environmental Research Letters* 10 (8). DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/8/084021>.
- Nöjd P., Reams G. A. 1996. Growth variation of Scots pine across a pollution gradient on the Kola Peninsula, Russia. *Environmental Pollution* 93: 313-325.
- Pederson N., Cook E. R., Jakoby G. C., Peteet D. M., Griffin K. L. 2004. The influence of winter temperatures on the annual radial growth of six northern range margin tree species. *Dendrochronologia* 22: 7-29.
- Percy K. E., Ferretti M. 2004. Air pollution and forest health: toward new monitoring concepts. *Environmental Pollution* 130 (1): 113-126.
- Savva Y., Denneler B., Beregron Y., Koubaa A., Tremblay F. 2008. Effect of interannual climate variations on radial growth of Jack pine provenances in Petawawa, Ontario. *Canadian Journal of Forest Research* 38 (3): 619-630. DOI: <https://doi.org/10.1139/X07-178>.
- Schweingruber F. H., Albrecht H., Beck M., Hessel J., Joos K., Keller D. 1985. Diagnosis and distribution of conifer decay in the Swiss Rhone Valley, a dendrological study. *Eidgenössische Anstalt für das Fortliche Versuchswesen* 270: 189-192.
- Sensuła B., Opała M., Wilczyński S., Pawełczyk S. 2015. Long- and short-term incremental response of *Pinus sylvestris* L. from industrial area nearby steelworks in Silesian Upland, Poland. *Dendrochronologia* 36: 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2015.08.001>.
- Sensuła B., Wilczyński S. 2017. Climatic signals in tree-ring width and stable isotopes composition of *Pinus sylvestris* L. growing in the industrialized area nearby Kędzierzyn-Koźle. *Geochronometria* 44: 240-255. DOI: <https://doi.org/10.1515/geochr-2015-0070>.
- Sensuła B., Wilczyński S., Monin L., Allan M., Pazadur A., Fagel N. 2017. Variations of tree ring width and chemical composition of wood of pine growing in the area nearby chemical factories. *Geochronometria* 44: 226-239. DOI: <https://doi.org/10.1515/Geochr-2015-0064>.
- Sensuła B., Wilczyński S., Piotrowska N. 2016. Zastosowanie metod dendrochronologicznych oraz spektrometrycznych w monitorowaniu drzewostanów sosnowych na obszarach przemysłowych. *Sylwan* 160 (9): 730-740. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylvan.2016040>.
- Stravinskiene V., Bartkevicius E., Plausinyte E. 2013. Dendrochronological research of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) radial growth in vicinity of industrial pollution. *Dendrochronologia* 31: 179-186.
- Sutherland E. K., Martin B. 1990. Growth response of *Pseudotsuga menziesii* to air pollution from copper smelting. *Canadian Journal of Forest Research* 20 (7): 1020-1030.

- Szychowska-Krapiec E., Wiśniewski Z. 1996. Zastosowanie analizy przyrostów rocznych sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris*) do oceny wpływu zanieczyszczeń przemysłowych na przykładzie zakładów chemicznych „Police” (woj. szczecińskie). *Kwartalnik Akademii Górniczo-Hutniczej Geologia* 22 (3): 281-299.
- Tardif J., Conciatori F. 2001. Comparative analysis of the climate response of seven boreal tree species from north-western Quebec, Canada. *Tree-Ring Research* 57 (2): 169-181.
- Warren W. G. 1989. Tree rings and pollution: trend removal or trend estimation? W: Pelz D. R [red.]. *Proceeding of the IUFRO Conference on Forest Statistics*. Abteilung für Forstliche Biometrie, Universität Freiburg. 304-316.
- 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.
- Wilezyński S. 2006. The variation of tree-ring widths of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) affected by air pollution. *European Journal of Forest Research* 125 (3): 213-219. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-005-0106-2>.
- Wilezyński S. 2010. Uwarunkowania przyrostu radialnego wybranych gatunków drzew z Wyżyny Kieleckiej w świetle analiz dendrochronologicznych. *Zeszyty Naukowe UR w Krakowie* 464 (341).
- Wilezyński S., Feliksik E. 2005. Disturbances in variation of the annual ring width of Norway spruce in the Polish Western Beskid Mountains. *Journal of Forest Science* 51 (12): 539-547.
- Wilezyński S., Gołąb J. 2001. Sygnał klimatyczny w słojach drewna buka zwyczajnego (*Fagus sylvatica* L.) z Beskidu Wyspowego. *Sylwan* 145 (10): 61-72.