

Zapis zanieczyszczenia powietrza w przyrostach rocznych drzew

The record of air pollution in tree rings

FILIP DUSZYŃSKI

Instytut Geografii i Rozwoju Regionalnego, Uniwersytet Wrocławski
50-137 Wrocław, pl. Uniwersytecki 1; filip.duszynski@uni.wroc.pl

Zarys treści. Problem negatywnego oddziaływania zanieczyszczeń powietrza na drzewa został szerzej rozpoznany już ponad sto lat temu, jednak dopiero od lat 1970. w badaniach zaczęto stosować metodę dendrochronologiczną. Dowiedziono, że szkodliwe substancje chemiczne, takie jak dwutlenek siarki czy tlenki azotu, powodują zaburzenie procesów fizjologicznych roślin drzewiastych, co skutkuje spowolnieniem bądź zupełnym zahamowaniem ich wzrostu. Zjawisko to doskonale zapisane jest w postaci redukcji przyrostów rocznych drzew. Dzięki temu można określać zarówno czas, w którym na środowisko przyrodnicze negatywnie oddziaływał przemysł, jak i siłę tego oddziaływania. Na świecie przeprowadzono wiele studiów dendrochronologicznego zapisu zmian jakości powietrza związanych z funkcjonowaniem lokalnych źródeł emisji zanieczyszczeń i z pogorszonym stanem aerosanitarnym na rozległym obszarze. Stosowano różne techniki analityczne: od wizualnej oceny przebiegu krzywych chronologii, przez porównanie chronologii stanowiskowych z referencyjną, po budowanie modeli regresji. Szerokość przyrostów rocznych jest dobrym bioindykatorem i powinna znaleźć szerokie zastosowanie w monitoringu środowiska.

Słowa kluczowe: dendrochronologia, zanieczyszczenie powietrza, bioindykacja powietrza.

Wprowadzenie

Przemysłowa emisja zanieczyszczeń w Polsce i w sąsiednich krajach postkomunistycznych została w ostatnich dwóch dekadach w znacznym stopniu zminimalizowana i nie stanowi już tak znaczącego zagrożenia dla środowiska przyrodniczego. Jednym z najbardziej jaskrawych przykładów negatywnych skutków emisji przemysłowych w środkowej Europie była degradacja zachodniosudeckich lasów w latach 1970. i 1980. (np. Jadczyk, 1994, 2009; Mazurski, 2008). Jak zauważają M. Treshow i J.N.B. Bell (2004), dopiero tak istotne zniszczenia drzewostanów wzrastających w pobliżu dużych zakładów przemysłowych w Europie

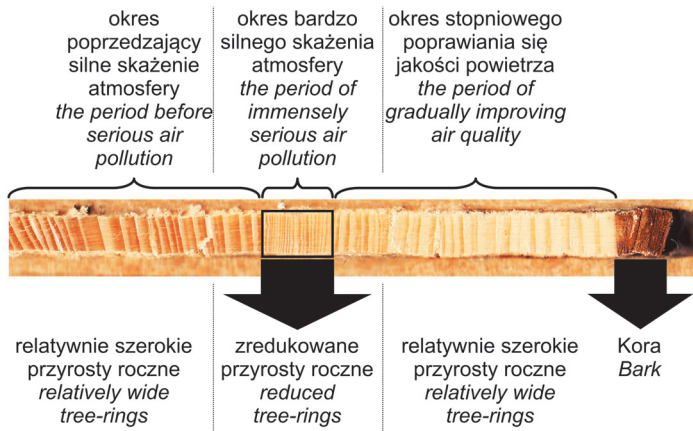
doprowadziły do wzrostu zainteresowania badaniami związanymi z kontrolą zanieczyszczeń. Równocześnie oczywista stała się potrzeba ciągłej kontroli postępujących zmian jakości powietrza, gdyż tylko w ten sposób jest możliwe podejmowanie wystarczająco szybkich działań, aby ograniczyć oddziaływanie szkodliwych substancji na atmosferę. Ważne miejsce w tego typu kontrolnych studiach zajmuje od przeszło czterech dekad analiza szerokości przyrostów rocznych drzew (np. Ashby i Fritts, 1972; Nash i inni, 1975; Evertsen i inni, 1986; Sutherland i Martin, 1990; Hirano i Morimoto, 1999; Juknys i inni, 2002; Danek, 2007; Malik i inni, 2012a; Stravinskiene i inni, 2013).

Artykuł niniejszy ma charakter przeglądowy, a jego celem jest nakreślenie głównych ram problematyki dendrochronologicznego zapisu zmian jakości powietrza. W polskim piśmiennictwie geograficznym brakowało opracowania poświęconego podsumowaniu stosowanych technik badawczych oraz dotychczasowych dokonań na tym polu. W artykule zawarto także podstawowe informacje dotyczące mechanizmu oddziaływania poszczególnych toksycznych substancji chemicznych na drzewa.

Przyrosty roczne drzew jako źródło danych o środowisku i antropopresji

Z drzewami mającymi przyrosty roczne możemy spotkać się właściwie na całym świecie, jednak zdecydowanie najwięcej gatunków wytwarzających słoje rośnie na obszarach z wyraźnie zaznaczającą się sezonowością (Schweingruber, 1996). To sprawia, że metoda dendrochronologiczna wykorzystywana jest w głównej mierze w strefie klimatów umiarkowanych, gdzie jeden słoje rzeczywiście odpowiada jednemu rokowi (Smith i Lewis, 2007) (ryc. 1). Ta niezwykła właściwość drzew umożliwia analizę zmienności oddziaływania czynników środowiskowych na szerokość przyrostów radialnych z rozdzielnością roczną, a nawet sezonową (Gärtner, 2007). Znajomość wieku najbardziej zewnętrznego przyrostu, który został wykształcony przez żyjące drzewo w ostatnim roku, pozwala na zestawienie całej sekwencji przyrostów radialnych z latami kalendarzowymi, a więc pozwala datować zdarzenia środowiskowe (Gärtner, 2007). Najistotniejszą cechą przyrostów rocznych, która umożliwia badanie środowiska przyrodniczego, jest różnicowanie się ich szerokości w poszczególnych latach. Kształtowane rokrocznie przez dane drzewo słoje powstają jako wypadkowa czynników wewnętrznych – takich jak ekspresja cech genetycznych, wrażliwość poszczególnych gatunków na czynniki zewnętrzne, czułość drzewa wynikająca z jego budowy anatomicznej, wiek drzewa, zmiany geometrii pnia w kolejnych latach życia drzewa czy częstotliwość owocowania – oraz wpływu panujących w danym okresie warunków środowiskowych, m.in. dostępności światła, temperatury powietrza, opadów atmosferycznych, wiatru, dostępności substancji pokarmowych, czynników rzeźbotwórczych oraz skażenia powietrza i gleb przez

działalność człowieka (Fritts i Swetnam, 1989; Schweingruber, 1996; Smith, 2008; Zielski i Krąpiec, 2009). Na ostateczną szerokość wykształconego w danym roku przyrostu ma więc wpływ bardzo wiele zmiennych, dlatego D. Eckstein (1990, za: Stravinskiene i inni, 2013) nazywa słoje „repozytoriami informacji o zjawiskach zachodzących w środowisku”. A. Bräunig (1995, za: Gärtner, 2007) wskazuje, że dendrochronologia znajduje zastosowanie w geomorfologii, wulkanologii, klimatologii, glaciologii, hydrologii i w szeroko rozumianych badaniach środowiskowych związanych z działalnością człowieka. Do tych ostatnich zalicza się także oddziaływanie zanieczyszczeń powietrza.



Ryc. 1. Fragment przykładowego odwiertu dendrochronologicznego, wklejonego do drewnianej podstawki i zeszlifowanego papierem ściernym. Uwagę zwraca seria szczególnie wąskich (zredukowanych) przyrostów rocznych, wykształconych w ten sposób prawdopodobnie na skutek oddziaływania zanieczyszczeń powietrza. Zaprezentowany odwiert pobrano ze świerka pospolitego (*Picea abies*) rosnącego na stoku Ptasiej Kopy w Wałbrzychu, a zredukowane przyrosty roczne pochodzą z lat 1970. i 1980. – okresu największego skażenia atmosfery przemysłową emisją zanieczyszczeń w tym mieście.

Źródło: materiały własne.

A section of an exemplary dendrochronological sample, glued to a wooden slat and sanded with sandpaper. Attention should be paid to a series of particularly narrow (reduced) growth rings which were most probably formed under the influence of air pollution. The presented core was taken from a spruce (*Picea abies*) tree growing on the slope of the Ptasia Kopa hill in the city of Wałbrzych. The reduced tree-rings originate from the 70s and 80s of the 20th century – a period of the greatest air pollution caused by the industrial emission in this city.

Source: author's own materials.

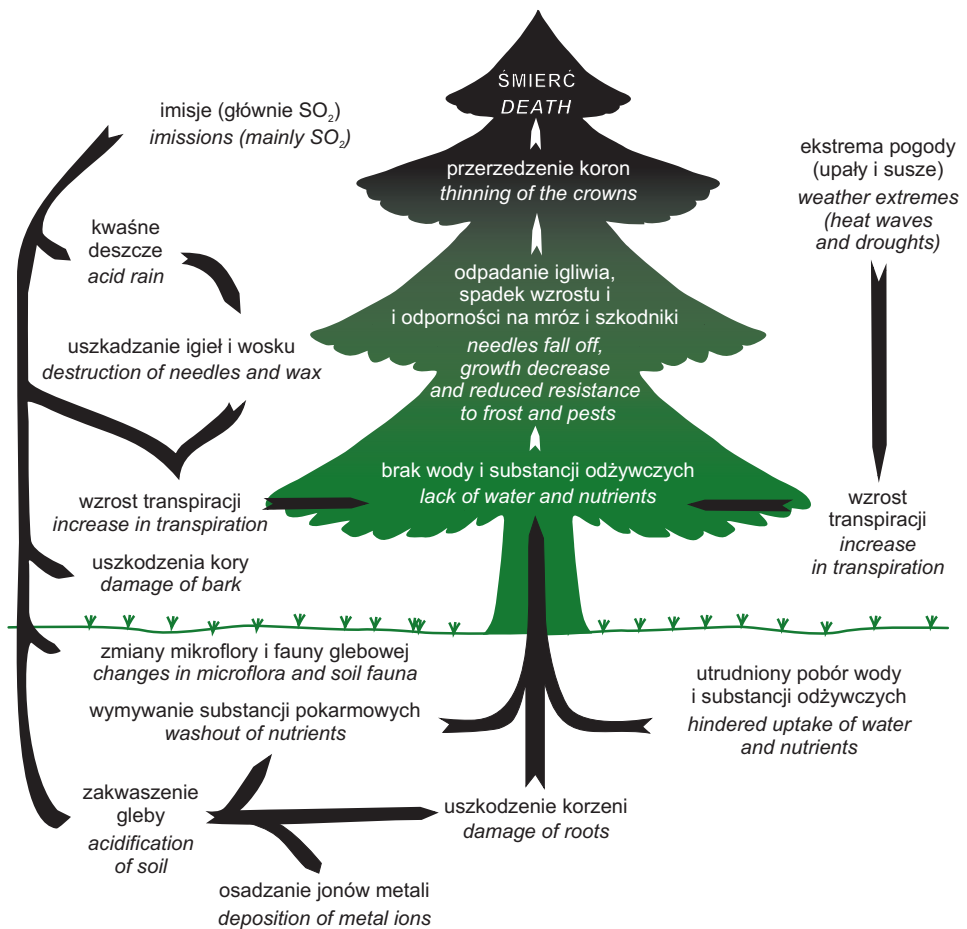
Nadmierne stężenie toksycznych substancji chemicznych może powodować zaburzenia w fizjologii roślin (Godzik, 1981; Bytnerowicz, 1996; McLaughlin i inni, 2002; Emberson, 2003; Legge i Krupa, 2004; Percy i Ferretti, 2004). Ich konsekwencją może być spowolnienie bądź zahamowanie wzrostu drze-

wa, które objawia się najczęściej w postaci silnego zredukowania bądź braku przyrostów rocznych (ang. *missing rings*) (ryc. 1). W ten sposób w sekwencjach przyrostów rocznych poszczególnych osobników pojawia się informacja o czasie trwania i sile oddziaływania czynnika zanieczyszczającego powietrze (Szychowska-Krapiec, 2009), a same przyrosty roczne okazują się być dobrym bioindykatorem (Smith, 2008; Stravinskiene, 2013). Korzyści płynące z ich stosowania – to przede wszystkim obiektywność technik pomiarowych i możliwość zbudowania sięgającej daleko wstecz serii czasowej (Nöjd i Reams, 1996). Co więcej – pomimo że znane są inne, czulsze wskaźniki zanieczyszczenia powietrza, dane uzyskane z przyrostów rocznych, dzięki ich ścisłemu powiązaniu z parametrami ekonomicznymi i biologicznymi, stanowią źródło cennych informacji na temat konieczności prowadzenia bieżących badań kontrolnych atmosfery (Nöjd i Reams, 1996). I. Malik i inni (2012b) dowiedli, że przyrosty roczne mogą spełniać funkcję nie tylko wskaźnikową, lecz również predykcyjną – ostrzegać z kilkuletnim wyprzedzeniem o potencjalnym zagrożeniu dla zdrowia i życia ludności.

Mechanizm i skutki oddziaływania toksycznych substancji chemicznych

W literaturze dendrochronologicznej znajdujemy stosunkowo niewiele informacji na temat dróg oddziaływania szkodliwych substancji chemicznych na przebieg procesów fizjologicznych w roślinach. Nie powinno to zaskakiwać, zważywszy że analizy przyrostów radialnych drzew służą przede wszystkim odpowiedzi na pytanie o czasową i przestrzenną zmienność jakości powietrza – ustalenie biologicznych przyczyn redukcji przyrostów rocznych schodzi w takiej sytuacji na drugi plan. W większości opracowań autorzy ograniczają się więc do stwierdzenia, jaki związek chemiczny był odpowiedzialny za obserwowaną redukcję przyrostów rocznych (np. Ashby i Fritts, 1972; Hirano i Morimoto, 1999). W niektórych artykułach pojawia się tłumaczenie zaburzenia wzrostu drzew zakłóceniem procesu fotosyntezy przez zanieczyszczenia powietrza (np. Evertsen i inni, 1986; Nöjd i Reams, 1996; Malik i inni, 2011). Tylko nieliczne prace zawierają przegląd informacji o fizjologicznych konsekwencjach ekspozycji na trujące substancje gazowe (Sutherland i Martin, 1990; McLaughlin i inni, 2002; Stravinskiene i inni, 2013).

Najważniejsze zanieczyszczenia powietrza, takie jak dwutlenek siarki, tlenki azotu, ozon, fluorki czy pyły, oddziałują na organizm rośliny bezpośrednio z powietrza, a dwa pierwsze mogą wyrządzać roślinie szkodę także pośrednio – z poziomu gleby (Jadczyk, 1999; McLaughlin, 2002; Emberson, 2003) (ryc. 2). A. Bytnerowicz (1996) podkreśla, że po dostaniu się toksycznych substancji do organizmu rośliny fizjologiczne efekty ich oddziaływania widoczne są na bardzo



Ryc. 2. Złożony mechanizm oddziaływania dwutlenku siarki na drzewa

Źródło: Jadczyk (1999, nieznacznie zmienione).

A complex mechanism of the influence of sulphur dioxide on trees

Source: Jadczyk (1999, slightly modified).

różnych poziomach organizacji biologicznej, obejmujących organella komórkowe, komórki, tkanki, całe rośliny, a nawet ich zbiorowiska. Ten sam autor zwraca uwagę, że sposób oddziaływania zanieczyszczeń na dany organizm jest uzależniony od stężenia danej substancji fitotoksycznej, cech fizjologicznych i biochemicznych samych roślin, a także wpływu rozmaitych modyfikujących czynników biotycznych i abiotycznych.

Dwutlenek siarki, będący typowym produktem ubocznym spalania paliw kopalnych (Emberson, 2003), jest postrzegany jako jeden z najbardziej fito-

toksycznych gazów. Dostaje się on do wnętrza liści przez aparaty szparkowe, choć może przeniknąć także przez kutykulę (Emberson, 2003). W drzewach długotrwale eksponowanych na działanie dwutlenku siarki występują zaburzenia mechanizmów transpiracji (np. L'Hirondelle i Addison, 1985; Jadczyk, 1999) (ryc. 2). Konsekwencją tego są zakłócenia procesu przyswajania dwutlenku węgla, będącego głównym elementem fotosyntezy (Legge i Krupa, 2004). Powstający w komórce z dwutlenku siarki wolny rodnik HSO_3 (dwusiarczyn) lub SO_3^- (siarczyn) negatywnie oddziałuje na metabolizm wolnych aminokwasów, doprowadzając w końcu do niedoboru białek, cukrów i soli mineralnych (Jadczyk, 1999). Oddziaływanie dwutlenku siarki objawia się także na poziomie zmian morfologicznych (Emberson, 2003), w postaci uszkodzeń igieł i liści drzew, a także destrukcji wosków epikutikularnych (Legge i Krupa, 2004). Obecność pochodnych dwutlenku siarki w glebie może doprowadzić do destrukcji włośników (ryc. 2), a przez to spowodować poważne komplikacje w poborze wody i substancji pokarmowych (Jadczyk, 1999).

Antropogeniczne źródło tlenków azotu także związane jest w głównej mierze ze spalaniem paliw kopalnych (Emberson, 2003). Ich oddziaływanie na roślinę jest podobne do wpływu dwutlenku siarki (Jadczyk, 1999), choć T.A. Mansfield (2004) podkreśla, że nie objawia się w tak oczywisty sposób. Obecność tych związków w dużym stężeniu może powodować spowolnienie wzrostu rośliny poprzez zahamowanie procesu fotosyntezy (Emberson, 2003). T.A. Mansfield (2004) zauważa, że szkodliwość dwutlenku azotu pojawia się głównie przy jego współdziałaniu z innymi zanieczyszczeniami. Samodzielne oddziaływanie dwutlenku azotu uchodzi za szkodliwe ze względu na straty energetyczne, jakie musi ponieść roślina, aby wydalić nadmiar tej substancji (Mansfield, 2004). Wpływ tlenku azotu na roślinę ma złożony charakter, jednak prawdopodobnie przyczynia się on do blokowania mechanizmów fotosyntezy (Mansfield, 2004).

Fluorki są jednym z głównych produktów ubocznych procesów przemysłowych (Emberson, 2003). Ich odkładanie się w organizmie rośliny może prowadzić do zahamowania procesu fotosyntezy, co skutkuje spowolnieniem wzrostu (McCune i Weinstain, 2004). Obecność fluorków zaburza ponadto procesy metaboliczne (Emberson, 2003).

Szkodliwe działanie pyłów polega przede wszystkim na tym, że osadzając się na powierzchni listowia tworzą warstewkę, redukującą ilość docierającego światła (Emberson, 2003). Wydajność procesu fotosyntezy jest wówczas ograniczona, a konsekwencją jest spowolnienie wzrostu rośliny (Jadczyk, 1999). Częsteczki pyłów mogą zatykać aparaty szparkowe, w znacznej mierze ograniczając wymianę gazową (Emberson, 2003). A. Farmer (2004) zwraca uwagę, że niektóre rodzaje pyłów mogą niszczyć epidermę liścia, a nawet wchodzić w niepożądane reakcje chemiczne po przedostaniu się do jego wnętrza.

W niniejszej pracy nie jest rozpatrywany wpływ ozonu na funkcjonowanie roślin, chociaż jest on bez wątpienia szczególnie szkodliwy (Muzika i inni,

2004). Jednak jego obecność w atmosferze ma charakter wybitnie ponadregionalny, niewiążący się z poszczególnymi źródłami emisji zanieczyszczeń (Ashmore, 2004; Percy i Ferretti, 2004), dlatego analiza jego wpływu na szerokość przyrostów radialnych jest znacznie utrudniona i przez to rzadziej opisywana w literaturze (np. Muzika i inni, 2004; Novak i inni, 2007).

W sytuacji oddziaływania na rośliny zanieczyszczeń powietrza do głosu dochodzą również inne czynniki biotyczne i abiotyczne, które mogą wpływać na ich fizjologiczną reakcję (Bytnerowicz, 1996). Do pierwszej grupy zaliczyć można m.in. ataki insektów czy patogenów grzybowych, do drugiej zaś – wzrost stężenia dwutlenku węgla, znaczną depozycję azotu, wyższy poziom promieniowania ultrafioletowego, niewystarczającą dostępność substancji odżywczych, susze czy ekstrema temperatury (Bytnerowicz, 1996; Jadczyk, 1999). R. Juknys i inni (2002) oraz V. Stravinskiene i inni (2013) podkreślają, że ekstremalne warunki pogodowe w danym roku wyraźnie pogłębiają negatywny sygnał zapisany w drzewach poddanych stałemu oddziaływaniu zanieczyszczeń powietrza.

Odporność drzew na toksyczne substancje jest bardzo zróżnicowana. Do najwrażliwszych zaliczane są takie gatunki, jak: świerk pospolity (*Picea excelsa*), sosna zwyczajna (*Pinus sylvestris*), jodła pospolita (*Abies alba*) i jałowiec pospolity (*Juniperus communis*) (Szychowska-Krąpiec, 2009; Vaičys i Armolaitis, 1986, za: Stravinskiene i inni, 2013). Modrzew (*Larix decidua*) wymieniany jest z kolei jako roślina o znacznie mniejszej wrażliwości na szkodliwe substancje zawarte w powietrzu (Szychowska-Krąpiec, 2009; Wertz, 2012). Drzewa liściaste wykazują generalnie większą odporność na zanieczyszczenia powietrza (Szychowska-Krąpiec, 2009).

Dendrochronologiczny zapis zmian jakości powietrza – rys historyczny i przykłady badań

Początki badań i ich dalszy rozwój

Na temat zgubnego wpływu zanieczyszczeń powietrza na możliwości funkcjonowania roślin wypowiedziano się już dawno temu. M. Treshow i J.N.B. Bell (2004) przywołują pracę Johna Evelyn z 1661 r., w której opisane zostały m.in. efekty oddziaływania szkodliwych substancji na rosnące w Londynie rośliny. W kolejnych dekadach problem skażenia atmosfery w Europie narastał, a relacja przemysł – degradacja roślinności stała się w końcu oczywista, tym bardziej, że dostrzeżono związek pomiędzy zamieraniem drzewostanów a bliskością zakładów przemysłowych (Treshow i Bell, 2004). I. Malik i inni (2011) zauważają, że zjawisko to zostało odnotowane po raz pierwszy w XIX w., a swój pogląd opierają na badaniach J.A. Stöckhardta z 1871 r., przeprowadzonych w Górach Kruszcowych (Rudawach). Podobnie do tej kwestii odnoszą się m.in. R. Juknys i inni (2002) oraz R. Wimmer (2002), który, poza wspomnianą już pracą J.A. Stöckhardta (1871), przywołuje również studia C. Gerlacha z początku XX w. I. Malik i inni

(2011) słusznie jednak zauważają, że ówczesnie prowadzone badania miały charakter studiów jakościowych, a wyciągane wnioski na temat wpływu zanieczyszczeń opierały się na wizualnej wycenie jakości i wyglądu pnia. Jedynie badania E. Haselhoffa i G. Lindaua z 1903 r., o których wspomina E. Szychowska-Krąpiec (2009) powołując się na F.H. Schweingrubera i innych (1985), wskazywały na redukcję przyrostów rocznych drzew rosnących w pobliżu głównych źródeł emisji zanieczyszczeń jeszcze na początku XX w. Do szczególnej intensyfikacji studiów nad omawianym problemem przy wykorzystaniu technik dendrochronologicznych doszło dopiero na początku lat 1970., co związane było z ekspansją przemysłu i narastaniem problemu skażenia atmosfery (Juknys i inni, 2002; Malik i inni, 2010).

Dendrochronologiczny zapis emisji ze źródeł lokalnych

W ostatnich czterdziestu latach za pomocą analizy słoików przyrostów rocznych najczęściej określano oddziaływanie lokalnych (punktowych) źródeł emisji zanieczyszczeń (Wertz, 2012). Jedną z pierwszych prac tego typu były studia W.C. Ashby'ego i H.C. Frittsa (1972), w których próbowano określić wpływ warunków klimatycznych okolic miejscowości LaPorte (Stany Zjednoczone) na kształtowanie się przyrostów rocznych dębu białego (*Quercus alba*). W trakcie badań odkryto, że stworzony model klimatyczny kształtowania się przyrostów rocznych nie przystaje do rzeczywistości – krzywa reprezentująca indeksowaną szerokość przyrostów rocznych przebiegała bowiem na wielu odcinkach znacznie poniżej wartości wymodelowanej. Wynik taki był asumptem do stwierdzenia, że poza uwarunkowaniami meteorologicznymi na wzrost drzew musiał mieć wpływ jakiś inny, dodatkowy czynnik. Autorzy, nie znajdując innego wyjaśnienia, zasugerowali, że o takim obrazie zjawiska mogły zdecydować dymy emitowane w pobliskim Chicago. Trzy lata później T.H. Nash i inni (1975) opublikowali kolejną, istotną dla rozwikłania problemu pracę, wykonaną również na obszarze Stanów Zjednoczonych. Tym razem podjęto próbę określenia wpływu zanieczyszczeń gazowych emitowanych z huty srebra i miedzi w Miami. Wyniki jednoznacznie potwierdziły, że szkodliwe substancje chemiczne w latach największej emisji wywarły istotny wpływ na sposób wykształcenia się przyrostów rocznych sosny żółtej (*Pinus ponderosa*). Dekadę później cenne badania przeprowadzili J.A. Evertsen i inni (1986), studiując wpływ emisji z irlandzkiej fabryki nawozów sztucznych na kształtowanie się przyrostów rocznych świerka pospolitego (*Picea excelsa*). Wykazana została nie tylko silna redukcja przyrostów rocznych, ale również zmiana gęstości drewna. Co ważne, autorzy dowiedli, że wraz ze wzrostem odległości od źródła emisji negatywna reakcja drzew była coraz mniejsza. Wpływem zakładów produkujących nawozy sztuczne zajmowali się także R. Juknys i inni (2002) oraz V. Stravinskiene i inni (2013), którzy określali dendrochronologiczny zapis zanieczyszczeń powietrza emitowanych

z litewskiej fabryki „Achema” (dawniej „Azotas”) w pobliskich sosnowych lasach. Szczególnie wartościowa i szeroko cytowana jest praca E.K. Sutherland i B. Martina (1990), którzy badali wpływ huty miedzi w Magna (Stany Zjednoczone) na szerokość przyrostów rocznych daglezi zielonej (*Pseudotsuga menziesii*). Tak jak w przypadku studiów J.A. Evertseny i innych (1986) ustalono, że im bliżej źródła zanieczyszczeń, tym silniejsza negatywna reakcja drzew. W latach 1990. za pomocą metody dendrochronologicznej badano katastrofalnie zdegradowane przez przemysł metalurgiczny środowiska północnej Rosji. P. Nöjd i G.A. Reams (1996) wykazali bardzo silne oddziaływanie na przyrodę żywą zanieczyszczeń (głównie dwutlenku siarki) emitowanych z huty metali nieżelaznych w Monczegorsku na Półwyspie Kolskim, natomiast A.P. Ivshin i S.G. Shiyatov (1995) potwierdzili negatywny wpływ huty niklu w okolicach Norylska (to z jej powodu Norylsk uznawany jest za jedno z najbardziej skażonych miejsc na Ziemi; por. *The World's Most Polluted Places*, 2007). Praca T. Hirano i K. Morimoto (1999) przedstawia obraz około 10-letniej redukcji przyrostów rocznych sosny czarnej (*Pinus thunbergii*) na skutek oddziaływania zanieczyszczeń z pobliskiego kompleksu przemysłowego w okolicach Osaki w Japonii. Równocześnie wykazano, że wraz ze zmniejszeniem emisji przyrosty roczne odzyskują szerokość z okresu poprzedzającego, a nawet ją przekraczają. Autorzy tłumaczą to wycięciem części drzew obumierających z powodu zanieczyszczeń, co sprawiło, że zmniejszyła się gęstość drzewostanu. Poskutkowało to mniejszą konkurencją międzyosobniczą, a w efekcie znaczną poprawą warunków wzrostu pozostałych drzew. Podobna sytuacja została odnotowana w licznych badaniach, m.in. E.K. Sutherland i B. Martin (1990).

W piśmiennictwie, przedstawiającym dendrochronologiczny zapis zmian jakości powietrza uwarunkowany oddziaływaniem źródeł lokalnych, spotkać możemy także sporo prac polskich autorów. Większość z nich powstała jednak dopiero w latach 1990., a więc niemal dwie dekady po pierwszych publikacjach ze Stanów Zjednoczonych. E. Szychowska-Krąpiec i Z. Wiśniewski (1996) oceniali wpływ zanieczyszczeń przemysłowych emitowanych przez zakłady chemiczne „Police” na wzrost sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris*). M. Krąpiec i E. Szychowska-Krąpiec (2001) zastosowali analizę szerokości słoików do zbadania oddziaływania zakładów przemysłowych zlokalizowanych w pobliżu Ojcowskiego Parku Narodowego na rosnące tam sosny (*Pinus sylvestris*) oraz jodły (*Abies alba*). W kolejnych pracach na terenie województwa śląskiego I. Malik i inni (2010, 2011) oceniali dendrochronologiczny zapis emisji zanieczyszczeń z Zakładów Chemicznych „Tarnowskie Góry” oraz Huty Cynku „Miasteczko Śląskie”. Prowadzone przez kilka lat badania sosen (*Pinus sylvestris*) doprowadziły do powstania rozbudowanego dzieła, w którym pod uwagę brano nie tylko wpływ czynnika lokalnego, ale również szerszy, regionalny aspekt skażenia powietrza (Malik i inni, 2012a). Szczególnie wartościowe i wyjątkowe jest w tej pracy wskazanie możliwości pojawienia się negatywnych efektów zdrowotnych wśród ludzi kilka

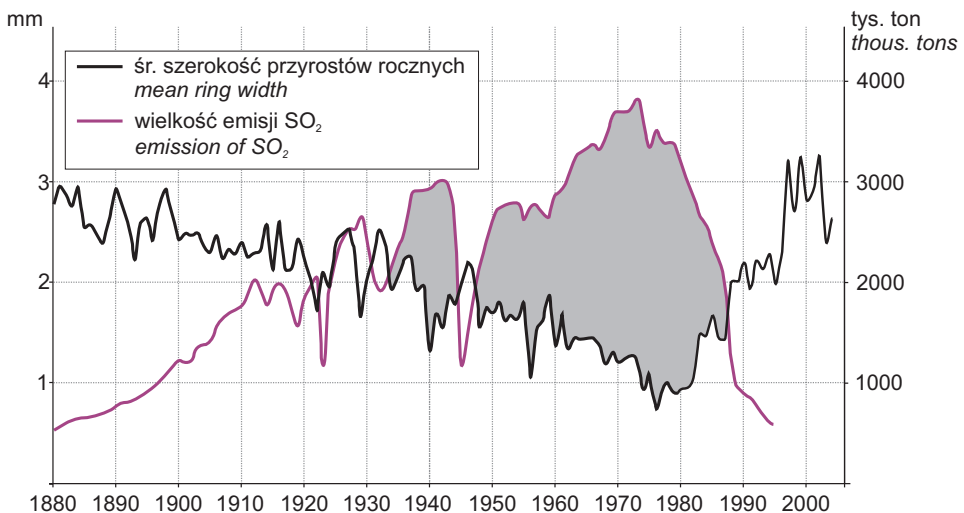
lat po wystąpieniu znacznych redukcji przyrostów rocznych drzew wokół byłego Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego. Dlatego redukcja przyrostów rocznych drzew może być traktowana nie tylko jako indyktor zanieczyszczenia powietrza, ale także jako sensor wczesnego ostrzegania przed zwiększeniem zagrożenia dla zdrowia i życia ludzi w wyniku emisji zanieczyszczeń do atmosfery (śmiertelność okołoporodowa niemowląt, zachorowalność na raka płuc, tchawicy, oskrzeli).

Dendrochronologiczny zapis wielkoskalowego zanieczyszczenia powietrza

Praca I. Malika i innych (2012a) znajduje się już na pograniczu pomiędzy studiami dotyczącymi zapisu zanieczyszczeń powietrza ze źródeł lokalnych, a dotykającymi problematyki o zasięgu ponadregionalnym. Na świecie przeprowadzono jednak sporo badań wykorzystujących wyłącznie to drugie, szersze podejście. Prace tego typu wykonano także w Polsce. Jak słusznie zauważa B. Wertz (2012), badania, których celem jest określenie jakości powietrza na rozległym obszarze, a więc w sytuacji, gdy konkretny emiter zanieczyszczeń nie jest zdefiniowany, są zdecydowanie trudniejsze. Pogląd ten podzielają M. Ferretti i inni (2002), zwracając ponadto uwagę na fakt, że studia takie nastroczą wielu problemów natury interpretacyjnej. Kompleksową pracę poświęconą problemowi zanieczyszczenia powietrza w Europie Środkowej przedstawili W. Elling i inni (2009). Autorzy ci pobrali próby z jodeł (*Abies alba*) rosnących w południowej części Niemiec i na ich podstawie donosili o związku redukcji przyrostów rocznych ze szczególnie obniżoną w tym czasie jakością powietrza. Jedną z pierwszych tego typu prac w Polsce wykonał E. Feliksik (1995), który podjął próbę oceny zagrożenia lasów beskidzkich imisjami przemysłowymi. Kilka lat później E. Feliksik i S. Wilczyński (2003) przeprowadzili analizy dendrochronologiczne dotyczące Sudetów, Beskidów i Rostocza, którymi dowiedli, że o długookresowym trendzie spadkowym krzywych przyrostów rocznych, jaki miał miejsce w drugiej połowie XX w., musiało zadecydować zanieczyszczenie powietrza; wpływ klimatu upatrywano jedynie w postaci krótkookresowych fluktuacji. M. Danek (2007) opublikowała artykuł poświęcony zapisowi obniżonej jakości powietrza w przyrostach rocznych sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris*) na Wyżynie Śląsko-Krakowskiej. Cennym wkładem w zrozumienie relacji 'zanieczyszczenie powietrza–przyrosty roczne' była także praca B. Werta (2012), w której wykazano, jak na epizod obniżenia jakości powietrza na Wyżynie Kieleckiej zareagowały sosny, jodły oraz modrzewie. W Polsce podjęto ponadto próby określenia zapisu transgranicznego transportu zanieczyszczeń, który wyrządził szczególne duże straty w drzewostanach w Sudetach Zachodnich. Trzeba tu wspomnieć o pracy M. Godka i innych (2009) oraz o wstępnych wynikach analiz J. Lisok (2012).

Przegląd najczęściej stosowanych technik badawczych

Tak jak w różnych częściach świata i w różnej skali przestrzennej prowadzono badania, tak zupełnie odmienne były sposoby analizowania zebranego materiału. Należy przy tym podkreślić, że w części prac wykorzystywano nawet kilka technik badawczych, co pozwalało na uzyskanie możliwie pełnego obrazu problemu. Najprostsze podejście zaproponowali J.A. Evertsen i inni (1986), gdzie wnioskowanie zostało oparte na analizie zmienności gęstości drewna i szerokości przyrostów rocznych w czasie oraz zależności pomiędzy tymi parametrami. Stosunkowo prostą techniką, co wcale nie umniejsza jej naukowej wartości, jest także wizualna ocena zależności pomiędzy krzywymi reprezentującymi wielkość produkcji bądź emisji zanieczyszczeń a szerokością przyrostów rocznych drzew (ryc. 3). Tego typu analiza nigdy nie występuje samodzielnie, stanowi raczej część większej pracy, dostarczając czytelnikowi niemal namacalnych dowodów na związek redukcji przyrostów rocznych z epizodem obniżenia jako-



Ryc. 3. Porównanie krzywej reprezentującej średnią szerokość przyrostów rocznych jodły pospolitej (*Abies alba*) rosnącej w południowej części Niemiec z krzywą obrazującą wielkość emisji dwutlenku siarki w dawnej RFN. Zwraca uwagę odwrotną proporcjonalność pomiędzy obiema cechami. Najbardziej charakterystyczny fragment oznaczono szarym kolorem.

Źródło: Elling i inni (2009, zmienił).

The comparison of the curve showing the average ring width of silver fir (*Abies alba*) trees growing in the south part of Germany with the one illustrating emission volume of sulphur dioxide in FRG. Attention should be paid to the inverse proportionality between the described features.

The most characteristic part of the plot was marked with grey colour.

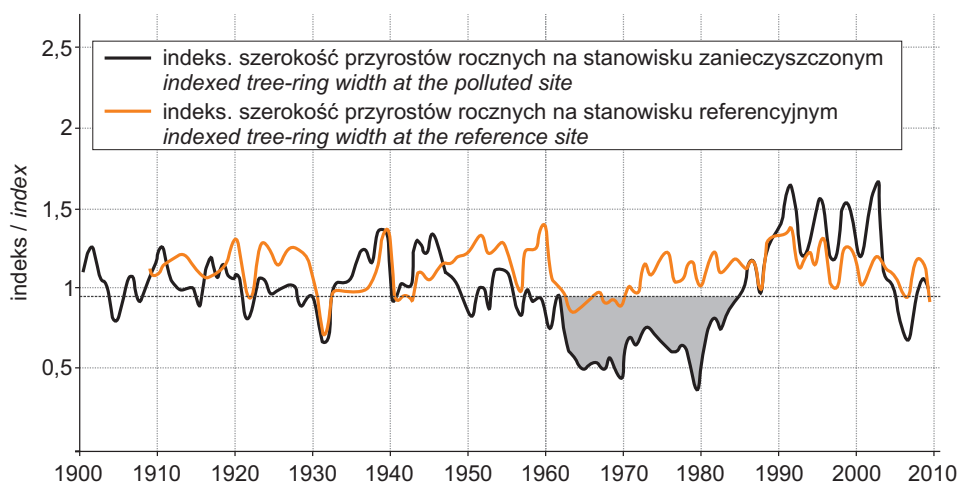
Source: Elling *et al.* (2009, modified).

ści powietrza (np. Elling i inni, 2009; Malik i inni, 2012a). Chociaż na tak stworzonych wykresach najczęściej doskonale widoczna jest odwrotna proporcjonalność pomiędzy obiema krzywymi, autorzy zwykle rezygnują z określania współczynnika korelacji. Być może przyczyną są zbyt niskie otrzymywane wartości – wiadomo wszak, że o kształtowaniu się przyrostów radialnych decyduje szereg czynników środowiskowych (Cook, 1987) – presja ze strony zanieczyszczonego powietrza jest tylko jednym z nich.

Istotny jest dobór stanowisk poboru próbek. Tak jak w przypadku innych studiów dendrochronologicznych (np. w dendrogeomorfologii), powszechnie wyznacza się stanowiska referencyjne, które stanowią odniesienie dla wyników otrzymanych na stanowiskach poddanych oddziaływaniu zanieczyszczeń (np. Sutherland i Martin, 1990; Malik i inni, 2012a). Stanowiska reperowe wyznacza się najczęściej w sporym oddaleniu od emiterów zanieczyszczeń, na tyle jednak blisko, aby warunki klimatyczne i siedliskowe były porównywalne do tych panujących na obszarze badań. W ten sposób otrzymane chronologie – stanowiskowe i referencyjną (nazywaną także reperową lub kontrolną) – porównuje się pod kątem różnic w modelu przyrostowym (ryc. 4). W literaturze można znaleźć propozycje ilościowej oceny stopnia zróżnicowania obu tych krzywych. V. Stravinskiene i inni (2013) używają wzoru pozwalającego na określenie relatywnego spadku szerokości przyrostów radialnych na stanowisku obciążonym zanieczyszczeniami w odniesieniu do stanowiska referencyjnego.

Sporą popularność zdobyła zaproponowana przez F.H. Schweingruber i innych (1985) metoda, opierająca się na analizie lat charakterystycznych i nagłych zmian szerokości przyrostów rocznych (ang. *abrupt growth changes*). Z sukcesem wykorzystali ją w swoich badaniach polscy autorzy, m.in. M. Danek (2007) oraz I. Malik i inni (2011, 2012a). W metodzie tej wielkość redukcji oblicza się jako stosunek szerokości przyrostów radialnych wykształcanych przez drzewa w epizodzie podwyższonego zanieczyszczenia powietrza do szerokości przyrostów rocznych w okresie wcześniejszym, poprzedzającym epizod. Obliczone wartości grupuje się w wyznaczone wcześniej klasy redukcji – zwyczajowo za redukcje średnie przyjmuje się te od 30% do 50%, duże – od 50% do 70%, a bardzo duże powyżej 70%. Finalnym efektem są wykresy (ryc. 5), z których możemy odczytać: czas trwania redukcji przyrostów rocznych, stopień redukcji przyrostów rocznych, a także liczbę (lub udział) drzew, które wyprodukowały węższe niż przeciętnie słoje. B. Wertz (2012) zwraca jednak uwagę, że pewnym mankamentem zaprezentowanego podejścia jest subiektywizm wyboru drzew, które w dalszym etapie analiz mają stanowić skalę porównawczą przy wyznaczeniu stopnia redukcji przyrostów rocznych.

W poprzednim rozdziale sygnalizowano, że wiele znaczących prac dotyczyło wychwyconych rozbieżności pomiędzy zbudowanymi chronologiami (najczęściej indeksowanymi) a wymodelowaną krzywą, obrazującą hipotetyczne kształtowanie się słoików w sytuacji, w której drzewo byłoby poddane jedynie wpływo-



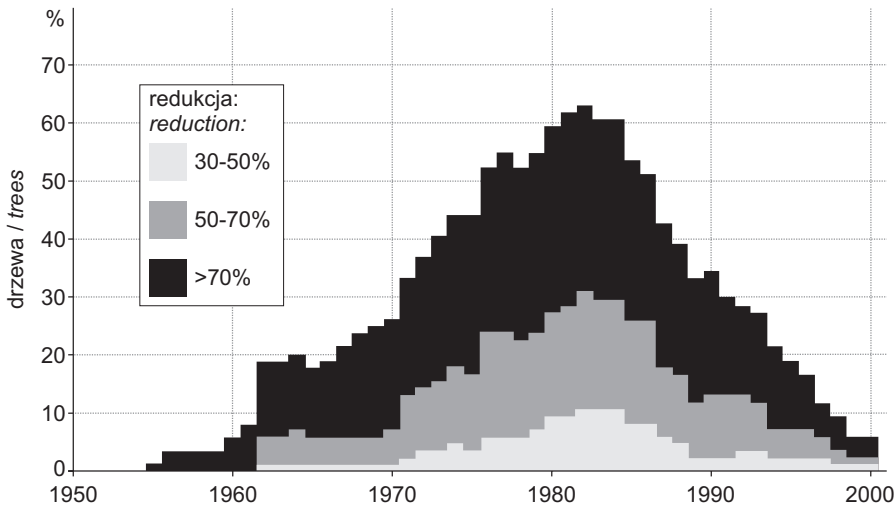
Ryc. 4. Wykres obrazujący indeksowane szerokości przyrostów rocznych sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris*) rosnącej na stanowisku poddanym oddziaływaniu zanieczyszczeń (północna część województwa śląskiego) i na oddalonym o około 50 km na północny zachód stanowisku referencyjnym. W latach 1960., 1970. i 1980. zaznacza się wyraźna różnica wartości indeksów otrzymanych dla drzew poddanych zanieczyszczeniom i tych wzrastających z dala od źródeł emisji. Szarym kolorem oznaczono lata, w których wartość indeksu nie przekroczyła 0,89.

Źródło: Malik i inni (2012b, zmienione).

Plot showing the indexed values of the tree-ring width of pine (*Pinus sylvestris*) growing on the site influenced by air pollutants (the northern part of the Silesian voivodeship) and on the reference site situated ca. 50 km away to the north-west. In the 60s, 70s and 80s of the XXth century a conspicuous difference is recognizable between the indexed values of trees growing on the polluted site and those growing far away from the emission sources. Grey colour marks the period when the value of the index did not exceed the level of 0,89.

Source: Malik *et al.* (2012b, modified).

wi czynnika klimatycznego (ryc. 6). Jak wykazano w kolejnych opracowaniach, krzywa zbudowana z wykorzystaniem wartości otrzymanych na drodze empirycznej jest w latach największej emisji zanieczyszczeń zdecydowanie poniżej krzywej utworzonej dla wartości wymodelowanych. Ciekawe jest, że już w pionierskiej pracy W.C. Ashbyego i H.C. Frittsa (1972) zastosowano tę stosunkowo zaawansowaną procedurę. W następnych dekadach na tej metodyce oparto wiele dalszych prac (Nash i inni, 1975; Sutherland i Martin, 1990; Nöjd i Reams, 1996; Hirano i Morimoto, 1999; Juknys i inni, 2002). Wydaje się, że wykorzystanie modelu regresji pozwala na najbardziej obiektywną ocenę oddziaływania zanieczyszczeń powietrza na drzewa. Pewne wątpliwości z tym związane wyrazili jednak M. Ferretti i inni (2002), odnotowując, że spadek krzywej reprezentującej szerokość przyrostów rocznych poniżej wartości wymodelowanych jest traktowany *a priori* jako dowód na obniżoną jakość powietrza. Biorąc pod uwagę



Ryc. 5. Udział drzew z różnym stopniem redukcji przyrostów rocznych w poszczególnych latach wśród jodeł (*Abies alba*) w Ojcowskim Parku Narodowym. Wykresy tego typu pozwalają na określenie czasu trwania i stopnia redukcji przyrostów radialnych.

Źródło: Krąpiec i Szychowska-Krąpiec (2001, nieznacznie zmienione).

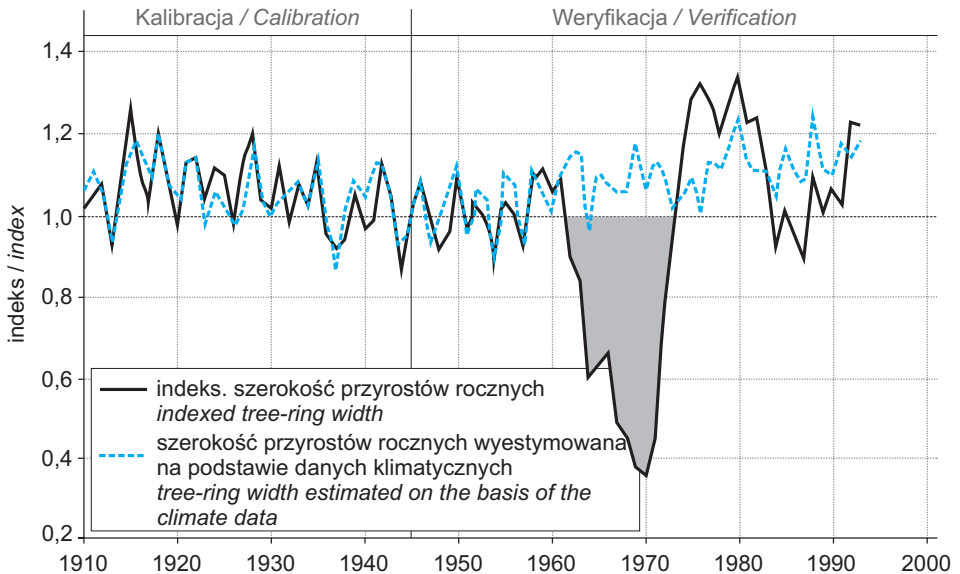
The percentage of trees with various levels of tree-ring reduction in particular years among silver firs (*Abies alba*) growing in Ojców National Park. Plots of this type help to evaluate the duration and level of tree-ring reduction.

Source: Krąpiec and Szychowska-Krąpiec (2001, slightly modified).

wielość czynników środowiskowych zapisujących się w sekwencjach przyrostów rocznych (Cook, 1987), założenie takie może być błędne.

Interesujące podejście zaprezentował B. Wertz (2012). Stosowana przez niego metoda opiera się na porównaniu przebiegu krzywej chronologii standaryzowanej z krzywą reprezentującą współczynnik zmienności indeksów. Wyniki tego badacza wskazują, że wraz ze wzrostem zanieczyszczeń maleją wartości chronologii standaryzowanej, rosną natomiast wartości współczynnika zmienności indeksów.

Rozpatrując zagadnienia metodyczne należy zwrócić uwagę na dość problematyczną kwestię: czy w tego rodzaju badaniach powinniśmy do dalszych analiz stosować chronologie rzeczywiste (zawierające rzeczywiste wartości szerokości przyrostów rocznych wyrażone w milimetrach), czy też chronologie standaryzowane (gdzie poszczególne wartości przedstawione są jako indeksy), a jeżeli ten drugi wariant, to podług jakich technik analitycznych. Chronologie standaryzowane znajdują powszechne zastosowanie w analizach dendroklimatologicznych, gdyż ich nadrzędnym celem jest wyeliminowanie trendów długookresowych (związanych np. z tzw. trendem starczym) i jednocześnie uwypuklenie fluktuacji



Ryc. 6. Porównanie krzywej reprezentującej indeksowaną szerokość przyrostów rocznych sosny czarnej (*Pinus thunbergii*) z krzywą wymodelowaną na podstawie danych klimatycznych. Jest charakterystyczne, że w latach największej emisji z pobliskiego kompleksu przemysłowego (prefektura Osaka) wymodelowane wartości znacznie przewyższają rzeczywiste. Sytuacja taka wskazuje, że gdyby wzrost drzew był kształtowany jedynie pod wpływem czynników pogodowych, przyrosty radialne byłyby znacznie szersze. Musiał więc wystąpić dodatkowy czynnik spowalniający wzrost drzewa – w tym wypadku było to zanieczyszczenie powietrza. Szarym kolorem oznaczono epizod, w którym krzywa wymodelowana najbardziej odbiega od wartości rzeczywistych.

Źródło: Hirano i Morimoto (1999, zmienione).

The comparison of the curve showing the indexed tree-ring width of black pine (*Pinus thunbergii*) with the one modelled on the basis of the climatic data. Attention should be paid to the fact that in the years of the greatest emission from the nearby industrial complex (Osaka prefecture) the estimated values are highly exceeding the real values. Such a situation indicates that if the growth of the trees had been conditioned only by meteorological factors, the tree-rings would have been much wider. A different factor must have, therefore, caused the slower growth of the trees – in this particular case it was air pollution. The grey colour shows the period when highest difference between the estimated and measured values occurred.

Source: Hirano and Morimoto (1999, modified).

krótkookresowych, związanych z warunkami meteorologicznymi panującymi w danym roku (Nöjd i Reams, 1996; Smith i Lewis, 2007). Z zasadnością eliminowania trendu długookresowego poprzez standaryzację w badaniach z zakresu dendrochronologicznego zapisu zanieczyszczeń powietrza polemizują w swojej pracy P. Nöjd i G.A. Reams (1996). Odwołując się do pracy W.G. Warrena (1989) stwierdzają, że prawdopodobieństwo usunięcia przy typowej procedurze detren-

dingu sygnału związanego z zanieczyszczeniem powietrza jest nieznanne, ale zapewne wysokie. W związku z tym autorzy sugerują rezygnację z procedury eliminacji trendu (ang. *trend removal*) na rzecz jego estymacji (ang. *trend estimation*) (Warren, 1989). Inaczej do tego zagadnienia podchodzą E.K. Sutherland i B. Martin (1990), którzy jednoznacznie wskazują, że procedura standaryzacji jest nieodzowna do dalszych analiz. Konieczność jej stosowania wiąże z faktem, że trend starczy cechuje się różnym przebiegiem u różnych osobników. Ponadto tylko taka procedura miałaby umożliwiać porównywalność danych uzyskanych z różnowiekowych drzew. Wydaje się, że rozwiązanie opisywanego problemu powinno być w najbliższych latach traktowane priorytetowo.

Znaczenie, perspektywy i ograniczenia metody dendrochronologicznej

Jak wskazują wyniki prac prowadzonych na całym świecie od przeszło czterech dekad i przy użyciu różnych technik analitycznych, epizody obniżenia jakości powietrza znajdują swoje niemal bezpośrednie odwzorowanie w postaci zredukowanej szerokości przyrostów radialnych. W związku z tym możliwości płynące z tego typu badań daleko wykraczają poza dowodzenie o biologicznej reakcji drzew na skrajnie niekorzystne dla wzrostu warunki. Informacje zapisane w sekwencjach przyrostów rocznych należy raczej traktować jak empiryczny dowód skażenia powietrza na danym obszarze – w tym rozumieniu ujawnia się bioindykacyjna wartość opisywanych danych (Nöjd i Reams, 1996; Smith, 2008), a także ich szczególna przydatność w studiach geograficznych obejmujących zagadnienie oddziaływania człowieka na środowisko przyrodnicze. Wydaje się, że dotychczas zdołano dość dobrze rozpoznać mechanizmy oraz przebieg zjawiska redukcji przyrostów rocznych, jednak potrzebne są dalsze badania. W świetle wskaźnikowych właściwości przyrostów radialnych konieczne jest skoncentrowanie uwagi na bieżącym monitoringu drzewostanów w pobliżu najbardziej zanieczyszczających powietrze zakładów przemysłowych, szczególnie w państwach rozwijających się, gdzie są współcześnie lokowane gałęzie przemysłu szczególnie szkodliwe dla środowiska przyrodniczego i zdrowia człowieka. To właśnie tam informacje zapisane w przyrostach rocznych drzew mogłyby umożliwić rejestrację negatywnych zmian postępujących z roku na rok. Co więcej – chociaż znamy wiele precyzyjniejszych metod monitoringu emisji zanieczyszczeń i jakości powietrza – o wartości analiz dendrochronologicznych stanowi ich obiektywizm (Nöjd i Reams, 1996). Zapisane w drzewach informacje nie podlegają manipulacjom ze strony człowieka i mogą być na bieżąco wykorzystywane przez niezależne zespoły eksperckie. Podwaliny aplikacyjnego wymiaru studiów z zakresu dendrochronologicznego zapisu zmian jakości powietrza położyli ostatnio I. Malik i inni (2012a). Predykcyjny wymiar badań podług zaproponowanej przez nich metody powinien być intensywnie rozwijany.

Pomimo optymistycznych perspektyw należy zdawać sobie sprawę, że ciągle nierozwiązanych pozostaje kilka istotnych kwestii natury metodycznej i interpretacyjnej. Poza wcześniej opisanymi, M. Ferretti i inni (2002) zwracają uwagę, że nie do końca jasne i możliwe do zmierzenia z wykorzystaniem technik dendrochronologicznych jest zanieczyszczenie powietrza takimi substancjami, jak ozon. Trudno także stwierdzić, jak istotne dla ostatecznej reakcji drzew są przemiany zachodzące w atmosferze pomiędzy współwystępującymi w niej związkami toksycznymi. Wydaje się, że mnogość czynników środowiskowych wpływających na szerokość kształtowanych przez drzewa słoików jest kwestią najbardziej problematyczną – stwarza bowiem pole do znacznej swobody interpretacyjnej (Ferretti i inni, 2002). Wylimitowanie choćby części tych problemów, np. poprzez stosowanie coraz subtelniejszych technik statystycznych, wnikliwą ocenę jakościową drewna z widocznymi redukcjami przyrostów rocznych, a także mikroskopową analizę zmian anatomicznych w obrębie poszczególnych słoików, powinno w przyszłości pozwolić na uzyskanie pewniejszego i bardziej przejrzystego obrazu problemu.

*

Składam serdeczne podziękowania Panu Profesorowi Piotrowi Migoniowi za uwagi i sugestie do pierwotnej wersji artykułu. Dziękuję również Recenzentom, których komentarze przyczyniły się do uczynienia tekstu bardziej kompletnym. Pani Doktor Dominice Wrońskiej-Wałach i Panu Doktorowi Piotrowi Owczarkowi dziękuję za zaszczerzenie mi zainteresowania piękną nauką, jaką jest dendrochronologia.

Piśmiennictwo / References

- Ashby W.C., Fritts H.C., 1972, *Tree growth, air pollution, and climate near LaPorte, Ind.*, Bulletin American Meteorological Society, 53, 3, s. 246-251.
- Ashmore M.R., 2004, *Wpływ utleniaczy na poziomie organizmu i zbiorowiska roślinnego*, [w:] J.N.B. Bell, M. Treshow (red.), *Zanieczyszczenie powietrza a życie roślin*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, s. 101-132.
- Bell J.N.B., Treshow M. (red.), 2004, *Zanieczyszczenie powietrza a życie roślin*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- Bräuning A., 1995, *Zur Anwendung der dendrochronologie in den geowissenschaften*, Die Erde, 126, s. 189-204.
- Bytnerowicz A., 1996, *Physiological aspects of air pollution stress in forests*, Phytion-Horn, 36, s. 15-22.
- Cook E.R., 1987, *The decomposition of tree-ring series for environmental studies*, Tree-Ring Bulletin, 47, s. 37-59.
- 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, s. 265-277.
- Eckstein D., 1990, *Quantitative assessment of past environmental changes*, [w:] E.R. Cook, L.A. Kairiukstis (red.), *Methods of Dendrochronology. Application in the Environmental Sciences*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, s. 220-223.

- Elling W., Dittmar C., Pfaffelmoser K., Rötzer T., 2009, *Dendroecological assessment of the complex causes of decline and recovery of the growth of silver fir (Abies alba Mill.) in Southern Germany*, Forest Ecology and Management, 257, s. 1175-1187.
- Emberson L., 2003, *Air pollution impacts on crops and forests: an introduction*, [w:] L. Emberson, M. Ashmore, F. Murray (red.), *Air Pollution Impacts on Crops and Forests: A Global Assessment*, Imperial College Press, London, s. 3-29.
- Evertsen J.A., Mac Siurtain M.P., Gardiner J.J., 1986, *The effect of industrial emission on wood quality in norway spruce (Picea abies)*, IAWA Bulletin, 7, 4, s. 399-404.
- Farmer A., 2004, *Wpływ zanieczyszczeń pyłowych*, [w:] J.N.B. Bell, M. Treshow (red.), *Zanieczyszczenie powietrza a życie roślin*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, s. 209-222.
- Feliksik E., 1995, *Próba oceny zagrożenia lasów beskidzkich przez emisje przemysłowe w oparciu o analizy dendrochronologiczne*, [w:] *Materiały konferencyjne „Ekologiczne i ekonomiczne uwarunkowania rozwoju gospodarczego Karpat pld.-wsch.”, Bieszczady 1995*, Centrum Edukacji Ekologicznej Wsi, Krosno, s. 117-124.
- Feliksik E., Wilczyński S., 2003, *Tree Rings as Indicators of Environmental Change*, Electronic Journal of Polish Agricultural Universities, 6, 2.
- Ferretti M., Innes J. L., Jalkanen R., Saurer M., Schäffer J., Spiecker H., Wilpert K. von, 2002, *Air pollution and environmental chemistry – what role for tree-ring studies?*, Dendrochronologia, 20, 1-2, s. 159-174.
- Fowler D., 2004, *Depozycja zanieczyszczeń i przyswajanie ich przez rośliny*, [w:] J.N.B. Bell, M. Treshow (red.), *Zanieczyszczenie powietrza a życie roślin*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, s. 51-75.
- Fritts H.C., Swetnam T.W., 1989, *Dendroecology: A Tool for Evaluating Variation in Past and Present Forest Environments*, Advances in Ecological Research, 19, s. 111-188.
- Gärtner H., 2007, *Glacial landforms, tree rings: dendrogeomorphology*, [w:] S.A. Elias (red.), *Encyclopedia of Quaternary Science*, Elsevier Scientific, s. 979-988.
- Godek M., Migala K., Sobik M., 2009, *Air pollution and forest disaster in the Western Sudetes in the light of high elevation spruce tree-ring data*, TRACE – Tree Rings in Archeology Climatology and Ecology, 7, s. 121-126.
- Godzik S., 1981, *Oddziaływanie zanieczyszczeń powietrza na rośliny – aktualne problemy i poglądy*, Wiadomości Botaniczne, 25, 3, s. 197-208.
- Hirano T., Morimoto K., 1999, *Growth reduction of the Japanese black pine corresponding to an air pollution episode*, Environmental Pollution, 106, s. 5-12.
- Ivshin A.P., Shiyatov S.G., 1995, *The assessment of subtundra forest degradation by dendrochronological methods in the Norils industrial area*, Dendrochronologia, 13, 1, s. 113-126.
- Jadczyk P., 1994, *Przyczyny zniszczenia lasów w Górach Izerskich i Karkonoszach. I. Warunki środowiska i czynniki antropogeniczne*, Sylwan, 12, s. 39-47.
- Jadczyk P., 1999, *Przyczyny zniszczenia zachodniosudeckich lasów*, Pielgrzymy, Informator Krajoznawczy, SKPS, Wrocław, s. 75-89.
- Jadczyk P., 2009, *Natural effects of large-area forest decline in the Western Sudeten*, Environment Protection Engineering, 35, 1, s. 49-56.
- Juknys R., Stravinskiene V., Vencloviene J., 2002, *Tree-ring analysis for the assessment of anthropogenic changes and trends*, Environmental Monitoring and Assessment, 77, s. 81-97.
- Krąpiec M., Szychowska-Krąpiec 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, s. 33-42.

- Kurczyńska E.U., Dmuchowski W., Włoch W., Bytnerowicz A., 1997, *The influence of air pollutants on needles and stems of Scots Pine (Pinus sylvestris L.) trees*, Environmental Pollution, 98, 3, s. 325-334.
- 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, seria A, s. 373-386.
- Legge A.H., Krupa S.V., 2004, *Wpływ dwutlenku siarki*, [w:] J.N.B. Bell, M. Treshow (red.), *Zanieczyszczenie powietrza a życie roślin*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, s. 151-173.
- Lisok J., 2012, *Wpływ depozycji zanieczyszczeń na kondycję drzewostanu lasów sudeckich w świetle modeli EMEP i FRAME*, Instytut Geografii i Rozwoju Regionalnego, Uniwersytet Wrocławski, Wrocław, maszynopis powielony.
- Malik I., Danek M., Krąpiec M., 2010, *Air pollution recorded in Scots Pine growing near a chemical plant, preliminary results and perspective (Upper Silesia, southern Poland)*, TRACE – Tree Rings in Archeology Climatology and Ecology, 8, s. 41-45.
- Malik I., Danek M., Marchwińska-Wyrwał E., Danek T., Wistuba M., Krąpiec M., 2012a, *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 Soil Pollution, 223, s. 3345-3364.
- Malik I., Danek M., Marchwińska-Wyrwał E., Danek T., Wistuba M., Krąpiec M., Woskiewicz-Ślęzak B., 2012b, *Czasowe relacje pomiędzy redukcjami przyrostów rocznych sosny zwyczajnej (Pinus sylvestris L.) oraz śmiertelnością niemowląt pod wpływem zanieczyszczeń atmosferycznych – przykład z województwa śląskiego*, Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych, 54, s. 248-260.
- Malik I., Wistuba M., Danek M., Danek T., Krąpiec 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, s. 9-21.
- Mansfield T.A., 2004, *Tlenki azotu: stare problemy i nowe wyzwania*, [w:] J.N.B. Bell, M. Treshow (red.), *Zanieczyszczenie powietrza a życie roślin*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, s. 133-149.
- Mazurski K.R., 2008, *Destruction of forests in the Sudetes – thirty years later*, [w:] *Výroční konference ČGS, Liberec 25-29.08.2008*, s. 30-41, <http://mazurski.eu/>
- McCune D.C., Weinstein L.H., 2004, *Wpływy fluorków*, [w:] J.N.B. Bell, M. Treshow (red.), *Zanieczyszczenie powietrza a życie roślin*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, s. 181-190.
- McLaughlin S.B., Shortle W.C., Smith K.T., 2002, *Dendroecological applications in air pollution and environmental chemistry: research needs*, Dendrochronologia, 20, 1-2, s. 133-157.
- Muzika R.M., Guyette R.P., Zielonka T., Liebhold A.M., 2004, *The influence of O₃, NO₂ and SO₂ on growth of Picea abies and Fagus sylvatica in the Carpathian Mountains*, Environmental Pollution, 130, 1, s. 65-71.
- Nash T.H., Fritts H.C., Stokes M.A., 1975, *A technique for examining nonclimatic variation in widths of annual tree rings with special reference to air pollution*, Tree-Ring Bulletin, 35, s. 15-24.
- Novak K., Cherubini P., Saurer M., Fuhrer J., Skelly J.M., Kräuchi N., Schaub M., 2007, *Ozone air pollution effects on tree-ring growth, δ13C, visible foliar injury and leaf gas exchange in three ozone-sensitive woody plant species*, Tree Physiology, 27, 7, s. 941-949.

- Nöjd P., Reams G.A., 1996, *Growth variation of Scots pine across a pollution gradient on the Kola Peninsula, Russia*, Environmental Pollution, 93, 3, s. 313-325.
- Percy K.E., Ferretti M., 2004, *Air pollution and forest health: toward new monitoring concepts*, Environmental Pollution, 130, 1, s. 113-126.
- Schweingruber F.H., 1996, *Tree Rings and Environment*. Dendroecology, Paul Haupt AG, Bern.
- Schweingruber F.H., Kontic R., Niederer M., Nippel C.A., Winkler-Seifert A., 1985, *Diagnosis and distribution of conifer decay in the Swiss Rhone Valley, a dendrological study*, Eidgenössische Anstalt für das Fortliche Versuchswesen, 270, s. 189-192.
- Smith K.T., 2008, *An organismal view of dendrochronology*, Dendrochronologia, 26, 3, s. 185-193.
- Smith D., Lewis D., 2007, *Dendrochronology*, [w:] S.A. Elias (red.), *Encyclopedia of Quaternary Science*, Elsevier Scientific, Amsterdam, s. 459-465.
- Stöckhardt J.A., 1871, *Untersuchungen über die schadhliche Einwirkung des Hutten- und Steinkohlenrauches auf das Wachstum der Pflanzen, insbesondere der Fichte und Tanne*, Tharandter forstliches Jahrbuch, 21, s. 218-254.
- Stravinskiene V., Bartkevicius E., Plausinyte E., 2013, *Dendrochronological research of Scots pine (Pinus sylvestris L.) radial growth in vicinity of industrial pollution*, Dendrochronologia, 31, s. 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, s. 1020-1030.
- Szychowska-Krąpiec E., 2009, *Monitoring drzewostanów zagrożonych przez emisje przemysłowe*, [w:] A. Zielski, M. Krąpiec (red.), *Dendrochronologia*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, s. 243-250.
- Szychowska-Krąpiec 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, s. 281-299.
- The World's Worst Polluted Places*, 2007, Blacksmith Institute, New York.
- Treshow M., Bell J.N.B., 2004, *Rys historyczny*, [w:] J.N.B. Bell, M. Treshow (red.), *Zanieczyszczenie powietrza a życie roślin*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, s. 7-27.
- Vaičys M., Armolaitis K., 1986, *Gas resistance and regeneration of forests damaged by industrial emission*, [w:] E. Donaubauer (red.), *Forest Plants and Forest Protection. Proceedings of 18th IUFRO World Congress*, Division 2, 1, s. 360-367.
- Warren W. G., 1989, *Tree rings and pollution: trend removal or trend estimation?*, [w:] D.R. Pelz (red.), *Proceedings of the IUFRO Conference on Forest Statistics*, Abteilung für Forstliche Biometrie, Universität Freiburg, s. 304-316.
- Wertz B., 2012, *Dendrochronologiczna ocena wpływu emisji przemysłowych na główne gatunki drzew iglastych z Wyżyny Kieleckiej*, Sylwan, 156, 5, s. 379-390.
- Wimmer R., 2002, *Wood anatomical features in tree-rings as indicators of environmental change*, Dendrochronologia, 20, 1-2, s. 21-36.
- Zielski A., Krąpiec M., 2009, *Dendrochronologia*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.

[Wpłynęło: marzec; poprawiono: czerwiec 2014 r.]

FILIP DUSZYŃSKI

THE RECORD OF AIR POLLUTION IN TREE RINGS

The aim of this review has been to describe the phenomenon of the dendrochronological recording of air pollution. Special emphasis was placed on: (1) summarising relevant studies conducted previously both in Poland and abroad, (2) highlighting the research techniques applied most commonly, and (3) presenting the basic physiological and morphological consequences of the exposure of plants to harmful chemical substances present in the air. Although the problem of growth-ring reductions to industrial emissions has gained frequent investigation (e.g. Danek, 2007; Szychowska-Krąpiec, 2009; Malik *et al.*, 2011, 2012), this paper would seem to represent a first attempt to review the achievements of the method in the Polish literature.

The dendrochronological method is widely regarded as the most precise dating technique in the Earth Sciences (e.g. Gärtner, 2007). As the final width of a single tree-ring reflects both genetics and certain external factors, it is possible to make reference to rings in studying the spatial and temporal differentiation characteristic of various environmental phenomena. Since the 1970s, it has become clear that air pollution episodes may be recorded effectively in tree-ring series. Such chemical substances as sulphur dioxide, oxides of nitrogen, fluorides and ozone are all toxic to plants, inasmuch as that they individually and collectively exert a negative influence on key physiological processes. They are thus responsible for patterns of reduced growth that can be dated with the year-to-year accuracy by means of dendrochronological techniques. Over the last forty years, much work around the world has been devoted to the above problem. Most has focused on study of the impact of harmful gaseous substances emitted from such point sources as smelters (e.g. Sutherland and Martin, 1990; Nojd and Reams, 1996) or fertiliser factories (e.g. Evertsen *et al.*, 1986; Stravinskiene *et al.*, 2013). Beyond that, some works have represented a broader approach researching air pollution impacts on a regional or international scale (e.g. Danek, 2007; Elling *et al.*, 2009). In each case, the results reveal a more or less serious reduction of tree-rings corresponding well with periods of low air quality.

The range of techniques gaining application in the studies described has been wide, though in the main it is the more complex ones that have generated more precise and reliable results. The simplest method is based on visual assessment of a curve showing the width of tree-rings over time. Visible, persisting low values combined with knowledge of the activity of some factory in the vicinity can lead to the drawing of conclusions as regards the causal relationship. Much fieldwork is tailored to the sampling of reference (control) sites, not affected by air pollutants. Data from the study and the reference site are then compared using different statistical methods. Narrower rings formed by trees growing at the study site are taken to confirm the presence of a phenomenon reflecting emissions from local industry. Another method, proposed by Schweingruber *et al.* (1985), is based on the analysis of characteristic years and abrupt growth changes.

Studies based on regression models represent the most advanced group among analytical techniques applied more commonly. In such an approach, the curve representing indexed values for tree-rings is compared with a modelled one that shows the potential width of growth rings formed under the relevant climatic conditions, with no further impacts. Differences are then considered to attest to the role or impact of an additive air-pollution factor.

The reactions of trees affected by the presence of air pollutants should not merely be treated as an interesting biological phenomenon. Rather, the information recorded in tree-ring series ought to be regarded as a source of empirical data on air quality over certain periods of time. In this sense, growth rings offer a very good bioindicator capable of being used widely as human impact on the environment is studied.