

## Accumulation of trace elements in annual tree rings as an indicator of environmental changes

# Akumulacja pierwiastków śladowych w rocznych przyrostach drzew jako wskaźnik zmian środowiskowych



DOI: 10.15199/62.2026.4.3

A review, with 26 refs., discusses dendrochem. trace element anal. in annual tree rings as a valuable tool for reconstructing long-term environmental trends. Considering trace elements in annual tree rings provides information on changes in atm. deposition and soil chem. related to both natural processes and human activities. Changes in trace element concns. in tree rings often correlate with historical changes in the intensity of industrial activity, urbanization, and the introduction of emission control regulations. The recorded chem. signal is modified by biol. factors, such as species-specific mechanisms of element uptake, growth dynamics, and internal redistribution of elements, as well as by local habitat conditions.

**Keywords:** annual tree growth, dendrochemical analysis, trace elements

Przyrosty roczne drzew odzwierciedlają warunki środowiskowe panujące w kolejnych latach wzrostu i mogą stanowić wiarygodny wskaźnik przeszłych zmian środowiskowych. Wbudowywanie pierwiastków w stoje roczne dostarcza informacji o zmianach depozycji atmosferycznej oraz chemizmu gleb, związanych zarówno z procesami naturalnymi, jak i działalnością człowieka. Różnicowanie stężeń pierwiastków śladowych w słojach często koreluje z historycznymi zmianami intensywności działalności przemysłowej, urbanizacji i wprowadzania regulacji ograniczających emisje. Jednocześnie zapis chemiczny jest modyfikowany przez czynniki biologiczne, takie jak gatunkowo uwarunkowane mechanizmy pobierania pierwiastków, dynamika wzrostu oraz wewnętrzna redystrybucja pierwiastków, a także przez lokalne warunki siedliskowe.

**Słowa kluczowe:** przyrosty roczne drzew, analiza dendrochemiczna, pierwiastki śladowe

Przyrosty roczne roślin drzewiastych są szerokim i złożonym źródłem danych. Badanie chemii przyrostów rocznych drzew (dendrochemia) wykorzystane w celu monitorowania zanieczyszczeń metalami może określać czasową dostępność pierwiastków w środowisku, w którym rośnie drzewo<sup>1-4</sup>. Monitoring dendrochronologiczny może być potencjalnie wykorzystywany do rekonstrukcji historii zanieczyszczenia ekosystemu pierwiastkami śladowymi<sup>5-8</sup>. Drzewa są wykorzystywane jako bioindykatory, gdyż na ich procesy fizjologiczne i wzrost wpływają czynniki środowiskowe, w tym zanieczyszczenia z różnych źródeł, imisja, poziom opadów,

a także procesy fizjologiczne roślin<sup>6</sup>). Różnice w stężeniu zanieczyszczeń w próbkach tego samego gatunku z różnych lokalizacji niekoniecznie muszą wskazywać na zmienność narażenia<sup>9,10</sup>). Mogą być one związane ze zmiennością czynników biologicznych (wiek drzewa, czas trwania narażenia, warunki fizjologiczne) lub parametrów środowiskowych (skład gleby, warunki pogodowe, zmiany klimatu). Ważną rolę w określaniu morfologii metali, rozpuszczalności, migracji oraz biodostępności odgrywa pH gleby. Poziomy metali ciężkich wzrastają wraz ze spadkiem pH gleby. Poszczególne gatunki drzew cechuje różny stopień wrażliwości na działanie



Dr Edyta JANEBA-BARTOSZEWICZ (ORCID: 0000-0001-9288-6379) w roku 1996 ukończyła studia na Uniwersytecie im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. W 2002 r. otrzymała stopień doktora nauk chemicznych. Jest adiunktem w Instytucie Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych Politechniki Poznańskiej. Specjalność – fizykochemia gazów i cieczy, chemia żywności, leków i kosmetyków.



Dr hab. Bożena KARBOWSKA (ORCID: 0000-0002-2437-2023) w roku 1998 ukończyła studia na Politechnice Radomskiej im. Kazimierza Pułaskiego. Jest adiunktem na Wydziale Technologii Chemicznej Politechniki Poznańskiej. W 2004 r. uzyskała stopień doktora nauk chemicznych, a w 2019 r. stopień doktora habilitowanego. Specjalność – badania źródeł zanieczyszczenia metalami ciężkimi oraz ich migracji w środowisku, opracowania nowych elektrod modyfikowanych na potrzeby oznaczania śladowych ilości metali w różnych komponentach środowiska.

**\* Adres do korespondencji:**

Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu, Politechnika Poznańska, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, tel.: (61) 665-24-97, e-mail: edyta.janeba-bartoszewicz@put.poznan.pl

zanieczyszczeń powietrza<sup>11,12</sup>). Przyrosty roczne wykształcane przez drzewa w okresie dużego zanieczyszczenia atmosfery z reguły są relatywnie węższe<sup>13</sup>). Rutkiewicz i współpr.<sup>11</sup> wskazali, że redukcje przyrostów rocznych w świerkach pospolitych rosnących na terenie Zakopanego pojawiły się synchronicznie ze wzrostem zawartości pyłów w atmosferze. Baes i McLaughlin<sup>2</sup>, badając zmiany w chemii przyrostów rocznych drzew iglastych, stwierdzili, że zwiększone stężenia niektórych metali w tkankach odpowiadają czasowym wzrostom lokalnego i regionalnego spalania paliw kopalnych. Najwyższe stężenia metali w przyrostach drzew odnotowano w pobliżu elektrowni oraz w miejscach położonych z dala od źródeł punktowych. De Vives i współpr.<sup>14</sup> wykazali przydatność gatunku *Caesalpinia peltophoroides* jako bioindykatora zanieczyszczenia środowiska w celu ustalenia modelu rozkładu czasowego niektórych pierwiastków, takich jak P, K, Ca, Sr i Ba.

Ocenę różnic w stężeniach Cd, Fe i Al za pomocą rocznych pierścieni 180-letniego drzewa leszczyny tureckiej (*Corylus colurna* L.) przedstawiono w pracy Key'a i współpr.<sup>15</sup>). Podczas badania przyrostów rocznych najwyższe wartości stężeń pierwiastków zaobserwowano po stronie zachodniej i północnej, a te różnice między kierunkami (w tym samym okresie) przypisano sąsiedztwu zakładów przemysłowych (hutniczego i stalowego) oraz autostrady. Podobne obserwacje opisali Austriacy i współpr.<sup>16</sup>), którzy wykazali, że czasowa zmienność stężeń As, Cd, Co, Cu, Mo, Sb, Zn, Al, Ca i Mg w przyrostach rocznych topoli może wskazywać na proces rosnącej industrializacji i urbanizacji, podkreślając wpływ sąsiedztwa portu przemysłowego Zatoki Fos na emisje atmosferyczne (przemysłowe, drogowe i miejskie). Budzyńska i współpr.<sup>17</sup>), oznaczając Al, Ba, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Na, Nd, Ni, Pb, Pr, Rb, Sb, Sr, Ti, Tl i Zn w drzewach rosnących w pobliżu najbardziej ruchliwych dróg w Poznaniu, wskazali na ogólny wzrost zawartości oznaczanych pierwiastków od rdzenia do warstwy kambium w topoli czarnej (*Populus nigra* L.), klonie pospolitym (*Acer platanoides* L.) i brzozie brodawkowatej (*Betula pendula* Roth.), co mogło wiązać się ze zwiększeniem zanieczyszczenia środowiska miejskiego w ciągu 30 lat. Do podobnych wniosków doszli Balraju i współpr.<sup>18</sup>), wykorzystując *Magnolia champaca* do rekonstrukcji historii minionego klimatu i wpływu zmian klimatycznych i środowiskowych na czasowy rozkład metali (Zn, Pb, Fe, Cu, Ni, Ca i Mn) w słojach drzew. Wyniki wskazały na rosnące stężenie pierwiastków w powiązaniu ze wzrastającym wiekiem drzew rosnących na terenie składowiska odpadów w Aizawl (Mizoram, Indie).

Sidor i współpr.<sup>19</sup>) zbadali świerk pospolity (*Picea abies* L.) oraz jodłę pospolitą (*Abies alba* L.) z obszaru Tarnița (Rumunia), silnie zanieczyszczonego działalnością górniczą i przetwórstwem metali nieżelaznych. Okres, w którym drzewa iglaste w rejonie Tarnița reagowały odmiennie na stopień szkód spowodowanych zanieczyszczeniem pokrywał się z okresem, w którym działalność górnicza w tym rejonie była prowadzona na bardzo wysokim poziomie. Jodła na tym

obszarze wykazywała silniejszą reakcję na czynniki powodujące zanieczyszczenie środowiska niż świerk, zwłaszcza w przypadku korelacji z miesięcznymi opadami atmosferycznymi, co potwierdza również Mikulenk i współpr.<sup>20</sup>).

Chen i współpr.<sup>21</sup>) wskazali na wysokie korelacje między zawartością metali ciężkich (Fe, Mn, Cu, Zn, Ni, Cr, Cd, Pb, Co i Sr) w słojach drzew gatunku *Pinus massoniana*, rosnących w Chinach, a klimatem, sugerując, że mogą stanowić alternatywny wskaźnik przyrostów drzew w rekonstrukcji klimatu z przeszłości, z ostatnich 168 lat. Badane metale wykazywały kontrastujące wzorce rozmieszczenia. Stwierdzono zwłaszcza silne korelacje między zawartością Cu a temperaturą.

Kvašniak i współpr.<sup>22</sup>) badając przyrosty roczne topoli czarnej (*Populus nigra* L.), lipy szerokolistnej (*Tilia platyphyllos* L.) i dębu szypułkowego (*Quercus robur* L.) na obszarze huty aluminium w regionie Žiar (Słowacja) wskazali na istotny wpływ na grubość warstwy granicznej twarżel-biel. Ponadto zaakcentowali, że migracja z najbardziej zewnętrznego słoja drzewa może powodować włączanie pierwiastków do starszych przyrostów rocznych. Uzyskane wysokie zawartości Pb w przyrostach rocznych drzewa odpowiadały tym z 1944 r. (prawie dekadę przed rozpoczęciem produkcji w oryginalnej hucie aluminium) i mogą być związane z konsekwencją wydarzeń II wojny światowej. Wraz z większym stężeniem ołowiu wykryto również zwiększoną zawartość Al, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni i Ti.

Dotychczasowe doniesienia literaturowe nie przedstawiają spójnego wzorca akumulacji pierwiastków śladowych w przyrostach rocznych roślin drzewiastych w odniesieniu do ich potencjalnego wykorzystania do rekonstrukcji historii zanieczyszczenia ekosystemu. W kilku wcześniejszych pracach wyrażono wątpliwości co do możliwości wykorzystania przyrostów rocznych drzew do badania zmian zanieczyszczenia środowiska w czasie (Bindler i współpr.<sup>23</sup>) oraz Hagemeyer i współpr.<sup>24</sup>).

Arteau i współpr.<sup>1</sup>) odnotowali w słojach drzew *Thuja occidentalis* L. historię zmian w zanieczyszczeniu środowiska Pb w wyniku działalności hutniczej w Kanadzie. Oszacowano jednak opóźnienie wynoszące co najmniej 13 lat między emisjami atmosferycznymi wynikającymi z działalności przemysłowej a czasem, w którym zostały one zarejestrowane przez przyrosty roczne drzew. Badając 20-letnie świerki norweskie rosnące w pobliżu hut Al<sup>10</sup>), wykazano, że zmian środowiskowych nie można przypisać do konkretnego roku, a największe różnice czasowe w stężeniach pierwiastków w słojach drzew mogą być związane z globalnymi zmianami środowiskowymi, w szczególności z erupcjami wulkanów.

Dobrzańska i współpr.<sup>25</sup>) udowodnili długoterminowy wpływ eksploatacji miedzi w Iwinach (dolnośląskie) poprzez oznaczenie pierwiastków śladowych (Cd, Mn, Ni, Zn, Cr, Co, Pb, Cu, Fe, Al, Ag) w rocznych przyrostach drzew dębu szypułkowego (*Quercus robur* L.). Zaobserwowano, że wysokie poziomy metali nie odpowiadały jednak znanemu czasowi wprowadzania zanieczyszczeń (działalność górnicza, wyciek

odpadów), a szczytowe wartości Zn i Fe odnotowano dopiero po zamknięciu kopalni. Badając stężenie ołowiu w pierścieniach drzew klonu cukrowego (*Acer saccharum* L.) w lasach strefy umiarkowanej wschodniej Kanady, wykazano duże zróżnicowanie stężeń ołowiu w pierścieniach drzew, czasami oderwanych od poziomu zanieczyszczenia, a także różnice w zdolności pierścieni drzew do rejestrowania poziomów zanieczyszczenia.

Sensuła i Fagel<sup>6)</sup>, badając skład pierwiastkowy (Na, Mg, Fe, Ni, Cu, Zn i Pb) sosen rosnących na zanieczyszczonym obszarze w sąsiedztwie huty stali oraz drzew rosnących z dala od przemysłu, doszli do wniosku, że w rocznych przyrostach roślin drzewiastych nie ma bezpośredniej liniowej zależności między ładunkiem opadów a stężeniem badanych pierwiastków. Nechita i współpr.<sup>26)</sup>, badając przyrosty roczne drzew *Quercus robur* (dąb szypułkowy), odkryli, że zawartość Mn, Cu, Cd, Pb, Zn i Ni może korelować z warunkami suszy wywołanej klimatem.

Padilla i Anderson<sup>3)</sup> poddali analizie przyrosty roczne drzew ponad 350-letniej sosny żółtej (*Pinus ponderosa*) pod kątem oznaczenia stężeń Cr, Cu, Zn, As, Sr, Cd, Ba, Pb w odniesieniu do lokalnych i globalnych wydarzeń historycznych w USA. Badane pierwiastki nie wykazywały tych samych wzorców stężenia w czasie. Cu i Cr wykazywały cykliczne wzorce stężenia na przestrzeni ostatnich ponad 350 lat, które wydają się być związane z lokalnymi wydarzeniami. Natomiast Sr, Cd, Ba, Zn były stosunkowo stałe od połowy XVII w. do początku XIX w., wzrosły na początku XIX w. przez ok. 50 lat, a następnie spadły do 2000 r.

Szerokość przyrostów rocznych drzew może być pomocna do ujawnienia dodatkowych informacji związanych z czynnikami środowiskowymi, takimi jak konkurencja międzyosobnicza i genetyka. Wydaje się, że należy wziąć pod uwagę inne aspekty przy interpretacji śladu środowiskowego, takie jak migracja pierwiastków w obrębie profilu glebowego oraz w obrębie drzew. Ważne jest również uwzględnienie biogeochemicznego źródła dostępności składników mineralnych w celu zarejestrowania przeszłych warunków środowiskowych i klimatycznych.

## Podsumowanie

Przyrosty roczne roślin drzewiastych stanowią cenne archiwum informacji o warunkach środowiskowych panujących w czasie wzrostu drzewa. Analiza akumulacji pierwiastków śladowych w słojach rocznych umożliwia odtworzenie historii zmian środowiskowych, zarówno naturalnych, jak i wynikających z działalności człowieka. Skład chemiczny słoików odzwierciedla dostępność pierwiastków w glebie, wodzie i atmosferze, a także wpływ czynników, takich jak zanieczyszczenie przemysłowe, transport drogowy i zmiany

użytkowania terenu. Badania dendrochemiczne pokazują, że stężenia wybranych pierwiastków śladowych (np. Pb, Cd, Zn, Cu) mogą wykazywać wyraźne zmiany w czasie, korelujące z okresami intensyfikacji lub ograniczenia emisji antropogenicznych. Jednocześnie na proces akumulacji wpływają cechy biologiczne drzewa, warunki siedliskowe oraz mobilność pierwiastków w tkankach, co wymaga ostrożnej interpretacji wyników. Podsumowując, przyrosty roczne drzew są użytecznym narzędziem w badaniach nad śladem środowiskowym, pozwalającym na długoterminową ocenę jakości środowiska. Analiza akumulacji pierwiastków śladowych w słojach drzew uzupełnia inne metody monitoringu i dostarcza unikatowych informacji o przeszłych zmianach środowiskowych, podkreślając znaczenie drzew jako naturalnych rejestratorów historii środowiska.

Źródło finansowania: 0414/SBAD/2025, 0911/SBAD/2504.

Otrzymano: 11-03-2026

Zrecenzowano: 30-03-2026

Zaakceptowano: 31-03-2026

Opublikowano: 27-04-2026

## LITERATURA

- [1] J. Arteau, E. Boucher, A. Poirier, D. Widory, *Sci. Total Environ.* 2020, **740**, 139992.
- [2] C.F. Baes, S.B. McLaughlin, *Science* 1984, **224**, nr 4648, 494.
- [3] K.L. Padilla, K.A. Anderson, *Chemosphere* 2002, **49**, nr 6, 575.
- [4] A. Doucet, M.M. Savard, C. Bégin, J. Marion, A. Smirnov, T.B.M.J. Ouarda, *Tellus B: Chem. Phys. Meteorol.* 2012, **64**, nr 1, 19005.
- [5] R. Shetti, K. Boonen, M. Smiljanić, V. Tejneký, O. Drábek, J. Lehejček, *Environ. Pollut.* 2024, **350**, 124012.
- [6] B. Sensuła, N. Fagel, *Forests* 2023, **14**, nr 5, 964.
- [7] T. Navrátil, T. Nováková, J.B. Shanley, J. Rohovec, Š.M. Vaňková, S.A. Norton, *Environ. Sci. Technol.* 2018, **52**, nr 19, 2060.
- [8] G. Wright, C. Woodward, L. Peri, P.J. Weisberg, M.S. Gustin, *Biogeochemistry* 2014, **120**, nr 1, 149.
- [9] G. O'Sullivan, K. Hayes, Ursino, A. E. Hart, *J. Environ. Expo. Assess.* 2023, **2**, 313.
- [10] H.A.A. Alaoui, C.O. Genc, B. Aricak, N. Kuzmina, S. Menshikov, M. Cetin, *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2020, **27**, nr 16, 20273.
- [11] P. Rutkiewicz, I. Malik, M. Wistuba, *Stud. Mater. CEPL Rogowie* 2016, **18**, nr 48/3, 194.
- [12] G. Gawrońska, *Rocz. Ochr. Środ.* 2000, **2**, 195.
- [13] T. Borecki, *Prace Inst. Bad. Leśn.* 1993, **18**, 7.
- [14] A. de Vives, S. Moreira, S. Brienza, J. Medeiros, M. Filho, O. Araújo, Z. Virgilio, F. Filho, *Spectrochim. Acta Part B: Atom. Spectr.* 2006, **61**, 1170.
- [15] K. Key, Ş. Kulaç, İ. Koç, H. Sevik, *Water Air Soil Pollut.* 2022, **233**, 61.
- [16] A. Austruy, L. Yung, J.P. Ambrosi, O. Girardclos, C. Keller, B. Angeletti, J. Dron, P. Chamaret, M. Chalot, *Chemosphere* 2019, **220**, 116.
- [17] S. Budzyńska, A. Budka, E. Roszyk, P. Niedzielski, M. Mleczyk, *Ecol. Indicat.* 2023, **149**, 110198.
- [18] W. Balraju, K.K. Upadhyay, S.K. Tripathi, *Water Air Soil Pollut.* 2023, **234**, 726.
- [19] C.G. Sidor, C. Cuciurean, R. Vlad, I. Popa, *Bucovina Forestieră* 2022, **22**, 129.
- [20] P. Mikulenkova, A. Prokúpková, Z. Vacek, S. Vacek, D. Bulušek, J. Simon, V. Hájek, *Centr. Eur. Forest. J.* 2020, **66**, 23.
- [21] S. Chen, Y. Qichao, Q. Ch. Xiuling, J. Liu, Ch. Deliang, J. Ou, J. Liu, Z. Dong, Z. Zheng, K. Fang, *Elementa: Sci. Anthropol.* 2021, **9**, 75.
- [22] J. Kvašniak, M. Ješkovský, J. Kaizer, J. Zeman, I. Kontul, K. Sucka, P.P. Povinec, *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2024, **333**, 3335.
- [23] R. Bindler, I. Renberg, J. Klaminder, O. Emteryd, *Sci. Total Environ.* 2024, **319**, 173.
- [24] J. Hagemeyer, B. Markert, K. Friese, *Environ. Pollut.* 2024, **350**, 124012.
- [25] J. Dobrzańska, P. Lochyński, R. Kalbarczyk, M. Ziemiańska, *Forests* 2021, **12**, 1505.
- [26] C. Nechita, A.M. Iordache, K. Lemr, T. Levanić, T. Pluhacek, *J. Clean. Prod.* 2021, **317**, 128428.