Zeszyty Naukowe
Wyższej Szkoły Bankowej we Wrocławiu
Nr 7(45)/2014

Agnieszka Bukietyńska, Mariusz Czekała
Wyższa Szkoła Bankowa we Wrocławiu

Filip Duszyński
Uniwersytet Wrocławski

Zastosowanie metod statystycznych w badaniu dendrochronologicznego zapisu zmian jakości powietrza

Streszczenie. W artykule zastosowano metody głównych składowych. Były dwa cele. Po pierwsze, autorzy chcieli zaproponować tzw. bioindykator, po drugie, zbadali zależność między emisją zanieczyszczeń a przyrostem radialnym drzew.

Słowa kluczowe: zanieczyszczenie powietrza, dendrochronologia, słoje drzew, bioindykator, przyrost radialny, emisja

Wstęp

Celem artykułu jest znalezienie związków między emisją zanieczyszczeń a średnią przyrostów rocznych słojów drzew. Bardzo bogata literatura z zakresu dendrochronologii wskazuje w sposób głównie opisowy na istnienie takich związków. W niniejszym opracowaniu autorzy podjęli wstępną próbę analizy zależności kształtowania się przyrostów rocznych drzew wzrastających na wschodnich stokach góry Chełmiec (Góry Wałbrzyskie) od zanieczyszczeń powietrza emitowanych w Wałbrzychu w latach największej prosperity II sektora gospodarki. Problem skażenia atmosfery w Wałbrzychu na skutek ekspansywnej działalności zakładów elektrociepłowniczych i koksowniczych, opierających swoją działalność na wydobywanym na miejscu silnie zasiarczonym węglu, był szczególnie

doniosły i stanowił przedmiot wielu opracowań[1]. Autorzy ci wskazywali wprawdzie na szkody wyrządzone przyrodzie żywej, dotychczas brakowało jednak pracy, która w całości poświęcona byłaby ilościowemu ujęciu tego problemu. Nowe perspektywy w tym zakresie otwierają zaawansowane analizy statystyczne, tak rzadko stosowane w publikacjach z zakresu dendrochronologicznego zapisu zmian jakości powietrza przedstawianych przez polskich autorów. W studiach zagranicznych[2], metody statystyczne są coraz częściej stosowane. Pomimo faktu, że naczelnym narzędziem jest analiza prostej regresji liniowej, autorzy uzyskują bardzo ciekawe, przekonujące i, co najważniejsze, obiektywne wyniki swoich badań. W tej pracy podjęte zostały wysiłki, aby: (i) określić, w jakim stopniu szerokość słojów przyrostów rocznych w latach największej emisji zanieczyszczeń w Wałbrzychu jest wyjaśniana przez zanieczyszczenia powietrza; (ii) stwierdzić, który z emitowanych w mieście związków chemicznych w największym stopniu warunkował widoczną redukcję przyrostów radialnych; (iii) wskazać, jak cennym narzędziem w badaniach dendrochronologicznych może być analiza głównych składowych, obok analizy regresji. W badaniach analizowano wpływ czterech związków chemicznych: dwutlenku siarki, dwutlenku azotu, tlenku węgla oraz grupy związków określonych jako „inne". Przyczyną dobrania tych substancji był fakt, że to właśnie one były emitowane w Wałbrzychu w latach 1975-2000 w największych ilościach[3]. Co więcej, z licznych opracowań wynika, że dwutlenek siarki i dwutlenek azotu w sposób szczególnie negatywny oddziałują na rośliny[4]. Bardzo ważny jest również cel ekonomiczny. Dane o przyrostach rocznych są obiektywne i dla dendrologów stosunkowo łatwe do zmierzenia. Poszukując bioindykatora, można się nimi posłużyć zamiast często obarczonych błędem danymi o emisji zanieczyszczeń. Badania przeprowadzone w tym artykule wskazują na taką możliwość, choć pełny z punktu widzenia dendrochronologów model powinien zawierać również dane klimatyczne, co zostało tu pominięte.

---

[1] E. Jońca, *Geograficzno-przyrodnicze warunki rozwoju i zagadnienie ochrony środowiska miasta Wałbrzycha*, „Przegląd Geograficzny" 1985, nr 57 (1-2), s. 73-94.

[2] J. Wójcik, *Przemiany wybranych komponentów środowiska przyrodniczego rejonu wałbrzyskiego w latach 1975-2000, w warunkach antropopresji, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu przemysłu*, „Rozprawy Naukowe Instytutu Geografii i Rozwoju Regionalnego" 21, Uniwersytet Wrocławski, Wrocław 2011.

P. Jadczyk, *Przyczyny zniszczenia zachodniosudeckich lasów. Pielgrzymy, Informator Krajoznawczy*, SKPS, Wrocław 1999, s. 75-89.

[3] A. Zielski, M. Krąpiec, *Dendrochronologia*, WN PWN, Warszawa 2009.

[4] D. Smith, D. Lewis, *Dendrochronology*, „Encyclopedia of Quaternary Sciences" 2007, nr 2, s. 459-465.

1. Metoda dendrochronologiczna i jej zastosowania – wprowadzenie teoretyczne

Dendrochronologia to nauka zajmująca się datowaniem słojów przyrostów rocznych. Wykorzystuje ona unikalną właściwość roślin drzewiastych, takich jak drzewa czy krzewinki, do produkcji dokładnie jednego przyrostu radialnego w danym roku. Granice pomiędzy poszczególnymi słojami przyrostów rocznych drzew wzrastających w strefie klimatów cechujących się sezonowością mogą być z łatwością zidentyfikowane, z uwagi na anatomiczne zróżnicowanie komórek produkowanych w ciągu roku. Aktywność podziałów komórek kambium waskularnego objawia się w okresie wiosna-lato, a więc w trakcie tzw. sezonu wegetacyjnego. Drewno produkowane w pierwszych tygodniach roku cechują jednak inne charakterystyki aniżeli drewno wytwarzane latem czy wczesną jesienią. Drewno wczesne (wiosenne) zbudowane jest z dużych, cienkościennych komórek – cewek w przypadku drzew iglastych oraz naczyń w przypadku drzew liściastych. Taka ich budowa związana jest ze spełnianą w tym czasie funkcją, ich zadaniem jest bowiem przewodzenie substancji pokarmowych[5]. Nadrzędną rolą drewna późnego (letniego) jest natomiast wzmacnianie i ochrona drzewa przed uszkodzeniami, w związku z czym komórki są znacznie mniejsze i mają grube ściany komórkowe. Tak znaczne różnice pomiędzy oboma rodzajami drewna sprawiają, że pomiędzy poszczególnymi przyrostami rocznymi rysuje się szczególnie wyraźna granica, w przypadku drzew iglastych doskonale widoczna także na poziomie makroskopowym (drewno wczesne jest jasne, późne natomiast ciemne). W efekcie znając rok, w którym wyprodukowany został ostatni, najbardziej zewnętrzny przyrost roczny, jesteśmy w stanie precyzyjnie przypisać lata kalendarzowe także tym wcześniejszym. Trzeba w tym miejscu podkreślić, że na przestrzeni życia każdego drzewa zdarzają się sporadycznie sytuacje, gdy w ciągu roku, z różnych powodów, produkowany jest jeszcze jeden, dodatkowy przyrost (nazywany fałszywym) lub nie zostaje w ogóle wyprodukowany (tzw. brakujący przyrost). Zjawisko to nie jest jednak kluczowe dla niniejszej pracy i nie zmienia faktu, że metoda dendrochronologiczna jest powszechnie postrzegana jako najdokładniejsza technika datowania stosowana w naukach o Ziemi[6]. Powszechne zastosowanie metody dendrochronologicznej w badaniach z zakresu szeroko rozumianej ekologii wynika z tego, że drzewa w swoich sekwencjach przyrostów

[5] I. Malik, *Dendrochronologiczny zapis współczesnych procesów rzeźbotwórczych kształtujących stoki i doliny rzeczne wybranych stref krajobrazowych Europy Środkowej*, Wyd. Uniwersytetu Śląskiego, Katowice 2008.

[6] H. Gärtner, *Glacial landforms, tree rings: dendrogeomorphology*, „Encyclopedia of Quaternary Sciences" 2007, nr 2, s. 979-988.

rocznych niosą informację o stanie i zmianach w środowisku przyrodniczym[7]. Na przestrzeni lat setkami prac udowodniono, że na ostateczną szerokość przyrostu rocznego wpływ ma nie tylko ekspresja cech genetycznych danego drzewa, ale również, a może przede wszystkim, szereg czynników zewnętrznych[8]. Z tego też względu Eckstein[9] za Stravinskiene [10] i in., określił słoje przyrostów radialnych jako „repozytoria informacji o zjawiskach zachodzących w środowisku". Generalnie rzecz biorąc, szerokie słoje przyrostów radialnych identyfikujemy w latach korzystnych dla wzrostu drzewa, wąskie natomiast są charakterystyczne dla lat niesprzyjających. Choć Zielski i Krąpiec[11] słusznie wskazują, że szerokość słoja jest w głównej mierze wynikiem warunków pogodowych panujących w danym roku, nie można zapomnieć o innych składowych. Wśród czynników egzogenicznych warunkujących szerokość przyrostu rocznego Hirano i Morimoto[12] umieszczają takie uwarunkowania, jak klimat, typ gleb, lokalną topografię, katastrofy naturalne, ataki insektów, konkurencję międzyosobniczą, stosowanie nawozów i pestycydów, prowadzenie gospodarki leśnej związanej z wyrębem drzew czy, będące przedmiotem niniejszej pracy, oddziaływanie zanieczyszczeń powietrza. W literaturze bardzo silnie eksploruje się także dendrochronologiczny zapis zdarzeń geomorfologicznych, a subdyscyplina zajmująca się tym tematem otrzymała nawet osobną nazwę – dendrogeomorfologia[13] .

2. Wykorzystanie metody dendrochronologicznej w badaniach zmian jakości powietrza

Zaprezentowany krótki przegląd zjawisk, które znajdują swoje odwzorowanie w słojach przyrostów rocznych, miał posłużyć ukazaniu szczególnej roli drzew w badaniach środowiska przyrodniczego. W świetle przedstawionych informacji

[7] Ibidem.

[8] D. Smith, D. Lewis, *Dendrochronology*, „Encyclopedia of Quaternary Sciences" 2007, nr 2, s. 459-465; A. Zielski, M. Krąpiec, op. cit.

[9] D. Eckstein, *Quantitative assessment of past environmental changes*, w: *Methods of Dendrochronology. Application in the Environmental Sciences*, red. E.R. Cook, L.A. Kairiukstis, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 1990, s. 220-223.

[10] V. Stravinskiene, E. Bartkevicius, E. Plausinyte, *Dendrochronological research of Scots pine* (*Pinus sylvestris L.*) *radial growth in vicinity of industrial pollution*, „Dendrochronologia" 2013, nr 31, s. 179-186.

[11] A. Zielski, M. Krąpiec, op. cit.

[12] T. Hirano, K. Morimoto, *Growth reduction of the Japanese black pine corresponding to an air pollution episode*, „Environmental Pollution" 1999, nr 106, s. 5-12.

[13] J. Alestalo, *Dendrochronological interpretation of geomorphic processes*, „Fennia" 1971, nr 105.

oczywiste staje się, że dane, które ze sobą niosą, mogą mieć wybitną wartość aplikacyjną. Jednym z najbardziej jaskrawych przykładów możliwości stosowania przyrostów rocznych dla celów praktycznych jest ich wykorzystanie w analizach zmian jakości powietrza na danym terenie. Dowiedziono, że znaczne stężenie w powietrzu pewnych substancji chemicznych, takich jak dwutlenek siarki, tlenki azotu, a także wiele innych, negatywnie oddziałuje na drzewa[14]. Fizjologiczny mechanizm oddziaływania poszczególnych związków chemicznych jest niezwykle skomplikowany, a jego badanie stanowi wyzwanie przede wszystkim dla biologów i biochemików, w mniejszym stopniu dla dendrochronologów. Na potrzeby tej pracy tylko warto odnotować, że negatywnych skutków ekspozycji na zanieczyszczenia powietrza upatruje się na przykład w postaci zaburzeń kluczowego dla roślin procesu fotosyntezy[15]. Jadczyk wspomina także o problemach z procesem transpiracji. Na wyższym poziomie organizacji biologicznej ujawniają się patologiczne zmiany w morfologii igieł, liści oraz wosków epikutikularnych[16]. Stravinskiene i in.[17] zwracają ponadto uwagę, że odkładające się w glebie pochodne dwutlenku siarki mogą powodować zaburzenie prawidłowego wzrostu korzeni. Destrukcja włośników korzeni powoduje z kolei znaczne utrudnienia w możliwościach poboru wody i substancji odżywczych. Wszystkie przedstawione zjawiska prowadzą w prostej linii do spowolnienia bądź nawet całkowitego zahamowania wzrostu roślin. Ekspresją tego są silnie zredukowane bądź brakujące przyrosty roczne. Analizując przedstawione na wykresie sekwencje przyrostów rocznych poszczególnych osobników, możemy więc wnosić o sile i czasie oddziaływania danego czynnika zanieczyszczającego[18]. Sprawia to, że przyrosty roczne możemy uznawać za dobry bioindykator, co w swoich pracach podkreślali m.in. Nöjd i Reams[19], Smith[20] czy Stravinskiene i in.[21] Nöjd i Reams[22] zwrócili uwagę, że do korzyści płynących z ich stosowania zalicza się przede wszystkim obiektywność technik pomiarowych oraz możliwość zbadania zjawiska w bardzo długim interwale czasowym. Autorzy ci stwierdzili ponadto, że analiza przyrostów rocznych umożliwia komparatywną analizę danych ekonomicznych i biologicznych,

---

[14] A. Bytnerowicz, *Physiological Aspects of Air Pollution Stress in Forests*, „Phyton" (Horn) 1996, nr 36, s. 15-22.

[15] E.K. Sutherland, B. Martin, *Growth response of Pseudotsuga menziesii to air pollution from copper smelting*, „Canadian Journal of Forest Research" 1990, nr 20 (7), s. 1020-1030.

[16] P. Jadczyk, *Przyczyny zniszczenia zachodniosudeckich lasów*, Pielgrzymy, Informator Krajoznawczy, SKPS, Wrocław 1999, s. 75-89.

[17] V. Stravinskiene, E. Bartkevicius, E. Plausinyte, op. cit.

[18] A. Zielski, M. Krąpiec, op. cit.

[19] P. Nöjd, G.A. Reams, *Growth variation of Scots pine across a pollution gradient on the Kola Peninsula*, „Russia. Environmental Pollution" 1996, nr 93 (3), s. 313-325.

[20] D. Smith, D. Lewis, op. cit.

[21] V. Stravinskiene, E. Bartkevicius, E. Plausinyte, op. cit.

[22] P. Nöjd, G.A. Reams, op. cit.

co w dalszej kolejności, w przypadku szczególnie negatywnego obrazu rzeczywistości, może być przyczynkiem do prowadzenia bieżących, bardziej precyzyjnych pomiarów kontrolnych. W ostatnich studiach Malik[23] i in. udowodnili, że przyrosty roczne mogą spełniać nie tylko funkcję wskaźnikową, ale nawet predykcyjną – wyniki ich badań wskazują bowiem, że redukcja przyrostów rocznych wyprzedza o kilka lat wzrost śmiertelności niemowląt oraz zachorowalności na raka. W świetle przedstawionych informacji nie zaskakuje fakt, że badaniu dendrochronologicznego zapisu zmian jakości powietrza poświęcono na całym świecie wiele doskonałych prac, wśród których wymienić należy m.in. studia Ashby'ego i Frittsa[24] , Nasha i in.[25], Sutherlanda i Martina[26], Hirano i Morimoto[27], Juknysa i in.[28] , Danek[29] czy Malika i in.[30]

3. Prezentacja danych

Na potrzeby niniejszego opracowania pobrano próby dendrochronologiczne z trzech stanowisk badawczych. Dwa z nich ulokowano w obrębie wzniesień Chełmca (stanowisko DCH) i Ptasiej Kopy (stanowisko DPK), znajdujących się w bezpośrednim pobliżu dawniej uprzemysłowionej południowej i południowo-zachodniej części Wałbrzycha. Drzewostany tam wzrastające przez kilkadziesiąt lat były narażone na działanie silnie zanieczyszczonych mas powietrza, emitowanych w pobliskich koksowniach i elektrociepłowniach. Trzeci poligon badawczy spełniał funkcję stanowiska referencyjnego – został założony na północnych

[23] I. Malik, op. cit.

[24] W. C. Ashby, H. C. Fritts, *Tree growth, air pollution, and climate near LaPorte*, „Ind. Bulletin American Meteorological Society" 1972, nr 53 (3), s. 246-251.

[25] T. H. Nash, H. C. Fritts, M. A. Stokes, *A technique for examining nonclimatic variation in widths of annual tree rings with special reference to air pollution*, „Tree-Ring Bulletin" 1975, nr 35, s. 15-24.

[26] E. K. Sutherland, B. Martin, op. cit.

[27] T. Hirano, K. Morimoto, op. cit.

[28] R. Juknys, V. Stravinskiene, J. Vencloviene, *Tree-ring analysis for the assessment of anthropogenic changes and trends*, „Environmental Monitoring and Assessment" 2002, nr 77, s. 81-97.

[29] M. Danek, *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" 2007, nr 185, s. 265-277.

[30] I. Malik, M. Danek, E. Marchwińska-Wyrwał, T. Danek, M. Wistuba, M. Krąpiec, *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 Pullution" 2012, nr 223, s. 3345-3364.

stokach góry Kościelec (Góry Kamienne) i był oddalony od przemysłowego centrum Wałbrzycha o ok. 11 km. Znaczna odległość od miasta, a także odizolowanie barierą orograficzną Rybnickiego Grzbietu pozwoliły z dużą dozą prawdopodobieństwa założyć, że stanowisko to nie zostało obciążone wpływem zanieczyszczeń emitowanych w Wałbrzychu. Jako takie stanowiło dobre odniesienie dla wyników uzyskanych dla stanowisk DCH i DPK.

Na wytypowanych stanowiskach badawczych pobrano próby ze świerka pospolitego (*Picea abies* L.) przy użyciu świdra Presslera. Odwierty pobrano ze standardowo przyjętej w dendrochronologii wysokości pierśnicy (1,3 m). Każdy osobnik opróbowany został wzdłuż pojedynczego promienia skierowanego równolegle do stoku (aby móc weliminować potencjalny sygnał geomorfologiczny, manifestujący się w postaci drewna reakcyjnego lub dekoncentryczności przyrostów rocznych). Odwierty pobrano z drzew będących reprezentatywnymi dla całej populacji, tj. takich, które rosły w podobnych warunkach siedliskowych.

W ramach prowadzonych prac pobrano 42 odwierty dendrochronologiczne – 16 ze stanowiska Ptasia Kopa, 15 ze stanowiska Chełmiec oraz 11 ze stanowiska referencyjnego. Z uwagi na fakt, że część prób nie nadawała się do badań z powodu silnie uszkodzonego drewna, dalszym analizom poddano 13 prób w przypadku stanowiska Ptasia Kopa, 11 prób ze stanowiska Chełmiec oraz 9 prób ze stanowiska referencyjnego.

Odwierty wklejono do drewnianych podstawek o szerokości rowka 5 mm. Aby jak najlepiej uwidocznić strukturę słojów przyrostów rocznych, próby zeszlifowano przy użyciu papieru ściernego o coraz mniejszej granulacji. Po weryfikacji poprawności datowania dane zostały wykorzystane do dalszych analiz statystycznych.

W tabeli 1 zaprezentowano dane dotyczące przyrostów rocznych drzew i emisji zanieczyszczeń. W badanym okresie obserwujemy tendencję spadkową emisji zanieczyszczeń oraz tendencję wzrostową wyżej wymienionych przyrostów.

Dane te prezentujemy na rysunku 1. Wykres ten sugeruje, zgodnie z oczekiwaniami, ujemną korelację między emisją zanieczyszczeń a rocznym przyrostem radialnym. Z drugiej strony poszczególne rodzaje zanieczyszczeń wydają się dodatnio skorelowane.

Ze względu na przypuszczalnie silną współliniowość może być trudne zbudowanie przyczynowo-skutkowego modelu regresji liniowej. Próbę taką podjęliśmy mimo mało zachęcających – jak wykażemy niżej – wyników.

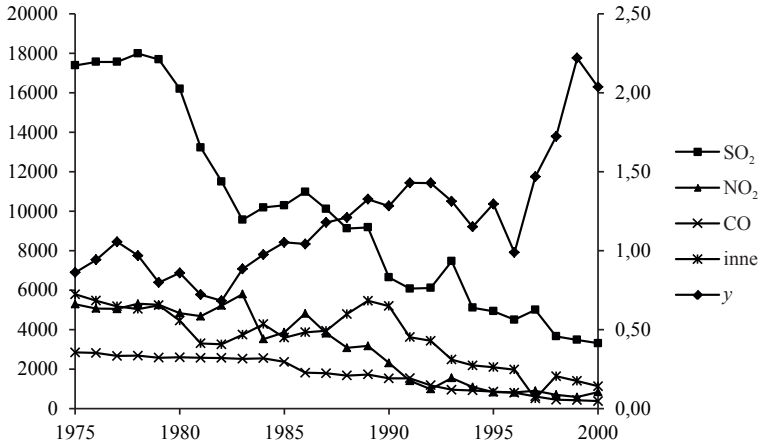
Tabela 1. Dane o przyrostach rocznych drzew (w mm) i emisji zanieczyszczeń (w tonach) emitowanych w Wałbrzychu w latach 1975-2000

Lata	*y*	SO_2	NO_2	CO	Inne	Całkowita emisja w t
1975	0,86	17 384,8	5285,5	2840,8	5786,8	31 297,9
1976	0,94	17 562,8	5070,5	2813,8	5467,8	30 914,9
1977	1,06	17 562,8	5049,5	2666,8	5175,8	30 454,9
1978	0,97	17 984,8	5309,5	2675,8	5039,8	31 009,9
1979	0,80	17 681,8	5252,5	2573,2	5232,8	30 740,3
1980	0,86	16 199,5	4835,2	2593,2	4454,2	28 082,1
1981	0,72	13 221,5	4677,2	2568,8	3300,6	23 768,1
1982	0,68	11 501,5	5218,2	2559,8	3254,6	22 534,1
1983	0,88	9 559,5	5796,2	2519,8	3738,6	21 614,1
1984	0,98	10 182,5	3524,2	2546,8	4271,6	20 525,1
1985	1,05	10 295,8	3862,6	2362,1	3591	20 111,5
1986	1,04	10 981,8	4815,6	1814,1	3864	21 475,5
1987	1,18	10 106,8	3814,6	1785,1	3938	19 644,5
1988	1,21	9 125,8	3073,6	1673,1	4789	18 661,5
1989	1,33	9 176,8	3174,6	1729,1	5462	19 542,5
1990	1,28	6 640,9	2307,5	1526,7	5190,3	15 665,4
1991	1,43	6 074,2	1406,4	1535,2	3613,3	12 629,1
1992	1,43	6 107,7	988,5	1181,1	3431,8	11 709,1
1993	1,31	7 466,2	1545,5	951,5	2481,1	12 444,3
1994	1,15	5 109,4	1087,4	920,8	2188	9 305,6
1995	1,30	4 932,2	826,4	857,2	2093,5	8 709,3
1996	0,99	4 497,8	815,7	798,5	1971,5	8 083,5
1997	1,47	5 003,2	898,1	615,9	507	7 024,2
1998	1,72	3 661,1	700,9	448,4	1637	6 447,4
1999	2,22	3 478,6	580,2	426	1395,1	5 879,9
2000	2,04	3 310,5	834,8	378,5	1132,1	5 655,9

zmienna *y* – przyrost słojów

Ź r ó d ł o: wyniki doświadczalne oraz dane zawarte w pracy J. Wójcik, *Przemiany wybranych komponentów środowiska przyrodniczego rejonu wałbrzyskiego w latach 1975-2000, w warunkach antropopresji, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu przemysłu*, „Rozprawy Naukowe Instytutu Geografii i Rozwoju Regionalnego" 21, Uniwersytet Wrocławski, Wrocław 2011.

Rysunek 1 zawiera szeregi czasowe danych o emisji. Skala na lewej stronie osi poziomej odpowiada wielkości emisji w tonach, a jednostka po prawej stronie – rocznym przyrostom w mm.



Rys. 1

Ź r ó d ł o: opracowanie własne na podstawie danych z tabeli 1. Lewa oś dotyczy emisji zanieczyszczeń w tonach, oś prawa to roczny przyrost (zmienna *y*) w mm.

4. Regresja liniowa – zależność przyrostu radialnego od czterech rodzajów zanieczyszczeń

Punktem wyjścia do dalszej analizy jest macierz korelacyjna między zmiennymi występującymi w modelu. Ma ona postać przedstawioną w tabeli 2.

Tabela 2. Współczynniki korelacji między analizowanymi zmiennymi

	y	SO_2	NO_2	CO	Inne
y	1,0000				
SO_2	–0,7162	1,0000			
NO_2	–0,7722	0,8966	1,0000		
CO	–0,8168	0,9072	0,9438	1,0000	
Inne	–0,5897	0,7842	0,7442	0,8111	1,0000

Ź r ó d ł o: obliczenia własne na podstawie tabeli 1.

Jeżeli założymy 5% poziom istotności, to otrzymamy wartość krytyczną – w teście istotności *t* Studenta współczynnika korelacji, przy 24 stopniach swobody – 2,064. Oznacza to, że krytyczna wartość współczynnika korelacji[31] wynosi około 0,15. Dlatego też wszystkie występujące w modelu zmienne są istotnie skorelowane. Bardzo silne korelacje między zmiennymi opisującymi zanieczyszczenia sugerują jed-

[31] H. Theil, *Zasady ekonometrii*, PWN, Warszawa 1978.

nak silną współliniowość między zmiennymi objaśniającymi. Potwierdzają to wyniki otrzymane po zastosowaniu metody najmniejszych kwadratów do analizowanego modelu. Chodzi o model regresji wielorakiej, uzależniającej przyrost radialny (wyrażony w mm) od czterech rodzajów zanieczyszczeń (wyrażonych w tonach). Jest to model klasycznej regresji liniowej z czterema zmiennymi objaśniającymi.

Tabela 3. Wyniki analizy regresji dla modelu z czterema zmiennymi objaśniającymi

Statystyki regresji	
Wielokrotność R	0,827037585
R-kwadrat	0,683991167
Dopasowany R-kwadrat	0,623799008
Błąd standardowy	0,229585326

	Współczynniki	Błąd standardowy	t Stat	Wartość *p*
Przecięcie	1,751418751	0,123390832	14,19407527	3,11E–12
SO_2	6,48485E–06	2,35012E–05	0,275936428	0,785294
NO_2	–8,70899E–07	7,76059E–05	–0,011222078	0,991152
CO	–0,000459668	0,000193656	–2,373628408	0,027232
Inne	4,96518E–05	5,38617E–05	0,92183946	0,367082

Ź r ó d ł o: obliczenia własne w arkuszu Excel.

Jak wynika z tabeli 3, jedynie zmienna CO jest istotna statystycznie (przy poziomie istotności nie niższym niż 0,027232). Model jednej zmiennej ze zmienną CO prowadzi do oszacowań zamieszczonych w tabeli 4.

Tabela 4. Wyniki analizy regresji dla modelu z jedną zmienną

Statystyki regresji	
Wielokrotność R	0,816844602
R-kwadrat	0,667235103
Dopasowany R-kwadrat	0,653369899
Błąd standardowy	0,220377522

	Współczynniki	Błąd standardowy	t Stat	Wartość *p*
Przecięcie	1,809560439	0,099491641	18,18807	1,52744E–15
CO	–0,000356313	5,13636E–05	–6,93707	3,57134E–07

Ź r ó d ł o: obliczenia własne w arkuszu Excel.

Powyższy model jednej zmiennej (do przyjęcia z punktu widzenia analizy regresji) jest jednak sprzeczny z wynikami badań dendrochronologów i przez ekonomistów może być traktowany co najwyżej jako model symptomatyczny, a nie przyczynowo-skutkowy. Jest to oczywiście spowodowane silną współliniowością

zmiennych opisujących zanieczyszczenia. Model ten nie udzieli odpowiedzi na pytanie o główne czynniki decydujące o jakości środowiska. Aby otrzymać odpowiedź na to pytanie, zastosowaliśmy analizę głównych składowych.

5. Główne składowe w analizie zanieczyszczeń

Metodę głównych składowych zastosowaliśmy do analizy macierzy obserwacji opisującej emisję zanieczyszczeń. Celem tego podrozdziału jest zaprezentowanie propozycji bioindykatora, zmiennej opisującej w sposób syntetyczny emisję zanieczyszczeń. Zmienna taka (lub zbudowana z wykorzystaniem podobnej metodologii) może być wykorzystana w modelach ekonometrycznych jako zmienna objaśniająca, reprezentująca czynniki negatywnie wpływające na środowisko.

W dalszej części pracy analizowane dane rozpatrujemy jako odchylenia od średnich (normalizacja). Nie jest to zabieg konieczny, ale wygodny z przyczyn numerycznych, z uwagi na zastosowanie programu Taksonomia numeryczna[32] .

W kolejnych tabelach zawarto kolejno macierz momentów, ślad tej macierzy, wynoszący 790 827 792 (jest to równocześnie suma wartości własnych), wartości własne, proporcje (udziały) poszczególnych wartości własnych oraz wektory własne.

Tabela 5. Macierz momentów

625 024 889	213 047 388	97 314 915	1,48E+08
213 047 387,5	90 344 198	38 489 716	53 427 816
97 314 914,52	38 489 716	18 408 707	26 284 461
148 090 271,6	53 427 816	26 284 461	57 049 997

Ź r ó d ł o: obliczenia własne z wykorzystaniem programu Taksonomia numeryczna.

Tabela 6. Wartości własne i udziały w sumie wartości własnych

Wartości własne	751 877 659	21 530 290	16 140 327	1 279 516
Udziały w sumie	0,950747643	0,027225	0,0204094	0,001618

Ź r ó d ł o: obliczenia własne z wykorzystaniem programu Taksonomia numeryczna.

Zdecydowanie dominujący jest wpływ pierwszej głównej składowej. Z postaci tej składowej wynika, że najwyższą wagę należy przypisać SO_2 oraz NO_2, co jest zgodne z rezultatami w pismiennictwie dendrochronologicznym. Również

[32] M. Kolenda, *Taksonomia numeryczna. Klasyfikacja, porządkowanie i analiza obiektów wielocechowych*, Wyd. AE we Wrocławiu, Wrocław 2006, s. 236-239.

Tabela 7. Wektory własne

Zanieczyszczenia	Wektory			
	W_1	W_2	W_3	W_4
SO_2	0,9092574	–0,340121	–0,23866	–0,024699828
NO_2	0,3193669	0,2701826	0,861482	–0,287844138
CO	0,1454192	0,1723797	0,209901	0,951356856
Inne	0,2238505	0,8840839	–0,39602	–0,107031786

Ź r ó d ł o: obliczenia własne z wykorzystaniem programu Taksonomia numeryczna.

niski udział CO jest zgodny z przekonaniem dendrochronologów, co zapowiedzielismy, przy analizie modelu symptomatycznego.

Z tabeli 7 wynika, że bioindykator (zmiennej reprezentującej syntetyczne zanieczyszczenia) można w analizowanym przypadku przedstawić za pomocą wzoru:

$$B = 0{,}909\,SO_2 + 0{,}319\,NO_2 + 0{,}145\,CO + 0{,}22\,\text{Inne}$$

Powyższe wyniki skłaniają nas do budowy modelu regresji uzależniającego przyrost radialny od pierwszej głównej składowej. Z uwagi na to, że dane rozpatrujemy w postaci odchyleń od średnich, będzie to model bez wyrazu wolnego. Po zastosowaniu metody najmniejszych kwadratów otrzymujemy wyniki przedstawione w tabeli 8.

Tabela 8. Wyniki analizy regresji i wariancji dla modelu z główną składową

Podsumowanie – wyjście	
Statystyki regresji	
Wielokrotność R	0,734189496
R-kwadrat	0,539034216
Dopasowany R-kwadrat	0,499034216
Błąd standardowy	0,254137354
Obserwacje	26

Analiza wariancji					
	df	SS	MS	F	Istotność F
Regresja	1	1,888098554	1,888099	29,2339603	1,489E–05
Resztkowy	25	1,614644866	0,064586		
Razem	26	3,50274342			

	Współczynniki	Błąd standardowy	t Stat	Wartość *p*
Przecięcie	0	#N/D!	#N/D!	#N/D!
Zmienna X1	0,00005011	9,26819E–06	–5,40684	1,3056E–05

Ź r ó d ł o: obliczenia własne w arkuszu Excel.

Istotny statystycznie (ujemny) współczynnik przy zmiennej (pierwszej głównej składowej) wykazuje istotność zmiennej opisującej zanieczyszczenia dla przyrostu radialnego w badanym przypadku.

Wnioski

W pracy, przy zastosowaniu klasycznych metod, osiągnięto cel ekonomiczny polegający na budowie bioindykatora zanieczyszczeń. Cel dendrochronologiczny osiągneliśmy jedynie częściowo. Niepokojący bowiem jest fakt, że symptomatyczny model uzależniający przyrost radialny jedynie od emisji CO jest (w sensie współczynnika determinacji) lepiej dopasowany niż model oparty na głównej składowej. Prowadzi to do wniosku, że zanieczyszczenia nie są jedynym czynnikiem mającym wpływ na przyrost radialny. Dendrochronolodzy znają odpowiedź na ten problem. Drugą grupą czynników są oczywiście czynniki klimatyczne. Nie stanowi to jednak przedmiotu rozważań w tym artykule.

Literatura

Alestalo J., *Dendrochronological interpretation of geomorphic processes*, „Fennia" 1971, nr 105.

Ashby W.C., Fritts H.C., *Tree growth, air pollution, and climate near LaPorte*, „Ind. Bulletin American Meteorological Society" 1972, nr 53 (3).

Bytnerowicz A., *Physiological aspects of air pollution stress in forests*, „Phyton" (Horn) nr 36, 1996.

Danek M., *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" 2007, nr 185.

Eckstein D., *Quantitative assessment of past environmental changes*, w: *Methods of Dendrochronology. Application in the Environmental Sciences*, red. E.R. Cook, L.A. Kairiukstis, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 1990.

Gärtner H., *Glacial landforms, tree rings: dendrogeomorphology*, „Encyclopedia of Quaternary Sciences" 2007, nr 2.

Hirano T., Morimoto K., *Growth reduction of the Japanese black pine corresponding to an air pollution episode*, „Environmental Pollution" 1999, nr 106.

Jadczyk P., *Przyczyny zniszczenia zachodniosudeckich lasów*, Pielgrzymy, Informator Krajoznawczy, SKPS, Wrocław 1999.

Jońca E., *Geograficzno-przyrodnicze warunki rozwoju i zagadnienie ochrony środowiska miasta Wałbrzycha*, „Przegląd Geograficzny" 1985, nr 57 (1-2).

Juknys R., Stravinskiene V., Vencloviene J., *Tree-ring analysis for the assessment of anthropogenic changes and trends*, „Environmental Monitoring and Assessment" 2002, nr 77.

Kolenda M., *Taksonomia numeryczna, Klasyfikacja, porządkowanie i analiza obiektów wielocechowych*, Wyd. AE we Wrocławiu, Wrocław 2006.

Malik I., *Dendrochronologiczny zapis współczesnych procesów rzeźbotwórczych kształtujących stoki i doliny rzeczne wybranych stref krajobrazowych Europy Środkowej*, Wyd. Uniwersytetu Śląskiego, Katowice 2008.

Malik I., Danek M., Marchwińska-Wyrwał E., Danek T., Wistuba M., Krąpiec M., *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 Pullution" 2012, nr 223.

Nash T.H., Fritts H.C., Stokes M.A., *A technique for examining nonclimatic variation in widths of annual tree rings with special reference to air pollution*, „Tree-Ring Bulletin" 1975, nr 35.

Nöjd P., Reams G.A., *Growth variation of Scots pine across a pollution gradient on the Kola Peninsula, Russia*, „Environmental Pollution" 1996, nr 93 (3).

Smith D., Lewis D., *Dendrochronology*, „Encyclopedia of Quaternary Sciences" 2007, nr 2.

Stravinskiene V., Bartkevicius E., Plausinyte E., *Dendrochronological research of Scots pine* (*Pinus sylvestris L.*) *radial growth in vicinity of industrial pollution*, „Dendrochronologia" 2013, nr 31.

Sutherland E.K., Martin B., *Growth response of Pseudotsuga menziesii to air pollution from copper smelting*, „Canadian Journal of Forest Research" 1990, nr 20 (7).

Theil H., *Zasady ekonometrii*, PWN, Warszawa 1978.

Wójcik J., *Przyrodnicze i antropogeniczne uwarunkowania rozprzestrzeniania się przemysłowych zanieczyszczeń powietrza w Wałbrzychu*, „Problemy Zagospodarowania Ziem Górskich" 1999, nr 45.

Wójcik J., *Przemiany wybranych komponentów środowiska przyrodniczego rejonu wałbrzyskiego w latach 1975-2000, w warunkach antropopresji, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu przemysłu*, „Rozprawy Naukowe Instytutu Geografii i Rozwoju Regionalnego" 21, Uniwersytet Wrocławski, Wrocław 2011.

Zielski A., Krąpiec M., *Dendrochronologia*, WN PWN, Warszawa 2009.

Statistical methods applied in the study of dendrochronological record of air quality

Summary. The methods of principal coordinates are used in the paper. It has two objectives. Firstly, the authors want to create so-called bioindicator. Secondly, they show the relationships between air pollution and radial growth in vicinity.

Key words: air pollution, dendrochronology, tree rings, bioinicator, radial growth, emission