ROCZNIK POLSKIEGO TOWARZYSTWA DENDROLOGICZNEGO Vol. 58 – 2010 • 25-38

JAN ŁUKASZKIEWICZ

Określanie wieku niektórych gatunków drzew ulicznych na podstawie wybranych parametrów dendrometrycznych

Determining the age of some street tree species with selected dendrometrical parameters.

Katedra Architektury Krajobrazu, Wydział Ogrodnictwa i Architektury Krajobrazu,
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
Landscape Architecture Department, Faculty of Horticulture and Landscape Architecture,
Warsaw University of Life Sciences
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa, Poland
e-mail: jan_lukaszkiewicz@sggw.pl

Received: 17 December 2010, Accepted: 15 January 2011

Abstract: Trees are an important component of the urban landscape. Their aesthetics qualities and especially a positive impact on the environment translate into increased life quality of urban communities. From this point of view the aspect of trees' growth in urban areas is an object of intensive research all over the world. The better the knowledge of factors and mechanisms affecting growth and development trees in urban areas, the more accurate is in example monetary evaluation of trees value and their effects on the environment (value of the retained stormwater, produced oxygen, assimilated CO_2, retained pollutions of water, soil and air, reduction of heat islands, etc.). Research on the correlation of tree age, environmental factors and the growth of dendrometric parameters serve as a starting point for developing various computer programs enabling one to calculate the economic effect of trees on savings and expenditure of individual households, towns and cities. Results of tree growth research prove that savings resulting from the presence of trees in towns can be more than three times the cost of tree maintenance. Trees growth is with no doubt dependent on their age. This paper evaluates the possibility of determining tree age based simultaneously on dbh (diameter at breast height 1,3 m) and total tree height, using species most commonly growing along streets in Warsaw: common lime (*Tilia cordata* Mill.), common ash (*Fraxinus excelsior* L.) and horse chestnut (*Aesculus hippocastanum* L.). The first step of research was the identification and measuring of age homogenous trees populations growing in similar conditions (street side trees in Warsaw, excluding city's downtown) for which planting ages were known (mainly from archive data). Next, multifactoral regression models were developed describing the growth of both parameters (dbh and height) over time. In the majority of cases, plotting tree age against diameter and height yielded a regression coefficient r value and determination coefficient r^2 value above 0.9. For graphical interpretation of elaborated multifactoral model nomograms were applied. This kind of graph explains tree age based on both dbh and height of trees. Another aspect of the research was a verification. The resulting model was applied to unrelated groups of trees of known age. Mean bias values were established for each model. The difference between the actual age and mean age calculated with the model was less than ±15%. Presented model, although not meant for application to individual trees might be useful to determine the age of trees populations growing along streets and roads.

Key words: trees age, dendrometry, regression model, nomograms

Wprowadzenie

Nauka od dawna bada fazy życia i rozwoju drzew. Poznanie struktury wieku drzewostanów stało się konieczne na przykład do rozwiązania wielu zadań z zakresu gospodarki leśnej. W nauce o przyroście (jej początki w krajach Europy sięgają XVIII wieku) bada się, jak z wiekiem zmieniają się poszczególne parametry miąższości drzewa: pierśnica, wysokość, kształt pnia (Borowski 1974). Wiek drzewa uznawany jest za jeden z czynników natury wewnętrznej, który wpływa dość istotnie na kształt strzały (pnia drzewa), a więc na przyrost i miąższość drewna (Czuraj 1963). Badając wzrost i przyrost drzew i drzewostanów oraz wpływ na nie różnych czynników, nauka o przyroście stara się określić pewne prawa przyrody, które można wykorzystać w praktycznej działalności, na przykład w hodowli lasu.

Istnieje wiele zasadniczych przyczyn, dla których określanie wieku drzew stało się użyteczne w innych dyscyplinach, niezwiązanych bezpośrednio z gospodarką leśną, takich jak architektura krajobrazu lub arborystyka (ogrodnictwo „stosowane" do drzew miejskich). Dzieje się tak, ponieważ drzewa są podstawowym składnikiem krajobrazu miast. W związku z tym na terenach miejskich szacowanie wieku drzew jest wykorzystywane w następujących działaniach:

- określanie struktury wiekowej drzewostanów – analizy kompozycji w parkach, ogrodach, miejskich zadrzewieniach przyulicznych, przydrożnych itp., w celu ustalenia zasad kształtowania, pielęgnacji i ochrony drzew, na przykład przez operaty pielęgnacyjne (Siewniak 1990, Majdecki 1993);
- określenie stadium rozwoju osobniczego drzew w celu przeprowadzenia kompleksowej oceny stanu zdrowotnego i stanu bezpieczeństwa – stopnia zagrożenia powodowanego przez drzewa o osłabionej statyce (Kosmala i in. 2009);
- wycena monetarnej wartości drzew usuwanych oraz określanie kompensacji przyrodniczej wymaganej z tytułu usuwania drzew (Szczepanowska 2001, 2009);
- przewidywanie rozmiarów drzew i ich wpływu na przestrzeń i środowisko w funkcji czasu – modele wzrostu drzew (Banks i in. 1999, Peper i in. 2001, Larsen, Kristoffersen 2002, Grabosky, Gilman 2004, Linsen i in. 2005, Brasch i in. 2009).

Szczególnie ten ostatni aspekt posiada dla drzewostanów współczesnych miast duże znaczenie. Wynika to z faktu, że wiek drzew jest niezaprzeczalnie powiązany z ich wzrostem. Wraz z upływem czasu zwiększają się stopniowo parametry dendrometryczne, takie jak pierśnica, wysokość, objętość korony i inne. Ta zależność jest szczególnie dokładnie analizowana w badaniach nad drzewostanami miejskimi. W krajach wiodących w tej dziedzinie, na przykład w Australii, Niemczech, Stanach Zjednoczonych, Wielkiej Brytanii, podejmowane są próby coraz dokładniejszego prognozowania optymalnej przestrzeni dla koron i systemów korzeniowych drzew miejskich (Banks i in. 1999, Peper i in. 2001, Larsen, Kristoffersen 2002, Grabosky, Gilman 2004). Opracowywane są także matematyczne formuły pozwalające tworzyć trójwymiarowe modele wzrostu drzew, zgodne ze specyficznymi dla poszczególnych gatunków parametrami wzrostu (Linsen i in. 2005, Brasch i in. 2009).

Wiedza o rozmiarach i kondycji drzew będących w określonym wieku pozwala określać rodzaj, częstotliwość i opłacalność stosowania niektórych zabiegów pielęgnacyjnych, takich jak cięcia korekcyjne, stosowanie wiązań czy podpór. Ułatwione jest też określenie potrzeb nawozowych i zapotrzebowania na środki ochrony roślin, co jest szczególnie ważne przy rozpisywaniu ofert na prace pielęgnacyjne. Podobnie jest z wydatkami, jakie trzeba przeznaczyć na sprzątanie opadłych liści i gałęzi lub naprawę uszkodzonej przez drzewa infrastruktury technicznej. Ponadto łatwiej jest planować prace związane z usuwaniem starych drzew i wprowadzaniem w to miejsce – nowych. Wiek i zależna od niego faza wzrostu jest również dodatkową przesłanką pozwalającą określać stopień zagrożenia powodowanego przez drzewa. W praktyce wszystkie wymienione powyżej zagadnienia, związane z obecnością drzew w mieście, znajdują zastosowanie w operatach pielęgnacyjnych i projektach gospodarki drzewostanami zarówno w parkach zabytkowych (Siewniak 1990, Majdecki 1993), jak i w zadrzewieniach o typowo miejskim charakterze, na przykład wzdłuż ulic.

Badania związków wieku z parametrami dendrometrycznymi wykorzystuje się również do prognozowania wpływu drzew na zmniejszanie zużycia energii w miastach, minimalizację spływu powierzchniowego wód opadowych do kanalizacji burzowej, łagodzenie mikroklimatu miejskiego poprzez emisję O_2, pochłanianie CO_2, pyłów i szkodliwych gazów, redukcję tzw. „wysp ciepła" itd. Służy do tego coraz doskonalsze oprogramowanie komputerowe (na przykład „Dismut" „eco-Smart" lub „Stratum"), pozwalające szacować wpływ drzew na wydatki i oszczędności pojedynczych gospodarstw domowych lub całych miast[1]. Rezultaty badań nad wzrostem drzew w miastach pozwalają ustalić, że oszczędności wynikające z ich obecności są nawet trzykrotnie wyższe od nakładów poniesionych na ich utrzymanie (McPherson i in. 2002, Geiger, McPherson 2004, Gardner 2006, McPherson 2006, McPherson 2007).

Dokładność określania wieku drzew

Dokładność metod określania wieku drzew zależy od okoliczności, w jakich są one stosowane. Nie zawsze zachodzi potrzeba określania wieku w sposób bardzo dokładny (wiek określony co do roku) – stanowi to zresztą dużą trudność. Ważne jest natomiast, aby było wiadomo, na ile dana metoda jest dokładna (jakiej wielkości błąd w ocenie wieku można popełnić stosując daną metodę).

W sytuacji, gdy obiektem badań są drzewa rosnące w miastach, ze względów praktycznych dokładność oceny wieku powinna się zwierać w przedziale od 5 do 10 lat. Jest to podyktowane m.in. znacznym obniżeniem średniej wieku osiąganego przez drzewa w niekorzystnych miejskich warunkach siedliskowych (Foster, Blaine 1978, Morse 1978, Rokosza 1996, Dmuchowski, Badurek 2001, Szczepanowska

[1] Opracowywaniem tego rodzaju oprogramowania zajmuje się m. in. „Center for Urban Forest Research" – jednostka należąca do Departamentu Rolnictwa USA (USDA Forest Service).

2001). Taka dokładność szacowania wieku wynika również z przepisów, w których jest mowa o usuwaniu drzew (zasady wnoszenia opłat i nakładania kar wymagają określonej dokładności określania wieku drzew)[2].

Inne podejście metodyczne stosowane jest podczas analizy struktury wiekowej drzewostanu parkowego. Stary, różnowiekowy drzewostan parkowy bada się stosując przeważnie tzw. przedziały wiekowe lub klasy wieku. Określenie wieku drzew w tym wypadku posiada charakter szacunkowy i polega na przyporządkowaniu drzewa (lub grupy drzew) do określonego przedziału wiekowego. Analiza drzewostanu, jego wieku i stanu zachowania jest jednocześnie analizą kompozycji – próbą ustalenia historycznego doboru drzew i podstawą prac rewaloryzacyjnych. Z układu poszczególnych części drzewostanu można odczytać myśl przewodnią kompozycji ogrodu. W strukturze drzewostanu można rozróżnić – na przykład – następujące klasy wieku: drzewa zabytkowe wraz z drzewami najstarszymi (substancja zabytkowa drzewostanu parkowego), drzewa pośrednie, których nie można jednoznacznie zaklasyfikować do grupy pierwszej, oraz samosiewy lub drzewa dosadzone (Siewniak 1990). Drzewostan można też podzielić na przedziały wiekowe o równych interwałach, na przykład 25- a nawet 50-letnich. Podział ten może być również nierównomierny, dostosowany do historycznych etapów rozwoju kompozycji parkowej, które następowały w nierównomiernych odstępach czasu (Majdecki 1993).

Klasyfikacja metod oceny wieku drzew

W tym miejscu pojawia się zasadnicze pytanie: skąd czerpać wiedzę o wieku drzew? Odpowiedzi poszukiwać można oczywiście na podstawie dat sadzenia. Wiadomości tego rodzaju zawarte być mogą w dokumentacji dotyczącej założenia danego parku, ogrodu, alei, lub budowy ulicy czy też prac pielęgnacyjnych i w dużych miastach Europy zachodniej, Stanów Zjednoczonych, Australii wiek drzew można określić bardzo często właśnie na podstawie dat ich posadzenia (Banks i in. 1999, Peper i in. 2001, Larsen, Kristoffersen 2002, Frank i in. 2006). Tego rodzaju informacje są gromadzone m. in. w inwentaryzacyjnych bazach danych drzew i drzewostanów miejskich. W związku z tym trudno jest podać przykłady badań, w których wiek byłby parametrem określanym na podstawie wymiarów drzewa.

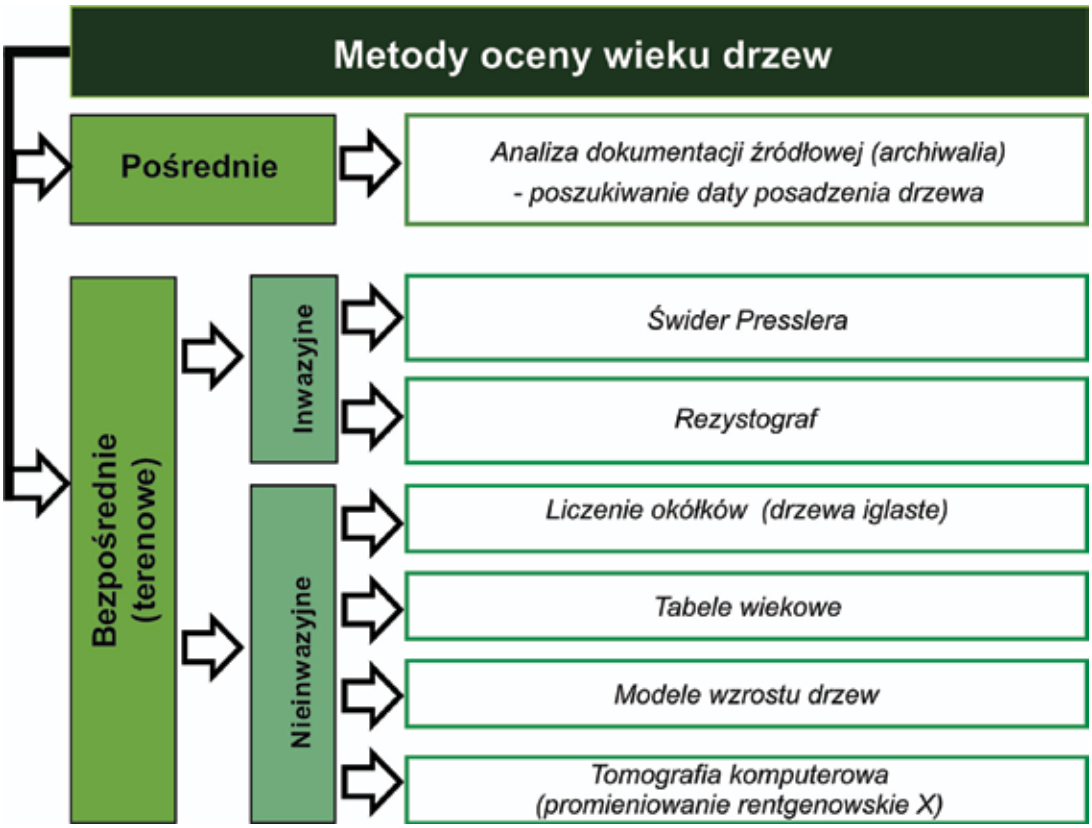
W Polsce ze względu na zaszłości historyczne tego rodzaju źródła są przeważnie dość skromne, trudno dostępne lub w ogóle ich brak. Dużych trudności nastręcza odnalezienie informacji o datach posadzenia drzew sprzed kilkunastu lub kilkudziesięciu lat, nie mówiąc już o drzewostanie zabytkowym lub pomnikowym liczącym sto lat lub więcej. Nie ma również pewności, w jakim stopniu dane znalezione w archiwach są dokładne. Z powyższych względów ustalanie dat posadzenia drzew na podstawie dokumentacji źródłowej jest często żmudne i czasochłonne. W związku z tym szacowanie wieku drzew wymaga niejednokrotnie użycia nie jednej, a dwóch lub więcej metod. Wykorzystanie danych wskazujących na czas posadzenia drzew, które to dane pochodzą z dokumentacji archiwalnej, nie wyklucza przeprowadzenia równolegle badań *in situ*.

Teoretycznie jedynym i najskuteczniejszym sposobem pomiaru wieku drzewa jest policzenie słojów drewna wewnątrz pnia. Dużym ułatwieniem w badaniach nad wiekiem pomnikowych drzew, na przykład w alejach, są wykroty i wiatrołomy spowodowane huraganami i burzami (Pigott 1989). Dostarczają one cennego materiału badawczego (możliwość policzenia słojów drewna), bez potrzeby uszkadzania drzew zdrowych. Jednak w architekturze krajobrazu i arborystyce szacuje się przeważnie wiek drzew żywych (stojących). Wśród metod stosowanych w tym celu bezpośrednio w terenie wyróżnić można dwie zasadnicze podgrupy: metody inwazyjne, to znaczy te, które w trakcie pomiarów powodują uszkodzenia drzewa, oraz metody nieinwazyjne[3] (ryc. 1).

Inwazyjne metody określania wieku drzew (przy zastosowaniu świdra Presslera, rezystografu) wykorzystują właściwości budowy anatomicznej drewna pnia (Isik, Li 2003). Na podstawie liczby pierścieni przyrostów rocznych można oszacować wiek drzew – często bardzo dokładnie. Ten sposób uzyskiwania wyników wyróżnia metody inwazyjne spośród metod pozostałych. Niestety, inwazyjny charakter badań pociąga za sobą większe lub mniejsze uszkodzenia pni oraz groźbę infekcji przez patogeny, co skutkuje rozkładem drewna (Weber, Mattheck 2005). Ponadto w sytuacji, gdy odwierty są przeprowadzane na drzewach o daleko posuniętym rozkładzie drewna, odczytanie wieku na podstawie słojów staje się praktycznie niemożliwe. Poza tym stosowanie tych metod jest pracochłonne, lub – jak w wypadku rezystografu – wymaga używania delikatnego i kosztownego sprzętu. Z wymienionych powodów takie metody nie są optymalne w sytuacji, gdy musimy działać w ocenie wieku drzew w miastach – na większą skalę. Zwłaszcza w przypadku drzew pomnikowych powinien być on określany nieinwazyjnie – jedynie na drodze zewnętrznych pomiarów. Powszechnie wykorzystywane do określania wieku drzew tabele wiekowe spełniają to kryterium. Obliczanie wieku drzew poszczególnych gatunków opiera się o zawarte w tabelach wielkości pierśnic (Mitchell 1979, Majdecki 1980–1986, Siewniak, Kusche 1994). Patrząc na odczyty wieku

[2] Wytyczne do podejmowania decyzji w sprawie usuwania drzew odnaleźć można w aktach prawnych dotyczących ochrony środowiska. Chodzi tu przede wszystkim o ustawy, w których zapisy na ten temat pojawiały się w różnej, często odmiennej formie. Jednym z podstawowych kryteriów decydujących o wycince był i pozostaje nadal wiek drzewa: Ustawa o Ochronie i Kształtowaniu Środowiska z dnia 31 stycznia 1980 roku (Dz.U. nr 94. 49. 196), znowelizowana Ustawa o Ochronie Przyrody z dnia 29 sierpnia 1997 roku (Dz.U. nr 97. 133. 885 z dnia 29 października 1997 roku), ustawa Prawo Ochrony Środowiska z dnia 27 lipca 2001 roku (Dz.U. nr 01.100.1085 z dnia 18 września 2001 roku), oraz Ustawa z dnia 21 maja 2010 roku o zmianie ustawy o udostępnianiu informacji o środowisku (…) oraz zmianie niektórych ustaw (Dz.U. nr 119 poz. 804).

[3] Część metod oceny wieku drzew stosowana była pierwotnie tylko w dendrometrii lub dendrochronologii. W tych przypadkach wiek drzew ustala się bądź to z liczby słojów rocznych na świeżo ściętych pniakach, bądź to na podstawie próbki pobranej za pomocą świdra przyrostowego, a także z liczby okółków. Metody, które są oparte na zliczaniu słojów rocznych drewna, stosowane w dendrometrii, dendrochronologii lub archeologii, z natury rzeczy muszą być inwazyjne. Jednakże w obiektach architektury krajobrazu, podczas inwentaryzacji i oceny wiekowej drzewostanów (szczególnie w miastach, gdzie stan zdrowotny drzew jest gorszy ze względu na trudne warunki życia), powinny być preferowane w miarę możności metody nieinwazyjne.



Ryc. 1. Klasyfikacja metod oceny wieku drzew pod względem charakterystyki wykorzystywanych technik badań lub pomiarów. Opracowanie: J. Łukaszkiewicz

Fig. 1. The classification of methods applied for tree age assessment depending on features of data collecting techniques. Methods used to examining archival sources (descriptive, cartographic, iconographic, and others) aimed on trees planting dates can be described as indirect methods. In contrary the field methods (measurements and observations *in situ*) can be described as direct methods. Among those used *in situ* can be distinguished two main groups: invasive methods – those that cause tree damages during measurements (eg. Pressler borer, resistograph) and non-invasive (eg. whorls counting (conifers), age tables, tree growth models or tomography(X-rays)). By J. Łukaszkiewicz

uzyskane za pomocą tabel można stwierdzić, niestety, że są one bardzo często obciążone grubym błędem, i nie jest to błąd stały. Kolejną niedogodność tej metody stanowią bardzo duże luki pomiędzy latami, pojawiające się w zestawieniach wieku i odpowiadającej mu wielkości pierśnic. Powoduje to, że odczyty wieku z tabel mają wyłącznie szacunkowy charakter. Porównanie cech podstawowych metod szacowania wieku drzew, najbardziej rozpowszechnionych w użytkowaniu i stosowanych w badaniach terenowych w architekturze krajobrazu prezentuje tabela 1. Każda z wymienionych metod może znaleźć zastosowanie w zależności od istniejących potrzeb i celu badań.

Tabela 1. Zestawienie cech dla czterech podstawowych (dwóch inwazyjnych i dwóch nieinwazyjnych), najbardziej rozpowszechnionych w użytkowaniu metod oceny wieku drzew, stosowanych w badaniach terenowych w architekturze krajobrazu i arborystyce

Table 1. The comparison of four (two invasive and two non-invasive) tree age assessment methods most commonly applied during fields research in landscape architecture and arboriculture

l.p. nb.	Metody inwazyjne: świder Presslera, rezystograf Invasive tree age assessment methods: Pressler borer, resistograph	Metody nieinwazyjne: tabele wiekowe, modele wzrostu drzew Non-invasive tree age assessment methods: age tables, trees growth models
1	Pomiary w terenie są czasochłonne i złożone – odwierty na jednym drzewie wymagają przynajmniej dwukrotnego powtórzenia	Pomiary są nieskomplikowane, łatwe do przeprowadzenia, nie wymagają powtórzeń
2	Konieczne są specjalistyczne instrumenty pomiarowe – utrudniania stwarza masa instrumentów, a stosowanie wymaga sprzyjających warunków pogodowych	Proste, łatwe w przenoszeniu instrumenty pomiarowe np. taśma miernicza, wysokościomierz
3	Rozpierzchłonaczyniowa budowa anatomiczna drewna może poważnie utrudnić lub uniemożliwić odczyt wieku podobnie, jak zgnilizna i rozkład tkanek drewna wewnątrz pni	Rozpierzchłonaczyniowa budowa anatomiczna, lub wewnętrzny rozkład tkanek drewna nie utrudniają odczytu wieku (pomiar zewnętrznych parametrów dendrometrycznych)

4	Możliwość stosowania bez względu na gatunek drzewa i typ siedliska	Liczba gatunków jest ograniczona – każdy gatunek posiada nieco inne współczynniki wzrostu; nie można dowolnie stosować bez względu na siedlisko
5	Możliwość bardzo dokładnego określenia wieku na podstawie liczby słojów drewna	Wyniki szacunkowe – różne stopnie dokładności w oparciu o zewnętrzne parametry dendrometryczne (pierśnica, wysokość całkowita drzew i in.)
6	Odczyt wieku wymaga osobnej interpretacji pomiarów np. barwienie próbek drewna (świder) lub komputerowa analiza danych (rezystograf)	Szybkie uzyskiwanie odczytu wieku po pomiarze na podstawie gotowych zestawień tabelarycznych lub wykresów krzywych wzrostu
7	Do obliczonego wieku należy dodać liczbę lat, jakiej potrzebowało drzewo, aby dorosnąć do wysokości wykonanych odwiertów (np. 1,3 m nad poziomem terenu)	Odczytywany wiek jest z założenia wiekiem całkowitym drzewa

Model zależności wieku i parametrów drzew ulicznych

Z braku lepszych narzędzi istniejące tabele wiekowe drzew – mimo szeregu wad – są w dalszym ciągu chętnie stosowane w trakcie badań w obiektach architektury krajobrazu i w dyscyplinach pokrewnych. Dzieje się tak, ponieważ dotychczas nie powstała w Polsce metoda obiektywna, potrzebna do oceny dużych, liczebnych i cennych drzewostanów, jakie występują w obiektach architektury krajobrazu. Powinna być ona możliwie dokładna oraz pozwalać na szybką interpretację wyników.

Rezultatem poszukiwań takiej metody mogą być modele wzrostu drzew. Jak ukazują przykłady z wielu ośrodków badawczych na całym świecie, tego rodzaju matematyczne formuły umożliwiają m.in. określanie wieku drzew, a także prognozowanie „efektu finansowego" oddziaływania drzew na środowisko na podstawie ich wzrostu. Dużą zaletą tej metody jest możliwość graficznej interpretacji wzrostu drzew w funkcji czasu, na przykład przedstawionego w postaci wykresu krzywej wzrostu lub nomogramu. Tego rodzaju metoda jest prosta i nie wymaga skomplikowanych pomiarów, ponieważ opiera się na łatwo mierzalnych parametrach dendrometrycznych (przeważnie są to pierśnica i wysokość). Podstawowym problemem przy opracowywaniu takich równań jest konieczność dysponowania rozbudowaną bazą danych na temat drzew o znanym wieku, które rosną w porównywalnych warunkach siedliskowych. Jest to poważne ograniczenie, utrudniające opracowanie takiej metody dla wielu gatunków drzew występujących w miastach.

W literaturze przedmiotu trudno o przykłady badań, w których wiek byłby parametrem określanym nieinwazyjnie, *in situ*, na podstawie parametrów dendrometrycznych. Większość badaczy koncentruje się na analizowaniu wzrostu parametrów dendrometrycznych w czasie (Banks i in. 1999, Peper i in. 2001, Larsen, Kristoffersen 2002, Grabosky, Gilman 2004, Linsen i in. 2005). Dotyczy to szacowania wzrostu pierśnicy, wysokości całkowitej drzew, zasięgu korony oraz powierzchni liści, na przykład na potrzeby leśnictwa lub arborystyki.

Spotykane w literaturze przedmiotu matematyczne modele wzrostu drzew w funkcji czasu oparte są przede wszystkim na metodzie regresji (np. Pigott 1989, Brzeziecki 1999, Greenberg, Simons 1999, Peper i in. 2001, Gutsell, Johnson 2002, Larsen, Kristoffersen 2002). Dotyczy to zarówno badań z zakresu leśnictwa, jak i drzew w warunkach miejskich. Za pomocą regresji można określić wartości najlepszego dopasowania parametrów modelu do danych (Motulsky, Christopoulus 2003). Bardzo mało jest natomiast przykładów badań przedstawiających to zagadnienie w formie odwrotnej, gdzie upływ czasu (wieku drzew) opisany jest przez zmieniające się parametry dendrometryczne. Tego rodzaju podejście zaprezentowali na przykład Loewenstein i in. (2000), ale jest to praca dotycząca warunków leśnych. W Polsce podobne ujęcie dla drzew miejskich prezentuje praca Borowskiego i Pstrągowskiej (2009) oparta na tzw. tabelach Majdeckiego (1980-86).

Etapy badań nad poszukiwanym modelem

Badania zmierzające do ustalenia metody określenia zależności pomiędzy wiekiem drzew a parametrami dendrometrycznymi (pierśnicą i wysokością) podzielone zostały na trzy etapy:

- **Etap 1** – identyfikacja i pomiary odpowiednio licznych, homogenicznych gatunkowo i wiekowo populacji drzew z wybranych trzech gatunków, rosnących w pasach trawiastych przy ulicach i drogach, w porównywalnych warunkach siedliskowych;
- **Etap 2** – analiza statystyczna zebranych danych i określenie zależności, opisanych matematycznym równaniem, wzrostu drzew wraz z wiekiem;
- **Etap 3** – badania weryfikacyjne (walidacja modelu) na odrębnej grupie drzew o dokładnie znanym wieku, które mają na celu sprawdzenie, na ile prognozy dotyczące wieku zgodne są z rzeczywistością.

Określenie powierzchni badawczych oraz pomiary terenowe

Pierwszy etap badań ukierunkowanych na opracowanie metody szacowania wieku drzew obejmował zbiór informacji na temat kilkudziesięciu rzędowych zadrzewień ulicznych i przydrożnych i przeprowadzony został w latach 2002–2004. Do badań wytypowano trzy gatunki drzew często sadzonych na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat przy ulicach i drogach: lipę drobnolistną (*Tilia cordata* Mill.), jesion wyniosły (*Fraxinus excelsior* L.) oraz kasztanowiec pospolity (*Aesculus hippocastanum* L.). Założono, że każdy gatunek powinien być reprezentowany przez minimum 5 klas wieku zawierających nie mniej niż 6 drzew każda.

W pomiarach uwzględniano drzewa posadzone w tym samym roku (jednorodne wiekowo populacje drzew ulicznych), będące w dobrym stanie zdrowotnym, to jest bez widocznych z zewnątrz objawów wewnętrznej zgnilizny drewna – bez dziupli, otwartych kanałów, rakowatych narośli lub głębokich próchniejących ubytków w dolnej części pnia. Posusz i nekrozy na liściach nie przekraczały 20% objętości korony, która powinna być w pełni wykształcona (nie zredukowana przez cięcia lub bez ewidentnych deformacji).

Zasięg terytorialny badań ograniczony został do Warszawy i jej najbliższych okolic. W celu wyeliminowania zmienności warunków siedliskowych na wzrost drzew założono, że wybrane powierzchnie badawcze powinny znajdować się w bardzo zbliżonych – porównywalnych warunkach mikroklimatycznych oraz glebowych. Z tego powodu nie uwzględniono drzew rosnących w samym śródmieściu Warszawy, gdzie warunki życia drzew są skrajnie niekorzystne. Wszystkie obiekty znalazły się w podstrefie klimatycznej 6b, w której leży Warszawa. Jest to obszar wyróżniony na podstawie USDA Frost Hardiness Zone Map (Heinze, Schreiber 1984), który pokrywa około 60% terytorium Polski i charakteryzuje się średnimi minimalnymi długookresowymi temperaturami powietrza od –20,5°C do –17,8°C.

W wyborze powierzchni badawczych uwzględniono również to, by warunki glebowe były porównywalne. Badano zagęszczenie podłoża oraz właściwości chemiczne wierzchniej warstwy podłoża wokół drzew. Wielu autorów (Shigo 1996, Cermak i in. 2000, Szczepanowska 2001, Grabosky i in. 2002, Kosmala i in. 2009) wskazuje na fakt, że większość gatunków drzew rosnących w miastach wytwarza główną masę systemu korzeniowego (około 70%) w płytkiej warstwie podłoża o miąższości do około 30 – 50 cm. Uzyskane laboratoryjnie wyniki analizy składu granulometrycznego podłoża wskazują, że grunt na wszystkich powierzchniach badawczych składa się z piasku gliniastego z niewielką domieszką humusu (powyżej 2%) i charakteryzuje się pH=7,2. Dla każdej powierzchni badawczej przeprowadzono ponadto badanie zagęszczenia podłoża z wykorzystaniem penetrometru. Stwierdzono, że dla wszystkich obiektów zagęszczenie podłoża wynosi przeciętnie 3,6 kg/cm^2 (0,35 MPa), przy odchyleniu standardowym $s = \pm$ 0,3 kg/cm^2. Uzyskane wyniki wskazują, że zagęszczenie wierzchniej warstwy podłoża w obszarze wytypowanych powierzchni badawczych jest znacznie niższe od wartości 0,7 MPa, przy której według badań aktywność wzrostu korzeni ograniczona jest o 50% (Taylor, Ratliff 1969, Greacen, Sands 1980, Craul 1999, Coder 2000).

W celu ustalenia rzeczywistego wieku drzew ulicznych zgromadzono dane dotyczące dat ich sadzenia. Wiek drzew starszych (na przykład na Żoliborzu czy Saskiej Kępie) analizowany był na podstawie danych archiwalnych, dla przykładu w postaci zdjęć lotniczych Warszawy z roku 1936 oraz 1945 (Archiwum Akt Dawnych m.st. Warszawy). W niektórych wypadkach przeprowadzono rozmowy z osobami pamiętającymi czas sadzenia drzew. Ponadto wykonano kwerendy w archiwach Krajowego Ośrodka Badań i Dokumentacji Zabytków w Warszawie. Analizowane były również dane z inwentaryzacji drzew ulicznych, które posiada warszawski Zarząd Oczyszczania Miasta (Dział Zieleni), oraz informacje na temat pomników przyrody woj. mazowieckiego (Wojewódzki Konserwator Przyrody oraz Wydział Ochrony Środowiska m.st. Warszawy). W ponad połowie przypadków spośród wytypowanych powierzchni badawczych wiek starszych drzew (kilkudziesięcioletnich) został potwierdzony na podstawie liczby słojów drewna pochodzących z odwiertów świdrem Presslera. Na reprezentatywnych drzewach wykonywane były dwa odwierty na wysokości 1,3 m. Do liczby lat uzyskanych na podstawie liczby słojów drewna dodawano 5[4]. Ostateczna inwentaryzacja objęła 388 drzew z trzech gatunków, które posłużyły do sporządzenia bazy danych. Lipę drobnolistną reprezentuje 10 odrębnych klas wieku, natomiast jesion wyniosły oraz kasztanowiec pospolity – 7 klas. Wstępną charakterystykę przyjętych do badań klas wieku drzew ulicznych przedstawia tabela 2.

Analiza statystyczna danych

Na tym etapie badań każda z jednorodnych klas wieku w obrębie danego gatunku została losowo podzielona na dwie połowy: grupę badaną i grupę kontrolną. Następnie wszystkich grup badanych danego gatunku użyto do budowy wykładniczego modelu regresji wielorakiej (dwie zmienne niezależne: pierśnica i wysokość). Drugą połowę zbioru drzew danego gatunku, która znalazła się w grupach kontrolnych, przeznaczono do przeprowadzenia praktycznej weryfikacji modelu.

Postać matematyczna prezentowanego w niniejszej pracy wykładniczego modelu regresji wielorakiej ma charakter wzoru, którego parametry zostały ustalone za pomocą oprogramowania statystycznego STATISTICA 7.0. W niniejszej pracy przyjęte zostały dwa sposoby prezentacji opracowanego modelu regresji:

- w postaci równania (wzór 1)
- w postaci graficznej – nomogramy (ryc. 2, 3 i 4).

Wzór 1. Matematyczne równanie wykładniczego modelu regresji wielorakiej określającego zależność wieku jednolitej wiekowo populacji drzew ulicznych od uśrednionej dla tej populacji wartości zmiennych niezależnych: pierśnicy i wysokości, gdzie:

- *wiek* – obliczony wiek dla populacji drzew ulicznych (lat);
- $\overline{piers}$ – średnia pierśnica dla populacji drzew ulicznych (cm);
- $\overline{wys}$ – średnia wysokość całkowita dla populacji drzew ulicznych (m).

Wartości współczynników przedstawia Tabela 3.

$$wiek = -a + e^{\left(b + c \bullet \frac{\overline{piers}}{100} + d \bullet \overline{wys}\right)}$$

[4] Czas potrzebny na osiągnięcie przez siewkę wysokości 1,3 m ocenia się przeciętnie na 5 lat (Assman 1968, Kaennel, Schweingruber 2004).

Tabela 2. Klasy wieku wyodrębnione kolejno dla drzew ulicznych z gatunków: lipa drobnolistna (*Tilia cordata* Mill.), jesion wyniosły (*Fraxinus excelsior* L.), kasztanowiec pospolity (*Aesculus hippocastanum* L.), użyte do opracowania wykładniczego modelu regresji wielorakiej na podstawie średnich wartości pierśnicy i wysokości

Table 2. Common lime (*Tilia cordata* Mill.), common ash (*Fraxinus excelsior* L.) and horse chestnut (*Aesculus hippocastanum* L.) age classes incorporated into the regression model, dbh and height parameters included

Numer klasy wieku Age class number	Wiek rzeczywisty (lat)* Actual age (years)*	Liczebność próby (szt.)** Sample size**	Średnia pierśnica Mean diameter at breast height (dbh)		Średnia wysokość Mean tree total height	
			cm	sd ± (cm)	m	**sd ± (m)**
1	7	10	3,0	0,9	3,3	0,00
2	18	8	17,0	2,7	5,7	0,85
3	25	17	21,0	2,5	8,0	1,14
4	34	22	29,0	4,1	9,7	1,09
5	34	18	24,0	4,5	10,1	0,73
6	36	10	31,0	3,4	14,1	0,94
7	53	21	38,0	5,9	12,5	1,52
8	58	23	48,0	6,4	14,5	1,11
9	75	18	54,0	4,4	13,8	1,60
10	85	17	72,0	10,2	20,7	1,08
		∑=164				
1	10	14	4,0	1,0	3,9	0,70
2	15	9	12,0	2,0	7,1	0,70
3	20	12	16,0	3,0	7,6	0,98
4	26	18	24.0	4.0	9.5	1.58
5	43	15	39.0	6.0	12.3	1.73
6	45	17	44.0	5.0	11.6	0.82
7	80	20	66.0	9.0	23.2	1.77
		∑=105				
1	16	11	13.0	2.0	3.7	0.52
2	22	18	21.0	4.0	6.0	0.66
3	25	23	23.0	4.0	5.3	0.85
4	30	17	29.0	4.0	8.8	0.73
5	38	14	32.0	6.0	8.1	0.78
6	58	16	46.0	7.0	13.1	1.69
7	64	20	49.0	8.0	13.3	1.43
		∑=119				

* Rzeczywisty wiek drzew pochodzący z danych archiwalnych lub ustalony na podstawie liczby przyrostów (świder Presslera).

The actual age of trees taken from historical records or tree rings number (Pressler borer).

** Całkowita liczba drzew w jednorodnej wiekowo populacji – klasie wieku.

The total number of trees in age-homogenous population – class, taken into inventory.

Formula 1. The mathematical equation of non-linear model of multifactoral regression describing the growth of both mean dendrometrical parameters (diameter at breast height and tree height) over time (age) for street trees age-homogenous population, where:

- *age* – the calculated age of street tree population (years);
- $\overline{dbh}$ – mean diameter at breast height taken from street trees population (cm);
- $\overline{h}$ – mean total height of street trees population (m).

Table 3 presents equation factors of regression model.

$$age = -a + e^{\left(b + c \bullet \frac{\overline{dbh}}{100} + d \bullet \overline{h}\right)}$$

Prezentowany model regresji oszacowano metodą najmniejszych kwadratów. Współczynniki równania matematycznego (*a, b, c, d*) określone dla każdego z trzech gatunków prezentuje tabela 3. Podstawa logarytmu naturalnego (*e*) wynosi 2,7183[5]. Za każdym razem podany jest współczynnik regresji (r), wraz z poziomem jego istotności (p) oraz wartością współczynnika determinacji (r^2). Zgodnie z literaturą przedmiotu (Neter, Wassermann 1974, Blalock 1977, Sokal, Rohlf 1981, Łomnicki 2002, Motulsky, Christopoulos 2003, Frątczak i in. 2005) wartości: (r), (p) oraz (r^2) należy rozumieć następująco:

- współczynnik (r) jest miarą zgodności: im jego wartość jest większa od zera i bliższa jedności, tym wartość zmiennej (lub zmiennych niezależnych: pierśnicy i wysokości) bardziej wpływa na wartość zmiennej zależnej – w tym wypadku wieku;
- wartość współczynnika (p) większa od 0,05 oznacza, że współczynnik regresji jest nieistotny statystycznie, natomiast $p \leq 0{,}05$ oznacza, że współczynnik regresji jest istotny statystycznie;
- wartość współczynnika determinacji (r^2) jest najprostszym sposobem interpretacji wartości (r) – pozwala ona określić, w jakim stopniu całkowita zmienność wartości wieku drzew (Y) „tłumaczona" jest zmiennością parametrów dendrometrycznych (X). Współczynnik (r^2) można również określić jako część zmienności wspólną dla obu zmiennych: (Y) oraz (X).

Współczynniki (r) oraz (r^2) określone dla każdego z trzech badanych gatunków wskazują, że ponad 90% zmienności wartości „wiek" tłumaczone jest zmiennością wartości „pierśnica" oraz „wysokość" (tabela 3).

Wyniki

Prezentowane w niniejszej publikacji nomogramy (ryc. 2, 3 i 4) są próbą przeniesienia zależności trójwymiarowej (trzy parametry: wiek, pierśnica, wysokość) na płaszczyznę, która z natury rzeczy wymusza stosowanie układu dwóch współrzędnych. W tej sytuacji odczytanie wieku w postaci parametru ciągłego jest niemożliwe i konieczny staje się odczyt przybliżony na przykład w przedziałach co 5 lat – jak to zostało przyjęte w niniejszej publikacji. Widoczne na nomogramach linie oddzielające poszczególne przedziały wiekowe były wyznaczane poprzez podstawienie do badanego modelu regresyjnego określonego wieku (na przykład 10, 15, 20 lat itd.), a następnie wartości parametru „pierśnica" – typowych dla danego wieku. Przy ustalonych wartościach dwóch parametrów („wiek" i „pierśnica") wartość parametru trzeciego – „wysokość całkowita" – określana była metodą iteracyjną[6]. W ten sposób dla danego wieku otrzymuje się szereg par parametrów dendrometrycznych (pierśnicy i wysokości całkowitej drzew), które po podstawieniu do danego modelu i przeliczeniu wyznaczają określony wiek.

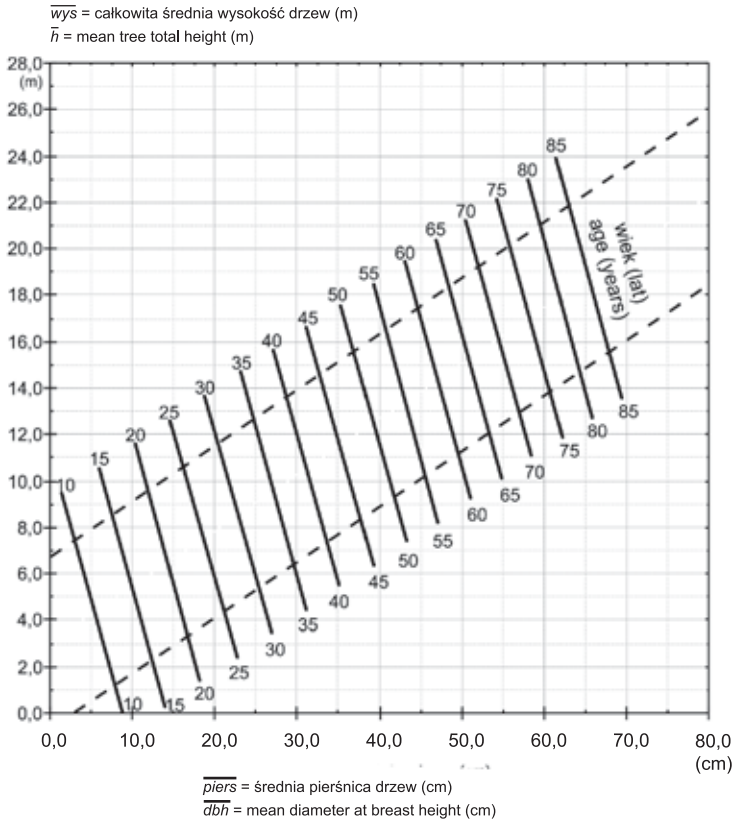
Kolejne zestawy iteracji pozwoliły otrzymać szereg punktów, co umożliwiło wykreślenie linii odpowiadającej wartości danego wieku na nomogramie (10, 15, 20 lat itd.). Działania takie wykonywane były osobno dla każdej linii wiekowej. Na przykład nomogram opracowany dla lipy drobnolistnej (ryc. 2.) zawiera 16 linii wiekowych w przedziale od 10 do 85 lat – w odstępach pięcioletnich. Linie podziałów wiekowych były następnie nanoszone na układ współrzędnych, w którym na osi (X) odłożono wartości pierśnicy, a na osi (Y) wartości wysokości całkowitej drzew. Przedstawione na nomogramach grube linie przerywane oznaczają granice, w których mieści się 95% drzew z populacji wykorzystanej do utworzenia modelu. Wykreślono je w oparciu o przedziały predykcji dla zależności pierśnica/wysokość.

Tabela 3. Współczynniki równania wykładniczego modelu regresji wielorakiej (Wzór 1) dla trzech badanych gatunków drzew
Table 3. Equation factors of non-linear model of multifactoral regression (Formula 1) for each tree species

Współczynnik Factor	Lipa drobnolistna Common lime (*Tilia cordata* Mill.)	Jesion wyniosły Common ash (*Fraxinus excelsior* L.)	Kasztanowiec pospolity Horse chestnut (*Aesculus hippocastanum* L.)
a	264,073	210,115	54,2714
b	5,5834	5,3523	4,0709
c	0,3397	0,2655	0,7988
d	0,0026	0,0064	0,0209
r	0,9491	0,9857	0,9635
p	< 0,001	< 0,001	< 0,001
r^2	0,9009	0,9716	0,9284

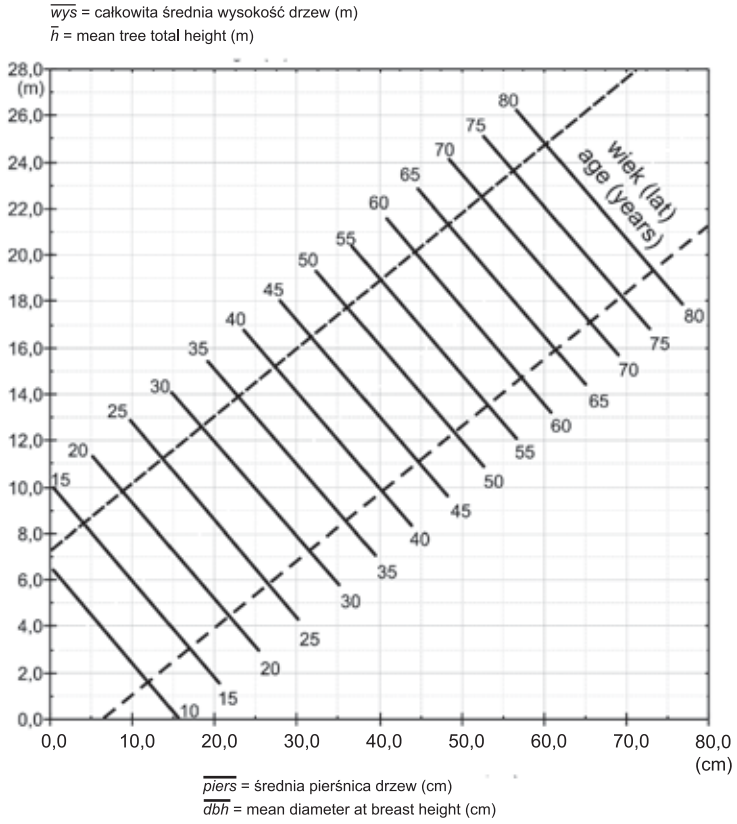
[5] Podstawa logarytmu naturalnego (inaczej liczba Eulera lub liczba Nepera) wynosi w przybliżeniu 2,7182818. Oznacza się ją literą *„e"*.

[6] Iteracja oznacza dopasowanie trzeciego parametru do wartości dwóch pozostałych parametrów na zasadzie wielokrotnych kolejnych przybliżeń (Motulsky, Christopoulos 2003). W niniejszej publikacji wykorzystano do tego celu program komputerowy GraphPad.



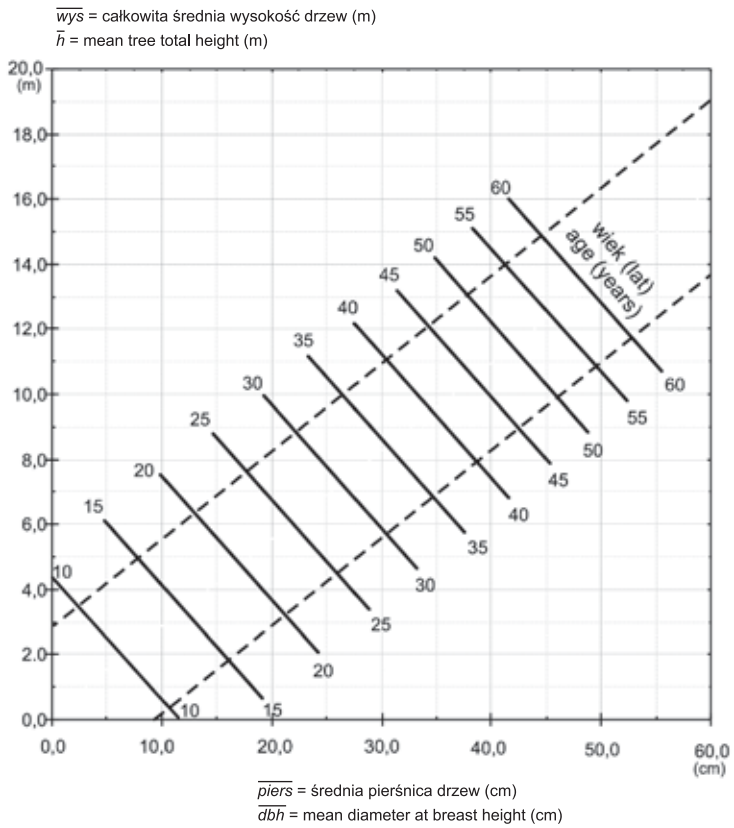
Ryc. 2. Lipa drobnolistna (*Tilia cordata* Mill.) – nomogram obejmuje linie wiekowe w zakresie od 10 do 85 lat. Linie przerywane obejmują obszar zawierający 95% odczytów wieku wszystkich drzew z badanej grupy kontrolnej.
Opracowanie: J. Łukaszkiewicz

Fig. 2. Common lime (*Tilia cordata* Mill.) nomogram. The graph contains age lines in five years intervals in range from 10 to 85 years. The area limited with hashed lines contains 95% calculated age values of all unrelated trees of known age taken from a test group. By J. Łukaszkiewicz



Ryc. 3. Jesion wyniosły (*Fraxinus excelsior* L.) – nomogram obejmuje linie wiekowe w zakresie od 10 do 80 lat.
Linie przerywane obejmują obszar zawierający 95% odczytów wieku wszystkich drzew z badanej grupy kontrolnej.
Opracowanie: J. Łukaszkiewicz

Fig. 3. Common ash (*Fraxinus excelsior* L.) nomogram. The graph contains age lines in five years intervals in range from 10 to 80 years. The area limited with hashed lines contains 95% calculated age values of all unrelated trees of known age taken from a test group. By J. Łukaszkiewicz



Ryc. 4. Kasztanowiec pospolity (*Aesculus hippocastanum* L.) – nomogram obejmuje linie wiekowe w zakresie od 10 do 60 lat. Linie przerywane obejmują obszar zawierający 95% odczytów wieku wszystkich drzew z badanej grupy kontrolnej. Opracowanie: J. Łukaszkiewicz

Fig. 4. Horse chestnut (*Aesculus hippocastanum* L.) nomogram. The graph contains age lines in five years intervals in range from 10 to 60 years. The area limited with hashed lines contains 95% calculated age values of all unrelated trees of known age taken from a test group. By J. Łukaszkiewicz

Zastosowanie nomogramów

Poniżej zaprezentowana jest prosta technika zastosowania nomogramu w badaniach nad wiekiem drzew ulicznych. Należy pamiętać o tym, że nomogram najlepiej zastosować do określania wieku drzew ulicznych – rosnących w warunkach siedliskowych podobnych do tych, w jakich rosły drzewa użyte do opracowania niniejszej metody. Przyjmijmy, że zachodzi potrzeba ustalenia wieku dla sześciu lip drobnolistnych, rosnących rzędowo wzdłuż ulicy. Przystępując do zadania, należy zmierzyć pierśnicę i wysokość każdego drzewa. Następnie trzeba ustalić średnią arytmetyczną – osobno dla pierśnic i wysokości drzew. Załóżmy, że dla sześciu badanych lip drobnolistnych średnia pierśnica wyniosła 50,0 cm, a średnia wysokość 16,0 m. Uzyskane wartości nanosimy na osie nomogramu opracowanego dla lipy. Na podstawie zaznaczonych parametrów dendrometrycznych rysujemy na nomogramie dwie prostopadłe linie, których punkt przecięcia wypada na linii opisanej jako 65 lat (ryc. 2). Oznacza to, że średni wiek dla sześciu ulicznych lip drobnolistnych wynosi 65 lat. Jeśli miejsce przecięcia wyznaczonych linii znalazłoby się pomiędzy liniami wieku, należy go określić na podstawie interpolacji. Na prezentowanym przykładzie odczyt wieku znalazł się na nomogramie wewnątrz obszaru objętego przerywanymi liniami (95% wszystkich drzew z grupy kontrolnej). Oznacza to, że badane drzewa charakteryzowały się wzrostem typowym – w odniesieniu do drzew uwzględnionych przy opracowaniu modelu. Jeżeli okazałoby się, że odczyt wieku znalazł się zdecydowanie poza tym obszarem, to któryś z uśrednionych parametrów dendrometrycznych był nietypowy. Zły odczyt wieku uzyskany za pomocą opracowanych modeli regresji może być wynikiem odmiennego zagęszczenia grupy drzew od przyjętego za typowe przy opracowaniu modelu lub wpływu innych zmiennych niezależnych, na przykład poziomu wód gruntowych, rodzaju gleby oraz redukcji rozmiarów korony drzewa na skutek cięć pielęgnacyjnych.

Weryfikacja opracowanego wykładniczego modelu regresji wielorakiej

Wiarygodność opracowanego wykładniczego modelu regresji wielorakiej została sprawdzona empirycznie. Weryfikacja nie polegała w tym wypadku na stwierdzeniu, czy model regresji jest „prawdziwy", ale czy generuje on dobrą, sprawdzalną hipotezę odnoszącą się do oceny wieku drzew na podstawie parametrów dendrometrycznych.

Weryfikacja opracowanego modelu regresji opierała się o statystykę porównawczą wartości parametru „wiek", otrzymanego przy użyciu testowanego na grupach kontrolnych modelu, z wartością rzeczywistą wieku drzew. Należy przypomnieć, że grupy kontrolne nie były użyte do opracowania modelu regresji. Dane dendrometryczne drzew z grup kontrolnych przeliczane były na wiek danego drzewa z wy-

korzystaniem matematycznej wersji danego modelu regresji otrzymanego dla danego gatunku. W ten sposób dla każdego drzewa użytego do weryfikacji danego modelu regresyjnego otrzymano dwie wartości parametru „wiek":

- wartość rzeczywistą (znaną z analizy dokumentów źródłowych i badań terenowych);
- wartość wyliczoną za pomocą sprawdzanego modelu (tabela 4).

Dla utworzonego modelu regresyjnego przeanalizowano jego dokładność odtworzenia wieku drzew z grup kontrolnych. Była to praktyczna weryfikacja dopasowania modelu do danych. W prezentowanych badaniach dokładność metody oznacza zgodność otrzymanego wyniku z wartością prawdziwą. Dokładność mówi o tym, jak blisko prawdziwej średniej wartości populacyjnej leży wartość oznaczana. Do opisu dokładności metody wykorzystano tendencyjność wyrażoną procentowo, jako *bias* (ang. „bias" – obciążenie). Tendencyjność określa niepożądane, systematyczne źródło błędów, które w wynikach i wnioskach naukowych są skutkiem działania czynników niezwiązanych z badaniami lub z mierzonymi zmiennymi. Im mniejsza tendencyjność, tym lepsze dopasowanie modelu do danych. Oblicza się ją według wzoru 2:

Wzór 2. Dokładność metody wyrażona procentowo jako tendencyjność (*tend*), czyli obciążenie (ang. *bias*).

$$tend = \left(\frac{wiek_{obliczony} - wiek_{rzeczywisty}}{wiek_{rzeczywisty}} \right) \bullet 100(\%)$$

Tabela 4. Porównanie rzeczywistego wieku drzew ulicznych z gatunków: lipa drobnolistna (*Tilia cordata* Mill.), jesion wyniosły (*Fraxinus excelsior* L.), kasztanowiec pospolity (*Aesculus hippocastanum* L.) z wiekiem tych drzew obliczonym za pomocą wykładniczego modelu regresji wielorakiej na podstawie pierśnic i wysokości.

Table 4. Comparison of street trees common lime (*Tilia cordata* Mill.), common ash (*Fraxinus excelsior* L.) and horse chestnut (*Aesculus hippocastanum* L.) age classes known and calculated age with non-linear model of multifactoral regression using diameter at breast height (dbh) and total height of trees

Lipa drobnolistna Common lime (*Tilia cordata* Mill.)			Jesion wyniosły Common ash (*Fraxinus excelsior* L.)			Kasztanowiec pospolity Horse chestnut (*Aesculus hippocastanum* L.)		
Numer klasy wieku Age class number	Wiek rzeczywisty (lat)* Actual age* (years)	Wiek obliczony (lat)** Calcult. age** (years)	Numer klasy wieku Age class number	Wiek rzeczywisty (lat)* Actual age* (years)	Wiek obliczony (lat)** Calcult. age** (years)	Numer klasy wieku Age class number	Wiek rzeczywisty (lat)* Actual age* (years)	Wiek obliczony (lat)** Calcult. age** (years)
1	7	7,2	1	10	8,0	1	16	17,8
2	18	21,9	2	16	18,0	2	22	27,6
3	25	27,9	3	20	21,0	3	25	26,9
4	34	35,2	4	26	29,1	4	30	36,0
5	34	35,2	5	43	43,5	5	38	33,5
6	36	42,2	6	45	45,3	6	58	59,4
7	53	49,8	7	80	81,2	7	60	67,3
8	58	59,4	-	-	-	-	-	-
9	75	66,7	-	-	-	-	-	-
10	85	79,5	-	-	-	-	-	-
$\overline{tendencyjność}$ ($\overline{bias}$)			$\overline{tendencyjność}$ ($\overline{bias}$) = 1,8%			$\overline{tendencyjność}$ ($\overline{bias}$) = 9,5%		

* Rzeczywisty wiek drzew z grupy kontrolnej pochodzący z danych archiwalnych lub ustalony na podstawie liczby przyrostów (świder Presslera).
The actual age of trees taken from historical records or tree rings number (Pressler borer).

** Wiek obliczony za pomocą opracowanego wykładniczego modelu regresji wielorakiej na podstawie pierśnic i wysokości drzew z grup kontrolnych (nie użytych do budowy modelu).
The age calculated with developed non-linear model of multifactoral regression applicated on trees diameter at the breast height (dbh) and height of each species taken from control group.

*** Dokładność szacowania wieku dla całego zbioru drzew w obrębie gatunku wyrażona przez średnią tendencyjność (%) obliczoną na podstawie Wzoru 2.
An accuracy of age assessment for all trees belonged to examined species described as mean bias in percentage value calculated with the application of Formula 2.

Formula 2. The accuracy of the method interpreted as *bias* (%).

$$bias = \left(\frac{age_{calculated} - age_{actual}}{age_{actual}} \right) \bullet 100(\%)$$

Weryfikacja modelu pokazała, że oszacowany wiek drzew z grup kontrolnych jest bardzo zbliżony do ich wieku rzeczywistego. Jedynie w przypadku kasztanowca wartości *bias* były nieco większe. Wyniki odczytu wieku opracowanym modelem prezentuje tabela 4. Weryfikacja przeprowadzona na grupach kontrolnych wykazała, że model posiada zadowalającą dokładność w określaniu wieku dla rzędowych nasadzeń drzew ulicznych. W przypadku każdego gatunku zgodność pomiędzy wiekiem oszacowanym a wiekiem rzeczywistym nie przekroczyła 15% *bias*. Wydaje się zatem, że osiągnięte parametry jakościowe, wyrażone przez *bias*, świadczą w zdecydowanej większości przypadków o dobrym dopasowaniu opracowanego modelu do danych doświadczalnych, co z kolei świadczy pozytywnie o potencjalnych możliwościach użytkowych tej metody.

Dyskusja

Z literatury przedmiotu (Brack, Wood 1998, Banks i in. 1999, Peper i in. 2001; Larsen, Kristoffersen 2002, Grabosky, Gilman 2004, Linsen i in. 2005) wynika, że spośród różnych uwzględnianych w badaniach parametrów dendrometrycznych najczęściej badane są zależności między wiekiem a pierśnicą i wysokością całkowitą. Badacze drzewostanów miejskich (Pigott 1989, Peper i in. 2001, Gutsell, Johnson 2002, Larsen, Kristoffersen 2002) koncentrują się w pierwszej kolejności na możliwościach przewidywania wzrostu wspomnianych parametrów dendrometrycznych podczas określonego czasu. Dużo rzadziej spotykane jest podejście odwrotne, gdzie upływ czasu (wiek drzew) opisany jest zmiennością parametrów dendrometrycznych (Loewenstein i in. 2000).

Nie ulega wątpliwości, że jednym z podstawowych źródeł wiedzy na temat wieku drzew są daty ich posadzenia. Niekompletność, fragmentaryczność lub nieraz zupełny brak danych historycznych o dacie (roku) posadzenia drzew oraz wieku samych drzew w chwili posadzenia sprawiają, że skuteczne metody terenowe określania wieku drzew *in situ* nabierają szczególnego znaczenia.

W niniejszej publikacji przedstawiono rzadko spotykane w innych badaniach nad wzrostem drzew w miastach ujęcie wykładniczego modelu regresji wielorakiej (Neely 1988, Banks i in. 1999, Peper i in. 2001, Larsen, Kristoffersen 2002, Linsen i in. 2005). Opracowany model pozwala – dla rzędowego nasadzenia drzew ulicznych – szacować z dobrą skutecznością wiek drzewa na podstawie wartości dwóch parametrów dendrometrycznych: średniej pierśnicy i średniej wysokości. Graficzna interpretacja opracowanego wykładniczego modelu regresji wielorakiej została zaprezentowana w postaci tzw. nomogramów. Konstrukcja nomogramu umożliwia przedstawienie na płaszczyźnie układu trzech parametrów: wieku, pierśnicy i wysokości. Zaletą nomogramów jest czytelność i prostota, co umożliwia łatwe zastosowanie w warunkach terenowych.

Ważnym zagadnieniem było ustalenie progu dopuszczalnego błędu, jaki można popełnić przy odczycie wieku opracowanymi modelami regresyjnymi. Procentowe odczyty dokładności (*bias*) dla otrzymanego modelu regresji pozwoliły ustalić, że w większości przypadków błędy odczytu wieku nie przekraczają progu +/–15%. Można to uznać za wynik zadowalający w odniesieniu do względnie niewielkiej liczby drzew (łącznie 388 roślin) użytych do budowy i weryfikacji modelu. Niewątpliwie skuteczność tego rodzaju badań wzrasta wówczas, kiedy próba drzew jest odpowiednio liczna. Badania prezentowane w literaturze przedmiotu (White 1998, Banks i in. 1999, Peper i in. 2001, Larsen, Kristoffersen 2002, Linsen i in. 2005, Brasch i in. 2009) oparte są często na próbach idących w setki, a nieraz i w tysiące drzew. Mimo to uzyskane przeze mnie wyniki potwierdzają słuszność przyjętych założeń. Liczniejsza próba z pewnością wpłynęłaby jednak na wzrost dokładności metody, ale jak widać – nawet przy ograniczonej liczebności drzew uwzględnionych w badaniach – zastosowany model regresji wykazuje obiecującą skuteczność.

Dalsze badania nad metodą określania wieku drzew opartą na modelu regresji powinny uwzględnić – poza ulicznym – inne typy siedliska miejskiego, w tym na przykład tereny zieleni osiedlowej i parki miejskie. W ten sposób ocena wieku każdego z badanych gatunków drzew zawierać mogłaby co najmniej trzy zestawy współczynników zawartych w modelu regresji w zależności od typu siedliska.

Wydaje się, że w przyszłości możliwe będzie zwiększenie liczby uwzględnionych gatunków drzew przez zastosowanie w modelu regresji odpowiednich zestawów współczynników. Powinny to być w pierwszej kolejności gatunki najpowszechniej sadzone wzdłuż ulic w miastach (na przykład w Warszawie), takie jak klon pospolity (*Acer platanoides* L.), klon jawor (*Acer pseudoplatanus* L.), dąb szypułkowy (*Quercus robur* L.), dąb czerwony (*Quercus rubra* L.), lipa krymska (*Tilia ×euchlora* K. Koch), lipa srebrzysta (*Tilia tomentosa* Moench.), robinia akacjowa (*Robinia pseudoacacia* L.), jarząb pospolity (*Sorbus aucuparia* L.).

Wnioski

Otrzymane wyniki wskazują, że można opracować model regresji pozwalający skutecznie szacować wiek drzew na podstawie dwóch parametrów dendrometrycznych jednocześnie: pierśnicy i wysokości całkowitej.

Opisana metoda określania wieku populacji drzew ulicznych, w oparciu o wykładniczy model regresji wielorakiej, może znaleźć zastosowanie w sytuacjach, kiedy wiek zadrzewienia ulicznego nie jest znany, ale istnieją przesłanki na temat jednolitej struktury wieku zadrzewienia (jednakowa lub podobna data posadzenia drzew).

Opracowany model regresji wykazuje dobrą dokładność określania średniego wieku populacji drzew rosnących w niewielkim zwarciu, jakie występuje w zadrzewieniach ulicznych i przydrożnych. W takim wypadku błąd popełniany przy odczycie wieku nie przekracza +/–15%.

Graficzne odwzorowanie modelu regresji w postaci nomogramów nie znajduje odpowiednika w przytaczanej analizie literatury przedmiotu. Nomogramy mogą być wykorzystane praktycznie w warunkach terenowych i pozwalają na łatwe odczytanie wieku dla homogenicznej populacji drzew ulicznych.

Prezentowane badania są podstawą do opracowania metody bardziej uniwersalnej. Metodę, na tym etapie zaawansowania, można rozwijać i z czasem rozbudować o kolejne gatunki drzew. Uzyskane do tej pory wyniki są punktem wyjścia do zakrojonych na szerszą skalę badań populacji drzew ulicznych, w celu określenia zależności ich parametrów dendrometrycznych od wieku. Dalsze badania powinny dostarczyć odpowiedzi na pytanie, czy niektóre gatunki drzew posiadają podobne lub bardzo zbliżone cechy i tempo wzrostu; gdyby tak było, istniałaby możliwość adaptacji prezentowanego modelu regresji dla innych gatunków niż trzy użyte do badań.

Literatura

ASSMAN E., 1968. Nauka o produkcyjności lasu (wyd. 1). PWRiL, Warszawa.

BANKS J. C., BRACK C. L., JAMES R. N., 1999. Modeling changes in dimensions, health status, and arboricultural implications for urban trees. Urban Ecosystems 3: 35-43.

BLALOCK H. M., 1977. Statystyka dla socjologów. PWN, Warszawa.

BOROWSKI M., 1974. Przyrost drzew i drzewostanów. PWRiL, Warszawa.

BOROWSKI J., PSTRĄGOWSKA M., 2009. Lista gatunków i wyznaczenie współczynników gatunkowych i przyrostowych wykorzystywanych w metodzie wyceny drzew. IGPiM, Warszawa.

BRACK C. L., WOOD G. B., 1998. Forest Mensuration. Measuring trees, stands and forests for effective forest management. Tree growth and increment. http://sres.anu.edu.au [19.03.2004].

BRASCH S., McPHERSON E. G., LINSEN L., 2009. Interactive data visualization for animating urban tree growth. International Journal of Modelling and Simulation 29(3): 306-314.

BRZEZIECKI B., 1999. Ekologiczny model drzewostanu. Zasady konstrukcji, parametryzacji, przykłady zastosowań. Fundacja Rozwój SGGW, Warszawa.

CERMAK J., HRUSKA J., MARTINKOVA M., PRAX A., 2000. Urban tree root systems and their survival near houses analyzed R-using ground penetrating radar and sap flow techniques. Plant and Soil 219: 103-116.

CODER K. D., 2000. Soil compaction & Trees: causes, symptoms & effects. University of Georgia USA. http://www.ag.iastate.edu/departments/forestry/ext/roadside_tree_management/for00-003.pdf [13.06.2005].

CRAUL P. J., 1999. Urban soils. Application and practices. Wiley, New York.

CZURAJ M., 1963. Pomiar drzew i drzewostanów dla techników leśnych. PWRiL, Warszawa.

DMUCHOWSKI W., BADUREK M., 2001. Stan zieleni przyulicznej w Warszawie na podstawie wieloletnich obserwacji i doświadczeń Ogrodu Botanicznego – CZRB PAN. W: Zieleń Warszawy. Problemy i nadzieje. Mat. Ogólnopolskiej Konferencji Naukowo-Technicznej (Dmuchowski W., Niekrasz K., red.), Warszawa-Powsin 4.10.2001: 19-32.

FOSTER R., BLAINE J., 1978. Urban trees survival: Trees in the side-walk. Journal of Arboriculture 4: 14-17.

FRANK S., WATERS G., BEER R., MAY P., 2006. An analysis of the street tree population of greater Melbourne at the beginning of the 21st century. Arboriculture & Urban Forestry 32(4): 109-115.

FRĄTCZAK E., PĘCZKOWSKI M., SIENKIEWICZ K., SKASKIEWICZ K., 2005. Statystyka od podstaw z systemem SAS. Wersja 9.1. Szkoła Główna Handlowa w Warszawie, Warszawa.

GARDNER S., 2006. 'Selling' Urban Forestry in Your Town. USDA Forest Service. Center for Urban Forest Research. http://www.fs.fed.us/psw/programs/cufr/products/powerpoint/cufr_653_35_Selling%20U.F._St.Louis.swf [16.08.2006].

GEIGER J. R., McPHERSON E. G., 2004. Desert Southwest Community Tree Guide. USDA Forest Service, Center for Urban Forest Research, Pacific Southwest Research Station.

GRABOSKY J., BASSUK N., TROWBRIDGE P., 2002. Structural Soils: A New Medium to Allow Urban Trees to Grow in Pavement. LATIS Cornell University, New York.

GRABOSKY J., GILMAN E., 2004. Measurement and prediction of tree growth reduction from tree planting space in established parking lots. Journal of Arboriculture 30(3): 154-165.

GREACEN E. L., SANDS R., 1980. Compaction of forest soils – a review. Australian Journal of Soil Research 8: 163-189.

GREENBERG C. H., SIMONS R. W., 1999. Age, composition, and stand structure of old-growth oak sites in the Florida high pine landscape: implications for ecosystem management and restoration. Natural Areas Journal 19: 30-40.

GUTSELL S. L., JOHNSON E. A., 2002. Accurately ageing trees and examining their height-growth rates: implications for interpreting forest dynamics. British Ecological Society, Journal of Ecology 90: 153-166.

HEINZE W., SCHREIBER D., 1984. Eine neue Kartierung der Winterhärtezonen für Gehölze in Europa. Mitteilungen der Deutschen Dendrologischen Gesellschaft 75: 11-56.

ISIK F., LI B., 2003. Rapid assessment of wood density of live trees using the Resistograph for selection in tree improvement programs. Canadian Journal of Forestry Resources 33: 2426-2435.

KAENNEL M., SCHWEINGRUBER F. H., 2004. Glossary of Dendrochronology. http://www01.wsl.ch/glossary [19.11.2004].

KOSMALA M., ROSŁON-SZERYŃSKA E., SUCHOCKA M., 2009. Metoda oceny kondycji drzew z uwzględnieniem bezpieczeństwa i uszkodzeń mechanicznych. IGPiM, Warszawa.

LARSEN F. K., KRISTOFFERSEN P., 2002. Tilia's physical dimensions over time. Journal of Arboriculture 28(5):

209-214.
LINSEN L., KARIS B. J., McPHERSON E. G., HAMANN B., 2005. Tree Growth Visualization. The Journal of WSCG [January 31-February 4] 13: 81-88.
LOEWENSTEIN E. F., JOHNSON P. S., GARRETT H. E., 2000. Age and diameter structure of a managed uneven-aged oak forest. Canadian Journal of Forestry Resources 30: 1060-1070.
ŁOMNICKI A., 2002. Wprowadzenie do statystyki dla przyrodników. PWN, Warszawa.
MAJDECKI L., 1980-1986. Tabela wiekowa drzew. Rkps, Oddział Architektury Krajobrazu SGGW, Warszawa.
MAJDECKI L., 1993. Ochrona i konserwacja zabytkowych założeń ogrodowych. PWN, Warszawa.
McPHERSON E. G., MACO S. E., SIMPSON J. R., PEPER P. J., XIAO Q., VAN DER ZANDEN A. E., 2002. North Western Washington and Oregon Community Tree Guide: Benefits, Costs and Strategic Planting. International Society of Arboriculture, Pacific Northwest Chapter. Silverton, Oregon.
McPHERSON E. G., 2006. i-Tree: Demonstrating that Trees Pay Us Back! USDA Forest Service. Center for Urban Forest Research. http://www.fs.fed.us/psw/programs/cufr/products/powerpoint/cufr_650_48_Webcast_04-25-06a.swf [05.07.2006].
McPHERSON E. G., 2007. Benefit-based Tree Valuation. Arboriculture and Urban Forestry 33(1): 1-11.
MITCHELL A., 1979. A Field Guide to the Trees of Britain and Northern Europe. William Collins Sons & Co., London.
MORSE S. C., 1978. Trees in the town environment. Journal of Arboriculture 4: 1-6.
MOTULSKY H. J., CHRISTOPOULOS A., 2003. Fitting models to biological data using linear and nonlinear regression. A practical guide to curve fitting. GraphPad Software Inc., San Diego CA. www.graphpad.com [06.04.2005].
NEELY D. (ed.),1988. Valuation of landscape trees, shrubs and other plants. 7th ed. Urbana, II: International Society of Arboriculture.
NETER J., WASSERMANN W., 1974. Applied linear statistical models. Richard D. Irwin Inc., Homewood, Illinois.
PEPER J. P., McPHERSON G. E., MORI S. M., 2001. Equations for predicting diameter, height, crown width and leaf area of San Joaquin Valley street trees. Journal of Arboriculture 27(6): 306-317.
PIGOTT C. D., 1989. Estimation of the age of lime-trees (*Tilia* ssp.) in parklands from stem diameter and ring counts. Arboricultural Journal 13: 289-302.
ROKOSZA J., 1996. Wiek drzew. W: Rysunek odręczny dla architektów krajobrazu. Rylke J. (red.). Wydawnictwo SGGW, Warszawa: 164-176.
SHIGO A., 1996. Troubles In the Rhizosphere. Tree Care Industry 10(7). http://www.chesco.com [22.07.2005].
SIEWNIAK M., 1990. Gospodarka drzewostanem w założeniach parkowo-ogrodowych. Komunikaty Dendrologiczne 16: 1-46.
SIEWNIAK M., KUSCHE D., 1994. Baumpflege Heute. Patzer Verlag, Berlin-Hannover.
SOKAL R. R., ROHLF F. J., 1981. Biometry. The principles and practice of statistics in biological research. 2nd ed. W. H. Freman and Co., New York.
SZCZEPANOWSKA H. B., 2001. Drzewa w mieście. Hortpress, Warszawa.
SZCZEPANOWSKA H. B., 2009. Synteza badań i założenia merytoryczne metody wyceny wartości drzew dla warunków polskich. IGPiM, Warszawa.
TAYLOR H. M., RATLIFF L. F., 1969. Root growth pressures of cotton, peas and peanuts. Agronomy Journal 61: 398-402.
WEBER K., MATTHECK C., 2005. The Effects of Excessive Drilling on Wood Decay in Trees. Forschungszentrum Karlsruhe GmbH in der Helmholtz-Gemeinschaft. Institute for Materials Research. Karlsruhe, Germany. http://www.imlusa.com/index.php [23.05.2006].
WHITE J., 1998. Estimating the age of large and veteran trees in Britain. Forestry Commission – information note. http://www.forestry.gov.uk [11.10.2004].