

# MIKROPRZESZŁOŚĆ

Badania specjalistyczne w archeologii



pod redakcją  
Aldony Kurzawskiej i Iwony Sobkowiak-Tabaki



WYDZIAŁ  
ARCHEOLOGII

# MIKROPRZESZŁOŚĆ

Badania specjalistyczne w archeologii

pod redakcją

Aldony Kurzawskiej i Iwony Sobkowiak-Tabaki

Poznań 2021

Mikroprzeszłość  
Badania specjalistyczne w archeologii

Recenzje:  
dr hab. Maria Lityńska-Zajac, prof. IAE PAN  
dr hab. Marek Nowak, prof. UJ

Redakcja:  
Aldona Kurzawska  
Iwona Sobkowiak-Tabaka

Opracowanie techniczne i skład komputerowy:  
Bartłomiej Gruszka

Korekta językowa:  
Agnieszka Gruszka

Projekt okładki i rycin poprzedzających rozdziały:  
Przemysław Matejko

ISBN: 978-83-946591-8-9

<https://doi.org/10.14746/WA.2021.1.978-83-946591-8-9>

Monografia jest dostępna online w Repozytorium Uniwersytetu im A. Mickiewicza w Poznaniu  
<https://repozytorium.amu.edu.pl/>

Wydział Archeologii  
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu

Publikacja dofinansowana z Projektu Wydziału Archeologii nr DEC/19/WArch/2021

Copyright by Faculty of Archaeology Adam Mickiewicz University in Poznań and authors

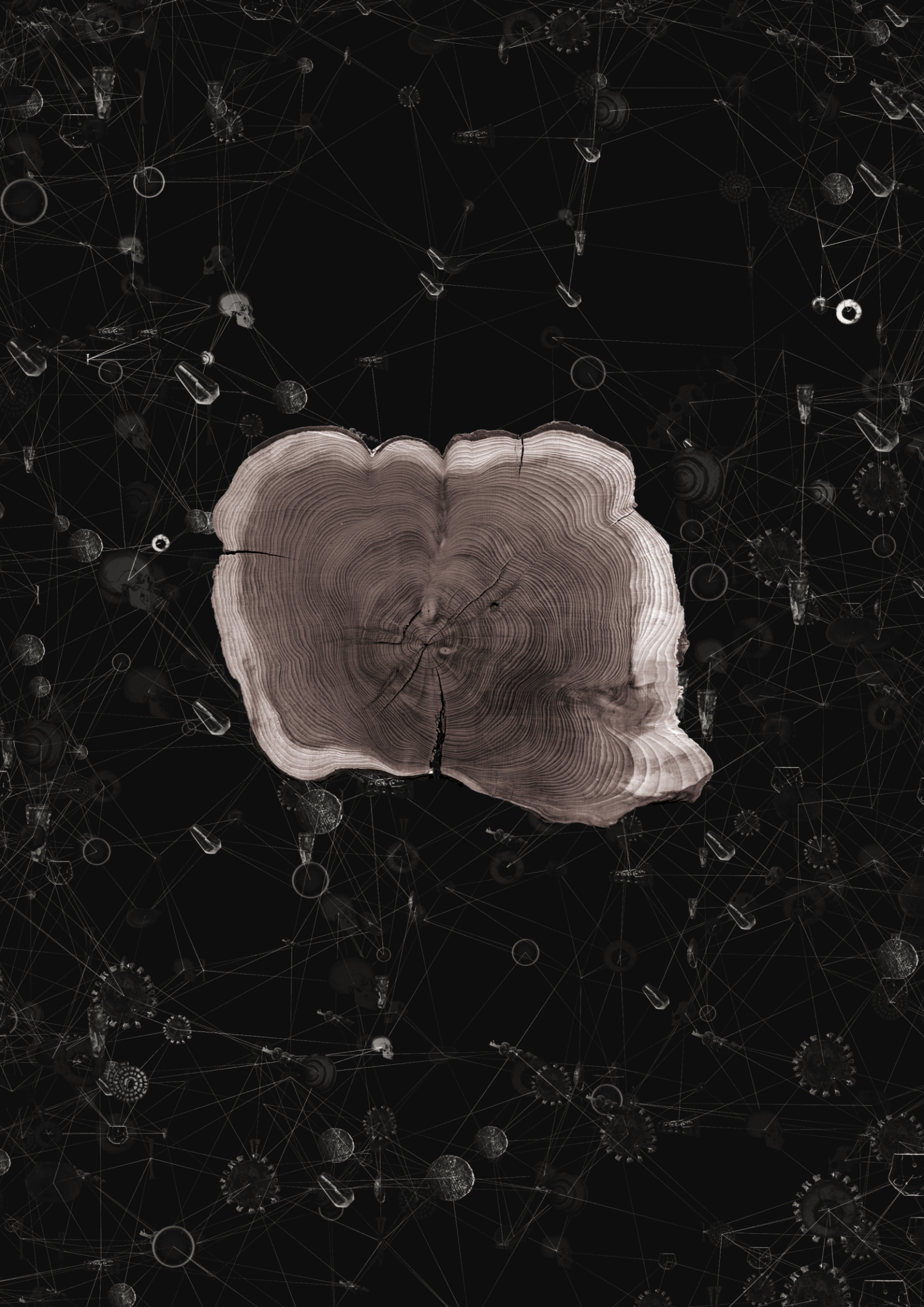
Poznań 2021

Nakład:  
200 egz.

## SPIS TREŚCI

Przedmowa	5
Andrzej Michałowski	
Wprowadzenie	7
Aldona Kurzawska, Iwona Sobkowiak-Tabaka	
Palinologia	13
Piotr Kołaczek, Monika Karpińska-Kołaczek, Sambor Czerwiński, Katarzyna Marcisz, Mariusz Lamentowicz	
Archeobotanika	31
Magdalena Moskal-del Hoyo	
Dendroarcheologia	67
Henryk P. Dąbrowski	
Mikroskamieniałości okrzemkowe	89
Monika Rzodkiewicz	
Wioślarki	115
Izabela Zawiska	
Archeoentomologia	131
Marcin Kadej, Szymon Konwerski, Agata Hałuszko	
Archeomalakologia	155
Aldona Kurzawska	
Izotopy stabilne węgla ( $\delta^{13}\text{C}$ ) i tlenu ( $\delta^{18}\text{O}$ ) w archeomalakologii	181
Karina Apolinarska	
Archeozoologia	199
Jarosław Wilczyński	

Antropologia fizyczna	219
Dorota Lorkiewicz-Muszyńska, Julia Sobol, Wojciech Kociemba, Anna Hyrchała, Mariusz Glapiński	
Archeogenetyka	249
Maciej Chyleński	
Mikromorfologia	277
Karolina Leszczyńska, Michał Jankowiak	
Petroarcheologia	297
Piotr Gunia, Ewa Lisowska	
Surowce krzemionkowe – możliwości badań	315
Iwona Sobkowiak-Tabaka	
Traseologia	333
Katarzyna Pyżewicz	
Ceramika – badania petroarcheologiczne	353
Piotr Gunia, Marta Krueger, Ewa Lisowska	
Ceramika – badania osadów organicznych wnętrza naczyń	367
Marta Krueger	
Tekstylnia	387
Maria Cybulska, Anna Drązkowska	
Archeometalurgia	407
Marcin Biborski, Mateusz Biborski	
Mikroskopy stosowane w archeologii	431
Piotr Gunia, Ewa Lisowska, Aldona Kurzawska	
Ręczny spektrometr fluorescencji rentgenowskiej (XRF) w archeologii	443
Michał Krueger	
Wykaz autorów	451



# Dendroarcheologia

Henryk P. Dąbrowski

---

## WSTĘP

Zgodnie z najkrótszą, ale kompletną definicją, dendrochronologia jest dyscypliną zajmującą się datowaniem słoików przyrostu rocznego drewna, czyli synchronizacją przyrostów rocznych z latami kalendarzowymi (Zielski i Krąpiec 2004). Najważniejszą cechą datowania metodą dendrochronologiczną jest możliwość określania wieku drewna z dokładnością do jednego roku, nieporównywalną do jakiegokolwiek obecnie stosowanej w archeologii, a precyzja ta jest taka sama dla drewna pochodzącego nawet sprzed kilkudziesięciu wieków (Baillie 1995).

## HISTORIA BADAŃ

W 1859 r. niemiecki emigrant Jacob Kuechler, osiadły w okolicach San Antonio w Teksasie, w lokalnym niemieckojęzycznym *Texas Staats-Zeitung* opublikował krótki artykuł zatytułowany *Das Klima von Texas* z listą suchych i deszczowych lat, przyporządkowując ich daty wąskim i szerokim przyrostom rocznym dębów (Campbell 1949). Jest to pierwsza publikacja, w której opisano reakcje przyrostów rocznych drzew na zmiany warunków środowiska.

Za twórcę dendrochronologii uznawany jest jednak amerykański astronom A.E. Douglass, badający

w pierwszych latach XX w. cykliczne zmiany aktywności słonecznej. Poszukując reakcji środowiskowych na te zjawiska założył, że mogą one być zakodowane w zmiennej szerokości słoików drzew. Zauważył mianowicie, że sekwencje przyrostowe zachowują zapis zmian elementów klimatu, a charakterystyczne wąskie przyrosty tworzone są w latach o niewielkich opadach (Douglass 1909; 1914). Równocześnie interesował się archeologią i badaniami starożytnych (w amerykańskim rozumieniu tego pojęcia) ruin indiańskich osiedli rozrzuconych na rozległych terenach Południowego Zachodu USA, geograficznego i kulturowego regionu o niezwykle znaczeniu dla pradziejów Ameryki Północnej, obejmującego stany Arizona i Nowy Meksyk oraz przylegające do nich części Kolorado, Nevady i Utah oraz meksykańskich Sonory i Chihuahua (Palonka 2019). W jego gorącym i suchym klimacie doskonale zachowało się wiele drewna archeologicznego, które obok rosnących także w tym regionie długowiecznych gatunków drzew (osiągających wiek 5 tys. lat sosn długowiecznych [*Pinus longaeva*] czy żyjących ponad 2 tys. lat sosn ościstych [*Pinus aristata*], mamutowców olbrzymich [*Sequoiadendron giganteum*], jałowców zachodnich [*Juniperus occidentalis*] i sekwoi wiecznie zielonych [*Sequoia sempervirens*]), okazało się znakomitym źródłem materiału badawczego dla dynamicznie rozwijającej się nowej metody. Po przeanalizowaniu setek próbek

drewna z zachodniej części Stanów Zjednoczonych, a także z Europy A.E. Douglass zauważył pewne prawidłowości w sekwencjach słoików, co umożliwiło mu skorelowanie poszczególnych słoików z sekwencji z latami kalendarzowymi. Na tej podstawie utworzył pierwszą wielowiekową chronologię, która pozwoliła na pierwsze datowania ruin indiańskich osiedli, kładąc podwaliny dendroarcheologii (Douglass 1929). W 1937 r. w Uniwersytecie Arizony w Tucson A.E. Douglass założył istniejące do dziś i wciąż wiodące w świecie Laboratory of Tree-Ring Research, posiadające obecnie największą na świecie kolekcję dendrochronologicznych próbek drewna. W ciągu kilku lat wokół twórcy dendrochronologii powstała grupa aktywnych badaczy zajmujących się archeologią Południowego Zachodu, co pozwoliło na wydatowanie wielu stanowisk archeologicznych leżących w tym regionie (Nash 1999). Wkrótce okazało się, że metodę dendrochronologiczną można również stosować przy datowaniu drewna znajdowanego na inuickich stanowiskach archeologicznych w Arktyce (Giddings 1940) i rozpoczęto prowadzenie badań tego typu w wielu miejscach USA. Również już w latach 30. XX w. uczniowie Douglassa podjęli pierwsze badania drewna pochodzącego ze szwajcarskich palafitów oraz egipskich trumien. Bez wątpienia, datowanie drewna metodą dendrochronologiczną zrewolucjonizowało możliwość określania wieku znalezisk archeologicznych (Nash 2000). Przede wszystkim za najważniejszą zaletę metody uznać należy nieosiągalną innymi sposobami dokładność określania wieku drewna do jednego roku a czasem nawet do sezonu (lato, zima) z niezmienną precyzją, nawet dla najdawniejszych okresów. Analiza dendrochronologiczna poprzez swoją niezależność wobec innych sposobów datowania pozwala na pewniejsze i nieporównywalnie dokładniejsze określenie wieku niż te oparte na analizie typologicznej, stylistycznej czy technologicznej, np. w przypadku ceramiki (Ważny 2001). Wszak w studiach nad przeszłością umiejscowienie w czasie badanych wydarzeń czy zjawisk jest jedną z kluczowych informacji. Pośrednie dane o dawnym klimacie i środowisku możliwe są do odczytania oraz datowania przy wykorzystaniu różnych źródeł pośrednich, takich jak jeziorne warwy, pyłki roślin, czy też lodowe rdzenie, jednak słoje drzew powstające co rok, dzięki analizie dendrochronologicznej, zapewniają najwyższą

precyzję i dokładność datowania. Warto zaznaczyć, że w chyba powszechnie znanej (przynajmniej z nazwy) metodzie datowania radiowęglowego dokładnie wydatowane dendrochronologicznie pojedyncze słoje stanowią źródło materiału porównawczego, a także wykorzystywane są w kalibrowaniu krzywych  $^{14}\text{C}$  (Baillie 2009; Becker 1993).

Po II wojnie światowej dendrochronologia zaczęła się rozpowszechniać poza Ameryką Północną, znalazła szerokie zastosowanie początkowo w Europie, a następnie na pozostałych kontynentach i dziś uprawiana jest niemal na całym świecie. Pierwsze próby datowania dendrochronologicznego drewna archeologicznego znalezionego w Polsce podjęto po odkryciu w Biskupinie osady ludności kultury łużyckich pól popielnicowych. Fragmenty drewna w 1938 r. wysłano do Instytutu Geochronologii w Sztokholmie, obecnie jednak, opublikowane po II wojnie światowej wyniki tych badań nie spełniają wymogów stawianych tego typu studiom (de Geer 1956). Kolejne próby podjęto w latach 80. XX w., również bezskutecznie (Ważny 2001). W 1993 r. ogłoszono wyniki badań Tomasza Ważnego, które potwierdzono w roku 2009 (Ważny 1993; 2009). Okres największej aktywności budowlanej mieszkańców osady w Biskupinie ustalono na lata około 737 r. p.n.e. (Ważny 2001; 2009). Również na lata około połowy VIII w. p.n.e. wydatowano drewno grodu ludności kultury łużyckich pól popielnicowych w Wicinie (Krąpiec i Szychowska-Krąpiec 2013). W Polsce od końca lat 80. XX w. systematycznie są budowane chronologie lokalne, umożliwiające uzyskanie wiarygodnych datowań dla coraz większego zakresu terytorialnego, a także chronologicznego dziejów i pradziejów. Dzieje się tak dzięki temu, że coraz więcej próbek drewna pozyskanego podczas wykopalisk archeologicznych oraz badań obiektów dawnej architektury trafia do laboratoriów dendrochronologicznych, co świadczy o rosnącej w środowisku archeologów i historyków architektury świadomości możliwości, jakie stwarza datowanie dendrochronologiczne. Najnowsza literatura specjalistyczna obfituje w wyniki i interpretacje analiz dendroarcheologicznych. Warto przywołać chociaż kilka przykładów takich badań. Datowania dendrochronologicznego drewna użytego do budowy wałów grodu w Gieczu na lata 60. IX w. rzuciły nowe światło na rolę tego ośrodka dla dynastii piastowskiej (Krąpiec

i Krysztofiak 2003). Ciekawym przykładem zastosowania dendrochronologii jest określanie wieku szeroko rozpowszechnionego na terenie słowiańszczyzny środka transportu – łodzi jednopiennych (tzw. dłubanek) (Pazdur i in. 2001). Ponadto analizy architektoniczne uzupełniane są często o datowania dendrochronologiczne, przynosząc wciąż nowe rozstrzygnięcia dotyczące dziejów budownictwa (Prarat 2019; Schaff i Prarat 2018) oraz włączając się w poszukiwania najstarszych budowli drewnianych w Polsce, do których obecnie zaliczane są kościoły w Krzyżowicach, pow. brzeski (1327), Domachowie, pow. gostyński (1369), Tarnowie Pałuckim, pow. wągrowiecki (1374) i Kosieczynie, pow. świebodziński (1389) (Krąpiec, niepubl.; Ważny i Wyrwa 2006; Ważny 2007).

Postępowi technologii komputerowych, cyfrowej dokumentacji oraz obróbki i analizy obrazu towarzyszy stały rozwój metody i jej zastosowań, a rosnące zasoby danych umożliwiają wydłużanie chronologii w głąb pradziejów, przez co możliwe staje się datowanie drewna na coraz większych obszarach, pochodzącego z coraz dawniejszych epok (Hillam i in. 1990; Maczkowski i in. 2021; Rybniček i in. 2020). Obecnie najważniejsze laboratoria dendroarcheologiczne, w których analizowane jest drewno zabytkowe z terenu Polski, znajdują się w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie oraz w Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu. W 2016 r. w Muzeum Archeologicznym w Biskupinie powstała pierwsza w Polsce muzealna pracownia dendroarcheologiczna. Wyniki datowań dendroarcheologicznych publikowane są w wielu czasopismach archeologicznych o niemal nieograniczonym obecnie dostępie, najważniejszymi zaś czasopismami dendrochronologicznymi są wydawany w Tucson od 1934 roku przez Tree Ring Society *Tree-Ring Research* (do roku 2000 r. jako *Tree-Ring Bulletin*) oraz *Dendrochronologia* wydawana od 1983 r.

## SŁOJE I ICH SEKWENCJE

Słoje o zmiennej szerokości, najwyraźniej widoczne na przekroju poprzecznym pnia zwykle jako koncentryczne kręgi ułożone wokół jego rdzenia, reprezentujące kolejne lata życia drzewa, ułożone w ciągi (sekwencje), są podstawowym źródłem danych i obiektem badań dendrochronologicznych.

Przyrosty są efektem podziału komórek leżącego w strefie podkorowej na obwodzie pnia kambium (miazgi twórczej), tkanki aktywnej w okresie wegetacyjnym, po zakończeniu którego następuje okres spoczynku. Kambium wytwarza tkankę drewna odkładającą się w cyklu rocznym w ciągu całego życia drzewa w postaci kolejnych warstw. Proces ten określany jest jako przyrost wtórny, czyli przyrost na grubość pnia, gałęzi oraz korzeni. W pewnym uproszczeniu: wyraźne słoje są charakterystyczne dla drewna rosnących w strefie klimatów umiarkowanych o wyraźnie zróżnicowanych porach roku roślin drzewiastych. Wąskie słoje powstają w latach o niekorzystnych, a szerokie w latach o korzystnych dla danego gatunku drzewa środowiskowych warunkach wegetacyjnych, które nakładają się na cechy genetyczne danego gatunku. W naturalnym, rocznym rytmie przyrostowym pod wpływem wyjątkowych warunków środowiskowych zdarzają się jednak anomalie przyrostowe wpływające na analizy dendrochronologiczne. Są to tzw. wypadające, brakujące słoje (*missing rings*), w Europie częściej dotyczące drzew iglastych (Koprowski i in. 2011), oraz podwójne przyrosty – tzw. fałszywe słoje (*false rings*). Zjawiska te polegają na tym, że na części lub na całym obwodzie pnia w niektórych latach nie wytwarza się słoja, a także w pewnych przypadkach drzewo może wykształcić dodatkowy, fałszywy słoja w jednym roku. Badanie pełnego przekroju poprzecznego pozwala stwierdzić takie przypadki, a w procesie budowania chronologii są one eliminowane za pomocą analiz statystycznych (Schweingruber 1989; Speer 2010; Zielski i Krąpiec 2004).

Wyraźny rysunek słoików cechuje wszystkie występujące naturalnie na terenie Polski drzewa iglaste: cis pospolity (*Taxus baccata*), jałowiec pospolity (*Juniperus communis*), jodła pospolita (*Abies alba*), modrzew europejski (*Larix decidua*), świerk pospolity (*Picea abies*) oraz rodzime gatunki sosny (pospolita *Pinus sylvestris*, limba *P. cembra*, i górska *P. mugo*). Wyraźnymi słoikami charakteryzują się niektóre gatunki drzew liściastych, przede wszystkim dęby (*Quercus* sp.) i wiązy (*Ulmus* sp.) oraz jesion wyniosły (*Fraxinus excelsior* L.) i grochodrzew (*Robinia pseudoacacia* L.), które określane są jako pierścieniowonaczyniowe, czyli takie, w których drewnie średnica naczyń drewna wczesnego jest wyraźnie większa od średnicy naczyń drewna późnego. Drewno wczesne powstaje wiosną,

natomiast drewno późne (ciemniejsze i gęstsze) formowane jest latem i obie te warstwy łącznie stanowią jeden przyrost roczny tworzący się w trakcie okresu wegetacyjnego. Drzewa liściaste, które nie wykazują wyraźnych różnic pomiędzy średnicą (światłem) naczyń drewna wczesnego i późnego, określane są jako rozpięzchłonaczyniowe. Do tej grupy należy wiele szeroko rozpowszechnionych gatunków drzew, m.in. brzozy (*Betula* sp.), klony (*Acer* sp.), lipy (*Tilia* sp.), olchy (*Alnus* sp.), topole (*Populus* sp.), wierzby (*Salix* sp.), grab pospolity (*Carpinus betulus* L.), a także drzewa owocowe. Drewno buka zwyczajnego (*Fagus sylvatica* L.) przez część badaczy zaliczane do grupy drzew o drewnie rozpięzchłonaczyniowym zwykle uznaje się za tzw. przejściowonaczyniowe lub półpięściowonaczyniowe (Schweingruber 1989; Speer 2010; Zielski i Krąpiec 2004).

Jak wspomniano wyżej, sekwencje następujących po sobie kolejno szerokich i wąskich słoików drewna są głównym obiektem badań dendrochronologicznych. Naczynia tworzące słoje, układające się w sekwencje przyrostowe, odkładają się w drewnie na stałe, tworząc trwałe zapis reakcji organizmu na czynniki środowiskowe w kolejnych latach życia drzewa, z których za najistotniejsze uznaje się temperaturę powietrza oraz opady atmosferyczne. Zapis ten zachowuje się niezmienny tak długo, jak długo jest w stanie zachować się drewno i nawet wiele stuleci po ścięciu drzewa przechowuje ono w pierwotnej formie swoją najważniejszą cechę wykorzystywaną w procesie datowania – sekwencję przyrostową. W sprzyjających warunkach w zwęglonym drewnie zachowuje się również niezmienną sekwencję przyrostową, którą również można poddać analizom dendrochronologicznym (Krąpiec 1996a; 1998a; Pichler i in. 2013).

Dendrochronologia zajmuje się odczytywaniem i interpretacją tego zapisu, który jest nieocenionym źródłem informacji o wysokiej, rocznej rozdzielczości wartościowej szczególnie dla odległych okresów sprzed instrumentalnego pomiaru parametrów pogodowych (Przybylak i in. 2020).

Podstawowym narzędziem datowania dendrochronologicznego są bezwzględnie wydatowane wielowiekowe chronologie standardowe (tzw. standardy chronologiczne). Są to ciągi liczbowe reprezentujące zmiany szerokości przyrostów rocznych właściwe dla jednego gatunku lub rodzaju drewna.

Ten drugi przypadek w Polsce i Europie Zachodniej dotyczy dębów. Chronologie dębowe konstruowane są zwykle z sekwencji przyrostowych dwóch najliczniej występujących na terenie Polski gatunków tego rodzaju, często tworzących mieszańce – dębu szypułkowego (*Quercus robur* L.) i dębu bezszypułkowego (*Quercus petraea* [Matt.] Lebl.).

Najdłuższe chronologie na świecie zestawiono dla drzew rosnących na terenie Niemiec i osiagając długość 12 460 lat (południowoniemiecka, tzw. Hohenheim, sosnowo-dębowa, Friedrich i in. 2004), 11 370 lat (sosnowa, Becker 1993) i 10 076 lat (dębowa, Becker 1993) oraz Irlandii (7272-letnia dębowa, Brown i in. 1986; Pilcher i in. 1984). Ponadto złożono chronologię jałowców ze wschodnich wybrzeży Morza Śródziemnego (7020 lat, Kuniholm 2003) i sosny długowiecznej (*Pinus longaeva* D.K. Bailey) z Kalifornii, USA, (8700 lat, Ferguson i in. 1985).

Dla terenu Polski najdłuższe chronologie dębowe zestawili M. Krąpiec (1996b; 1998b) (dla Polski południowej o długości 2474 lat, dla Dolnego Śląska dla lat 780-1994 i Wielkopolski obejmując lata 449-1994) oraz T. Ważny (1990) (dębowa dla Pomorza Gdańskiego sięgająca roku 996 AD). Najdłuższy dendrochronologiczny standard sosnowy dla Pomorza Gdańskiego i Kujaw obejmujący lata 1106-1991 zestawili A. Zielski (1992; 1997), natomiast dla Małopolski chronologię sosnową dla lat 1091-2006 złożyła E. Szychowska-Krąpiec (2010). Źródłem danych dla takich chronologii są setki lub nawet tysiące pojedynczych próbek drewna.

Najdłużej żyjącymi drzewami na świecie są sosny długowieczne (*Pinus longaeva*) rosnące w górach Kalifornii, Nevady i Utah, osiagające wiek nawet 5000 lat. Spośród drzew żyjących w Polsce największą długość życia osiagają cisy i dęby.

Dendrochronologia jest metodą stosunkowo młodą, jednak zdążyła rozwinąć się w kilka głównych nurtów takich, jak dendroklimatologia, dendroekologia, dendrogeomorfologia i dendrogeologia. Ponadto metodę dendrochronologiczną, czyli korelację zmian szerokości nawarstwień (jako pośrednich danych o różnorodnych zjawiskach) z latami kalendarzowymi wykorzystuje się w badaniach sklerochronologicznych, których przedmiotem są szkielety koralowców, muszle mięczaków (por. Apolinarska, w tym tomie), rybie łuski, czy też otolity ryb (struktury kostne związane ze zmysłem równowagi). Początkowo

dendrochronologia znalazła zastosowanie w archeologii i jako taka określana jest jako dendroarcheologia (uznawana jako dendrochronologia *sensu stricto*), a jej podstawowym zadaniem jest datowanie drewna archeologicznego oraz na potrzeby historii sztuki czy też historii architektury (Zielski i Krąpiec 2004).

## DENDROARCHEOLOGIA I DATOWANIE

W badaniach dendroarcheologicznych kluczową rolę odgrywa powszechność występowania określonego gatunku drewna w znaleziskach archeologicznych wynikająca z dostępności surowca drzewnego związanej z naturalnym zasięgiem gatunku. Z tego powodu na terenie Polski, mimo że prowadzone są badania dendrochronologiczne wielu gatunków drzew żyjących, to najszerze zastosowanie w dendroarcheologii znajduje drewno dębów (pospolitego dębu szypułkowego [*Quercus robur* L.] i nieco rzadziej występującego dębu bezszypułkowego [*Quercus petraea* [Matt.] Lebl.]) oraz rosnącej na terenie niemal całej Polski, choć dość trudnej w datowaniu, sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.). Drewno tych gatunków można uznać za najbardziej rozpowszechniony surowiec drzewny używany od wieków w Polsce, zwłaszcza w budownictwie. Rosnące znaczenie w dendroarcheologii zyskuje drewno jodły pospolitej (*Abies alba* Mill.), której zasięg występowania w Polsce ograniczony jest do południowej części kraju, w tym terenów górskich (Szychowska-Krąpiec 2000). Gatunek ten charakteryzuje się silnym sygnałem dendrochronologicznym o dużym zasięgu geograficznym i jest uznawany za dobrze nadający się do wykorzystania w dendrochronologii (Becker i Giertz-Siebenlist 1970). Południowopolska chronologia jodłowa zestawiona na podstawie materiałów z niemal całego naturalnego zasięgu tego taksonu w Polsce obejmuje lata 1106-1998 n.e. (Szychowska-Krąpiec 2000). Kolejnym gatunkiem zysującym na znaczeniu w dendroarcheologii jest świerk pospolity (*Picea abies* [L.] Karst.), naturalnie występujący w Polsce południowej oraz północno-wschodniej (Spyt i in. 2016).

Ważną właściwością ograniczającą możliwości datowania jest ograniczenie geograficzne tzw. sygnału dendrochronologicznego. Drzewa poszczególnych gatunków rosnące na określonym terenie wykazują wspólny sygnał dendrochronologiczny – jest to model sekwencji przyrostowej związany

z uwarunkowaniami geomorfologiczno-klimatycznymi właściwy dla regionu. Zjawisko to powoduje ograniczenie możliwości datowania chronologiami z różnych regionów sekwencji drzew rosnących na terenach o innych cechach środowiska. Wzrost odległości stanowisk, na których rosły drzewa, powoduje, że podobieństwo ich sekwencji przyrostowych maleje i staje się nieistotne statystycznie. Stąd często trudne lub wręcz niemożliwe jest datowanie sekwencji przyrostowej drzew rosnących w różnych częściach Polski, dla której wyróżniono kilka regionów jednorodnych pod względem wspólnego sygnału dendrochronologicznego (Krąpiec i Ważny 1994; Zielski i Krąpiec 2004). Zjawisko to jednak wykorzystywane jest w studiach nad pochodzeniem drewna (powszechnie używany jest angielski termin *dendroprovenancing*), gdyż umożliwia określenie regionu, z którego pochodzi drewno, często znacznie odległego od miejsca jego znalezienia. Badania tego typu pozwoliły na wyznaczenie m. in. Polski jako rejonu pochodzenia drewna wykorzystywanego w budownictwie angielskim we wczesnym okresie nowożytnym. Również tzw. bałtyckie chronologie dębowe używane są w datowaniu podobrazii stosowanych od XV do XVII w. m.in. przez holenderskich, flamandzkich i północnoniemieckich malarzy (Bridge 2012; Daly 2007; Eckstein 2005; Hillam i Tyers 1995; Kuniholm 2000). Bardzo ciekawą gałęzią studiów nad pochodzeniem drewna są badania znalezisk statków i okrętów, które zwykle odnajdywane są z dala od miejsc, w których je budowano i skąd pochodził surowiec wykorzystany do ich budowy (Bridge 2011; Creasman 2010). Duże zainteresowanie wywołują zwykle wyniki datowań dendrochronologicznych zabytkowych instrumentów muzycznych, zwłaszcza skrzypiec ze względu na osiągnięte przez nie wysokie ceny, jak w przypadku instrumentów wykonanych lub określanych jako wykonane przez słynnych lutników (Grissino-Mayer i in. 2004; Bernabei 2021).

Badania dendrochronologiczne i dendroarcheologiczne prowadzone są również w regionach bezleśnych, do których drewno transportowane jest wraz z prądami morskimi. Silny sygnał dendrochronologiczny świerków i modrzewi rosnących w tajdze pozwolił na określenie miejsc pochodzenia i datowanie drewna dryftowego znajdowanego na wybrzeżach Arktyki (Dąbrowski 2006; Shumilov i in. 2020).

## STANOWISKO – POBIERANIE PRÓBEK

Datowanie absolutne drewna archeologicznego jest najważniejszym celem w strategii określonej przez Zielskiego i Krąpca (2004) jako ARCHEO. Jej pierwszym etapem jest dokładna i wieloaspektowa dokumentacja znaleziska drewna i wytypowanie odpowiednich próbek z przeznaczeniem do badań laboratoryjnych.

Liczba słoików odpowiada na pytanie, ile lat żyło drzewo i służy określaniu wieku drzewa, natomiast datowanie dendrochronologiczne poprzez porównywanie sekwencji przyrostów rocznych (słoików) określa, kiedy powstał każdy słoik analizowanego ciągu mówi więc, kiedy żyło to drzewo. Zatem u podstaw badań dendrochronologicznych stoi pozyskanie danych, jakimi są szerokości kolejnych słoików w sekwencji. Aby spełnić wymogi metodyczne właściwe dla procedur statystycznych stosowanych w procesie datowania, zmierzona sekwencja przyrostowa (ciąg kolejnych słoików) badanej próbki powinna być nie krótsza niż 50 słoików. W przypadku drewna dębowego dopuszczalne jest datowanie sekwencji o długości 30 słoików, jednak w każdym przypadku szansa na prawidłowe wydatowanie rośnie wraz z długością sekwencji. Jak już wspomniano, drewno sosnowe jest zwykle uznawane za trudne w badaniach dendrochronologicznych i w jego przypadku najlepsze rezultaty osiąga się, analizując sekwencje o długości co najmniej 80-90 słoików. Największą szansę na prawidłowe datowanie dają próbki z kompletnym przekrojem o możliwie największej średnicy. Odpowiednią interpretację, a także spełnienie wymogów statystycznych, zapewni pobranie możliwie największej liczby próbek (dla konstrukcji drewnianej minimum takie stanowi 5-10), gdyż interpretacja wieku złożonej konstrukcji wymaga analizy serii próbek (brane pod uwagę są fazy budowy, naprawy, użycie wtórne surowca itp.).

Przy pobieraniu próbek przeznaczonych do badań dendrochronologicznych należy postępować w sposób podobny do pozyskiwania i zabezpieczania przedmiotów wykonanych z drewna i innych surowców organicznych. Bardzo ważne jest zabezpieczenie drewna przed wysuszeniem (np. poprzez szczelne przykrywanie eksplorowanych stopniowo elementów lub zawijanie drewna folią plastikową, przechowywanie w workach foliowych), które powoduje zniekształcenie przedmiotu, a także zwiększa niebezpieczeństwo jego dezintegracji (popękania,

ukruszenia się). Najmocniej na uszkodzenie narażone są zewnętrzne (obwodowe) warstwy drewna zawierające najmłodsze odcinki sekwencji przyrostowej (złożone z najmłodszych słoików), które są kluczowe w dokładnym datowaniu i określeniu daty ścięcia drzewa. Dokładne oczyszczanie z pozostałości gleby nie jest konieczne, nie należy również myć próbek wodą. W przypadku drewna pozyskanego w trakcie badań podwodnych należy utrzymać jego wilgotność poprzez przechowywanie w wodzie. Największe szanse uzyskania odpowiedniej do datowania sekwencji jest wycięcie plastra o grubości 4-7 cm, w razie potrzeby owinięcie go na obwodzie sznurkiem lub taśmą i umieszczenie w szczelnie zamkniętym worku foliowym. Plaster ten może być wycięty z końcowego fragmentu elementu (deski, belki, pala). Nieco inaczej należy postępować z bardzo delikatnymi węglami drzewnymi, które należy zabezpieczyć poprzez owinięcie papierem lub gazą i umieszczenie w pudełku wypełnionym np. ścinkami papieru amortyzującymi wstrząsy. Oczywiście niezbędne jest oznaczenie każdej próbki powiązanym z inwentarzem próbek unikalnym kodem (np. na metryce wykonanej z trwalszej od papieru kalki technicznej), który pozwoli na zidentyfikowanie datowanego elementu w procesie opracowania, czy też analizy chronologicznej obiektu lub stanowiska.

W przypadku odsłoniętych podczas badań wykopaliskowych wilgotnych, twardych, dobrze zachowanych elementów konstrukcji przeznaczonych do zachowania (np. wykorzystywanych jako fundament palowy lub podwalina) wciąż istniejących konstrukcji, używane są ręczne świdry przyrostowe (czasami zwane świdrami Presslera), stosowane również w leśnictwie do pozyskiwania wywierć w celu określania wieku drzew żyjących poprzez liczenie ich słoików. Umożliwiają one pobranie rdzenia o średnicy ok. 5-7 mm i długości sięgającej 800 mm. Świdry przyrostowe pozwalają na pozyskanie danych bez znacznej ingerencji w duży element drewniany. Jednak w przypadku fragmentów drewna odsłoniętych podczas wykopalisk najczęściej mamy do czynienia z drewnem o dość znacznym stopniu degradacji, w którego przypadku użycie świdra może zakończyć się rozłupaniem elementu lub też zniszczeniem (zmiażdżeniem) kluczowych w procesie określania wieku zewnętrznych (najmłodszych) przyrostów, które to były najsilniej narażone na degradację w procesie postdepozycyjnym i zwykle są najgorzej zachowaną



**Ryc. 1.** Fragment plastra drewna zaatakowanego przez szkodniki z odsłoniętą ścieżką pomiarową. W przypadku tego elementu pozyskanie wywiertu za pomocą świdra spowodowałoby zniszczenie próbki. Fot. S. Rosołowski

strefą próbki drewna. W takim przypadku najlepszym sposobem na uzyskanie próbki najlepiej nadającej się do datowania dendrochronologicznego jest wycięcie plastra lub tzw. wyrzynka. Plastry stanowiące przekrój poprzeczny całej próbki lub ew. wyżynki ukazujące jej fragment są najlepszym materiałem do wykonania pomiarów, ponieważ na większej powierzchni łatwiejsze jest odnalezienie najdłuższej sekwencji, niezakłóconej przez zaburzenia wzrostu drzewa (spowodowane np. wygięciem pnia lub gałęzi, ranami po zerwaniu kory lub pożarach, tzw. sękami – gałęziami wyrastającymi ze środka pnia, brakującymi lub podwójnymi przyrostami), czy też wpływem czynników zewnętrznych na drewno po jego ścięciu (działalnością szkodników drewna (por. Kadej i in., w tym tomie), procesami rozkładu i degradacji) (ryc. 1).

Próbki drewna suchego (np. z elementów konstrukcyjnych budynków, w tym więźb dachowych, belkowań stropów, szkieletów lub szalowań ścian) wchodzącego w skład dobrze zachowanych budowli, których statyka nie powinna być narażona podczas badań dendrochronologicznych, pozyskuje się jako wywierty przy użyciu specjalistycznych świrdrów do drewna suchego napędzanych wiertarkami elektrycznymi o dużym momencie obrotowym. Za pomocą takiego zestawu uzyskuje się rdzeń o średnicy zwykle wynoszącej kilkanaście milimetrów (ryc. 2).

Największą szansę na uzyskanie odpowiednio długiej i niezaburzonej sekwencji przyrostowej daje analiza plastra zawierającego możliwie największą

część obwodu pnia wraz z najmłodszymi przyrostami, o których istnieniu świadczy zachowana kora lub tzw. oflis. To właśnie fragmenty obwodu pnia z zachowaną korą lub pierścieniem podkorowym są najbardziej pożądane w badaniach dendroarcheologicznych. Stopień rozwinięcia tego słoja pozwala na odpowiedź na główne pytanie stawiane dendrochronologom dotyczące roku powalenia drzewa lub nawet sezonu – nieukształtowany w pełni słoć świadczy o ścięciu drzewa w sezonie wiosenno-wczesnoletnim (wykształcone jedynie drewno wczesne). Charakterystyczna obłą powierzchnia zachowana przynajmniej na części obwodu elementu drewnianego, zwana oflisem lub obliną, świadczy o usunięciu kory i pozwala na zidentyfikowanie słoja podkorowego przed wycięciem próbki. Wskazuje też dobre miejsce na pozyskanie próbki do badań.

Czas pomiędzy odsłonięciem elementu drewnianego a dostarczeniem go do laboratorium dendrochronologicznego powinien być możliwie najkrótszy. Dużą trudność z utrzymaniem drewna w stanie pozwalającym na prawidłowe datowanie (ale również konserwację) sprawiają eksplorowane przez dłuższy czas obiekty drewniane, systematycznie odsłaniane podczas wielu dni wykopalisk, zwłaszcza miejskich. Zewnętrzne warstwy takiego drewna ulegają gwałtownemu przesuszeniu, co prowadzi do zniekształcenia lub zniszczenia zewnętrznych warstw drewna. Doprowadzenie drewna do takiego stanu obniża szanse na jego prawidłowe datowanie (ryc. 3).



**Ryc. 2.** Świder do drewna suchego oraz wywierć wykonany takim świdrem. Fot. H.P. Dąbrowski



**Ryc. 3.** Plaster przesuszonego drewna z popękaną promieniowo warstwą bielu. Fot. S. Rosołowski

Odkryty podczas prac wykopaliskowych element drewniany oczywiście powinien podlegać takiej samej analizie stratygraficznej jak każdy inny przedmiot zabytkowy. Należy bardzo ostrożnie odnosić się do prób utożsamiania daty najmłodszego słoja próbki z datą powstania powiązanej z tym elementem jednostki stratygraficznej (np. warstwy kulturowej).

Idealną sytuacją jest poddanie analizom dendrochronologicznym wszystkich elementów drewnianych badanej konstrukcji, gdyż nawet przybliżone określenie wieku na podstawie samych oględzin fragmentu drewnianego jest niemożliwe. Umożliwia to dopiero analiza sekwencji szerokości kolejno następujących po sobie przyrostów rocznych, czyli w praktyce ciąg liczb odpowiadających zmierzonym z ustaloną dokładnością (zwykle do setnej części milimetra) słojom odpowiadająca zmianom ich szerokości. Obiektem dalszych badań jest sekwencja pomiarowa uzyskana podczas badań laboratoryjnych.

## BADANIA LABORATORYJNE

Po spreparowaniu, odpowiednim do stanu zachowania drewna, próbka poddawana jest badaniom laboratoryjnym. Badanie anatomiczne drewna przeznaczonego do datowania metodą dendrochronologiczną na dwóch etapach związane jest z koniecznością obserwacji pod dużymi powiększeniami. Pierwszym krokiem jest konieczność oznaczenia taksonu, które jest warunkiem prawidłowego prowadzenia dalszych analiz, ponieważ dla próbek archeologicznych drzew rosnących na terenie Polski istnieją niewielkie szanse na datowanie sekwencji przyrostowej jednego gatunku chronologią złożoną dla innego (tzw. telekoneksja), gdyż różne gatunki drzew różnie reagują na wpływ środowiska. W celu oznaczenia taksonomicznego drewna na podstawie jego budowy mikroskopowej wykorzystuje się mikroskopy tzw. biologiczne, przeznaczone do obserwacji próbek o małej grubości w świetle przechodzącym. Zwykle stosowane powiększenia wynoszą 40× lub 100×. Rozróżnienie najczęściej znajdowanego drewna sosnowego i dębowego przy pewnym doświadczeniu nie sprawia trudności i wystarczy do tego kilkakrotne powiększenie za pomocą ręcznej lupy (ryc. 4).

Pomiary szerokości kolejnych słoików wykonywane są przy użyciu połączonego z komputerem

stolika pomiarowego, na którym próbka przesuwana jest przed obiektywem nieruchomego mikroskopu stereoskopowego (obserwowana w świetle odbitym w powiększeniu zwykle od 7× do 80×), z okulem wyposażonym w krzyż celowniczy, a wielkość tego przesunięcia jest rejestrowana w programie komputerowym jako pojedynczy pomiar, np. szerokości całego przyrostu rocznego, drewna wczesnego lub drewna późnego (ryc. 5).

W wyniku zmierzenia kolejnych słoików próbki (od najstarszego do najmłodszego – od rdzenia w kierunku kory) powstaje ciąg liczbowy (sekwencja) zapisywany w programie komputerowym, reprezentujący sekwencję osobniczą. Uzyskana w wyniku pomiaru sekwencja przyrostowa badanej próbki (tożsama z sekwencją osobniczą drzewa lub jej fragmentem) rejestrowana jest w postaci tekstowego pliku komputerowego i jako taka podlega archiwizacji oraz komputerowym analizom statystycznym lub graficznym. Taka sekwencja przyrostów rocznych badanej próbki jest porównywana z chronologiami w celu odnalezienia podobieństwa umożliwiającego wydatowanie bezwzględne.

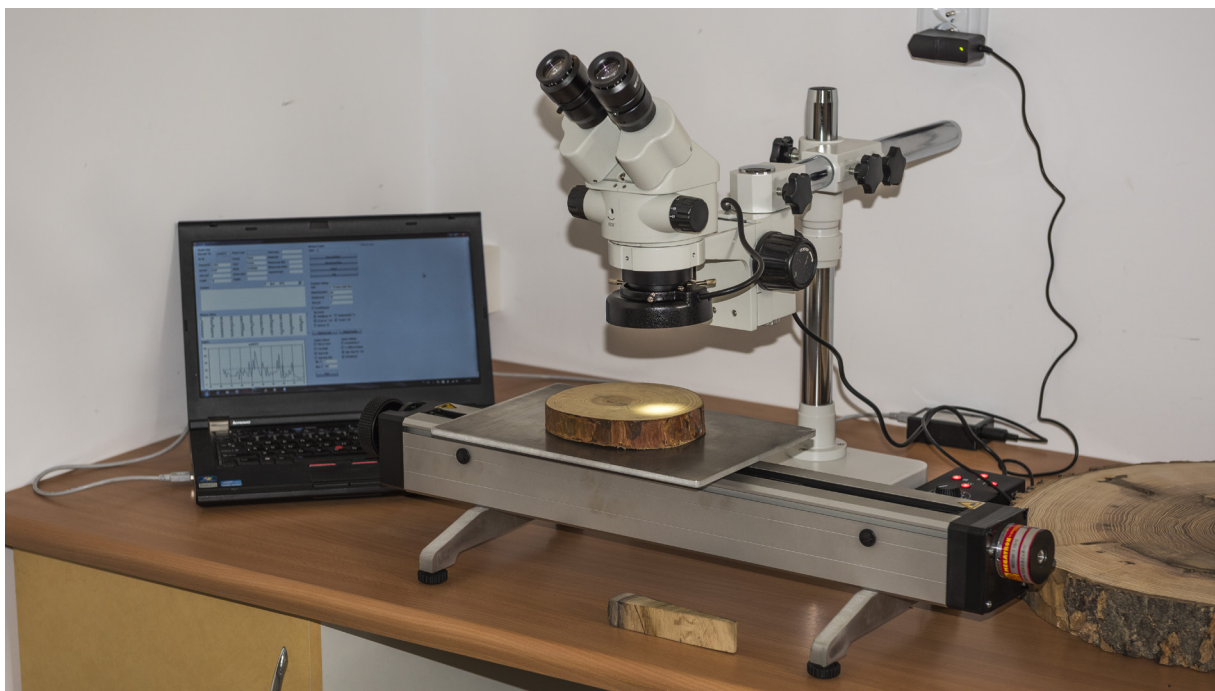
## CHRONOLOGIE

W dendrochronologii pojęcie chronologii obejmuje sekwencję przyrostów rocznych wyrażoną jako funkcję czasu. Przyrost roczny reprezentowany jest przez wartość liczbową (najczęściej wyrażoną w setnych milimetra) odwzorowującą szerokość słoja uzyskaną w wyniku pomiaru. Chronologie natomiast są ciągami (sekwencjami) takich wartości liczbowych lub opartymi na nich wykresami i podobnie jak sekwencje pojedynczych próbek archiwizowane są jako pliki komputerowe lub ich wydruki. Chronologia danego taksonu tworzona jest poprzez uśrednienie wartości szerokości przyrostów rocznych, pojedynczych sekwencji przyrostowych zsynchronizowanych kalendarzowo (odpowiednich dla tego samego roku kalendarzowego), poprzez dopasowanie wzoru przyrostowego właściwego dla taksonu i określonego terenu.

Do różnych celów badawczych tworzone są różne typy chronologii (np. chronologie indeksowane, standaryzowane, rezydualne), jednak w dendroarcheologii jako podstawowe narzędzie w procesie datowania wykorzystuje się najczęściej dwa typy chronologii: standardowe i „pływające”.



**Ryc. 4.** Próbkki drewna archeologicznego z drewna sosnowego i dębowego. Fot. S. Rosołowski



**Ryc. 5.** Dendrochronologiczny zestaw pomiarowy z komputerem. Fot. H.P. Dąbrowski

## Fragment sosnowej chronologii regionalnej KUJAWPOM

KUJAWPOM1168	238	306								
KUJAWPOM1170	186	261	269	236	381	346	292	206	249	190
KUJAWPOM1180	217	227	243	275	248	287	232	291	324	289
KUJAWPOM1190	374	320	272	227	262	215	273	286	285	263
KUJAWPOM1200	248	243	253	275	248	186	204	196	210	224
KUJAWPOM1210	228	194	160	208	242	210	212	184	217	161
KUJAWPOM1220	181	164	140	160	148	169	197	180	146	175
KUJAWPOM1230	144	177	136	125	120	135	137	191	137	144
KUJAWPOM1240	156	114	144	133	122	139	150	166	154	167
KUJAWPOM1250	140	123	134	145	109	142	151	127	115	111
KUJAWPOM1260	115	116	118	108	122	132	158	146	129	128
KUJAWPOM1270	132	161	102	112	111	116	103	93	93	94
KUJAWPOM1280	103	96	111	113	122	117	123	102	104	114
KUJAWPOM1290	125	130	112	110	104	113	114	101	93	113
KUJAWPOM1300	118	138	127	141	120	77	73	81	85	86
KUJAWPOM1310	99	69	89	112	103	104	118	124	114	121
KUJAWPOM1320	100	105	82	80	68	64	76	100	75	77
KUJAWPOM1330	76	72	58	56	82	79	86	76	76	75
KUJAWPOM1340	61	108	96	97	95					

Chronologia standardowa (standard dendrochronologiczny) jest chronologią absolutną (bezwzględną, a zatem wydatowaną), prowadzącą od współczesności możliwie najdalej w przeszłość lub wydatowaną na podstawie innej chronologii o známym wieku. Jest to ciąg cech przyrostów (zwykle ich szerokości w postaci reprezentujących je wartości liczbowych) złożony z wielu sekwencji przyrostowych przyporządkowanych latom kalendarzowym (wydatowanych). Jako przykład powyżej przedstawiono fragment obejmujący lata 1168-1344 sosnowego standardu dendrochronologicznego (chronologii regionalnej) KUJAWPOM zestawionej przez A. Zielskiego dla regionu kujawsko-pomorskiego w formacie Tucson. Wartości, reprezentujące kolejne lata, zapisano w wierszach od lewej do prawej z dokładnością do 0,01 mm (wartość 238 oznacza 2,38 mm, wartość 61 – 0,61 mm) (Zielski i Krąpiec 2004).

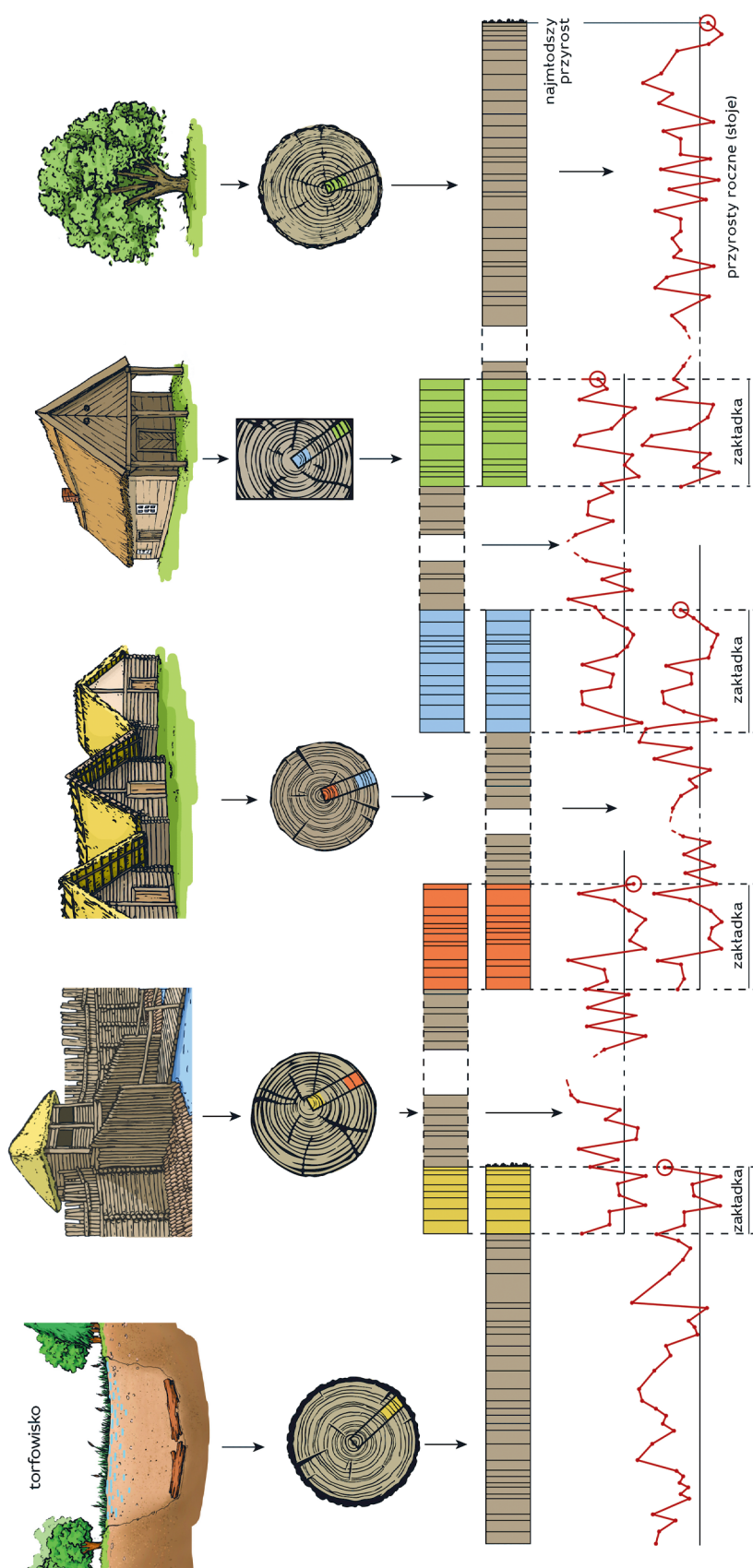
Chronologia „pływająca” (chronologia względna) złożona jest z wielu sekwencji przyrostowych wzajemnie skorelowanych o nieznanym jednak wieku (kolejne wartości ciągu nie są przyporządkowane latom kalendarzowym, czyli nie są wydatowane bezwzględnie).

Chronologie złożone są z wielu osobniczych sekwencji przyrostowych pokrywających ten sam

odcinek czasu, zachodzących na siebie, tak aby każdy rok w chronologii reprezentowany był przez pomiar z co najmniej kilkunastu sekwencji osobniczych (Krąpiec 2001).

Sekwencja osobnicza (krzywa dendrochronologiczna) to sekwencja przyrostowa jednego drzewa (w przypadku próbki pobranej z drzewa żyjącego, a więc takiego, którego wiek jest znany, ciąg ten jest absolutny – wydatowany bezwzględnie), a w przypadku drewna archeologicznego – pojedynczej próbki pozyskanej podczas badań wykopaliskowych.

Porównanie przebiegu sekwencji osobniczej (pochodzącej np. z próbki drewna archeologicznego) z chronologią bezwzględną pozwala na wydatowanie bezwzględne. Wykorzystywana jest w tym celu jedna z podstawowych procedur dendrochronologicznych: datowanie pomostowe (krzyżowe, *cross-dating*). Jego celem jest odnalezienie na odpowiednio długim (co najmniej 50 słoików, dla dębów może być to 30 słoików) fragmencie chronologii, czy też sekwencji osobniczej synchronicznego wzoru przyrostowego innej badanej sekwencji osobniczej lub też chronologii. W ten sposób również przebiega budowanie (wydłużanie) chronologii, również z uwzględnieniem co najmniej 50-letniej zakładki (30-letniej dla dębów) (ryc. 6).



**Ryc. 6.** Schemat zasady datowania pomostowego (*crossdating*). Rys. J. Luczka

## DATOWANIE I INTERPRETACJA WYNIKÓW

Datowanie dendrochronologiczne nie jest w stanie dać odpowiedzi na pytanie, kiedy wykonano przedmiot drewniany, kiedy i jak długo był używany ani kiedy został zdeponowany w ziemi, gdyż możliwości datowania ograniczają się do określenia, kiedy powstawały kolejne (w tym najmłodszy) słoje badanej próbki, a w szczególnych warunkach (zachowanego pierścienia podkorowego, ewentualnie, w przypadku drewna dębów, zachowanej przynajmniej części warstwy bielu), kiedy zostało ścięte drzewo. Taka też informacja podlega interpretacji po uwzględnieniu wszelkich danych dotyczących znaleziska.

Metoda dendrochronologiczna poprzez datowanie słojów umożliwia określenie daty ścięcia drzewa, a nie procesu, jaki po tym nastąpił.

Wydatowanie próbek drewna pozyskanych przez archeologa jest podstawowym działaniem dendrochronologa. Datowanie dendrochronologiczne, jako działanie niezależne nie może wpłynąć bezpośrednio na interpretację znalezisk, zwłaszcza na interpretację układu stratygraficznego. Jednak wyniki datowania dendrochronologicznego starannie zinterpretowanych stratygraficznie elementów drewnianych, zwłaszcza pochodzących z jednej konstrukcji/obiektu mogą wpłynąć na ostateczną interpretację datowania znaleziska oraz jego chronologii względnej. Stąd postulowana wyżej konieczność datowania wszystkich elementów spełniających wymogi metody dendrochronologicznej (odpowiedni gatunek drewna, odpowiednie zachowanie próbki i możliwa najdłuższa sekwencja umożliwiająca poddanie analizom statystycznym).

Przykładem prezentującym podnoszone postulaty może być konieczność datowania wieloelementowej konstrukcji drewnianej, tak aby możliwe było przeanalizowanie wszystkich jej części składowych, pozwalające na wydzielenie faz jej budowy, zidentyfikowanie użytych wtórnie elementów, a także ewentualnych napraw. Jednak interpretacja takich danych przeprowadzona zostanie przez archeologa lub historyka sztuki/architektury. Trudność z punktu widzenia dendrochronologa datowania wybiórczego konstrukcji złożonej z wielu drewnianych elementów można zilustrować datowaniem niewielkiego naczynia klepkowego, nawet z założeniem, że wszystkie jego części wykonano z drewna pochodzącego z jednego

drzewa. Na zdjęciu (ryc. 7) przedstawiono widok takiego naczynia znalezione w całości w latrynie na terenie Starego Miasta Elbląga i datowanego na podstawie zalegania w warstwie archeologicznej na XIV-XV w. Ocena „na oko” nie doprowadzi do wybrania jednej deski, która zawiera najmłodszą sekwencję, dlatego należy dokonać pomiaru wszystkich elementów składowych naczynia zawierających wymaganą metodą liczbę słojów.

Pomiędzy momentem ścięcia drzewa a wykorzystaniem jego drewna do wykonania przedmiotu, który nawet po wielu wiekach, może być poddany analizie dendrochronologicznej może upłynąć czas liczony w latach, którego długość jest trudna lub nawet niemożliwa do określenia. Okres ten obejmować może transport z lasu, suszenie, sezonowanie, składowanie przed sprzedażą, oczekiwanie na wykorzystanie przez wytwórcę, rzemieślnika (Haneca i in. 2009). W różnych okresach dziejów i prądziejów czas ten może być różny i związany ściśle z warunkami naturalnymi oraz kulturowymi właściwymi dla rozwoju cywilizacyjnego. Innego traktowania surowca drzewnego możemy spodziewać się w przypadku prądziejów, kiedy duże zalesienie umożliwiało dobry dostęp do drewna i konstruowanie budowli w niewielkiej odległości od źródeł surowca. W przypadku średniowiecznych inwestycji w dużych miastach często drewno było spławiane rzekami z odległych nawet terenów co było spowodowane odlesieniem najbliższych okolic. Ciekawym przykładem obrazującym opisywane zjawisko w późnym średniowieczu na początku nowożytności może być wykorzystywanie drewna eksportowanego poprzez porty południowego Bałtyku (Gdańska, Królewska i Kłajpedy) do cierpiącej na deficyt drewna Anglii (Ważny 2002; 2005).

Mimo że dendroarcheologia odgrywa służebną rolę w studiach nad kulturą człowieka, jest metodą korzystającą z warsztatu nauk przyrodniczych w celu badania zjawisk naturalnych. Drewno powstaje w wyniku skomplikowanych procesów przyrodniczych i jako takie traktowane jest jako element przyrody. Przyrosty roczne drzew powstają pod wpływem możliwości genetycznych właściwych dla gatunku, na które nakłada się wpływ środowiska, m.in. warunki glebowe, wodne, nasłonecznienie, ekspozycja terenu i wpływ na wiejące wiatry nawet dwóch drzew rosnących w niewielkiej odległości od siebie, mogą się różnić na tyle, że wzór przyrostowy będzie się nieco różnił. Drzewa



**Ryc. 7.** Widok od strony dna naczynia klepkowego z Elbląga datowanego na podstawie typologii i warunków depozycji na XIV-XV w. Fot. S. Rosołowski

są żywymi elementami przyrody i ich reakcja osobnicza na czynniki zewnętrzne może być różna. Dlatego ewentualność niewydatowania konkretnej próbki jest czymś naturalnym (Mäkinen i Vanninen 1999). Badając drewno drzew żyjących w odległej przeszłości, nie mamy pewności, gdzie one rosły. Najprawdopodobniej nie będziemy mogli wskazać miejsca, w którym rósł las, z którego je pozyskano i dlatego istnieje pewne prawdopodobieństwo, że sekwencja przyrostowa badanej próbki nie będzie odpowiadała dostępnej chronologii. Również drewno znajdowane podczas wykopalisk archeologicznych prowadzonych w dynamicznie rozwijających się wielkich ośrodkach miejskich, za jakie można uznać np. wczesnonowożytny Gdańsk lub Królewiec, trafiło doń z nieodlesionych terenów, ale

niekoniecznie z najbliższej okolicy miasta. Należy pamiętać, że przez stulecia drewno było podstawowym paliwem, bardzo ważnym surowcem w wytwórczości i rzemiośle oraz kluczowym materiałem budowlanym o bardzo szerokim zastosowaniu (Samsonowicz 1968).

W celu właściwej interpretacji uzyskiwanych datowań ważne jest zrozumienie wyników analizy dendrochronologicznej oraz cech drewna najczęściej datowanych tą metodą sosni i dębów. Zarówno drewno sosnowe, jak i dębowe wykazuje cechy tzw. twardzielowania. Twardziel to wewnętrzna warstwa drewna wyróżniająca się widocznym najlepiej na przekroju poprzecznym pnia zwykle ciemniejszym zabarwieniem niż warstwa bielu i stanowi zwykle drewno o najwyższej i najbardziej pożądanej

wartości technicznej. Najpopularniejsze gatunki twardełowe rosnące na terenie Polski to sosna, modrzew, cis, dąb, jesion, wiąz oraz grochodrzew. Jednakże twardeł, która widoczna jest w drewnie sosnowym, zabarwia się w sposób nieregularny i nie jest możliwe powiązanie jej zasięgu z wiekiem drzewa. W przypadku badań dendrochronologicznych drewna sosnowego datowanie z dokładnością do roku możliwe jest jedynie w przypadku zachowanego w próbce najmłodszego przyrostu (tzw. przyrostu podkorowego). Słój ten (w idealnym przypadku zachowany wraz z korą) jednoznacznie wskazuje rok i jego porę, w której zakończyła się wegetacja drzewa. Jeżeli nie jest możliwe stwierdzenie obecności tego słoja w próbce można jedynie wydatować ostatni/najmłodszy słój w badanej sekwencji i stwierdzenie, że drzewo zostało powalone po roku, na który wydatowano ten słój (*terminus post quem*). Niestety, czy ścięcie nastąpiło już w następnym roku czy kilka lub więcej lat później nie jest możliwe do określenia. Pewne możliwości dać może szczegółowa analiza pozostałych próbek drewna pochodzących z tej samej konstrukcji. Niektóre badania wskazują, że przy wznoszeniu budynków wykorzystywano drewno świeże lub krótko suszone (Baillie 1995).

Większe możliwości precyzyjnego datowania niż drewno sosnowe oferuje drewno dębów (Haneca i in. 2009). Jak już wspomniano wcześniej, sekwencje dębowe łatwiej się datują (co wynika z większej homogeniczności sygnału dendrochronologicznego właściwego drzewom z tego rodzaju) i do ich datowania częściej wystarczające są sekwencje o długości 30 słojów. Ponadto liczba słojów warstwy białej dębów wykazuje pewne prawidłowości właściwe dla regionu pochodzenia. Mimo że liczba ta jest dość zmienna i może być cechą osobniczą, a także zależeć od wieku drzewa i warunków klimatycznych, to zauważono, że w różnych regionach liczba przyrostów bielu jest wspólna dla większości żywych drzew i dla dębów europejskich liczba ta maleje wraz z przesuwaniami się zasięgu na wschód. Dla terenu Polski dla różnych regionów opracowano statystykę bielu i wynosi ona dla:

- Pomorza Zachodniego: 15 (-7/+9) słojów,
- Pomorza Wschodniego: 15 (-6/+8) słojów,
- Wielkopolski: 13 (-7/+8) słojów,
- Dolnego Śląska: 13 (-6/+9) słojów,
- Małopolski: 12 (-6/+7) słojów.

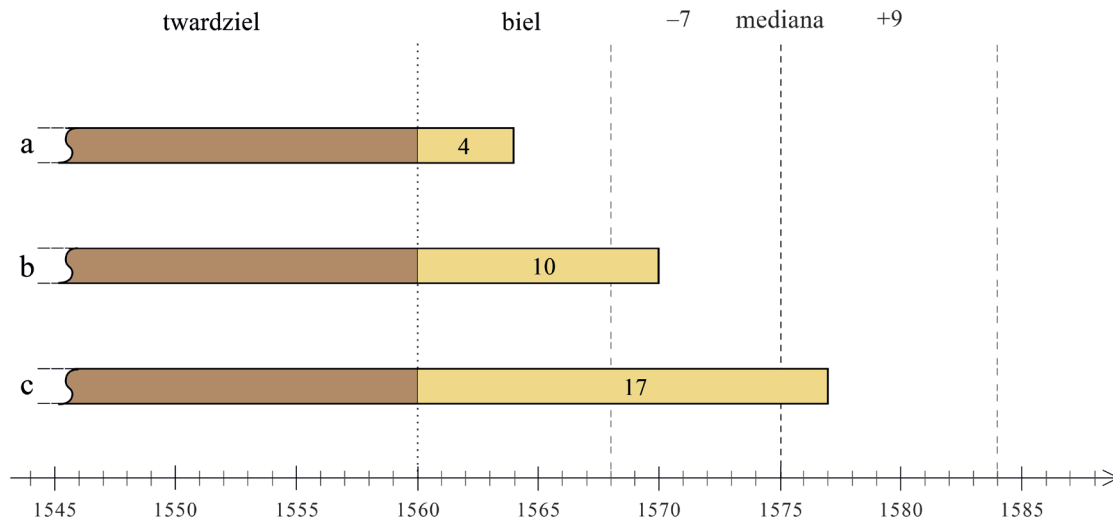
Pierwsza liczba dla każdego regionu podaje średnią liczbę słojów bielu, natomiast liczby w nawiasie

mówią o najmniejszej i największej szerokości tej warstwy (Zielski i Krąpiec 2004).

Na przykładzie próbki dębowej pochodzącej z Pomorza Zachodniego wyjaśnione zostaną wyniki datowania w konwencjonalnym zapisie stosowanym przez dendrochronologów dla próbek z zachowaną częściowo warstwą białą (słój podkorowy nie zachował się).

Zapis 15 (-7/+9) oznacza to, że szerokość warstwy bielu waha się od 8 (15 - 7) do 24 (15 + 9) słojów z medianą o wartości 15 słojów. Zatem jeżeli na próbce zachował się fragment warstwy bielu, do najmłodszego słoja twardełi należy dodać 15 lat i brać pod uwagę, że brakujących słojów mogło być pomiędzy 8 a 24.

1. Gdy wynik datowania jest następujący: datowanie zachowanej sekwencji 1564, z czego 4 ostatnie słoje to biel, to data ścięcia wynosi 1575 (-7/+9), co oznacza, że ostatni słój twardełi powstał w roku 1560 (1564 - 4) a drzewo ścięto pomiędzy rokiem 1568 (1560 + 8 lub 1575 - 7), a 1584 (1560 + 24, lub 1575 + 9), z największym prawdopodobieństwem w roku 1575 (1560 + 15).
2. Gdy liczba zachowanych słojów bielu jest większa od różnicy pomiędzy medianą a liczbą odejmowanych od mediany słojów (czyli różnica jest większa niż minimalna liczba słojów bielu = 8, a mniejsza od mediany = 15). W przypadku gdy wynik datowania wygląda następująco: datowanie sekwencji 1570, z czego 10 ostatnich słojów to biel, to data ścięcia wynosi 1575 (-4/+9), co oznacza, że drzewo ścięto pomiędzy rokiem 1571 (nie zachował się słój podkorowy) a 1584, z największym prawdopodobieństwem w roku 1575.
3. Kolejnym przypadkiem mogącym sprawić trudność w interpretacji wyniku datowania jest taki, w którym na próbce zachowała się większa liczba słojów bielu niż wynosi mediana. Wynik datowania w takim przypadku przybierze formę: datowanie zachowanej sekwencji 1577, z czego 17 ostatnich słojów to biel, to data ścięcia wynosi 1578 (-0/+6) lub 1578 (+6). Oznacza to, że drzewo ścięto po roku 1577 (czyli najwcześniej w roku 1578 – zgodnie z początkowym założeniem nie zachował się słój podkorowy, mówiący, że ostatni zachowany przyrost wykształcił się w ostatnim roku życia drzewa i takim słojem podkorowym mógł być pierwszy brakujący słój z roku 1578), nie później jednak niż w 1584 r.



**Ryc. 8.** Graficzne przedstawienie wyniku datowania sekwencji dębowych z zachowaną warstwą bielastą o różnej szerokości. Z założenia w żadnej z próbek nie zachował się pierścień podkorowy. Ciemnym kolorem zaznaczono twardziel drewna, a jasnym biel. Na rysunku przedstawiono najważniejszy z punktu widzenia archeologa końcowy odcinek sekwencji decydujący o dacie ścięcia drzewa. a) najmłodszy zachowany przyrost 1564, datowanie: 1575 (-7/+9), b) najmłodszy zachowany przyrost 1570, datowanie: 1575 (-4/+9), c) najmłodszy zachowany przyrost 1577, datowanie: 1578 (+6)

Warto zauważyć, że we wszystkich przypadkach różnego zachowania się warstwy bielastej statystyka bielu pozwala na przybliżone określenie tej samej daty najpóźniejszego powalenia drzewa (1584), co wynika z użycia w powyższych przykładach tej samej daty dla najmłodszego słoja twardzieli (1560).

Powyższe przykłady zilustrować można również za pomocą wykresu (ryc. 8).

Mimo, że zapis wyników datowania drewna dębowego z zachowanym fragmentem warstwy bielastej może wydawać się jako oznaczający przybliżenie lub zakres błędu, jest to wrażenie mylne. Niezależny sposób datowania sekwencji pozwala na przyporządkowanie poszczególnych słoików w sekwencji konkretnym latom, natomiast moment ścięcia drzewa określany jest na podstawie statystycznych danych wynikających z właściwości formowania się warstwy bielastej. Dendrochronologia nie daje możliwości przybliżonego określenia wieku drewna, a jedynie jednoznaczny wynik procesu datowania lub brak możliwości datowania sekwencji zachowanych słoików.

Od czasu ścięcia drzewa rozpoczynał się okres, często trudny lub wręcz niemożliwy do określenia, kiedy jego drewno zostanie wykorzystane do wykonania jakiegoś elementu (po okresie np. transportu z lasu, suszenia, sezonowania, składowania przed sprzedażą, oczekiwania na wykorzystanie przez

wytwórcę, rzemieślnika). Sposoby wykorzystania i sezonowania drewna zmieniały się z biegiem stuleci i związane były (i są nadal) z wymogami technologii budowy przedmiotów drewnianych, ale również z wynikającymi z nich zwyczajami. Sposoby użycia i traktowania surowca drzewnego pozostają w zasięgu interpretacji archeologicznej lub historycznej.

## PODSUMOWANIE – POSTULATY

Techniki mikroskopowe na obecnym etapie zaawansowania wiedzy są nieodzowną częścią procesu badawczego. Na etapie rozpoznawania/oznaczenia gatunku drewna mikroskop biologiczny jest nieodzowny. Rozwój technik komputerowych pozwala na wykorzystywanie skanów lub też fotografii cyfrowych (wcześniej zdjęć rentgenowskich i zdjęć na kliszach), coraz powszechniej stosowanych w przypadku badań drzew żyjących, z których zwykle preparowane są rdzenie za pomocą świrdrów przyrostowych (Griffin i in. 2021; Maxwell i Larsson 2021). W wyjątkowych przypadkach, gdy dostęp do zabytku jest ograniczony (ze względów np. konserwatorskich, czy też spowodowanych ograniczeniami kulturowymi czy religijnymi), rejestracji sekwencji przyrostowych dokonuje się przy użyciu specjalnych mobilnych skanerów, rezonansu magnetycznego,

promieni rentgenowskich (tomografii komputerowej) stosowane jednak jeszcze dość rzadko (Bill i in. 2012; Hoshino i in. 2008; Mori i in. 2019).

Różnego typu analizy dendrochronologiczne (najczęściej dotyczy to oznaczania drewna lub obserwacji jego cech anatomicznych) prowadzone są również przy pomocy mikroskopów skaningowych (SEM) oraz skanującego laserowego mikroskopu konfokalnego (*Confocal Laser Scanning Microscope*, CLSM) (Balzano i in. 2019; 2020)

W przypadku badań drewna pochodzącego z wykopalisk archeologicznych, które zwykle przeleżało stulecia w niesprzyjających warunkach środowiskowych, zwykle uległo przebarwieniu lub degradacji najczęściej jedynym sposobem okazuje się wykonanie pomiarów pod mikroskopem przez doświadczonego badacza. Jeżeli istnieje możliwość przecięcia (lub wypreparowania, wycięcia próbki), jest to często jedyny sposób na dokładny i znacznie tańszy niż wyżej wspomniane sposoby pomiar szerokości słojów.

Dokładność i precyzja (wysoka „rozdzielczość”) datowania dendrochronologicznego pozwalają na „rozwarstwienie” stosowane w przypadku analizy budowli drewnianych lub ich fragmentów (np. konstrukcji dachowych), na wydzielenie faz budowy, przebudów oraz napraw (odbudów). Podobne możliwości dendrochronologia oferuje wieloelementowym konstrukcjom odsłanianym podczas wykopalisk archeologicznych jak również złożonym konstrukcjom drewnianym (np. ołtarzom), podobraziom drewnianym sklejonym z kilku desek, trumnom, czy też nawet niewielkim naczyniom klepkowym.

Należy zdać sobie sprawę, że postulowana powyżej potrzeba przekazywania do datowań dendrochronologicznych możliwie dużej liczby próbek drewna nie tylko pozwoli na dokładniejsze datowanie w obrębie badanego stanowiska, ale i zwiększy szanse na datowanie względne poszczególnych próbek poprzez wzajemne porównanie ich sekwencji.

## MOŻLIWOŚCI I OGRANICZENIA

Poniżej zebrano główne cechy datowania metodą dendrochronologiczną i możliwości, jakie daje, wykorzystywane w dendroarcheologii.

- Przy doborze próbki do datowania największe szanse na prawidłowe datowanie daje wybranie jej w miejscu z zachowaną najmłodszą (zewnątrzną)

warstwą drewna leżącą bezpośrednio pod korą. To tam znajduje się decydująca o prawidłowym datowaniu część sekwencji oraz ew. słój podkorowy. Nie jest to powszechna wiedza, ale pień drzewa rozrasta się na zewnątrz, powiększając swój obwód, a nie od środka (od rdzenia).

- W przypadku zachowania się ostatniego, najmłodszego przyrostu (słój podkorowy leżący bezpośrednio pod korą) możliwe staje się określenie roku ścięcia z dokładnością do sezonu.
- Minimalna długość sekwencji przyrostowej spełniająca warunki metody to 50 słojów dla sosny i 30 słojów dla dębu. Są to liczby minimalne, jednak dające szanse na prawidłowe datowanie. Sekwencje krótsze, zgodnie z metodą dendrochronologiczną, są niemożliwe do datowania. Pamiętać należy, że wraz ze wzrostem długości zmierzonej sekwencji rosną szanse na określenie wieku, zatem im dłuższa sekwencja (więcej słojów), tym lepsza.
- Należy pobrać możliwie najwięcej próbek, najlepiej z każdego elementu drewnianego, gdyż nie każdą z nich uda się wydatować. Drewno jest surowcem naturalnym ukształtowanym pod wpływem skomplikowanych kombinacji czynników przyrodniczych.
- Próbkę należy przechowywać szczelnie zapakowaną w workach foliowych, w warunkach zbliżonych do tych, w jakich zostały znalezione, i w możliwie najkrótszym czasie należy je dostarczyć do laboratorium dendrochronologicznego. Dłuższe przechowywanie próbek dendrochronologicznych (zwłaszcza z drewna mokrącego) jest możliwe po ich zamrożeniu do temperatury  $-18^{\circ}\text{C}$ .
- Specjalnego traktowania mogą wymagać przedmioty drewniane przeznaczone zarówno do konserwacji, jak i datowania dendrochronologicznego. Większość metod konserwacji nie wpływa negatywnie na zmiany w strukturze drewna uniemożliwiające w późniejszym czasie przeprowadzenie analiz dendrochronologicznych. W przypadku planowanej rekonstrukcji zabytku konieczne jest konsultowanie sposobu pozyskania próbek z poszczególnych elementów drewnianych ze specjalistą, który będzie prowadził konserwację i rekonstrukcję zabytku. Z punktu widzenia archeologii główne zalety dendrochronologii to możliwość określenia wieku

i pochodzenia drewna, a także ustalenia, czy różne elementy wykonano z tego samego drzewa (np. podobrazie, naczynie). Jako że materiałem badawczym jest drewno – surowiec naturalny, ukształtowany pod wpływem procesów przyrodniczych, nie jest możliwe pełne poznanie wszelkich mechanizmów kształtujących jego strukturę. Wynika z tego, że część sekwencji nie jest możliwa do wydatowania. Również z powodu z niedostatecznego stanu badań dla niektórych regionów chronologie nie istnieją lub są niedostatecznie długie (nie pokrywają pełnego okresu dziejów), dlatego wielokrotnie podnoszony postulat przekazywania możliwie dużej liczby próbek drewna do badań dendrochronologicznych będzie zawsze aktualny, z korzyścią zarówno dla poznawania dziejów ludzi, jak i środowiska w którym żyli.

## LITERATURA

- Baillie, M.G.L. 1995. *A slice through time. Dendrochronology and precision dating*. London.
- Baillie, M.G.L. 2009. The radiocarbon calibration from an Irish oak perspective. *Radiocarbon* 51(1): 361–371.
- Balzano, A., Novak, K., Humar, M., Čufar, K. 2019. Application of confocal laser scanning microscopy in dendrochronology. *Les/Wood* 68(2): 5–17.
- Balzano, A., Cufar, K., Krže, L., Merela, M. 2020. Wood identification of charcoal with Confocal Laser Scanning Microscopy. *Les/Wood*. 69(2): 21–35.
- Becker, B. 1993. An 11,000-year German oak and pine dendrochronology for radiocarbon calibration. *Radiocarbon* 35: 201–213.
- Becker, B., Giertz-Siebenlist, V. 1970. Eine über 1100-jährige mitteleuropäische Tannenchronologie. *Flora* 159: 310–346.
- Bernabei, M. 2021. A Guarneri violin in the attic: the power of dendrochronology for analysing musical instruments. *Heritage Science* 9: 47. <https://doi.org/10.1186/s40494-021-00521-4>
- Bill, J., Daly, A., Johnsen, Ø., Dalend, K.S. 2012. DendroCT – Dendrochronology without damage. *Dendrochronologia* 30(3): 223–230.
- Bridge, M. 2011. Resource Exploitation and Wood Mobility in Northern European Oak: dendroprovenancing of individual timbers from the Mary Rose (1510/11–1545). *The International Journal of Nautical Archaeology* 40(2): 417–423.
- Bridge, M. 2012. Locating the origins of wood resources: a review of dendroprovenancing. *Journal of Archaeological Science* 39: 2828–2834.
- Brown, D.M., Munro, M.A.R., Baillie, M.G.L., Pilcher, J.R. 1986. Dendrochronology – the absolute Irish standard. *Radiocarbon* 28(2A): 279–283.
- Campbell, T.N. 1949. The pioneer tree-ring work of Jacob Kuechler. *Tree-Ring Bulletin* 15(3): 16–20.
- Creasman, P. 2010. *Extracting Cultural Information from Ship Timber*. Doctoral dissertation, Texas A&M University, 214 pp.
- Daly, A. 2007. *Timber, Trade and Tree-rings: A dendrochronological analysis of structural oak timber in northern Europe, c. AD 1000 to c. AD 1650*. Doctoral dissertation, University of Southern Denmark.
- Dąbrowski, H.P. 2006. *Dendrochronologiczna analiza drewna dryftowego z północno-wschodniej części Cieśniny Forland (północno-zachodni Spitsbergen)*. Dysertacja doktorska. Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu.
- Douglass, A.E. 1909. Weather cycles in the growth of big trees. *Monthly Weather Review* 37(6): 225–237.
- Douglass, A.E. 1914. A method of estimating rainfall by the growth of trees. *Bulletin of the American Geographical Society*. 46: 321–335.
- Douglass, A.E. 1929 The secret of the Southwest solved by talkative tree rings. *National Geographic Magazine* 56(6): 736–770.
- Eckstein, D. 2005. Wood science and art history interdisciplinary research illustrated from a dendrochronological point of view, (w:) C. Van de Velde, H. Beeckman, J. Van Acker, Fr. Verhaeghe, (red.), *Constructing wooden images : proceedings of the symposium on the organization of labour and working practices of late Gothic carved altarpieces in the Low Countries*: Brussels, 25-26 October 2002. VUB Brussels University Press, 19–26.
- Ferguson, C.W., Lawn B., Michael, H.N. 1985. Prospects for the extension of the bristlecone pine chronology: radiocarbon analysis of H-84-1. *Meteoritics* 20(2): 415–421.
- Friedrich, M., Remmele, S., Kromer, B., Hofmann, J., Spurk, M., Kaiser, K.F., Orsel, C., Küppers, M. 2004. The 12,460-year Hohenheim oak and pine tree-ring chronology from central Europe – A unique annual record for radiocarbon calibration and paleoenvironment reconstructions. *Radiocarbon* 46(3): 1111–1122.
- de Geer, E.H., 1956. Planetary geochronology, (w:) *Ve Congres International de Chronometrie, Proces-Verbaux et Memoires*, Vol. II, Besançon, 455–488.
- Giddings, Jr., J.L. 1940. The application of tree-ring dates to Arctic sites. *Tree-Ring Bulletin* 7(2):10–14.
- Griffin, D., Porter, S.T., Trumper, M.L., Carlson, K.E., Crawford, D.J., Schwalen, D., McFadden, C.H. 2021. Gigapixel

- macro photography of tree rings. *Tree-Ring Research* 77(2): 86–94.
- Grissino-Mayer, H., Sheppard, P., Cleaveland, M. 2004. A dendroarchaeological re-examination of the “Messiah” violin and other instruments attributed to Antonio Stradivari. *Journal of Archaeological Science* 31: 167–174.
- Haneca, K., Čufar, K., Beeckman, H. 2009. Oaks, tree-rings and wooden cultural heritage: a review of the main characteristics and applications of oak dendrochronology in Europe. *Journal of Archaeological Science* 36: 1–11.
- Hillam, J., Groves, C.M., Brown, D.M., Baillie, M.G.L., Coles, J.M., Coles, B.J. 1990. Dendrochronology of the English Neolithic. *Antiquity* 64(243): 210–220.
- Hillam J., Tyers, I. 1995. Reliability and repeatability in dendrochronological analysis: test using the Flechter archive of panel-painting data. *Archaeometry* 37(2): 395–405.
- Hoshino, Y., Okochi, T., Mitsutani, T., 2008. Dendrochronological dating of vernacular folk crafts in northern Central Japan. *Tree-Ring Research* 64(2): 109–114.
- Koprowski, M., Zielski, A., Skowronek, T. 2011. Analiza przyrostów rocznych sosn (*Pinus sylvestris* L.) o nietypowej budowie strzały na terenie Nadleśnictwa Borne Sulimowo. *Sylwan* 155(8): 555–562.
- Krąpiec, M. 1996a. Dendrochronologiczne datowanie zwęglonych prób drewna z wcześnieśredniowiecznej półziemianki z Krakowa-Nowej Huty-Wyciąża (stanowisko 5B). *Materiały Archeologiczne Nowej Huty* 19: 129–135.
- Krąpiec, M. 1996b. Subfossil oak chronology (474 B.C. – A.D. 1529) from southern Poland. (w:) J.S. Dean, D.M. Meko, T.W. Swetnam, (red.) *Tree rings, environment, and humanity: proceedings of the international conference, Tucson, Arizona, 17-21 May 1994. Radiocarbon*: 813–819.
- Krąpiec, M. 1998a. Bezwzględne datowanie zwęglonego drewna z wału 3B wcześnieśredniowiecznego grodziska w Stradowie. *Sprawozdania Archeologiczne*, 50: 265–270.
- Krąpiec, M. 1998b. Oak dendrochronology of the Neoholocene in Poland. *Folia Quaternaria* 69: 5–134.
- Krąpiec, M. 2001. Holocene dendrochronological standards for subfossil oaks from the area of southern Poland. *Studia Quaternaria* 18: 47–63.
- Krąpiec, M., Krysztofiak, T. 2003. Potwierdzenie plemiennej metryki grodu w Gieczu, Wielkopolskie. *Sprawozdania Archeologiczne* 6: 32–51.
- Krąpiec, M., Szychowska-Krąpiec, E. 2013. Analiza dendrochronologiczna drewna z badań grodziska w Wicinie w latach 2008–2012, (w:) A. Jaszewska, S. Kałagate (red.) *Wicina. Badania archeologiczne w latach 2008–2012 oraz skarb przedmiotów pochodzących z Wiciny*. Zielona Góra, 371–417.
- Krąpiec, M., Ważny, T. 1994. Dendrochronologia: podstawy metodyczne i stan zaawansowania badań w Polsce. *Światowit* 39: 193–214.
- Kuniholm, P.I. 2000. Dendrochronology (Tree-Ring Dating) of Panel Paintings, (w:) W.S. Taft, J.W. Mayer (red.), *The Science of Paintings*. New York, 206–215.
- Kuniholm, P.I. 2003. Aegean Dendrochronology Project December 2003 Progress Report. Ithaca, New York, The Malcolm and Carolyn Wiener Laboratory for Aegean and Near Eastern Dendrochronology, Cornell University, 9pp. <https://dendro.cornell.edu/reports/report2003.pdf>
- Maczkowski, M., Bolliger, M., Ballmer, A., Gori, M., Lera, P., Oberweiler, C., Szidat, S., Touchais, G., Hafner, A. 2021. The Early Bronze Age dendrochronology of Sovjan (Albania): A first tree-ring sequence of the 24th – 22nd c. BC for the southwestern Balkans. *Dendrochronologia* 66, Article 125811, 12pp.
- Mäkinen, H., Vanninen, P., 1999. Effect of sample selection on the environmental signal derived from tree-ring series. *Forest Ecology and Management* 113: 83–89.
- Maxwell, R.S., Larsson, L.-A. 2021. Measuring tree-ring widths using the CooRecorder software application. *Dendrochronologia* 67, numer artykułu 125841.
- Mori, M., Kuhara, S., Kobayashi, K., Suzuki, S., Yamada, M., Senoo, A. 2019. Non-destructive tree-ring measurements using a clinical 3T-MRI for archaeology. *Dendrochronologia* 57, numer artykułu 125630.
- Nash, S.E. 1999. *Time, Trees, and Prehistory. Tree-Ring Dating and the Development of North American Archaeology 1914–1950*. Salt Lake City.
- Nash, S.E. 2000. *It's About Time: A History of Archaeological Dating in North America*. Salt Lake City.
- Palonka, R., 2019, *Sztuka i archeologia kultur indiańskich prekolumbijskiego Południowego Zachodu USA*. Kraków.
- Pazdur, A., Krąpiec, M., Michczyński, A., Ossowski, W. 2001. Radiocarbon and Dendrochronological Dating of Logboats from Poland. *Radiocarbon* 43: 403–415.
- Pichler, T., Nicolussi, K., Goldenberg, G., Hanke, K., Kovács, K., Thurner, A. 2013. Charcoal from a prehistoric copper mine in the Austrian Alps: dendrochronological and dendrological data, demand for wood and forest utilisation. *Journal of Archaeological Science* 40(2): 992–1002.
- Pilcher, J.R., Baillie, M.G.L., Schmidt, B., Becker, B., 1984. A 7,272-year tree-ring chronology for western Europe. *Nature* 312(8): 150–152.
- Prarat, M. 2019. Historia przekształceń siedemnastowiecznego kościoła w zespole klasztornym Karczówka (Kielce) w świetle analizy więźb nawy i prezbiterium. *Acta Universitatis Nicolai Copernici Zabytkoznawstwo i Konserwatorstwo* 49: 87–114.
- Przybylak, R., Oliński, P., Koprowski, M., Filipiak, J., Pospieszynska, A., Chorążyczewski, W., Puchałka, R., Dąbrowski, H.P. 2020. Droughts in the area of Poland in recent centuries in the light of multi-proxy data April 2020, *Climate of the Past* 16(2): 627–661.

- Rybníček, M., Kočár, P., Muigg, B., Peška, J., Sedláček, R., Tegel, W., Kolar, T. 2020. World's oldest dendrochronologically dated archaeological wood construction. *Journal of Archaeological Science* 115, numer artykułu 105082.
- Samsonowicz, H. 1968, *Późne średniowiecze miast nadbałtyckich. Studia nad dziejami Hanzy nad Bałtykiem w XIV-XV w.* Warszawa.
- Schaaf, U., Prarat, M. 2018. Badania architektoniczne więzby nad nawą środkową kościoła Świętojańskiego oraz ich znaczenie dla historii budowlanej świątyni i średniowiecznego warsztatu ciesielskiego w Toruniu, (w:) K. Kluczajd (red.), *Kościół Świętojański w Toruniu – nowe rozpoznanie*. Toruń 2015, 125–155.
- Schweingruber, F.H. 1989. *Tree Rings. Basics and Applications of Dendrochronology*. Dordrecht - Boston - London.
- Shumilov, O.I., Kasatkina, E.A., Krapiec, M., Chochorowski, J., Szychowska-Krapiec, E. 2020. Tree-ring dating of Russian Pomor settlements in Svalbard. *Dendrochronologia* 62, numer artykułu 125721,
- Speer, J.H. 2010. *Fundamentals of Tree-Ring Research*. Tucson.
- Spyt, B., Kaczka, R.J., Kściuczyk, K., Zawadzka, M. 2016. Zastosowanie intensywności odbicia światła niebieskiego w datowaniu drewna historycznego. *Studia i Materiały CEPL w Rogowie* 18(48/3): 201–207.
- Szychowska-Krapiec, E. 2000. Późnoloczeński standard dendrochronologiczny dla jodły *Abies alba* Mill. z obszaru południowej Polski. *Kwartalnik AGH – Geologia* 26(2): 173–299.
- Szychowska-Krapiec, E. 2010. Long-term chronologie of pine (*Pinus sylvestris* L.) and fir (*Abies alba* Mill.) from the Małopolska region and their palaeoclimatic interpretation. *Folia Quaternaria* 79: 1–120.
- Ważny, T. 1990. *Aufbau und Anwendung der Dendrochronologie für Eichenholz in Polen*. Hamburg: Diss. Universität Hamburg, 213 pp.
- Ważny, T. 1993. Dendrochronological dating of the Lusatian culture settlement at Biskupin, Poland – first results. *News WARP* 14: 3–5.
- Ważny, T. 2001. *Dendrochronologia obiektów zabytkowych w Polsce*, Gdańsk.
- Ważny, T. 2002. Baltic timber in western Europe – an exciting dendrochronological question. *Dendrochronologia* 20(3): 313–320.
- Ważny, T. 2005. The origin, assortments and transport of Baltic timber, (w:) C. Van de Velde, H. Beeckman, J. Van Acker and Fr. Verhaeghe (red.), *Constructing Wooden Images. Proc. of the Symp. on the organization of Labour and working practices of Late Gothic carved altarpieces in the Low Countries, Brussels 25-26 October 2002*. Brussels, 115–126.
- Ważny, T. 2007. Analiza dendrochronologiczna kościoła w Kosieczynie. *Lubuskie Materiały Konserwatorskie* 4: 42–46.
- Ważny, T. 2009. Dendrochronologia drewna biskupińskiego, czyli co drzewa zapisały w przyrostach rocznych, (w:) L. Babiński (red.), *Stan i perspektywy zachowania drewna biskupińskiego. Biskupińskie Prace Archeologiczne* 7: 63–76.
- Ważny, T., Wyrwa, A.M. 2006. Kościół pw. Św. Mikołaja w Tarnowie Pałuckim i jego chronologia w świetle badań historycznych i dendrochronologicznych. Komunikat, (w:) A.M. Wyrwa (red.), *Studia i materiały do dziejów Pałuk* 6: 227–247.
- Zielski, A. 1992. Long term chronology of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in northern part of Poland. *Dendrochronologia* 10: 77–90.
- Zielski, A. 1997. *Uwarunkowania środowiskowe przyrostów radialnych sosny zwyczajnej (Pinus sylvestris L.) w Polsce północnej na podstawie wielowiekowej chronologii*. Toruń.
- Zielski, A., Krapiec, M., 2004. *Dendrochronologia*. Warszawa.

