

# 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

# Przedmowa

---

Gdy pięćdziesiąt lat temu, w roku 1971, firma Intel wprowadziła na rynek pierwszy na świecie komercyjny jednoukładowy mikroprocesor Intel 4004, zapewne jedynie niewielka grupa wizjonerów mogła przypuszczać, w jaki sposób ten drobiazg zmieni wkrótce świat, a także badania naukowe. Moc tych niewielkich układów, możliwość ich programowania i rosnąca powszechność pozwoliły, by dotychczasowe wielkie centra obliczeniowe stały się w nowym wydaniu na podręcznych biurkach uczonych na całym świecie. Oczywiście największym beneficjentem tego wielkiego przełomu stały się nauki ścisłe i eksperymentalne, niemniej także wiatr nowości zawiał na humanistycznych katedrach. Nie będzie tutaj nadużyciem stwierdzenie, że wśród nauk humanistycznych głównym beneficjentem tej wielkiej rewolucji naukowo-technologicznej stała się archeologia. Jest ona bowiem jedną z najlepiej wykorzystujących postęp technologiczny dyscypliną humanistyczną.

Niepozorne mikroprocesory otworzyły na oścież drzwi do coraz powszechniejszego wejścia w nowe, zamknięte dotychczas aspekty przeszłości. Pozwoliły tym samym na odkrywanie coraz to nowych światów, ukrytych dotąd przed oczyma badaczy. Archeolog, opisując dzieje cywilizacji opiera się na źródłach, które – by opowiedziały swą historię – muszą być w odpowiedni sposób o nią zapytane. Nieme z natury swej rzeczy wytwory rąk

ludzkich ozywają przy odpowiednim kwestionariuszu pytań, jakże często wywodzących się z nauk doświadczalnych. Wydawałoby się, jednowymiarowe przedmioty uprzestrzeniają się i nabierają nowego wymiaru. Ukryta w nich tytułowa Mikroprzeszłość dzięki zastosowaniu nowoczesnych urządzeń badawczych jak za dotknięciem czarodziejskiej różdżki ożywa i wprowadza coraz to nowe elementy układanki, której elementy mają coraz szersze zastosowanie w budowaniu obrazu przeszłości w jego pełnym makrowymiarze.

Niniejsza książka jest doskonałą prezentacją nowoczesnych metod odtwarzających owe mikroświaty zamknięte w szczegółowych analizach specjalistycznych. Przybliżając je czytelnikowi, autorzy poszczególnych rozdziałów pokazują, gdzie jeszcze można szukać odpowiedzi na pytania – wydawałoby się – ich pozbawione, skazane niedawno jeszcze na ciszę milczenia owych niemych artefaktów. Prezentowana analityka Mikroprzeszłości przesuwa tym samym ową linię między poznaniem a niemożnością coraz dalej w kierunku odsłaniania nowych przestrzeni dla wiedzy. Świat przeszłości wygląda spod obiektywów mikroskopów i soczewek spektrometrów, stając się coraz bardziej plastyczny i wyraźny.

prof. dr hab. Andrzej Michałowski  
Dziekan Wydziału Archeologii UAM



# Wprowadzenie

Aldona Kurzawska, Iwona Sobkowiak-Tabaka

---

*To, co dzisiaj jest dowiedzione, kiedyś było fantazją.*  
William Blake

Archeologia jest niezwykle dynamicznie rozwijającą się dziedziną nauki. Każdy rok przynosi nowe odkrycia, których analizy przyczyniają się do weryfikacji wcześniejszych hipotez i twierdzeń. Rozwój ten zawdzięczamy kilku czynnikom. Przede wszystkim ogromnemu postępowi technik wykopaliskowych i dokumentowania przebiegu badań archeologicznych, a także niezwykle rozwojowi metod badawczych, powszechnej już współpracy ze specjalistami z wielu różnych dziedzin i zastosowaniem szczegółowych analiz do bardzo wielu kategorii materiałów odkrywanych na stanowiskach archeologicznych. Laboratoria wyposażone w coraz lepsze narzędzia badawcze znacząco zwiększają nasze możliwości analizy materiałów. Nade wszystkim podstawowym czynnikiem napędzającym rozwój każdej dziedziny jest ciekawość i nieustające zadawanie nowych i wymagających pytań badawczych. Badając stanowiska archeologiczne, poznajemy świat makroskopowo, znajdujemy to, co widoczne – okruchy przeszłości człowieka. Dopiero w laboratoriach mamy możliwość spojrzeć na pozyskany materiał w mikroskali, z pomocą specjalistycznych analiz mikroskopowych, archeometrycznych, izotopowych, biomolekularnych; odkryć to, co ukryte i niewidoczne.

Historia analiz specjalistycznych w archeologii sięga XIX w. Od dawna archeolodzy, eksplorując

stanowiska archeologiczne, byli zainteresowani i próbowali dowiedzieć się, z jakiego materiału wykonano odkryte zabytki, w jaki sposób powstały i z jakiego okresu pochodzą. Zabytki trafiały więc do laboratoriów, gdzie badano przede wszystkim skład chemiczny przedmiotów. Początki stosowania analiz mikroskopowych w badaniach archeologicznych sięgają lat 30. XX w. Za ich prekursora uważa się S.A. Siemionowa – pioniera badań traseologicznych. To on zauważył ich ogromną wartość dla badań nad zabytkami kamiennymi. Był wizjonerem dziedziny, nieustannie krytykowano jego prace, a samego autora posądzano o szarlatanerię (Małecka-Kukawka 2012). Jednak wypracowana przez niego metodyka badań mikroskopowych nad zabytkami kamiennymi jest stosowana powszechnie do dziś.

Od drugiej połowy XX w. systematycznie ukazują się opracowania opisujące metody badań i specjalistycznych analiz stosowanych w archeologii, pokazujące zarówno rozwój dziedziny, jak i najważniejsze kierunki badawcze. Jedną z pierwszych takich prac była *Science in Archaeology* autorstwa D. Brothwella i E. Higgsa z 1963 r. Można śmiało powiedzieć, że to właśnie D. Brothwell był jednym z tych uczonych, którzy położyli podwaliny pod rozwój nowoczesnej archeologii. Sam zajmując się „bioarcheologią”, przykładał wielką wagę do

wartości poznawczych różnorodnych metod analitycznych (Brothwell 2016), co pokazał w kolejnej obszernej pracy *Handbook of Archaeological Sciences*, pod redakcją D. Brothwella i A.M. Pollarda z 2004 r. W 59 artykułach, podzielonych na 9 sekcji: datowanie, analizy paleośrodowiskowe, pelobiologiczne, biomolekularne, eksploatacja zasobów środowiska naturalnego, surowców nieorganicznych, prospekcja powierzchniowa, pochówki i konserwacja zabytków oraz metody statystyczne i komputerowe wykorzystywane w archeologii, pokazano zarówno postęp, jak i zachodzące zmiany w badaniach archeologicznych na początku XXI w., na przykładzie najnowszych dokonań dziedzin ściśle współpracujących z archeologią.

W ostatnich latach obserwujemy w naszej dyscyplinie niezwykle energiczny rozwój, szczególnie metod przyrodniczych i ich zastosowań. Wyrazem tego jest imponująca liczba publikacji, przykładowo *Microarchaeology. Beyond Visible Archaeological Record* (Weiner 2010), *Biomolecular Archaeology. An Introduction* (Brown i Brown 2011), czy bardziej szczegółowe opracowania *Use-Wear and Residue Analysis in Archaeology* (Marreiros i in. 2015), *Environmental Archaeology. Current Theoretical and Methodological Approaches* (Pişkin i in. 2018), *Handbook for the Analysis of Micro-Particles in Archaeological Samples* (Henry 2020) i *Lithic Residue Analysis. A review and guide to techniques* (Croft 2021).

W Polsce ukazało się zaledwie kilka prac o tej tematyce. W 1998 r. *Nauki przyrodnicze i fotografia lotnicza w archeologii*, pod red. L. Krzyżaniaka, w 2000 r., autorstwa D. Ławeckiej *Wstęp do archeologii* wydany przez Instytut Archeologii Uniwersytetu Warszawskiego (kolejne wznowienia w 2003 r., w 2009 r. w formie e-booka i w 2021 r. przez Wydawnictwo Naukowe PWN). W ostatnim rozdziale tej książki omówiono pokrótce analizy specjalistyczne, jakim poddawane są zabytki archeologiczne, m.in. archeozoologię, archeobotanikę, antropologię fizyczną, analizę gleb i sedymentów, pozostałości substancji organicznych, badania pochodzenia surowców, traseologię oraz badania eksperymentalne. Dwa lata później zostało przetłumaczone na język polski dzieło C. Renfrew i P. Bahna, zatytułowane *Archeologia. Teorie. Metody. Praktyka*. Jest to liczące 600 stron kompendium wiedzy, jednak sprzed ponad 20 lat (jeśli weźmiemy pod uwagę pierwsze wydania z lat 90. XX w.), o dziejach

i charakterze archeologii, metodach datowania i analizie składu artefaktów, roli archeologii ratowniczej, problemach zarządzania dziedzictwem kulturowym czy zagadnieniach związanych z popularyzacją archeologii. Książka ta jest bardzo bogato ilustrowana, zawiera wiele zdjęć, diagramów, rysunków, a co najważniejsze podaje przykłady metod zastosowanych w odniesieniu do badań konkretnych stanowisk archeologicznych i pozyskanych z nich zarówno ekofaktów, jak i artefaktów. Z konieczności więc opis stosowanych metod ogranicza się do najważniejszych problemów.

Nie sposób w tym miejscu pominąć ponad 1300-stronicowej, monumentalnej publikacji pod redakcją S. Tabaczyńskiego, A. Marciniaka, D. Cyngot i A. Zalewskiej, pod tytułem *Przeszłość społeczna. Próba konceptualizacji*, wydanej w 2012 r. Wydawnictwo to zawiera ponad 80 artykułów, z których 31 poświęconych jest dyscyplinom współdziałającym z archeologią. Doceniając ogromny wkład autorów w przygotowanie artykułów, zauważyć należy, że ich celem jest ukazanie kompleksowości dyscyplin i możliwości, jakie daje ich współdziałanie ze sobą, a nie ich pogłębiony opis.

Wymienione pozycje do dziś stanowią podstawowe podręczniki w języku polskim wprowadzające w zagadnienia archeologii. Zawierają zarys głównych problemów badawczych, metodyki prowadzenia prac archeologicznych, ich dokumentacji, datowania zabytków, definicji i terminologii oraz podstawy metodologiczne. Nie licząc opracowań poświęconych konkretnym zagadnieniom, np. badaniom palinologicznym (Dybova-Jachowicz i Sadowska 2003), dendrochronologii (Krąpiec i Zielski 2004), archeobotanicznym (Lityńska-Zajac i Wasylikowa 2005), archeozoologicznym (Bocheński 2000; Lasota-Moskalewska 1998; 2008) czy radiowęglowym (Walanus i Goslar 2004; 2009) oraz geomorfologii i gleboznawstwa (Pelisiak i Gębica 2007), na polskim rynku brak jest pozycji, która w wyczerpujący sposób przedstawiałaby analizy specjalistyczne stosowane we współczesnych badaniach archeologicznych.

Niniejsza publikacja jest przeznaczona zarówno dla archeologów poszukujących rozwiązania problemów powstałych w trakcie opracowywania wyników badań, jak i studentów archeologii czy pasjonatów, którzy chcieliby zgłębić swoją wiedzę w zakresie nowoczesnych metod badawczych stosowanych w naszej dyscyplinie i w badaniach

archeologicznych na terenie Polski. Książka nie pretenduje do miana podręcznika, a jedynie prezentuje możliwości poszczególnych dziedzin współpracujących z archeologią, które weszły już do jej kanonu badawczego, oraz tych, które wyłoniły się całkiem niedawno. Jej celem jest pokazanie warsztatu naukowego wykraczającego poza ramy tradycyjnej archeologii.

Jako redaktorki książki oraz autorki i współautorki części rozdziałów mamy świadomość, że nawet najlepsze i najdokładniej przeprowadzone analizy specjalistyczne nie przyniosą odpowiedzi na wszystkie pytania badawcze (por. Furholt 2019; Rączkowski 2019; Vander Linden 2016), lecz bez ich zastosowania nasze możliwości interpretacyjne byłyby znacznie ograniczone.

Oddajemy do rąk Czytelników wydawnictwo zawierające 21 artykułów, traktujących o badaniach specjalistycznych w polskiej archeologii i o najnowszych osiągnięciach w tym zakresie. W publikacji zawarto przykłady możliwości badawczych poszczególnych dziedzin związanych z archeologią w odniesieniu do konkretnych stanowisk czy problemów naukowych. Każdy z rozdziałów opisuje analizy specjalistyczne od pobierania prób i materiałów na stanowisku archeologicznym po analizę w laboratorium, opis stosowanych urządzeń i metod oraz opracowanie wyników badań. Opowiada tak naprawdę historię wielu ciekawych odkryć archeologicznych, których dokonano w laboratoriach. Odkrywania tego, co niewidoczne. Tematyka książki obejmuje zastosowanie badań bioarcheologicznych (palinologicznych, archeobotanicznych, malakologicznych, wioślarek i okrzemek, dendrochronologicznych, entomologicznych, antropologicznych, archeogenetycznych, archeozoologicznych), geologicznych (petrograficznych, mikromorfologicznych, petroarcheologicznych) oraz opis szczegółowych analiz różnorodnych materiałów pochodzących z badań archeologicznych (tekstylia, metale, ceramika, surowce krzemionkowe, traseologia). W książce dwa ostatnie rozdziały dotyczą zastosowania różnorodnych mikroskopów optycznych i coraz powszechniej wykorzystywanych mikroskopów elektronowych w analizach specjalistycznych oraz standardowo już stosowanego w badaniach archeologicznych ręcznego spektrometru fluorescencji rentgenowskiej (XRF).

Pomysł przygotowania tej książki jest rezultatem dyskusji prowadzonych przez redaktorki (archeologa i archeomalakologa) oraz ich doświadczeń

zdołanych w trakcie prowadzenia projektów badawczych i współpracy, zarówno w gronie własnym, jak i z naukowcami reprezentującymi inne dyscypliny nauki. Dzięki niej zarysowały się nowe perspektywy badawcze, co pozwoliło na aplikację metod, które jeszcze kilka lat temu nie były dostępne dla badaczy z Polski. Towarzyszył temu niezwykle entuzjazm i przeświadczenie, że dzięki zastosowaniu specjalistycznych metod, w szczególności mikroskopowych, artefakty, nawet te z najstarszych okresów dziejów człowieka, przestają być nieme.

W tym miejscu chcielibyśmy złożyć podziękowania wszystkim Autorom, którzy pozytywnie odpowiedzieli na nasze zaproszenie i przygotowali teksty do publikacji, angażując swoją wiedzę i czas. Bez ich udziału książka ta nigdy by nie powstała.

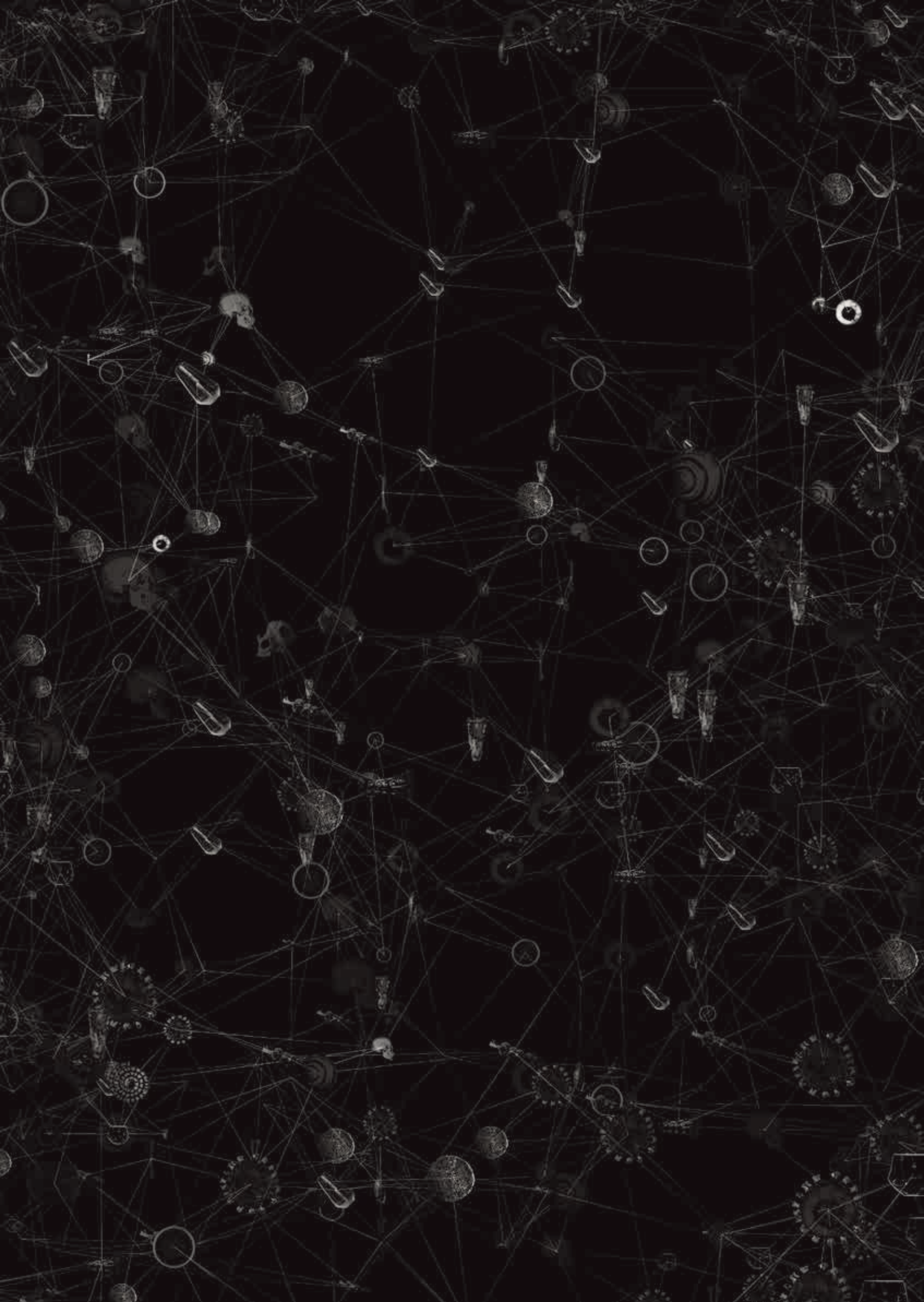
Serdeczne podziękowania kierujemy również pod adresem Pana prof. dr. hab. Andrzeja Michałowskiego, Dziekana Wydziału Archeologii UAM, za wsparcie naszego projektu.

## LITERATURA

- Bocheński, Z. (red.). 2000. *Podstawy archeozoologii. Ptaki*. Warszawa.
- Brothwell, D. 2016. *A Faith in Archaeological Science: Reflections on a Life* (Archaeological Lives Series). Oxford.
- Brothwell, D.R., Pollard, A.M. 2001. *Handbook of Archaeological Sciences*. Chichester.
- Brown, T., Brown, K. 2011. *Biomolecular Archaeology. An Introduction*. Chichester.
- Croft, S. 2021. *Lithic Residue Analysis. Review and guide to techniques*. BAR International Series 3023. Oxford.
- Dybova-Jachowicz, S., Sadowska, A. (red.). 2003. *Palinologia*. Kraków.
- Furholt, M. 2019. Re-integrating Archaeology: A Contribution to aDNA Studies and the Migration Discourse on the 3rd Millennium BC in Europe. *Proceedings of the Prehistoric Society* 85: 115-129.
- Henry, A.G. (red.). 2020. *Handbook for the Analysis of Micro-Particles in Archaeological Samples*. Cham.
- Grosman M. 2011. Społeczne oczekiwania a rzeczywiste potrzeby ochrony dziedzictwa kulturowego w Biskupinie, (w:) A. Marciniak, D. Minta-Tworzowska, M. Pawleta (red.), *Współczesne oblicza przeszłości*. Poznań, 187-203.
- Krapiec, M., Zielski, A. 2004. *Dendrochronologia*. Warszawa.
- Krzyżaniak, L. (red.). 1998. *Nauki przyrodnicze i fotografia lotnicza w archeologii*. Poznań.

- Lasota-Moskalewska, A. 1997. *Podstawy archeozoologii. Szczątki ssaków*. Warszawa.
- Lasota-Moskalewska, A. 2008. *Archeozoologia. Ssaki*. Warszawa.
- Lityńska-Zajac, M., Wasylukowa, K. 2005. *Przewodnik do badań archeobotanicznych*. Poznań.
- Ławecka, D. 2003. *Wstęp do archeologii*. Warszawa.
- Małecka-Kukawka, J. 2012. Traseologia – badania mikrośladów, (w:) S. Tabaczyński, A. Marciniak, D. Cyngot, A. Zalewska (red.), *Przeszłość społeczna. Próba konceptualizacji*. Poznań.
- Marreiros, J.M., Gibaja Bao, J.F., Bicho, N.F. 2015. *Use-Wear and Residue Analysis in Archaeology*. Cham.
- McGovern, P.E., Sever, T.L., Myers, J.W., Myers, E.E., Bevan, B., Miller, N.F. i in. 1995. Science in Archaeology: A Review. *American Journal of Archaeology* 99(1): 79–142.
- Pelisiak, A., Gębica, P. 2007. *Podstawy geomorfologii i gleboznawstwa dla archeologów*. Rzeszów.
- Piśkin, E., Marciniak, A., Bartkowiak, M. (red.). 2018. *Environmental Archaeology. Current Theoretical and Methodological Approaches*. Cham.
- Rączkowski, W. 2019. Fetyszyzacja: chwila namysłu nad technologiami i wizualizacjami w archeologii, (w:) A. Posern-Zieliński, J. Sawicka, J. Kabaciński, M. Kara, K. Zamel-ska-Monczak (red.), *Archeologia jako humanistyczna interpretacja przeszłości. Studia dedykowane Profesorowi Henrykowi Mamzerowi*. Poznań, 229–245.
- Renfrew, C., Bahn, P. 2002. *Archeologia. Teorie. Metody. Praktyka*. Warszawa.
- Tabaczyński, S., Marciniak, M., Cyngot, D., Zalewska, A. (red.). 2012. *Przeszłość społeczna. Próba konceptualizacji*. Poznań.
- Vander Linden, M. 2016. Population history in third-millennium-BC Europe: assessing the contribution of genetics. *World Archaeology* 48(5): 714–728.
- Walanus, A., Goslar, T. 2004. *Wyznaczanie wieku metodą 14C dla archeologów*. Rzeszów.
- Walanus, A., Goslar, T. 2009. *Datowanie radiowęglowe*. Kraków.
- Weiner, S. 2010. *Microarchaeology. Beyond the Visible Archaeological Record*. Cambridge.









# Palinologia

Piotr Kołaczek, Monika Karpińska-Kołaczek, Sambor Czerwiński,  
Katarzyna Marcisz, Mariusz Lamentowicz

---

## WSTĘP

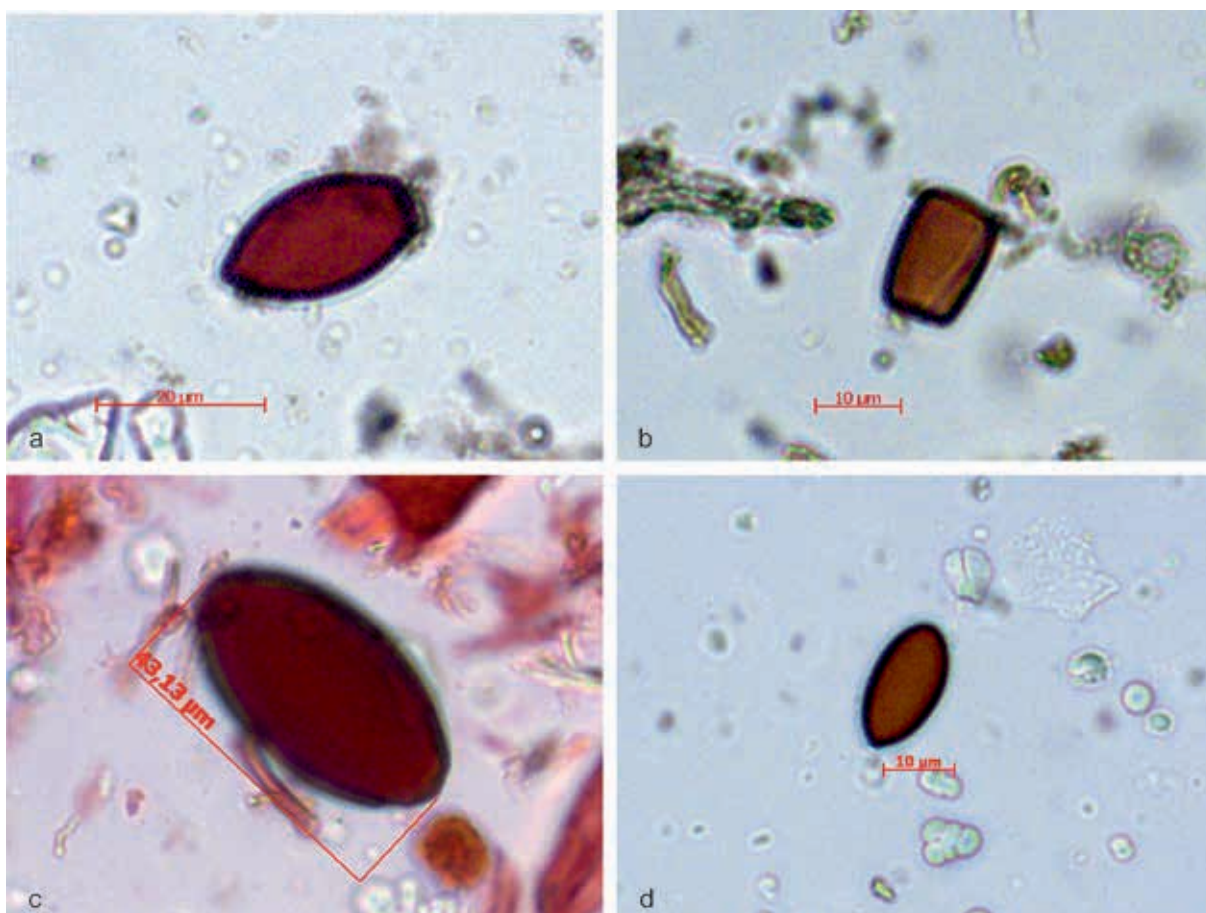
Ziarna pyłku roślin naczyniowych są mikroskopijnymi kapsułami przenoszącymi męskie komórki rozrodcze w pobliże ich żeńskich analogów, co skutkuje zapylaniem kwiatu i rozwojem owocu. Jednak, jak wszystkie komórki, również i te rozrodcze są wrażliwe na utratę wody. Aby uniknąć ich wysuszenia, ściana tej „kapsuły” zbudowana jest ze stosunkowo grubej zewnętrznej warstwy – egzyny, której materiałem budulcowym jest bardzo stabilna chemicznie sporopolenina (Moore i in. 1991). Ta cecha sprawia, że kiedy ziarno pyłku trafi np. na glebę, jest odporne na działanie szkodliwych czynników zewnętrznych. Jeśli dodatkowo środowisko, w którym takie ziarno pyłku zostaje zdeponowane, jest wilgotne i ubogie w tlen, wówczas może ono przetrwać setki, tysiące, a nawet miliony lat pogrzebane pod kolejnymi osadami (Moore i in. 1991). Stąd też najlepszymi archiwami paleoekologicznymi są jeziora i torfowiska, w których akumulują się różne pozostałości pochodzenia organicznego i nieorganicznego, m.in. pyłek roślin. Dzięki dużej wilgotności i niedoborze tlenu rozkład materii organicznej jest spowolniony, co pozwala na skuteczne archiwizowanie różnych mikrofosyliów (Campbell 1991; Campbell i Campbell 1994). Badania nad pyłkiem są domeną palinologii (od greckich słów: *palynejn* – rozpraszać, rozsiewać,

*pole* – drobny pył, *mąka*, *logos* – słowo, nauka), a w przypadku kopalnych ziaren pyłku mówimy o paleopalinologii (Sadowska i Chłopek 2003).

Jednakże podczas badań paleopalinologicznych można trafić nie tylko na pyłek. Zachowują się również szczątki zwierząt, roślin, protistów, grzybów, glonów, sinic czy mikroskopijnego węgla. Te mikrofosylia, które towarzyszą ziarnom pyłku, nazywają się zbiorczo palinomorfami niepyłkowymi (ang. *non-pollen palynomorphs*, ryc. 1). One również mogą być identyfikowane i liczone podczas analiz palinologicznych, dostarczając wielu cennych informacji o funkcjonowaniu dawnych ekosystemów i działalności człowieka (van Geel 1978; van Geel i Aptroot 2006). Z kolei oznaczając i licząc mikroskopijne fragmenty węgla (ryc. 2), można uzyskać informacje na temat pożarów, które występowały w przeszłości, w tym tych związanych z wypalaniem lasów, czy innych zbiorowisk roślinnych przez człowieka (Whitlock i Larsen 2001).

Analiza palinologiczna może również wspierać badania archeologiczne i historyczne, gdyż pozwala na odtworzenie składu i struktury roślinności, w której funkcjonował niegdyś człowiek. Ponadto sam człowiek kształtował środowisko, a efektem jego działalności były np. wylesienia. Widoczne są one jako spadki udziałów pyłku produkowanego przez drzewa i krzewy i/lub pojawienie się pyłku gatunków drzew i krzewów stanowiących pierwsze

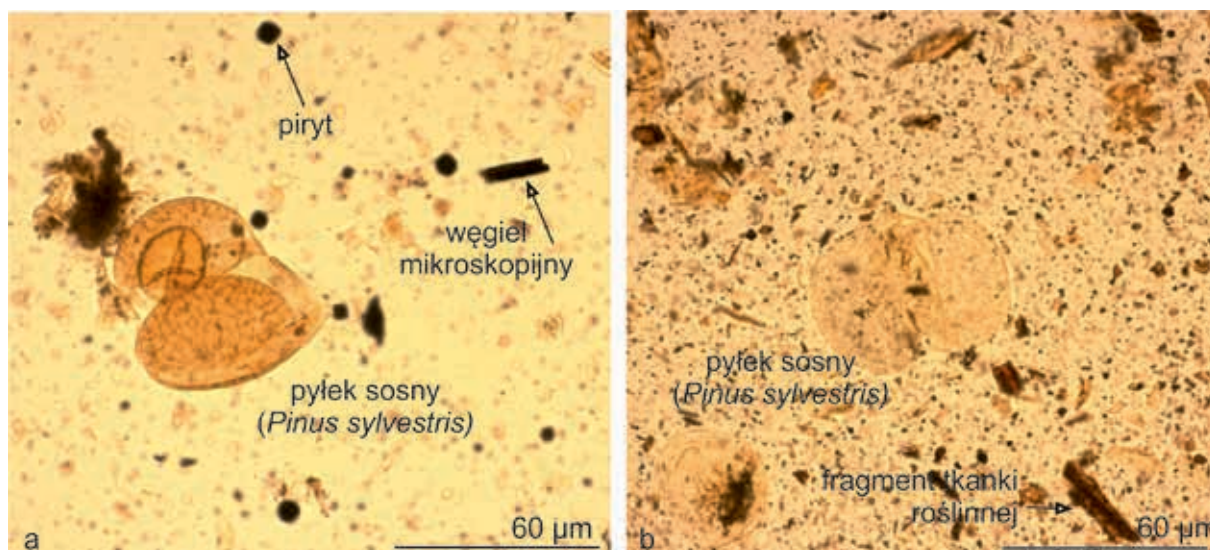




**Ryc. 1.** Zarodniki grzybów koprofilnych jako przykład palinomorf niepyłkowych (NPPs) oznaczanych w próbach palinologicznych: a – HdV-112 *Cercophora* typ; b – HdV-113 *Sporormiella* typ; c – HdV-368 *Podospora* typ; d – BRN-7. Fot. M. Karpińska-Kołaczek

etapy sukcesji na terenach wcześniej wylesionych. Najcenniejszymi dowodami na działalność człowieka, które palinolog może zidentyfikować pod mikroskopem, są ziarna pyłku zbóż świadczące o obecności pól uprawnych. Można również znaleźć bardziej subtelne ślady, takie jak grzyby koprofilne (tj. rozwijające się na odchodach, ryc. 1), które mogą wskazywać na intensyfikację działalności pasterskiej (Stivrins i in. 2015; Florenzano 2019; Dietre i in. 2020). W końcu to człowiek, wprowadzając zwierzęta pasterskie, przyczynił się do zwiększenia liczby roślinożerców w ekosystemach, a te do zwiększenia ilości odchodów będących pożywką dla tych grzybów. Jednakże najnowsze badania pokazują, że nie zawsze biomasa roślinożerców jest dobrze odzwierciedlona w ilości zachowanych w osadzie grzybów koprofilnych (Davies 2019; van Asperen i in. 2020; Shumilovskikh i van Geel 2020). Wraz z przyływem danych dokumentujących pojawianie się poszczególnych taksonów

pyłkowych w okresach zintensyfikowanej działalności człowieka, podjęto szereg prób klasyfikacji pyłkowych indykatorów działalności człowieka (Behre 1981; Poska i in. 2004). Choć trzeba tu zaznaczyć, że tego typu listy indykatorów pyłkowych mogą różnić się w zależności od obszaru dla którego zostały stworzone, dlatego należy je traktować z dużą dozą ostrożności. Wynika to z faktu, że tylko w wyjątkowych przypadkach konkretny typ pyłkowy jest tożsamy z jednym gatunkiem rośliny. Najczęściej poszczególne typy pyłkowe można przyporządkować do wielu gatunków, które mogą występować w skrajnie różnych siedliskach (Beug 2004). Stąd też dobrze jest, gdy badacz ma dodatkowo do dyspozycji wyniki analizy szczątków makroskopowych roślin (te można z dużo większą pewnością identyfikować do poziomu gatunku), które umożliwią wytypowanie „producentów” znajdującego w osadach pyłku. Równie ważne jest rozpoznanie typu archiwum paleoekologicznego, tzn.



**Ryc. 2.** Obraz spod mikroskopu świetlnego w zależności od analizowanego typu osadu: a – gytja jeziorna (stanowisko Bruszczevo, woj. wielkopolskie) – lepiej zachowane ziarna pyłku, problemem jest odróżnienie węgla od ziaren pirytu; b – rozłożony torf (stanowisko Bruszczevo, woj. wielkopolskie) – znacznie gorzej zachowane ziarna pyłku, większa ilość nieoznaczalnych szczątków organicznych. Fot. P. Kołaczek

określenie, czy mamy do czynienia z torfowiskiem, jeziorem, dawną fosą czy jeszcze innym typem stanowiska. Z tego powodu duże znaczenie mają też prace terenowe i umiejętność identyfikacji osadów biogenicznych (Tobolski 2000). Jednak aby w pełni wykorzystać potencjał badanego archiwum, dobrze jest korzystać z różnych analiz paleoekologicznych, które wzajemnie się dopełniają i pozwalają możliwie najlepiej opisać przeszłość.

Historia badań palinologicznych na stanowiskach archeologicznych sięga lat 50. XX w., kiedy analizie pyłkowej poddano materiał z kurhanów w północnych Niderlandach (Waterbolck 1956). Jednakże rozwój badań palinologicznych nad kurhanami i innymi typami grobowców przypadł dopiero na lata 80. i 90. XX w. (np. Casparie i Groenman-van Waateringe 1980; Andersen 1988; Makohonienko i in. 1998). Innymi obiektami archeologicznymi analizowanymi przez palinologów są fosy, rowy melioracyjne, groble i inne stanowiska w miejscach podmokłych (np. Troels-Smith 1959). Badane one były także na obszarze Polski (Wasylikowa i in. 1985; Latałowa 1999; Kittel i in. 2018). W ostatnim dziesięcioleciu dobrym przykładem badań palinologicznych są te prowadzone na materiale z fosy w Malborku, opublikowane przez Browna i Pluskowskiego (2011). Ponadto ważną gałęzią badań archeologicznych, angażującą analizy palinologiczne, są studia nad

zmianami środowiskowymi w miastach w przeszłości. Modelowym przykładem połączenia badań archeologicznych z palinologicznymi na terenie Polski mogą być badania z obszaru Gdańska (np. Święta-Musznicka i in. 2013; 2021). Przykłady zastosowania analizy palinologicznej w badaniach archeologicznych i historycznych można byłoby mnożyć i pewnie byłby to materiał na obszerną pozycję książkową. Zresztą szerszy zarys historii i rozwoju zastosowania palinologii w takich badaniach przedstawiała już Latałowa (2003). Stąd niniejsze opracowanie dotyczy jedynie wybranych aspektów użycia analiz palinologicznych w badaniach archeologicznych, w dużej części opartych na bezpośrednich doświadczeniach autorów niniejszej pracy.

## METODOLOGIA BADAŃ PALINOLOGICZNYCH: Z OSADU DO KOMPUTERA

Pierwszym etapem prac jest wytypowanie stanowiska do badań palinologicznych, co jest kluczowe dla późniejszej interpretacji wyników. Generalnie, im większy zbiornik, z którego pobierane są osady, tym większy zasięg ma obszar objęty rekonstrukcją (Jacobson i Bradshaw 1981). Zbiorniki niewielkie, takie jak nieduże jeziora czy torfowiska kotłowe, akumulują pyłek, który został wyprodukowany

przez rośliny rosnące w niewielkiej odległości od zbiornika lub w nim samym. Jednakże pyłek może być transportowany z miejsc położonych w różnej odległości od zbiornika akumulacyjnego. Przykładowo pyłek sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris*) może pochodzić zarówno z krawędzi, jak i z samego torfowiska, ale również z obszaru oddalonego nawet o kilka kilometrów, a z kolei pyłek turzyc (*Cyperaceae*) pochodzi najprawdopodobniej z najbliższego otoczenia stanowiska. Wiąże się to z wysokością, na której znajdują się pylniki, oraz różnym tempem opadania ziaren pyłku. Te lżejsze lub mające budowę spowalniającą opadanie, tym samym dłużej utrzymujące się w powietrzu, oraz produkowane na wyższych wysokościach będą przemieszczały się na dalsze odległości (por. Dyakowska 1937). Próby ze stanowisk archeologicznych i próbki glebowe reprezentują skrajnie lokalny zapis pyłkowy, stąd też większość pyłku w takich osadach będzie pochodziła bezpośrednio ze stanowiska lub jego najbliższego sąsiedztwa. Jeśli chcemy uzyskać jak najdokładniejszy obraz wpływu człowieka na środowisko, rdzeń z osadami biogenicznymi powinien zostać pobrany z jeziora lub torfowiska położonego w możliwie najbliższym sąsiedztwie stanowiska archeologicznego. Jednakże kombinacja stanowisk palinologicznych z dużych obiektów reprezentujących regionalny zapis paleośrodowiskowy, obiektów w otoczeniu stanowiska archeologicznego oraz pobór prób do analizy palinologicznej bezpośrednio z warstw archeologicznych powinny pomóc w wielowymiarowej rekonstrukcji zmian środowiska – od bardzo lokalnych po regionalne.

### Pobór prób

Kiedy już wytypujemy stanowisko badawcze, kolejnym etapem jest pobranie i identyfikacja osadów biogenicznych. Kluczowy jest taki ich pobór, który nie zaburzy stratygrafii, czyli kolejności warstw. Do tego celu wykorzystuje się specjalistyczne próbniki, z których najbardziej popularne są próbnik typu rosyjskiego (zmodyfikowana wersja – Instorf; por. Moore i in. 1991) i próbnik Więckowskiego (Więckowski 1961). W przypadku stanowisk archeologicznych praktykowane jest pobieranie sekwencji osadów ze ścian odkrywek (Tobolski 2000). Co ważne, w takich sytuacjach należy dokładnie oczyścić osad i dokonać w miarę szybkiego poboru materiału tak, żeby nie

doszło do zanieczyszczenia pyłkiem obecnym w powietrzu. Pobrane profile należy też jak najszybciej zabezpieczyć, żeby nie wysychały i nie uległy żadnym uszkodzeniom mechanicznym podczas transportu. W tym celu umieszcza się je w różnego rodzaju ry-nienkach, szczelnie owijając folią, aby spowolnić proces wysychania. Następnie profile powinny trafić do chłodziń lub zostać zamrożone, żeby uniknąć rozwoju grzybów czy innych mikroorganizmów na martwej materii organicznej. Takie grzyby mogłyby nie tylko dawać fałszywy sygnał wzorców palinomorf niepyłkowych, ale też "odmłodzić" wiek radiowęglowy osadów biogenicznych (Wohlfarth i in. 1998).

### W laboratorium

Po pobraniu niezaburzonego profilu osadów można przystąpić do próbkowania pod kątem analizy palinologicznej. Gęstość próbkowania będzie wpływała na szczegółowość otrzymanych wyników. Przy próbach pobranych w dużych interwałach głębokości, np. co 10 cm i więcej, wyniki będą obciążone dużą niepewnością. Przykładowo, jeśli nie będzie sygnału interesującej nas zmiany, to można zadać pytanie: czy ślad tego ważnego epizodu nie znalazł się na odcinku pomiędzy próbami? Stąd coraz popularniejsze są analizy w ciągłej rozdzielczości (co 1 cm, a nawet co 0,5 cm odstępu pomiędzy próbami), tym samym każda pobrana próba łączy się stratygraficznie z kolejną (np. Milecka i in. 2017; Czerwiński i in. 2021). Wówczas nie ma żadnych niezbadanych fragmentów i wcześniejsze pytanie staje się bezzasadne. Oczywiście w praktyce taka ciągła rozdzielczość prób wymusza analizę relatywnie krótkich serii czasowych i nie ma realnej możliwości przeanalizowania kilku metrów jednego profilu. Najczęściej, w pierwszej kolejności, wykonuje się analizę palinologiczną w niskiej rozdzielczości (co 10-20 cm), a następnie datuje metodą radiowęglową ( $^{14}\text{C}$ ) wybrane fragmenty profilu. W ten sposób odszukujemy najbardziej interesujące odcinki profilu i w ich obrębie zwiększamy rozdzielczość analiz i datowań. Ważne jest, żeby już na początku opróbować profil w jak największej rozdzielczości, co w przyszłości pozwoli na lepszy dobór prób do analiz. Niemniej jednak nie zawsze zagęszczenie prób jest niezbędne i ostatecznie to badacz decyduje, jaka rozdzielczość analiz będzie najlepsza dla rozwiązania problemu badawczego.



Zanim wybrane próby trafią pod mikroskop, muszą zostać poddane obróbce chemicznej (Faegri i in. 1989). Jej celem jest pozbycie się wszelkich możliwych zanieczyszczeń, które mogłyby utrudnić wykonanie preparatów mikroskopowych czy identyfikację materiału palinologicznego pod mikroskopem. Przykładowo, jedna z procedur zakłada zastosowanie: (i) 10 % kwasu chlorowodorowego (HCl) w celu usunięcia węglanów, (ii) gotowania w 10% wodorotlenku potasu (KOH), żeby usunąć kwasy huminowe oraz (iii) zalania próby 40% kwasem fluorowodorowym w celu usunięcia krzemionki. Kolejnym etapem jest tzw. acetoliza Erdtmanna (1960) mająca na celu usunięcie całej pozostałej treści organicznej z ziaren pyłku i spor, pozostawiając zewnętrzną warstwę sporopoleniny (wspomnianą we wstępie „kapsułę”), co znacznie ułatwia oznaczanie pyłku pod mikroskopem świetlnym. Na wczesnych etapach obróbki laboratoryjnej często dodaje się znaną liczbę ziaren lub spor indykatora, który pozwala na oszacowanie koncentracji pyłku (Stockmarr 1971). Takim indykatorem może być pyłek jakiegoś łatwego do zidentyfikowania i egzotycznego dla analizowanego materiału gatunku (np. *Eucalyptus* dla materiałów z Europy) lub taksonu rzadkiego w danej strefie klimatycznej (np. zarodniki *Lycopodium*). W warunkach europejskich najczęściej stosuje się tabletki o znanej liczbie spor gatunku *Lycopodium clavatum*, produkowane przez Uniwersytet w Lund. Przygotowany w laboratorium materiał zatapia się w glicerynie, żeby ułatwić sporządzenie preparatów mikroskopowych. Przedostatnim etapem przygotowania danych palinologicznych jest analiza mikroskopowa. Kropla przetworzonego laboratoryjnie osadu, osobno z każdej próby, trafia na szkiełko mikroskopowe i jest poddawana obserwacji. Preparaty przeglądane są pod mikroskopem świetlnym, pod powiększeniami 400× i rzadziej 1000×. Większe powiększenie stosuje się w przypadku identyfikacji niewielkich taksonów (<15 µm) lub posiadających bardzo drobne elementy struktury na powierzchni pyłku, np. oczka siateczki o średnicy mniejszej niż 1 µm. Taksony pyłkowe oznacza się i zlicza w pasach, zazwyczaj z powierzchni co najmniej połowy szkiełka nakrywkowego, do osiągnięcia interesującej nas liczby ziaren pyłku (wyłączając taksony wodne i błotne oraz rośliny zarodnikowe). Zazwyczaj liczy się do 500 ziaren pyłku roślin drzewiastych (ang. *arboreal pollen*, AP), ale należy pamiętać, że większa

liczba zwiększa prawdopodobieństwo znalezienia taksonów rzadkich, tj. pochodzących od roślin produkujących niewielkie ilości pyłku (Birks i Birks 1980). Te z kolei mogą reprezentować interesujące z punktu widzenia badań archeologicznych rośliny uprawne lub chwasty. Jest to ważne także w czasie interpretowania wyników palinologicznych. Jeśli rdzenie do badań pozyskano z dużego jeziora, wówczas obraz nawet dobrze rozwiniętej w przeszłości osady może być mocno rozmyty. Wynika to z faktu, że wiele gatunków roślin związanych z działalnością człowieka produkuje pyłek o małej lotności, odmiennie niż większość drzew, co skutkuje tym, że nie zawsze dociera on na środek dużego jeziora czy torfowiska. Ważne jest więc takie ustalenie liczby zliczanych ziaren, aby ograniczyć problemy z interpretacją wyników. Jednakże kiedy pyłek jest silnie zniszczony, doliczenie do 500 ziaren jest niezwykle trudne, a czasem nawet niemożliwe. Często należy wykonać wiele preparatów i poświęcić wiele godzin, żeby przeanalizować jedną próbę. Co gorsza, niektóre taksony pyłkowe szybciej ulegają rozkładowi i nawet duża liczba zliczonych ziaren może nie wystarczyć, aby uzyskać pełny obraz roślinności w przeszłości. Ponadto, w zależności od rodzaju osadu i jego wieku stan zachowania pyłku może być różny. W osadach, w których panował kwaśny odczyn i duża wilgotność (warunki beztlenowe), ziarna pyłku będą najlepiej zachowane (Campbell 1991; Campbell i Campbell 1994). Z kolei warunki, w których osady podlegają częstemu przesuszaniu (napowietrzaniu), nie będą sprzyjały konserwacji pyłku, dlatego stan jego zachowania może utrudniać lub nawet uniemożliwiać identyfikację. Do oznaczania pyłku stosuje się klucze i atlasy, które dla Europy są szczegółowo opracowane (np. Moore i in. 1991; Beug 2004). Ponadto wykorzystuje się zbiory preparatów porównawczych, tj. preparatów z oznaczonym pyłkiem współczesnych gatunków roślin. Najbogatsza kolekcja w Polsce znajduje się w Instytucie Botaniki PAN w Krakowie. Część zielników ma zdigitalizowane zbiory pyłkowe i udostępnia je na stronach internetowych (np. <https://globalpollenproject.org/>). O wiele trudniej jest w przypadku palinomorf niepyłkowych, dla których nie ma zbiorów porównawczych oraz atlasów, a większość informacji na ich temat jest rozproszona po licznych publikacjach. Typy palinomorf niepyłkowych mają swoją specjalną numerację, która często uwzględnia nazwę ośrodka, z którego



pochodził opisujący je badacz (np. HdV-X – Hugo de Vries University, Amsterdam; głównie palinomorfy niepyłkowe opisane przez Basa van Geela – prekursora analizy palinomorf niepyłkowych; van Geel 1978; Miola 2012) lub stanowiska (np. BRN-X; Feeser i O'Connell 2010). W ostatnich latach podjęto próbę zgromadzenia informacji o wszystkich poznanych palinomorfach w jednym miejscu, w otwartej elektronicznej bazie danych (<http://nonpollenpalynomorphs.tsu.ru/>), jednakże pomimo ciągłego rozwoju jest ona wciąż niekompletna, a typów palinomorf niepyłkowych wciąż przybywa.

Po przeanalizowaniu preparatu mikroskopowego, można go jeszcze przez jakiś czas przechowywać, zabezpieczając przed wysuszeniem brzoگی szkiełka nakrywkowego (np. żywicą). Preparaty zabezpiecza się, żeby mieć możliwość późniejszego sprawdzenia trudno oznaczalnych taksonów, jednak praktyka ta należy obecnie do rzadkości. Ważniejsze jest zostawienie materiału do analiz, zabezpieczonego w probówkach. Taki materiał może przetrwać wiele lat i jeśli ma dodany indykator, to można taką próbę ponownie przeanalizować i dołączyć nowe wyniki do już istniejących. W ten sposób można również uzupełnić uzyskane wcześniej wyniki o nowe analizy, np. palinomorf niepyłkowych czy węgla mikroskopijnego.

### Integracja danych

Ostatnim etapem przygotowania danych palinologicznych jest stworzenie diagramu zmian udziałów poszczególnych taksonów pyłkowych. Używa się do tego specjalistycznych programów komputerowych, z których najczęściej wybieranymi w Polsce są POLPAL (Nalepka i Walanus 2003) i TILIA (Grimm 1992). Diagramy palinologiczne można wygenerować, stosując wartości procentowe, tempo akumulacji lub koncentrację. W pierwszym przypadku wylicza się wartość procentową udziałów pyłku danego taksonu w próbie, w stosunku do tzw. sumy totalnej pyłku (z wyłączeniem zarodników oraz taksonów wodnych i błotnych). Wartości te są względne, a metoda jest czuła na nagłe wzrosty udziałów poszczególnych taksonów, dlatego ważna jest możliwie najdokładniejsza identyfikacja taksonów lokalnych. Przy tempie akumulacji pyłku wartości są bezwzględne (jednostka to np. liczba ziaren/cm<sup>2</sup>/rok). Niezbędne jest jednak poprawne oszacowanie

koncentracji pyłku w próbie (dzięki dodaniu znanej liczby łatwo oznaczalnych sporomorów, patrz wyżej) oraz tempa akumulacji osadów/torfu (tu niezbędna jest wysoka rozdzielczość datowań radiowęglowych i rzetelnie wyliczony model wieku-głębokość), co generuje większe koszty analizy. W ostatnim przypadku, podobnie jak przy tempie akumulacji pyłku, otrzymuje się wartości bezwzględne, ale bez niezbędnego oszacowania tempa akumulacji osadów. Metody te mają swoje wady, ale zestawienie wyników procentowych z tempem akumulacji pyłku pozwala na uniknięcie wielu potencjalnych błędów interpretacyjnych.

Tak w uproszeniu przedstawia się droga powstania i zobrazowania danych pyłkowych, które następnie są interpretowane, aby określić środowiskowy kontekst badań archeologicznych. Należy również wspomnieć, że wyniki analiz palinologicznych mogą być jeszcze poddane analizom statystycznym w celu wzmocnienia interpretacji danych oraz znalezienia powiązań z wynikami innych badań przeprowadzonych na stanowisku, zwłaszcza tych niewidocznych lub słabo widocznych „gołym okiem” (Birks 2019).

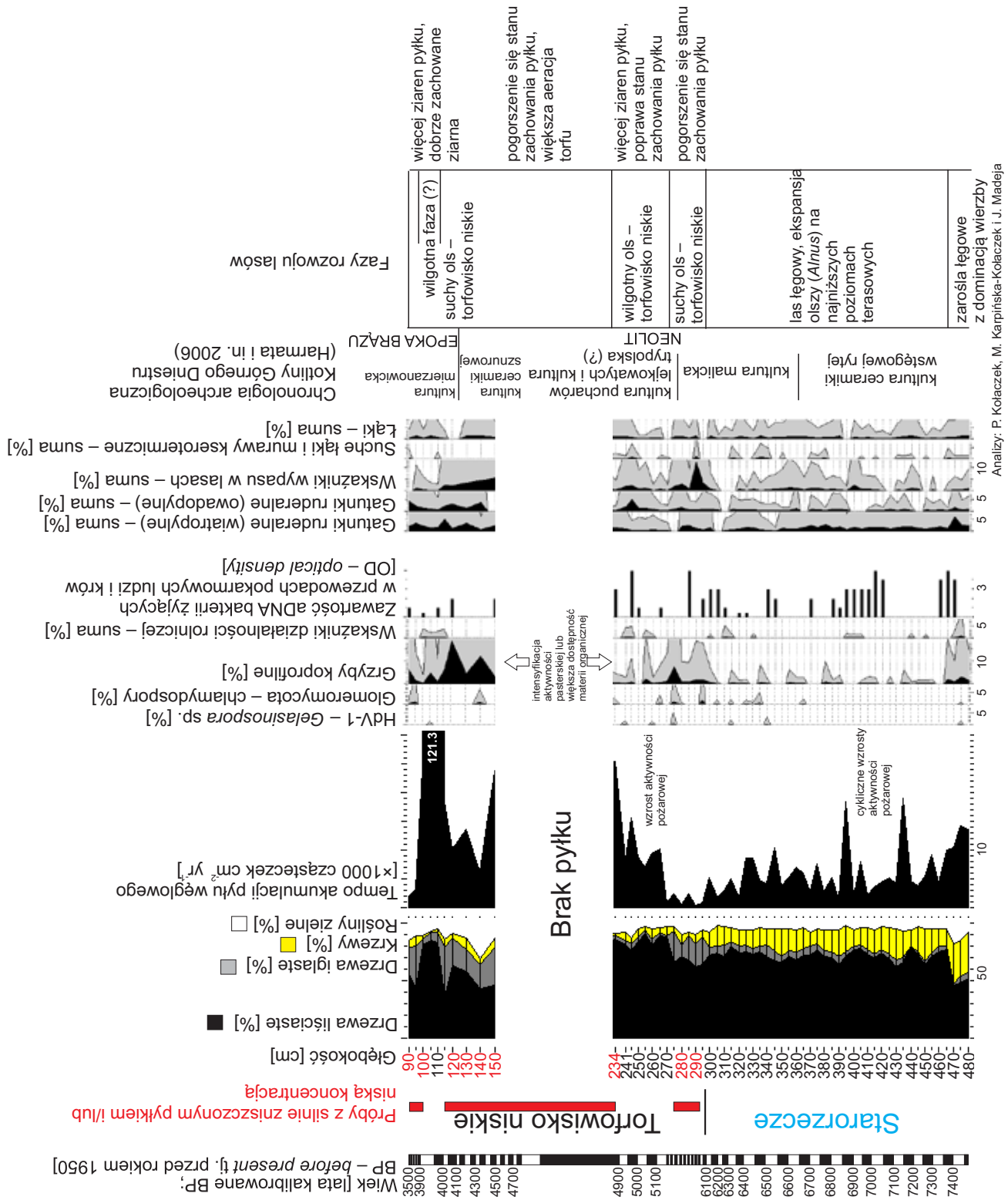
### Różne oblicza pyłku – starorzecza

Osadnictwo w pradziejach często było lokowane w pobliżu cieków czy zbiorników wodnych, które są miejscem akumulacji osadów biogenicznych, przez co stanowią archiwa paleoekologiczne doskonale przechowujące materiał pyłkowy. Spośród różnych typów jezior, starorzecza stanowią bardzo specyficzną grupę zbiorników, które powstają wskutek transformacji wód płynących w stojące, poprzez odcięcie zakola rzeki w trakcie epizodów powodziowych (Page 2004). W przeszłości okolice tego typu zbiorników stanowiły często atrakcyjne miejsca dla osadnictwa, więc mogły rejestrować palinologiczny sygnał wpływu osadnictwa na lokalne ekosystemy, a przez to stać się ważnymi obiektami dla rekonstrukcji zmian szaty roślinnej w kontekście badań archeologicznych. Niestety zbiorniki te podlegają wahaniom poziomu wody, co nie sprzyja dobremu zachowaniu ziaren pyłku. Ponadto torfowisko rozwijające się w miejscu starorzecza na skutek sukcesji ekologicznej jest podatne na ekspansję gatunków łąkowych, a wiele z nich produkuje ziarna pyłku klasyfikowane jako wskaźniki gospodarki człowieka (P. Kołaczek, obserwacja

własna). Może to niekorzystnie wpływać na poprawność rekonstrukcji zmian środowiska w przeszłości. Poza tym, ze względu na stosunkowo wąski kształt, starorzecza rejestrują zapis roślinności lokalnej lub znajdującej się w niewielkim oddaleniu od zbiornika. Kiedy przekształcają się w torfowiska, wówczas jeszcze mocniej reprezentowana jest roślinność lokalna (rosnąca na torfowisku) (Kołaczek i in. 2018a). Jednakże często z braku innej możliwości dane palinologiczne z tego typu zbiorników akumulacyjnych są wykorzystywane w multidyscyplinarnych badaniach archeologicznych (Kołaczek 2007; 2010; 2011; Kołaczek i in. 2016). Należy jednak pamiętać, że potencjalne sygnały wylesień w spektrach pyłkowych, zapisanych w ich osadach/torfie, powinno się interpretować z dużą dozą ostrożności.

Przykładem badań palinologicznych w ramach projektu archeologicznego były studia nad wpływem kultur neolitycznych i wczesnobrzozywych na środowisko naturalne w widłach Łomnicy i Dniestru (Kołaczek i in. 2016; ryc. 3). W badaniach tych, równoległe do kompleksowej analizy palinologicznej, została wykonana analiza obecności kopalnego DNA (ang. *ancient DNA*, aDNA) bakterii występujących w jelitach ludzi i bydła (Madeja i in. 2009) (por. Chyleński, w tym tomie). To pozwoliło na oszacowanie relatywnych zmian gęstości zaludnienia i/lub częstości przebywania ludzi w pobliżu starorzecza, a później torfowiska. Interesującym wynikiem była rozbieżność w czasie pomiędzy zapisem pyłkowym taksonów pochodzących prawdopodobnie od zbóż i zapisem kopalnego DNA sugerującego obecność człowieka. Można to tłumaczyć występowaniem gatunków traw produkujących ziarna pyłku zbliżone kształtem i wielkością do pyłku zbóż (Beug 2004). Mógł być to też efekt utrzymywania się w ekosystemie zbóż z wcześniej uprawianych, a następnie opuszczonych obszarów. W zapisie kopalnym szczególną uwagę zwraca okres obecności przedstawicieli wczesnoneolitycznej kultury ceramiki wstęgowej rytej, która reprezentowana była na badanym obszarze przez znikomą liczbę artefaktów archeologicznych. W tym okresie, w osadach starorzecza, wyraźnie zaznaczyły się dwie fazy z regularnie występującym aDNA wspomnianych bakterii oraz pojedynczymi znaleziskami ziaren pyłku w typie zbóż (*Cerealialia* typ). Może to sugerować, że siedzi-by ludzkie znajdowały się w stosunkowo bliskiej odległości od zbiornika, natomiast pola uprawne były

lokowane w pewnym oddaleniu od osady i starorzecza. W warstwach torfu odpowiadających okresowi późnoneolitycznej kultury ceramiki sznurowej oraz początkowemu etapowi epoki brązu zaobserwowano wzrost udziałów grzybów koprofilnych wskazujących na potencjalny wzrost presji pasterskiej w zlewni zbiornika (ryc. 1 i 3; Stivirs i in. 2015; Florenzano 2019; Dietre i in. 2020). Jednakże również w tym przypadku można podać alternatywne wyjaśnienie. Rozwój torfowiska i wiążąca się z tym intensywniejsza dekompozycja materii organicznej mogły spowodować zwiększenie liczebności zarodników grzybów uważanych za koprofilne. Niektóre z tych grzybów mogą bowiem rozwijać się również na martwej, rozkładającej się materii organicznej (np. grzyby z rodzaju *Cercophora*; Lundqvist 1972, za: van Geel i Aptroot 2006). Stąd też dla potwierdzenia obecności odchodów roślino- i wszystkożernych gatunków zwierząt ważna jest różnorodność taksonomiczna tych grzybów. Występowanie wielu taksonów jednocześnie może skłaniać do uznania wzrostu presji pasterskiej za przyczynę zmian. Taka sytuacja została stwierdzona w warstwach torfu reprezentujących udokumentowane okresy ekspansji ludności pasterskiej w Karpatach Zachodnich (Margielewski i in. 2011; Kołaczek i in. 2020). Jak wspomniano wcześniej, akumulacja torfu w dawnych starorzeczach nie sprzyja dobremu zachowaniu ziaren pyłku, co w znaczący sposób utrudnia interpretację. W wielu przypadkach długie odcinki profili torfowych są trudne do interpretacji, czego przykładem mogą być badania wypełnień starorzecza Kotliny Sandomierskiej (Kołaczek 2007; 2010; 2011). Analiza palinologiczna wykazała nadreprezentację taksonów pyłkowych, które są łatwe do oznaczenia nawet w przypadku złego stanu zachowania. Do takich taksonów należy sosna zwyczajna (*Pinus sylvestris*; ryc. 3), której pyłek, pomimo dużej podatności na zniszczenia podczas fosylizacji, często zachowuje swoje cechy diagnostyczne. Dlatego spektra pyłkowe w silnie rozłożonym torfie często sugerują obecność lasu sosnowego w otoczeniu stanowiska, podczas gdy sosna była prawdopodobnie jedynie domieszką w takich lasach (np. stanowisko Jarosław-Kruchel w Kotlinie Sandomierskiej; Kołaczek 2011). Jednak stopień zniszczenia pyłku może stanowić również istotną wskazówkę przydatną przy interpretacji wyników. Dla przykładu, nagła poprawa stanu zachowania pyłku może sugerować dłuższy okres panowania warunków beztlenowych,



Ryc. 3. Diagram palinologiczny ze starorzcza w Cwitoj (na podstawie Kołaczek i in. 2016). Wykonany w programie POLPAL

spowodowanych np. podniesieniem się poziomu wody na torfowisku, co może świadczyć o zwilgotnieniu klimatu. Do takiej sytuacji doszło w profilu z Cvitovej, gdzie zmiana warunków z jeziornych na torfowiskowe (ryc. 3) spowodowała znaczne pogorszenie się stanu zachowania pyłku oraz spadek jego koncentracji. Około 3200 lat p.n.e (5150 lat kal. BP; BP – lat przed 1950 r.) koncentracja pyłku wzrosła, a wraz z nią poprawił się stan jego zachowania, co zostało zinterpretowane jako podniesienie się poziomu wody (potencjalne zwilgotnienie klimatu).

Podsumowując, należy podkreślić, że starorzecza i torfowiska na nich rozwinięte to trudne pod względem interpretacji wyników archiwu paleoekologiczne. Zły stan zachowania pyłku oraz luki depozycyjne w osadzie mogą skutkować błędnymi interpretacjami dotyczącymi paleośrodowiska i działalności człowieka. Pomimo tylu negatywnych aspektów w badaniach archeologicznych starorzecza są często jedynymi dostępnymi archiwami paleośrodowiskowymi gromadzącymi pyłek. Dlatego jeżeli mamy obszar, na którym jedynymi archiwami są wypełnienia starorzeczy, należy poszukiwać osadów pochodzenia jeziornego (jeśli to możliwe), które konserwują pyłek lepiej niż silnie rozłożony torf.

### **PYŁEK ZE STANOWISK ARCHEOLOGICZNYCH – MIĘDZY ZNISZCZENIEM A ZANIECZYSZCZENIEM**

Analizy palinologiczne wykonuje się również bezpośrednio na próbach ze stanowisk archeologicznych. Jako przykłady można wymienić badania dotyczące neolitu z Kraju Nadmorskiego (wschodnia Rosja, Chlachula i in. 2015) oraz neolitu i brązu z centralnej Macedonii (północna Grecja; Niebieszczański i in. 2019). W przypadku stanowiska z Kraju Nadmorskiego próby pobierane były ze ściany wykopu, natomiast w przypadku stanowiska w centralnej Macedonii próby pobrano z niewielkiego zagłębienia bezodpływowego, tuż przy stanowisku archeologicznym. Oba te stanowiska, pomimo różnych warunków klimatycznych w jakich zachodziła akumulacja pyłku w osadach, cechowały się znacznym stopniem zniszczenia materiału pyłkowego. Stało się tak, ponieważ depozycja w warunkach zmiennej wilgotności, powodujących sekwencję kurczenia i rozszerzania się ziaren, przyspiesza ich niszczenie (Campbell 1991; Campbell i Campbell 1994).

Ponadto kontakt z tlenem intensyfikuje bakteryjny i grzybowy rozkład sporopoleniny (Elsik 1971; Havinga 1971), a co za tym idzie utratę możliwości oznaczenia pyłku lub jego całkowitą degradację. W przypadku osadów, które podlegają działaniu tlenu (na skutek przesuszenia), zjawisko spadku koncentracji pyłku zachodzi odwrotnie do kierunku przyrostu warstw (im starsza warstwa, tym mniej pyłku). Przykładem może być stanowisko Orlynyy Klyuch (ryc. 4; Chlachula i in. 2015), gdzie w zasadzie tylko warstwy przypowierzchniowe nadawały się do analizy palinologicznej. Problem spadku jakości interpretacyjnej materiału pyłkowego wraz z głębokością osadu pojawił się również we wspomnianych wcześniej multidyscyplinarnych badaniach nad tumbą Nea Raedestos (Niebieszczański i in. 2019). Jednakże w tym przypadku udało się zidentyfikować fazy ze zwiększoną liczebnością grzybów koprofilnych, mogących sugerować większą aktywność pasterską. Stanowisko Nea Raedestos jest również przykładem badań z rekonstrukcją palinologiczną o bardzo lokalnym zasięgu. Spektra pyłkowe zdominowane były przez taksony występujące wokół niewielkiego zbiornika wodnego, w którym następowała akumulacja. W obrazie pyłkowym dominowały taksony pochodzące od synantropijnych roślin zielnych, takich jak komosowate (Chenopodiaceae), astrowate – jęczminkowate (Cichoriaceae) i rdesty (*Polygonum aviculare* typ) (por. Behre 1981).

W badaniach na obu stanowiskach pojawił się też inny problem związanym z jakością zachowania ziaren pyłku. Otóż w niektórych próbach wykryto współwystępowanie ziaren zniszczonych i bardzo dobrze zachowanych. Tłumaczenie tego zjawiska zanieczyszczeniem współczesnym pyłkiem wydaje się logiczne, choć istnieje też inne wyjaśnienie. Współwystępowanie ziaren o różnym stopniu skorodowania może być efektem redepozycji osadu. Pyłek od samego początku akumulowany w środowisku wodnym zachowa się dobrze, natomiast ten redeponowany, z przesuszającej się cyklicznie gleby w otoczeniu takiego stanowiska, będzie nosił już ślady korozji. Stąd ważnym elementem dla późniejszej interpretacji wyników analizy pyłkowej ze stanowisk archeologicznych jest szczegółowy opis osadów, jak również maksymalne ograniczenie ekspozycji prób przeznaczonych do analiz na warunki zewnętrzne. Należy również notować w trakcie analizy mikroskopowej informację o stanie zachowania ziaren pyłku.





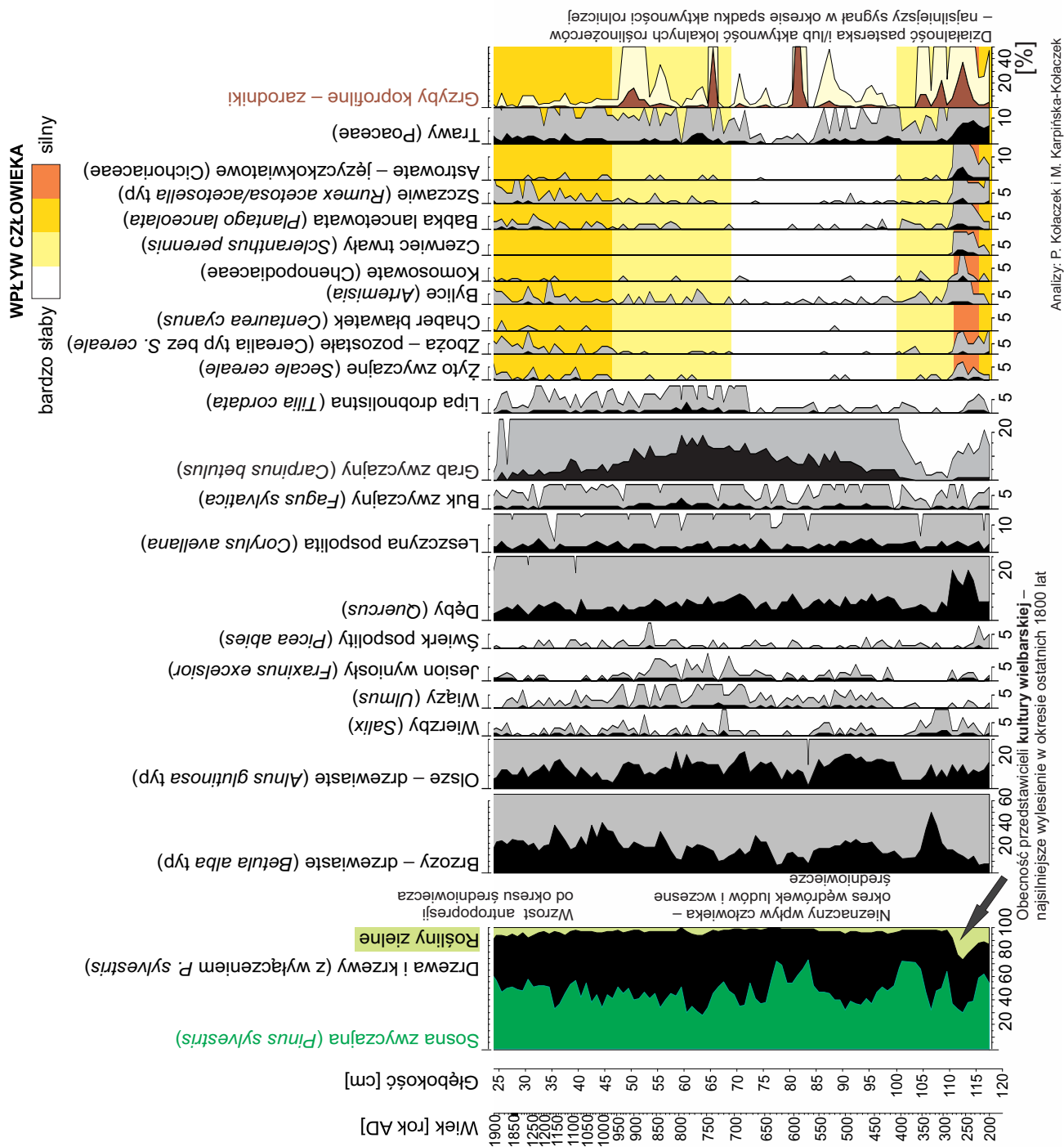
### KIEDY BADANIA PALINOLOGICZNE OTWIERAJĄ DRZWI ARCHEOLOGOM I HISTORYKOM?

Jednym z częstych problemów, jakie pojawiają się podczas interpretacji analiz palinologicznych, jest niedobór danych archeologicznych, ich duże rozproszenie w literaturze oraz problemy z ich dostępnością (np. Karpińska-Kołaczek i in. 2014; Lamentowicz i in. 2019). W takich przypadkach trudno jest oszacować potencjalny wpływ człowieka na szatę roślinną, zwłaszcza kiedy próbujemy jednocześnie określić wpływ klimatu na ekosystemy w przeszłości. Wtedy kluczowe staje się ustalenie powodu nasilenia jakiegoś zjawiska. Przykładowo, czy przyczyną spłukiwania osadów ze zlewni do jeziora było antropogeniczne wylesienie, nasilenie opadów czy oba te czynniki? Są też sytuacje, kiedy analiza palinologiczna wyraźnie pokazuje wpływ człowieka na środowisko związany z potencjalnie zaawansowanym osadnictwem na danym obszarze, a obszar ten nigdy nie był szczegółowo eksplorowany pod kątem archeologicznym. Do takich stanowisk można zaliczyć torfowisko Głęboćek znajdujące się w Borach Tucholskich (Lamentowicz in., 2019), w którego spektrach palinologicznych zarejestrowano bardzo silne wylesienia przypisane do okresu osadnictwa kultury wielbarskiej (epoka żelaza; ok. 50-450 n.e.). Co ważne, sygnał ten nie był efektem jedynie lokalnych zmian na torfowisku, ale został również potwierdzony przez szczegółową analizę palinologiczną przyległego jeziora (Jezioro Głęboćek, Obremska i in. 2017). W obu przypadkach zarejestrowane w materiale pyłkowym wylesienie wydawało się najsilniejsze w skali ostatnich 2000 lat, jednak najbliższe znaleziska archeologiczne kultury wielbarskiej znajdowane były 7-10 km od torfowiska (Lamentowicz i in. 2019, za: Szymańska 1974). W przypadku Jeziora Czarnego leżącego na Pojezierzu Mazurskim ślady palinologiczne wskazywały na możliwość intensywniejszej działalności człowieka już od okresu wczesnego brązu (około 1300 lat p.n.e.; Karpińska-Kołaczek i in. 2014). Jednakże w bliskim otoczeniu stanowiska brak było szczegółowych badań archeologicznych. Podobnie było podczas badań nad młodszymi materiałami. W pracy z torfowiska Pawski Ług, leżącego w pobliżu Łagowa (zachodnia Polska), uwagę zwraca dysproporcja w dostępności źródeł historycznych i archeologicznych. Dostępne są dość bogate źródła

historyczne dotyczące eksploatacji środowiska przez miejscową ludność w okresie od osiedlenia się tam joannitów. Niewiele jednak wiadomo na temat okresu panowania na tym obszarze słowiańskiego plemienia Lubuszan i okresu wczesnego państwa polskiego (Lamentowicz i in. 2020). Badania palinologiczne, w połączeniu z analizą różnych frakcji pyłu węglowego, wskazały na częstsze wykorzystanie ognia w pozyskiwaniu terenów pod uprawy, czy też w eksploatacji ówczesnych lasów (np. wypalanie węgla drzewnego, wypalanie lasu) w okresie przed joannitami. Jednak uściślenie informacji związanych z działalnością człowieka przed nastaniem władzy joannitów na tamtym obszarze to już zadanie dla archeologów i historyków.

Kolejnym przykładem są badania nad historią roślinności i zmianami poziomu wody w Kotlinie Orawsko-Nowotarskiej w czasie ostatnich 2000 lat (Kołaczek i in. 2010; 2018b). W tych badaniach, choć wątek wpływu człowieka stanowił poboczny temat, udało się przedstawić palinologiczne dowody na prawdopodobną obecność poletek uprawnych na obszarach aluwialnych Dunajca, jeszcze przed średniowieczną kolonizacją tych obszarów. Dotychczasowe źródła historyczne wskazywały, że obszar Kotliny Orawsko-Nowotarskiej był pokryty gęstymi lasami z systemem bagien i torfowisk, które nie były zamieszkiwane do XII w. n.e. Obszary te miały być naturalną „zieloną barierą” przed najazdami z południa (Łajczak 2006), choć niektórzy badacze już wcześniej sugerowali okresowe wykorzystanie lokalnych żyznych aluwii pod pola uprawne (Dobrowolski 1970).

Przykładem ścisłej współpracy palinologów z historykami są badania na torfowisku Kazanie koło Pobiedzisk pod Poznaniem obejmujące okres ostatnich 1200 lat (Czerwiński i in. 2019; 2021). Jest to pierwsze tak wysokorozdzielcze studium zmian szaty roślinnej dla tej części Wielkopolski. Profil z tego torfowiska został przeanalizowany w ciągłym opróbowaniu (bez przerw) oraz bardzo dokładnie wydutowany (jedna data radiowęglowa na każde 10 cm profilu), co jest nowym aspektem w badaniach paleoekologicznych Wielkopolski. Jako że stanowisko Kazanie zlokalizowane jest pomiędzy Poznaniem a Gnieznem, zarejestrowało ono zmiany środowiska związane z dynamicznym rozwojem państwa polskiego w połowie X w. n.e. (Czerwiński i in. 2021). Wiele źródeł historycznych podaje, że takie przedsięwzięcie jak budowa grodów doprowadziło do całkowitej/



**Ryc. 5.** Diagram palinologiczny ze stanowiska Głęboczek (na podstawie Lamentowicz i in. 2019 oraz niepublikowanych materiałów P. Kołaczka). Wykonany w programie TILIA



znaczącej wycinki dębów w otoczeniu stanowisk, a nawet do całkowitej deforestacji na obszarze między Poznaniem a Ostrowem Lednickim (Dzieduszycki 1976; Krąpiec 1998; Kurnatowska 2011; Trzeciecki 2016). Jednak badania Czerwińskiego i in. (2019; 2021) pokazują, że dęby w pobliżu torfowiska Kazanie nie tylko były liczne (>10% udziałów pyłkowych), ale również nie doszło do żadnych istotnych zmian w ich udziale w lasach między IX a XI w. n.e. Tym samym na pewno nie wszystkie dęby zostały wycięte. Pokazuje to, że nawet utarte poglądy, choć wydają się słuszne z archeologicznego i historycznego punktu widzenia, powinny być co jakiś czas weryfikowane przez badania paleośrodowiskowe, w tym palinologiczne. Dodatkowo analiza palinologiczna może dostarczać też istotnych informacji o potencjalnych miejscach do badań archeologicznych, czyniąc tę analizę wartościowym narzędziem w pracy archeologów i historyków.

## PODSUMOWANIE

Analizy palinologiczne dostarczają istotnych informacji dotyczących warunków przyrodniczych, w jakich funkcjonowały grupy ludzkie w przeszłości. Dostarczają też danych o zasobach leśnych, a wraz z analizą mikroskopijnych węgli mogą umożliwić odtworzenie sposobów używania ognia w pozyskiwaniu terenów do polowań czy upraw. Pozwala to w mniej lub bardziej dokładny sposób zrekonstruować strukturę roślinności lasów i terenów otwartych. Dzięki grzybom koprofilnym można uzyskać informacje o zmianach w presji pasterskiej na środowisko. Ponadto widoczne w obrazie palinologicznym glony mogą wskazywać na wahania poziomu wody na torfowiskach i w jeziorach, a przez to pośrednio dawać informację na temat warunków klimatycznych i hydrologicznych, w jakich funkcjonowali kiedyś ludzie. Jednakże, aby wyniki analiz palinologicznych mogły „służyć” badaniom archeologicznym, wiele istotnych warunków musi zostać spełnionych. Przede wszystkim należy pamiętać, że materiał do analiz palinologicznych powinien zostać pobrany z osadów lub torfu, które dają możliwość jak najlepszego zachowania pyłku. Ważne jest, z jakim typem archiwum paleoekologicznego mamy do czynienia – czy jest to duże jezioro rejestrujące regionalne zmiany (promień kilku lub kilkunastu kilometrów), czy analizujemy próbę z warstwy

kulturowej, która będzie miała bardzo lokalny zapis (informacja w promieniu kilku lub kilkunastu metrów). Jeżeli dane palinologiczne pochodzą ze zbiornika spoza stanowiska archeologicznego, wówczas jego wielkość czy szacowana pierwotna wielkość i oddalenie od stanowiska archeologicznego mogą wskazać, czy zasadne jest zestawienie tych dwóch zapisów. A jeżeli mamy pewność, że dane palinologiczne można zestawić z danymi archeologicznymi, należy wówczas wykonać szereg datowań radiowęglowych osadów, które pozwolą skorelować oba typy danych ze sobą. Ponadto stopień zachowania materiału pyłkowego nie zawsze jest sprzymierzeńcem we współpracy palinologów i archeologów, gdyż potrafi doprowadzić do mylnych interpretacji danych dotyczących roślinności w przeszłości. Podobnie jest w przypadku materiału zanieczyszczonego, dlatego zawsze należy pamiętać, aby materiał przeznaczony do analiz palinologicznych chronić przed warunkami zewnętrznymi. Jednak aby analizy palinologiczne mogły jak najlepiej wesprzeć badania archeologiczne, ważne jest równoległe wykonanie innych analiz paleoekologicznych, co pozwoli na weryfikację wyników i ograniczy błędy interpretacyjne.

## LITERATURA

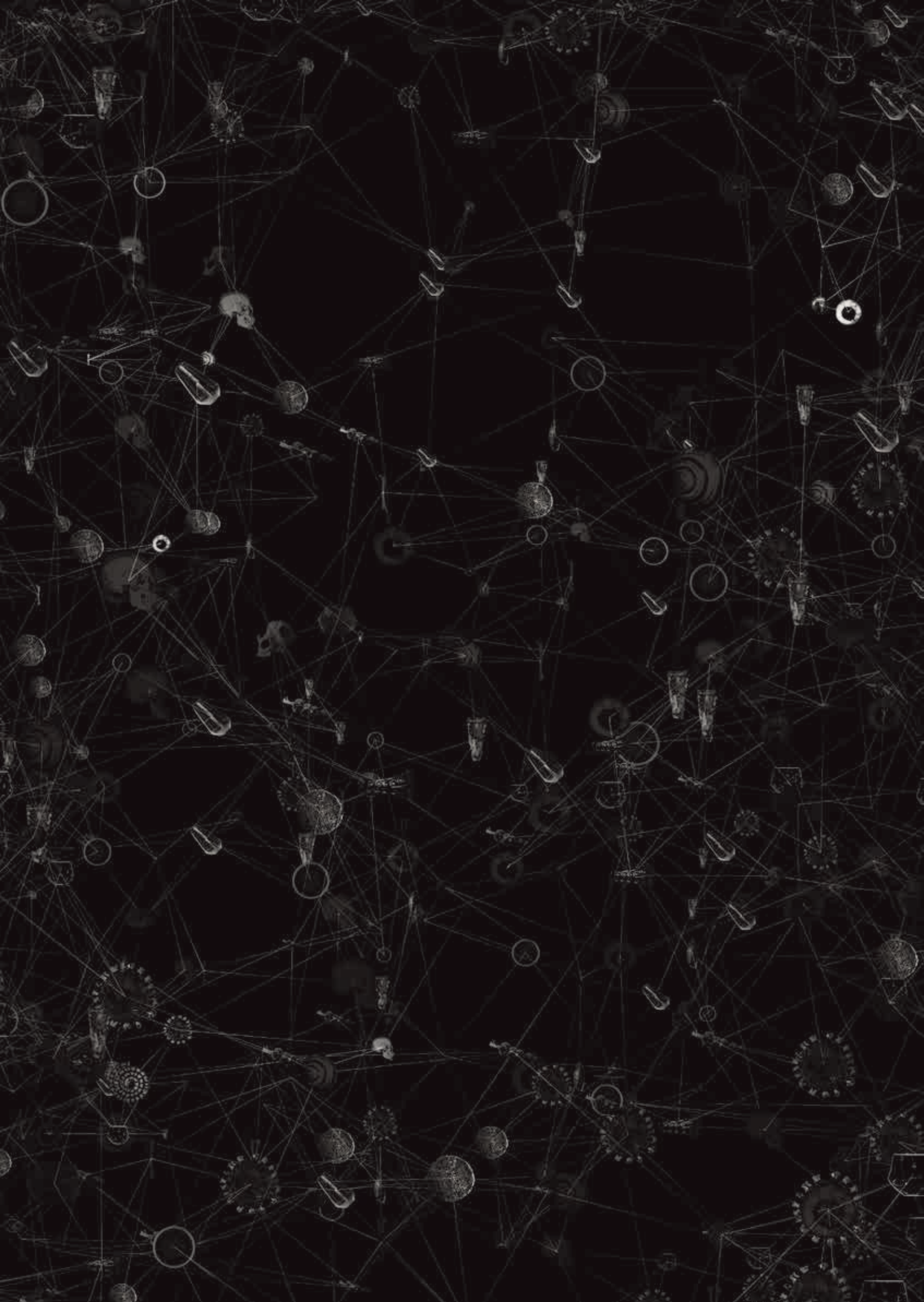
- Andersen, S.T. 1988. Pollen spectra from the double passage-grave, Klekkendehøj, on Mon. Evidence of swidden cultivation in the Neolithic of Denmark. *Journal of Danish Archaeology* 7: 77–92.
- Behre, K. 1981. The interpretation of anthropogenic indicators in pollen diagrams. *Pollen et Spores* 23: 225–245.
- Beug, H. 2004. *Leitfaden der Pollenbestimmung für Mitteleuropa und angrenzende Gebiete*. Munich.
- Birks, H.J.B. 2019. Contributions of Quaternary botany to modern ecology and biogeography. *Plant Ecology and Diversity* 12: 189–385.
- Birks, H.J.B., Birks, H.H. 1980. *Quaternary Palaeoecology*. London.
- Brown, A.D., Pluskowski, A. 2011. Detecting the environmental impact of the Baltic Crusades on a late-medieval (13th–15th century) frontier landscape: Palynological analysis from Malbork Castle and hinterland, Northern Poland. *Journal of Archaeological Science* 38(8): 1957–1966.
- Campbell, I. 1991. Experimental mechanical destruction of pollen grains. *Palynology* 15: 29–33.
- Campbell, I., Campbell, C. 1994. Pollen preservation: experimental wet/dry cycles in saline and desalinated sediments. *Palynology* 18: 5–10.

- Casparie, E.A., Groenman-van Waateringe, W. 1980. Palynological analysis of Dutch barrows. *Palaeohistoria* 22: 1-65.
- Chlachula, J., Lynsha, V.A., Kołaczek, P., Tarasenko, V.N. 2015. Neolithic and Aeneolithic Environments in the Central Primor'ye Region (the Bol'shaya Ussurka Valley), the Russian Far East. *Quaternary International* 370: 127-144.
- Czerwiński, S., Guzowski, P., Karpińska-Kołaczek, M., Lamentowicz, M., Gałka, M., Kołaczek, P., Izdebski, A., Ponią, P. 2019. Znaczenie wspólnych badań historycznych i paleoekologicznych nad wpływem człowieka na środowisko. Przykład ze stanowiska Kazanie we wschodniej Wielkopolsce. *Studia Geohistorica* 7: 56-74.
- Czerwiński, S., Guzowski, P., Lamentowicz, M., Gałka, M., Karpińska-Kołaczek, M., Ponią, R., Łokas, E., Diaconu, A.-C., Schwarzer, J., Miecznik, M., Kołaczek, P. 2021. Environmental implications of past socio-economic events in Greater Poland during the last 1200 years. Synthesis of paleoecological and historical data. *Quaternary Science Reviews* 259: numer artykułu 106902
- Davies, A.L. 2019. Dung fungi as an indicator of large herbivore dynamics in peatlands. *Review of Palaeobotany and Palynology* 271: numer artykułu 104108.
- Dietre, B., Reitmaier, T., Walser, C., Warnk, T., Unkel, I., Hajdas, I., Lambers, K., Reidl, D., Haas, J.N. 2020. Steady transformation of primeval forest into subalpine pasture during the Late Neolithic to Early Bronze Age (2300-1700 BC) in the Silvretta Alps, Switzerland. *Holocene* 30: 355-368.
- Dobrowolski, K. 1970. Najstarsze osadnictwo Podhala, (w:) W. Antoniewicz, K. Dobrowolski, W.H. Paryski (red.), *Studia Podhalańskie i bibliografii a pasterstwa Tatr i Podhala*. Wrocław-Warszawa-Kraków, 23-88.
- Dyakowska, J. 1937. Researches on the rapidity of the falling down of pollen of some trees. *Extrait du Bulletin de l'Academie Polonaise des Sciences et des Lettres Series B*, 1: 155-168.
- Dzieduszycki, W. 1976. Wykorzystywanie surowca drzewnego we wczesnośredniowiecznej i średniowiecznej Kruszwicy. *Kwartalnik Historii Kultury Materialnej* 24(1): 35-54.
- Elsik, W.C. 1971. Microbial degradation of sporopollenin, (w:) J. Brooks, P.R. Grant, M. Muir, P. van Gijzel, G. Shaw (red.), *Sporopollenin*. New York, 480-511.
- Erdtman, G. 1960. The acetolysis method. *Svenska Botanische Tidsskrift*, 54: 561-564.
- Faegri, K., Kaland, P.E., Krzywiński, K. 1989. *Textbook of pollen analysis. IV ed.* Chichester-Singapore.
- Feeser, I., O'Connell, M. 2010. Late Holocene land-use and vegetation dynamics in an upland karst region based on pollen and coprophilous fungal spore analyses: An example from the Burren, western Ireland. *Vegetation History and Archaeobotany* 19(5): 409-426.
- Florenzano, A. 2019. The history of pastoral activities in S Italy inferred from palynology: A long-term perspective to support biodiversity awareness. *Sustainability (Switzerland)* 11(2): numer artykułu 404.
- Grimm, E.C. 1992. TILIA/TILIA Graph, Version 1.2. Springfield, Illinois.
- Harmata, K., Machnik, J., Starkel, L. 2006. Transformation of natural environment by human activities, (w:) K. Harmata, J. Machnik, L. Starkel (red.), *Environment and man at the Carpathian Foreland in the Upper Dniester catchment from Neolithic to Early Mediaeval Period*. Prace Komisji Prehistorii Karpat, Tom III. Kraków, 245-251.
- Havinga, A.J., 1971. An experimental investigation into the decay of pollen and spores in various soil types, (w:) J. Brooks, P.R. Grant, M.D. Muir, P. van Gijzel, G. Shaw (red.), *Sporopollenin*. London, 446-478.
- Jacobson, G.L.Jr, Bradshaw, R.J. 1981. The selection of sites for palaeovegetational studies. *Quaternary Research* 16(1): 80-96.
- Karpińska-Kołaczek, M., Kołaczek, P., Stachowicz-Rybka, R. 2014. Pathways of woodland succession under low human impact during the last 13,000 years in northeastern Poland. *Quaternary International* 328-329(1): 196-212.
- Kittel, P., Sikora, J., Antczak, O., Brooks, S.J., Elias, S., Krąpiec, M., Luoto, T.P., Borówka, R.K., Okupny, D., Pawłowski, D., Płóciennik, M., Rzedkiewicz, M., Stachowicz-Rybka, R., Wacnik, A. 2018. The palaeoecological development of the Late Medieval moat - Multiproxy research at Rozprza, Central Poland. *Quaternary International* 482: 131-136.
- Kołaczek, P. 2007. Late Glacial and Holocene vegetation changes in the western part of Rzeszów foothills (Sandomierz basin) based on the pollen diagram from Krasne near Rzeszów. *Acta Palaeobotanica* 47(2): 455-467.
- Kołaczek, P. 2010. The development of late glacial and holocene vegetation and human impact near Grodzisko Nowe in the Lower San Valley (Sandomierz Basin, south-eastern Poland). *Acta Palaeobotanica* 50(2): 101-117.
- Kołaczek, P. 2011. 12 millennia of climatic and human induced vegetation changes in the Lower San Valley near Jarosław (SE Poland) in the light of pollen analysis. *Studia Quaternaria* 28: 25-39.
- Kołaczek, P., Fiałkiewicz-Kozieł B., Karpińska-Kołaczek, M., Gałka, M., 2010. The last two millennia of vegetation development and human activity in the Orawa-Nowy Targ Basin (south-eastern Poland). *Acta Palaeobotanica* 50(2): 133-148.
- Kołaczek, P., Karpińska-Kołaczek, M., Madeja, J., Kalinowych, N., Szczepanek, K., Gębica, P., Harmata, K. 2016. Interplay of climate-humane-vegetation on the north-eastern edge of the Carpathians (Western Ukraine) between 7500 and 3500 calibrated years BP. *Biological Journal of Linnean Society* 119(3): 609-629.
- Kołaczek, P., Gałka, M., Apolinarska, K., Płóciennik, M., Gąsiorowski, M., Brooks, S.J., Hutchinson, S.M.,

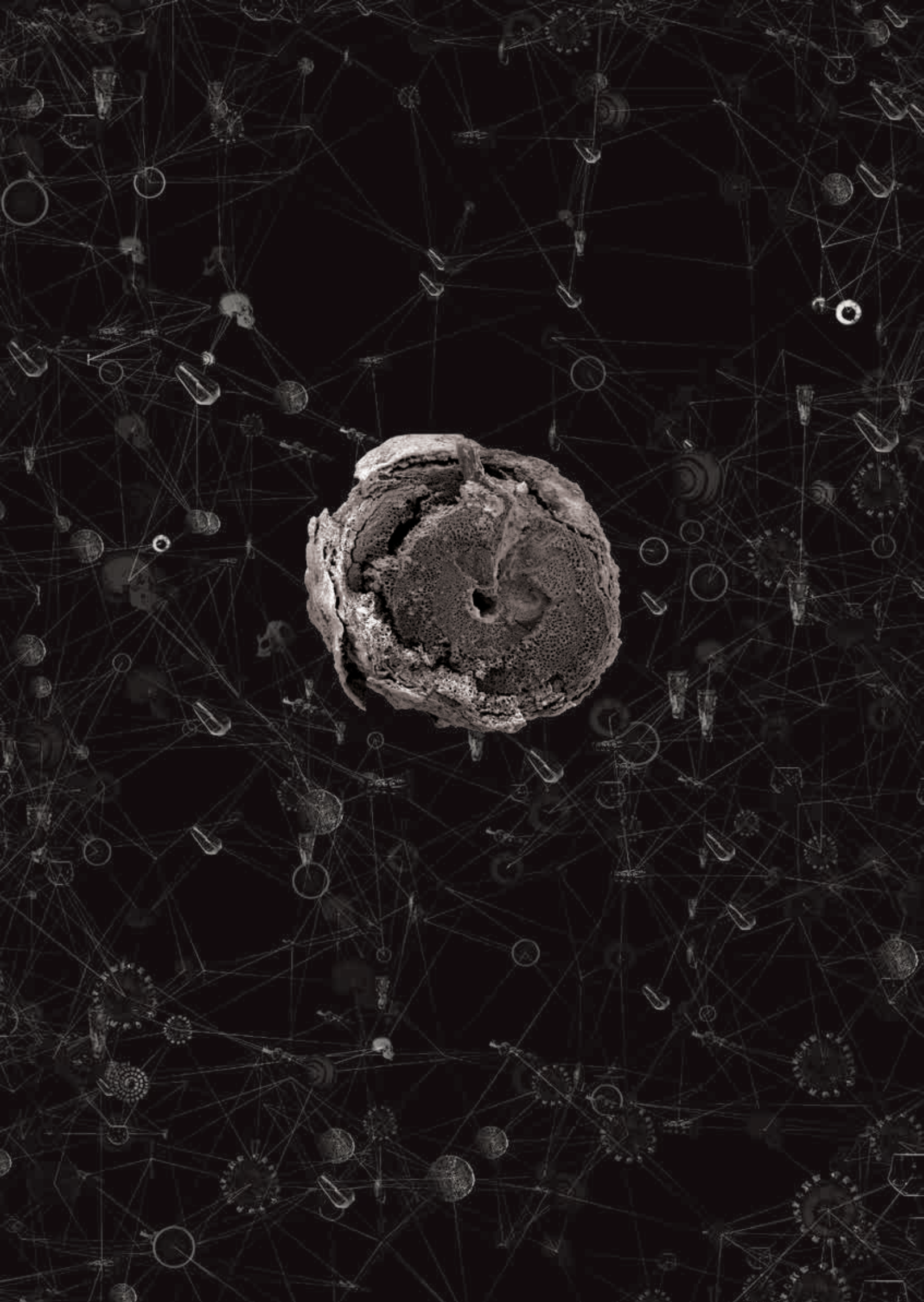
- Karpińska-Kołaczek, M. 2018a. A multi-proxy view of exceptionally early postglacial development of riparian woodlands with *Ulmus* in the Dniester River valley, western Ukraine. *Review of Palaeobotany and Palynology* 250: 27–43.
- Kołaczek, P., Karpińska-Kołaczek, M., Marcisz, K., Gałka, M., Lamentowicz, M. 2018b. Palaeohydrology and the human impact on one of the largest raised bogs complex in the Western Carpathians (Central Europe) during the last two millennia. *Holocene* 28(4): 595–608.
- Kołaczek, P., Margielewski, W., Gałka, M., Karpińska-Kołaczek, M., Buczek, K., Lamentowicz, M., Borek, A., Zernitskaya, V., Marcisz, K. 2020. Towards the understanding the impact of fire on the lower montane forest in the Polish Western Carpathians during the Holocene. *Quaternary Science Reviews* 229: numer artykułu 106137.
- Krąpiec, M. 1998. Oak dendrochronology of the Neoholocene in Poland. *Folia Quaternaria* 69: 5–133.
- Kurnatowska, Z. 2011. Grzybowo pod Wrześnią – potężny gród wczesnopiastowski. *Landform Analysis* 16: 56–58.
- Lamentowicz, M., Marcisz, K., Guzowski, P., Gałka, M., Diaconu, A.-C., Kołaczek, P. 2020. How Joannites' economy eradicated primeval forest and created anthroecosystems in medieval Central Europe. *Scientific Reports* 10(1): numer artykułu 18775.
- Lamentowicz, M., Kołaczek, P., Mauquoy, D., Kittel, P., Łokas, E., Słowiński, M., Jassey, V., Niedziółka, K., Jakubał-Drygalska, K., Marcisz, K. 2019. Always on the tipping point – A search for signals of past societies and related peatland ecosystem critical transitions during the last 6500 years in N Poland. *Quaternary Science Reviews*, numer artykułu 22521.
- Latałowa, M. 1999. Palaeoecological reconstruction of environmental conditions and economy in early medieval Wolin against a background of the Holocene history of the landscape. *Acta Palaeobotanica* 39(2): 183–271.
- Latałowa, M. 2003. Badania palinologiczne na stanowiskach archeologicznych, (w:) S. Dybowa-Jachowicz, A. Sadowska (red.), *Palinologia*. Kraków, 308–312.
- Lundqvist, N., 1972. Nordic Sordariaceae s. lat. *Symbolae botanicae Upsalienses* 20(1): 1–374.
- Łajczak, A., 2006. *Torfowiska Kotliny Orawsko-Nowotarskiej. Rozwój, antropogeniczna degradacja, renaturyzacja i wybrane problemy ochrony*. Kraków.
- Madeja, J., Wacnik, A., Zyga, A., Stankiewicz, E., Wypasek, E., Guminski, W., Harmata, K. 2009. Bacterial ancient DNA as an indicator of human presence in the past: Its correlation with palynological and archaeological data. *Journal of Quaternary Science* 24(4): 317–321.
- Makohonienko, M., Wrzesińska, A., Wrzesiński, J. 1998. Analiza palinologiczna wypełniska jam grobowych. *Studia Lednickie* 5: 95–102.
- Margielewski, W., Kołaczek, P., Michczyński, A., Obidowicz, A., Pazdur, A. 2011. Record of the meso- and neoholocene palaeoenvironmental changes in the Jesionowa landslide peat bog (Beskid Sądecki Mts. Polish Outer Carpathians). *Geochronometria* 38(2): 138–154.
- Milecka, K., Kowalewski, G., Fiałkiewicz-Kozieł, B., Gałka, M., Lamentowicz, M., Chojnicki, B.H., Goslar, T., Barabach, J. 2017. Hydrological changes in the Rzecin peatland (Puszcza Notecka, Poland) induced by anthropogenic factors: Implications for mire development and carbon sequestration. *Holocene* 27: 651–664.
- Miola, A. 2012. Tools for Non-Pollen Palynomorphs (NPPs) analysis: a list of Quaternary NPP types and reference literature in English language (1972–2011). *Review of Palaeobotany and Palynology* 186: 142–161.
- Moore, P.D., Webb, J.A., Collinson, M.E., 1991. *Pollen Analysis*. London.
- Nalepka, D., Walanus, A. 2003. Data processing in pollen analysis. *Acta Palaeobotanica* 43: 125–134.
- Niebieszczański, J., Hildebrandt-Radke, I., Vouvalidis, K., Syrides, G., Andreou, S., Czebreszuk, J., Pappa, M., Tsourlos, P., Karpińska-Kołaczek, M., Rzedkiewicz, M., Kołaczek, P. 2019. Geoarchaeological evidence of landscape transformations at the Neolithic and Bronze Age settlement of Nea Raedestos in the Anthemous River valley, central Macedonia, Greece. *Quaternary Research* 91(2): 584–599.
- Obremska, M., Ott, F., Słowiński, M., Błaszkiwicz, M., Brauer, A. 2017. From the Bronze Age to the Migration Period – human activity recorded in the lake sediments of Lake Czechowskie, (Northern Poland), (w:) M.J. Schwab, M. Błaszkiwicz, T. Raab, M. Wilmking, A. Brauer (red.), *Human Impact and Landscape Evolution in Southern Baltic Lowlands. ICLEA Final Symposium 2017. 7 - 9 June 2017, GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam, Germany. Abstract Volume and Excursion Guide, Scientific Technical Report, 17/03*. Potsdam, 130–131.
- Page, K. 2004. Palaeochannel, (w:) A.S. Goudie (red.), *Encyclopedia of geomorphology*. London - New York, 743–746.
- Poska, A., Saarse, L., Veski, S. 2004. Reflections of pre- and early-agrarian human impact in the pollen diagrams of Estonia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 209: 37–50.
- Sadowska, A., Chłopek, K. 2003. Historia badań, (w:) S. Dybowa-Jachowicz, A. Sadowska (red.), *Palinologia*. Kraków, 10–15.
- Shumilovskikh, L., van Geel, B. 2020. Non-Pollen Palynomorphs, (w:) A.G. Henry (red.), *Handbook for the Analysis of Micro-Particles in Archaeological Samples*. Cham, 65–94.
- Stivrins, N., Brown, A., Reitalu, T., Veski, S., Heinsalu, A., Banerjee, R.Y., Elmi, K. 2015. Landscape change in central Latvia since the Iron Age: multi-proxy analysis of the vegetation impact of conflict, colonization and economic expansion during the last 2,000 years. *Vegetation History and Archaeobotany* 24(3): 377–391.

- Stockmarr, J. 1971. Tablets with spores used in absolute pollen analysis. *Pollen et Spores* 13: 615–621.
- Szymańska, A. 1974. Nowe odkrycia na Pomorzu Gdańskim w latach 1969-1970. *Pomorania Antiqua* 5: 475–503.
- Święta-Musznicka, J., Latałowa, M., Badura, M., Gołębniak, A. 2013. Combined pollen and macrofossil data as a source for reconstructing mosaic patterns of the early medieval urban habitats – a case study from Gdańsk. N Poland. *Journal of Archaeological Sciences* 40: 637–648.
- Święta-Musznicka, J., Badura, M., Pędziszewska, A., Latałowa, M. 2021. Environmental changes and plant use during the 5th-14th centuries in medieval Gdańsk, northern Poland. *Vegetation History and Archaeobotany* 30: 363–381.
- Tobolski, K. 2000. *Przewodnik do oznaczania torfów i osadów jeziornych*. Warszawa.
- Troels-Smith, J. 1959. *The Mudbjerg dwelling place: an early neolithic archaeological site in the Aamosen bog, West-Zeeland, Denmark*. Washington D.C.
- Trzeciecki, M. 2016. The emergence of the territorial state, (w:) P. Urbańczyk, M. Trzeciecki, (red.), *The Past Societies. Polish lands from the first evidence of human presence to the Early Middle Ages*. Warszawa, 277–341.
- van Asperen, E.N., Kirby, J.R., Shaw, H.E. 2020. Relating dung fungal spore influx rates to animal density in a temperate environment: Implications for palaeoecological studies. *Holocene* 30(2): 218–232.
- van Geel B., 1978. A palaeoecological study of holocene peat bog sections in Germany and The Netherlands, based on the analysis of pollen, spores and macro- and microscopic remains of fungi, algae, cormophytes and animals. *Review of Palaeobotany and Palynology* 25: 1–120.
- van Geel, B., Aptroot, A., 2006. Fossil ascomycetes in Quaternary deposits. *Nova Hedwigia* 82(3): 313–329.
- Wasylikowa, K., Starkel, L., Niedziałkowska, E., Siba, S., Stworzewicz E. 1985. Environmental changes in the Vistula valley at Pleszów caused by Neolithic man. *Przegląd Archeologiczny* 33: 19–55.
- Waterbolk, H.T 1956. Pollen spectra from Neolithic grave monuments in the northern Netherlands. *Palaeohistoria* 5: 39–51.
- Whitlock, C., Larsen, C. 2001. Charcoal as a fire proxy, (w:) J.P. Smol, H.J.B. Birks, W.M. Last (red.), *Tracking environmental change using lake sediments, Volume 3: Terrestrial, algal, and siliceous indicators*. Dordrecht, 75–97.
- Więckowski, K. 1961. Improved vertical core sampler for collecting the bottom sediments monoliths. *Bulletin de l'Académie Polonaise des Sciences, Série des sciences géologiques et géographiques* 9(2): 129–133.
- Wohlfarth, B., Skog, G., Possnert, G., Holmquist, B. 1998. Pitfalls in the AMS radiocarbon dating of terrestrial macrofossils. *Journal of Quaternary Science* 13(2): 137–145.









# Archeobotanika

Magdalena Moskal-del Hoyo

---

## UWAGI WSTĘPNE: PRZEDMIOT I SPECYFIKA BADAŃ

Archeobotanika, jak sama nazwa wskazuje, zajmuje się badaniem szczątków roślinnych pochodzących ze stanowisk archeologicznych i jest nauką powstałą na styku dwóch dyscyplin, archeologii i botaniki. W związku z tym może odpowiadać na pytania dotyczące problemów szeroko rozumianej humanistyki, skupiając się przede wszystkim na zagadnieniach związanych z użytkowaniem roślin w rozmaitych celach przez ludzi w przeszłości. Umożliwia także poznanie historii roślinności danego regionu i warunków środowiskowych panujących w różnych okresach, a kształtujących się pod wpływem działalności człowieka. Jej znaczenie dla biologii łączy się też z rozpoznaniem powstania i rozprzestrzeniania się gatunków uprawnych oraz migracji gatunków dzikich towarzyszących człowiekowi, określanych jako archeofity. W literaturze przedmiotu można również spotkać pojęcie paleoetnobotaniki, które kładzie nacisk na botaniczny aspekt badań (Helbæk 1959; Lityńska-Zajac i Wasylińska 2005; Pearsall 2015).

Materiałem badawczym w analizach archeobotanicznych są tzw. subfossylne szczątki roślinne znajdujące się w nawarstwieniach i obiektach archeologicznych.

Ze względu na ogromną różnorodność taksonomiczną i morfologiczną roślin oraz ich sposobu zachowania na stanowiskach archeologicznych nie sposób krótko opisać wszystkie możliwe typy występowania roślin w kontekstach archeologicznych. Z tego powodu w niniejszym podsumowaniu omówione są przede wszystkim najczęściej spotykane sposoby fosylizacji w warunkach klimatycznych Europy Środkowej oraz główne typy szczątków roślinnych znajdowane na polskich stanowiskach archeologicznych. Czytelnika zainteresowanego poszerzeniem wiedzy w tym zakresie odsyłam do podręcznika pt. *Przewodnik do badań archeobotanicznych* (Lityńska-Zajac i Wasylińska 2005) oraz pracy pt. *Badania botaniczne nad przeszłością – źródła roślinne* (Lityńska-Zajac 2018a), z obszernymi odniesieniami do literatury. Poniższe opracowanie opiera się w głównej mierze na materiałach źródłowych i przedstawianych przykładach, które ograniczają się do doświadczeń autorki. Z tego też powodu więcej miejsca poświęcono analizom węgla drzewnych.

Na stanowiskach archeologicznych mogą wystąpić zarówno mikroskopowe, jak i makroskopowe szczątki roślinne. Pierwsze z nich są reprezentowane przez m.in. ziarna pyłku (patrz Kołaczek i in., w tym tomie), fitolity i okrzemki (Rzodkiewicz, w tym tomie). W drugiej grupie występują



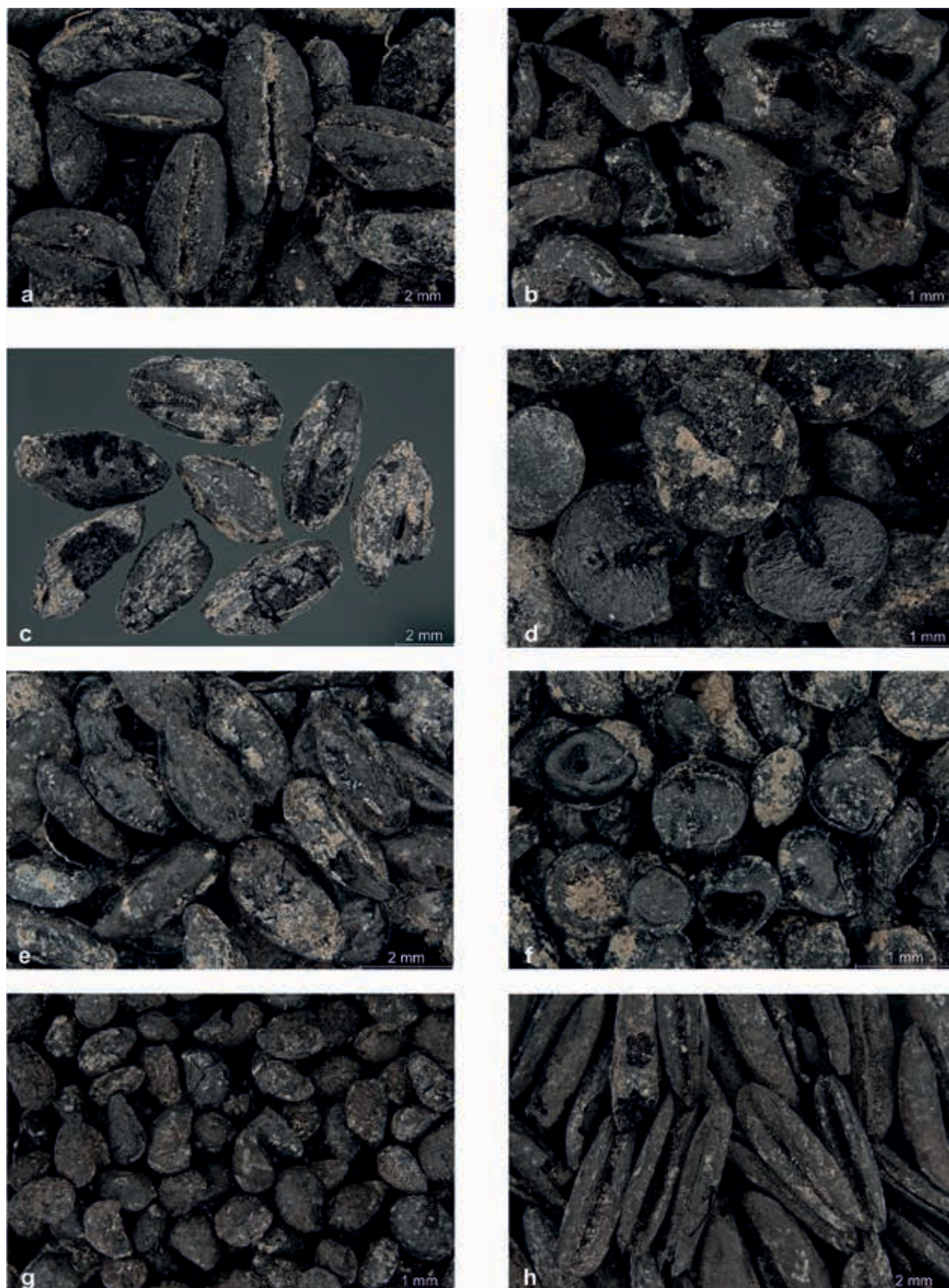
różne organy roślin, takie jak owoce, nasiona, liście i bulwki oraz drewno i korzenie, zachowane w całości lub we fragmentach. O ich możliwościach przetrwania decydują zarówno ich odporność na rozkład, jak i warunki depozycyjne (charakter złoża) oraz podepozycyjne panujące na badanym stanowisku archeologicznym. Pozostałości roślin mogą zachować się jako zwęglone (ryc. 1), storfiałe (ryc. 2a-c), wysuszone (ryc. 2d) i zmineralizowane (ryc. 2e). Ważnym źródłem informacji o roślinach użytkowanych przez człowieka są także ich odciski zachowane w polepie i ceramice. W Polsce najczęściej spotkać można ślady roślinne zachowane w dwóch pierwszych formach (Lityńska-Zajac i Wasylikowa 2005). Szczątki storfiałe znajdowane są przede wszystkim na stanowiskach, które nie uległy przesuszeniu, oraz takich, które odznaczały się małym dostępem tlenu, niskim pH i nieznaczną działalnością mikroorganizmów rozkładających materię organiczną. Wówczas ich stan zachowania może być bardzo dobry i niekiedy wyglądają jak materiał współczesny. Najczęściej z tego typu stanowiskami mamy do czynienia w warstwach średniowiecznych miast, w nawarstwieniach zachowanych w osadach jeziornych i w torfowiskach (Jaroń 1938; Bieniek i in. 1999; Lityńska-Zajac i Wasylikowa 2005). Szczątki zwęglone spotykane są na wyżej wspomnianych typach stanowisk oraz na tzw. stanowiskach suchych, które znajdują się powyżej poziomu wód gruntowych. W tej formie pozostałości roślin przetrwały do naszych czasów, gdyż pomimo działania ognia nie uległy całkowitemu spalaniu oraz nie zostały rozłożone przez mikroorganizmy. Sam proces spalania nie jest jednorodny i warunki panujące w palenisku, piecu czy podczas pożaru zależą od wysokości temperatury, dostępu tlenu, czasu trwania oraz ilości i jakości spalanego materiału. W związku z tym spalanie w różny sposób wpływa na szczątki roślinne, powodując w mniejszym lub większym stopniu ich deformacje (Lityńska-Zajac i Wasylikowa 2005). Dlatego spotykane są zarówno wspaniale zachowane zwęglone szczątki (ryc. 1), jak i okazy fragmentaryczne sprawiające dużą trudność w ich oznaczeniu taksonomicznym. Ze względu na różnorodny charakter procesów podepozycyjnych zachodzących w nawarstwieniach archeologicznych zazwyczaj przyjmuje się, że w przypadku tzw. stanowisk suchych szczątki zwęglone odpowiadają wiekiem

badanym obiektom archeologicznym, a materiały niespalone uważane są za okazy młodsze i nie są brane pod uwagę w interpretacji dotyczącej warstw pradziejowych i historycznych (Lityńska-Zajac i Wasylikowa 2005).

Warto zdać sobie sprawę, że pomimo pokrótce opisanych rozmaitych możliwości przetrwania szczątków roślinnych na stanowiskach archeologicznych, w rzeczywistości znajdowana lista taksonomiczna roślin nie odzwierciedla całego bogactwa flory rozwijającej się w przeszłości w okolicy. Wynika to z różnych powodów, wśród których największe znaczenie ma wybiórcze użytkowanie roślin przez człowieka. Największe szanse zachowania do naszych czasów miały te rośliny, które były bezpośrednio wykorzystywane przez ludzi, czyli były uprawiane lub zbierane ze stanu dzikiego oraz były przynoszone do osady czy obozowiska z okolicy. Ale spośród zebranych i nagromadzonych roślin zachować się mogły tylko te, które nie uległy zniszczeniu w czasie trwania osady lub obozowiska i po zaprzestaniu ich funkcjonowania w wyniku procesów podepozycyjnych. Ogromne znaczenie dla osiągnięcia różnorodności taksonomicznej i pozyskania dużej liczby szczątków roślinnych ma sam typ stanowiska, gdyż na tzw. stanowiskach suchych zazwyczaj zachowuje się mniej taksonów roślin niż na tzw. stanowiskach mokrych (Jacomet i Schlichtherle 1984; Antolin i in. 2017). Funkcja stanowiska lub jego części (m.in. mieszkalnej, gospodarczej, warsztatowej czy rytualnej) ma również przełożenie na skład szczątków roślinnych, gdyż przykładowo na stałej i długotrwale zamieszkiwanej osadzie liczba szczątków zazwyczaj jest większa niż na krótko użytkowanym obozowisku.

### NAJWAŻNIEJSZE FAKTY Z HISTORII ARCHEOBOTANIKI W POLSCE

W polskiej bibliografii początek badań archeobotanicznych to rok 1877 i moment ukazania się drukiem notatek Józefa Rostafińskiego, botanika i profesora Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie. Jego opracowanie dotyczyło szczątków roślin zachowanych przy mumiach peruwiańskich. Analiza botaniczna pozwoliła na identyfikację pięciu gatunków roślin, przy czym najwięcej uwagi poświęcił kukurydzy *Zea mays* (Zemanek



**Ryc. 1.** Zwęglone szczątki roślinne ze stanowiska nr 1-3 w Mozgawie (det. A. Mueller-Bieniek, M. Kapcia): a i b – skupisko pszenicy, głównie płaskurki (*Triticum diccocon*), ziarniaki (a) oraz fragmenty oplewiania (b); c – ziarniaki jęczmienia (*Hordeum vulgare*); d – soczewica (*Lens culinaris*); e – len (*Linum usitatissimum*); f – komosa biała (*Chenopodium typ album*); g – prawdopodobnie poziomka (*Fragaria sp./Potentilla sp.*); h – stokłosa (*Bromus sp.*). Fot. K. Stachowicz





**Ryc. 2.** Wybrane szczątki roślinne zachowane w postaci storfiałej (a, e), zmineralizowanej (c) i wysuszonej (d) (det. M. Badura). a – len (*Linum usitatissimum*); b – jabłoń (*Malus* sp.); c – proso (*Panicum miliaceum*); d – chmiel (*Humulus lupulus*); e – rdest szczawiolistny (*Polygonum lapathifolium*), skala 1 mm. Nowy Dworek, Badura i Noryśkiewicz 2020 (a-c); Kołobrzeg i Badura 2016 (e); Byszewo i Jarosińska i in. 2019 (d). Fot. M. Badura (a, b, e), A. Burka (c), M. Jarosińska (d)

2000). Pierwsza pełna publikacja ukazała się w latach 20. XX w., a dotyczyła śladów zbóż z epoki neolitu znalezionych w Polsce m.in. w Jaskini Górnej w Skałach Ogrójca w Ojcowie (Kozłowska 1921). W kolejnych latach opracowania archeobotaniczne pojawiały się sporadycznie, a przykładem szczegółowych badań o ogromnej wartości są prace Bronisława Jaronia poświęcone roślinom wydobytych z osiedla obronnego kultury łużyckiej w Biskupinie (Jaroń 1938) i średniowiecznej osady w Gnieźnie (Jaroń 1939).

Aniela Kozłowska wykonała też pierwsze badania antrakologiczne (gr. *anthrakas* – węgiel)

z Jaskini Ciemnej (Krukowski 1939-1948). W latach 30. XX w. Olga Seidl opublikowała wyniki analizy węgla drzewnych z kilku stanowisk archeologicznych z epoki brązu i epoki żelaza (Seidl 1936a; Seidl 1936b). W pracy na temat kurhanu z Rosiejowa porównała wyniki analizy antrakologicznej z rezultatami analiz palinologicznych, wskazując, że węgle drzewne mogą być źródłem danych o charakterze lokalnych drzewostanów (Seidl 1936b).

Druga wojna światowa zahamowała rozwój wszystkich nauk, jednak stosunkowo szybko po jej zakończeniu wznowiono badania zarówno archeologiczne, jak i archeobotaniczne. W okresie

powojennym ukazało się wiele drobnych publikacji, wśród których na uwagę zasługują przede wszystkim te przygotowane przez Melanię Klichowską (por. Klichowska 1953; 1956; 1961). Powstało także pierwsze podsumowanie badań archeobotanicznych z ziem polskich autorstwa Heleny Burchardówny (1953). Wśród ważnych zagadnień badawczych były próby podsumowania występowania roślin uprawnych od neolitu w Polsce (Gizbert 1960; Klichowska 1975), początek badań nad roślinami użytkowanymi na Wawelu w średniowiecznym Krakowie (Gizbert i Żaki 1954; Wasylkowa 1978) oraz prace na temat roślin dzikich (Gluza 1977), w tym roli roślin obecnie interpretowanych jako chwasty w dawnych uprawach rolnych (Wasylkowa 1981).

Po II wojnie światowej prowadzone były także badania antrakologiczne (m.in. Klichowska 1953; 1956; 1961). Władysław Szafer na podstawie znalezisk z paleolitycznych stanowisk archeologicznych odnotował współwystępowanie niektórych taksonów drzew i fauny w zależności od występowania chłodnych lub cieplejszych okresów (Szafer 1946). Z kolei Jan Zabłocki szczegółowo opisał metody oznaczania i analizy węgla drzewnych, opierając się na danych pochodzących ze średniowiecznego stanowiska w Jezioroku i poświęcając sporo uwagi możliwościom interpretacyjnym zespołów antrakologicznych w kontekście rekonstrukcji dawnych lasów (Zabłocki 1952). W Polsce od końca lat 50. XX w. pojawiało się coraz więcej opracowań zwracających uwagę na różnorodne aspekty badań nad pozostałościami zwęglonych drzew i krzewów (Sławiński i in. 1958; Reymanówna 1960; Jedliczka 1965; Pawlikowa 1965; 1969; Wieserowa 1967; Dzieduszycki 1976). Zapoczątkowane zostały także prace dotyczące analiz drewna w kontekście jego technologicznej i eksploatacyjnej wartości na podstawie średniowiecznych zabytków drewnianych ze Szczecina (Molski 1968) i Ostrowa Tumskiego (Ostrowska 1962).

Późniejszy przyrost prac antrakologicznych, nie tylko w Polsce, ale i na świecie, wynikał też z rozwoju badań mikroskopowych i wprowadzenia mikroskopu do światła odbitego, umożliwiającego badania próbek węgla drzewnych bez konieczności przygotowywania szeregu preparatów do obserwacji pod mikroskopem do światła przechodzącego (por. Gunia i in., w tym tomie). Istotne znaczenie

dla analiz taksonomicznych drewna miało również zastosowanie elektronowego mikroskopu skaningowego (ang. *scanning electron microscopy*, SEM) (Beal i in. 1974).

Od lat 80. XX w. nastąpił też przyrost analiz antrakologicznych, wśród których wyróżnić należy podsumowanie dotyczące użytkowania drewna w neolicie (Gluza i in. 1988; Wasylkowa i in. 1992) oraz liczne prace Marii Lityńskiej-Zajac wzbogacające naszą wiedzę na temat różnorodnych sposobów wykorzystywania drewna w pradziejach i w średniowieczu (m.in. Lityńska-Zajac 1990; 1997a; 1997b; 1998; 2004; 2007; 2008; Kadrow i Lityńska-Zajac 1994; Lityńska-Zajac i in. 2014a; 2014b; 2014c). Ostatnio też coraz częściej analizy antrakologiczne oparte są na licznych i systematycznie pobieranych próbach i dostarczają zespołów węgla drzewnych służących do scharakteryzowania lokalnych lasów (Lityńska-Zajac 1994; Moskal-del Hoyo 2014; 2016; Lityńska-Zajac i in. 2014a; 2014b; 2014c; Moskal-del Hoyo i in. 2017; 2018a; 2018b). Badanie drewna znalazło się w obszarze zainteresowań badawczych nie tylko ze względu na wzrost analiz dotyczących użytkowania surowca drewnianego przez człowieka w średniowieczu (Cywa 2018a; 2018b, tam cyt. lit.; Cywa i in. 2018), ale również w związku z rozwojem badań dendrochronologicznych (Dąbrowski, w tym tomie).

Od lat 90. ubiegłego wieku nastąpiła intensyfikacja interdyscyplinarnych prac archeologicznych, w których badania archeobotaniczne coraz częściej odgrywały ważną rolę. Coraz częściej wykorzystywano też różnego typu nowoczesne techniki i analizy. Wzrost danych zaowocował przede wszystkim poznaniem historii użytkowania roślin oraz rozwoju roślinności antropogenicznej w miastach, takich jak np. Kraków (m.in. Mueller-Bieniek 2012), Poznań (Koszałka 2005a; 2005b; 2008), Gdańsk (m.in. Badura 2011; Święta-Musznicka i Latałowa 2016; Święta-Musznicka i in. 2011), Kołobrzeg (m.in. Badura 2000; 2016; Latałowa i in. 2003), Elbląg (m.in. Badura i in. 2004; Jarosińska 2004; Latałowa i in. 2003), Wolin (m.in. Latałowa 1999; 2014), Gniezno (Koszałka 2000; Makohonienko i in. 2011a), Wrocław (Sady 2018), Lublin (Sady-Bugajska 2020), Puck (Maciejewska i in. 2020; Pińska i Badura 2017) czy Tczew (Pluskowski i in. 2019).

## METODY BADAŃ ARCHEOBOTANICZNYCH

### Pobieranie prób i przygotowania materiałów do analiz archeobotanicznych

Sposób pobierania prób archeobotanicznych ma na celu uzyskanie reprezentatywnego dla danego stanowiska materiału roślinnego. Z tego powodu jest niezwykle ważne, żeby przed wykopaliskami lub w ich trakcie omówić go z archeobotanikiem. Biorąc pod uwagę niszczący charakter prac wykopaliskowych, polegający niekiedy na pełnym usunięciu warstw archeologicznych, wybrana przez archeologów strategia próbkowania jest kluczowa dla potencjalnych wyników. Należy sobie bowiem uzmysłowić, że po zakończeniu prac wykopaliskowych uzupełnienia o nowe próby zazwyczaj nie są już możliwe. Warto podkreślić, że wiele prób może nie zawierać szczątków roślinnych i o tym, czy uzyskano miarodajne dane wiemy, niekiedy kilka lat po przeprowadzeniu wykopalisk i po zamknięciu analiz laboratoryjnych.

Jest wiele sposobów pobierania prób archeobotanicznych, a wybrana strategia powinna być dostosowana do typu stanowiska, jego funkcji, chronologii i arealu do przebadania (Jones 1991; Kadrow 2005; Pearsall 2015). Najlepszym rozwiązaniem jest opróbowanie każdego badanego obiektu i warstw wydzielonych w jego obrębie. Można zastosować naniesienie na każdy obiekt lub warstwę archeologiczną pewnego rodzaju siatki i pobierać próbę z każdego wydzielonego odcinka i z każdego poziomu, zgodnie z przyjętą metodyką badań archeologicznych na danym stanowisku. Przykładowo na paleolitycznym stanowisku jaskiniowym, którego wykop wynosi kilka metrów kwadratowych, można przyjąć siatkę 25 cm × 25 cm × 5 cm głębokości i pobierać praktycznie całe wypełnisko takiej warstwy mechanicznej. Natomiast w trakcie szerokoprzestrzennych badań na neolitycznej osadzie z licznymi obiektami można przyjąć siatkę metrową, która wyznaczy w obrębie każdego obiektu, w zależności od jego wielkości, liczbę pobranych prób z każdego eksplorowanego poziomu. Dobrym rozwiązaniem jest pobieranie prób o tej samej objętości (ryc. 3a). W przypadku metrowej siatki należy pobierać próby w sposób losowy, tak aby reprezentowały one różne części i warstwy obiektu. Przy czym warto pamiętać, że liczny

zespół zwęglonych makroskopowych szczątków roślinnych niekoniecznie musi pochodzić z najmniejszych warstw i zdarza się, że można go znaleźć w sedymencie, w którym na pierwszy rzut oka nie widać żadnych pozostałości roślin. Przy dużej liczbie badanych obiektów lepszym rozwiązaniem może okazać się pobranie wielu prób z kilkunastu wybranych obiektów, a następnie pobranie po jednej próbce z pozostałych, gdyż wiele badań pokazuje, że rzadko jedna próba pobrana z jednego obiektu zawiera liczne i zróżnicowane pod względem taksonomicznym szczątki. Obrazują to wyniki analiz archeobotanicznych z wczesnoneolitycznego stanowiska archeologicznego nr 2 w Gwoźdźcu. W tabeli 1 zamieszczono dane na temat liczby pobranych prób, ich objętości oraz liczby zachowanych szczątków roślinnych, z zestawieniem osobno dla owoców i nasion oraz fragmentów węgla drzewnych (tab. 1).

Podczas prac terenowych w każdym przypadku zaobserwowania nagromadzenia szczątków roślinnych należy pobrać dodatkowe próby z tych specyficznych warstw. Za każdym razem należy dostosować liczbę i objętość prób do eksplorowanej warstwy, aby można było prześledzić różnice stratygraficzne pomiędzy jej poszczególnymi częściami. Przykładem tego typu skupiska makroskopowych szczątków roślinnych są nagromadzenia węgla drzewnych w piecach i paleniskach lub jamy zasobowe (Gluza 1984; Kapcia i Mueller-Bieniek 2019), które najczęściej widoczne są „gołym okiem” (ryc. 4a) i mogą być dokładnie opróbowane podczas prac terenowych. Spotykane są jednak także skupiska roślin, które odkrywane są dopiero po przeszlamowaniu prób i których nie sposób wyróżnić w trakcie badań wykopaliskowych (ryc. 4d-e). Ponadto można również w sposób celowy pobrać kolejne próby z konkretnych kontekstów, np. ze stożka jamy trapezowatej (Kruk 1980), z warstwy przydennej czy z różnych części obiektu, np. paleniska (ryc. 5), skupiając się na wzajemnych relacjach pomiędzy poszczególnymi typami obiektów lub warstw i występowaniem określonych gatunków roślin.

Kontekst archeologiczny prób ma ogromne znaczenie dla późniejszych interpretacji wyników analiz archeobotanicznych. Dlatego też każdorazowo należy właściwie opisać zebraną próbę, podać jej lokalizację i przedstawić jej związek z pozostałym materiałem archeologicznym. Ten tok postępowania pozwala na właściwą ocenę różnych źródeł zalegających

**Tabela 1.** Zestawienie liczby pobranych prób, ich objętości oraz uzyskanej liczby szczątków roślinnych na podstawie analiz karologicznej (det. M. Lityńska-Zajac) i antrakologicznej (det. M. Moskal-del Hoyo) z wybranych obiektów ze stanowiska kultury ceramiki wstęgowej rytej nr 2 w Gwoźdźcu. Zmienione za: Lityńska-Zajac i Moskal-del Hoyo 2021.

Numer obiektu	Typ obiektu	Liczba prób	Objętość (w litrach)	Liczba okazów: owoce i nasiona	Minimalna liczba taksonów	Liczba fragmentów węgla drzewnych	Minimalna liczba taksonów
84, faza wczesna	jama	1	2	1	1	8	2
92, faza wczesna	jama	6	18,6	6	3	74	9
110, faza wczesna	jama	1	3,6	0	0	30	1
120, faza wczesna	jama	9	31,7	5	2	114	9
121, faza wczesna	jama	1	1,9	0	0	5	2
123, faza wczesna	jama	4	5,9	4	1	1	1
125, faza wczesna	jama	13	19,4	22	6	176	5
129, faza wczesna	jama	2	9	1	1	4	3
135, faza wczesna	jama	6	22,1	15	2	266	8
87, faza wczesna	jama posłupowa	1	1,8	13	1	12	3
88, faza wczesna	jama posłupowa	6	14,4	1	1	2	1
89, faza wczesna	jama posłupowa	4	9	3	1	27	4
90, faza wczesna	jama posłupowa	14	25,2	13	2	218	9
91, faza wczesna	jama posłupowa	18	46,1	0	0	135	5
112, faza wczesna	jama posłupowa	1	3	0	0	3	1
118, faza wczesna	jama posłupowa	2	4,2	0	0	61	8
130, faza wczesna	jama posłupowa	22	52,1	25	6	179	7
137, faza późna	jama	8	36,5	6	1	255	10
138, faza późna	jama	3	14,3	0	0	42	9
151, faza późna	jama	2	3,2	2	1	26	4
155, faza późna	jama	1	4	3	2	83	5
156, faza późna	jama	1	2,4	23	4	50	3
164, faza późna	jama	4	6,5	1	1	93	5
164, faza późna	jama/palenisko	4	12	0	0	264	6
165, faza późna	jama	10	12,2	28	7	329	8
165, faza późna	jama/palenisko	3	9,7	0	0	202	7

w jednym obiekcie lub warstwie kulturowej (jednostce stratygraficznej) badanego stanowiska. Ułatwia także porównywanie danych z różnych stanowisk pochodzących z tego samego typu obiektów i reprezentujących podobny kontekst. Przykładowo, liczba i udział poszczególnych taksonów znalezionych w jamach zasobowych będzie się zapewne różniła od danych pozyskanych z jam gospodarczych lub grobów, co w przypadku łączenia danych może prowadzić do błędnych wniosków dotyczących różnych aspektów gospodarki roślinnej (Lityńska-Zajac i Wasylikowa 2005).

Pobrane próby sedymentu powinny być szlamowane przy użyciu sit o średnicy oczek 0,25-0,5 mm dla frakcji lekkiej i 1,0-1,5 mm dla frakcji ciężkiej. Materiał roślinny może być również uzyskany drogą flotacji, m.in. za pomocą odpowiedniej maszyny (Moskal-del Hoyo 2014) w laboratorium lub w terenie (ryc. 3c). W przypadku, kiedy płukane próby nie mają tej samej objętości, za każdym razem należy ją zmierzyć i zapisać, co pozwoli na poznanie nasycenia prób szczątkami roślinnymi oraz na bardziej miarodajne porównywanie oszacowań





**Ryc. 3.** Pobieranie prób archeobotanicznych (a) o jednakowej objętości 3 litrów (białe pudełka) (b) z każdego obiektu i z każdego poziomu dokumentowanego w jego obrębie na stanowisku kultury ceramiki wstęgowej rytej w Biskupicach, stan. 18. Szlamowanie prób archeobotanicznych w terenie za pomocą maszyny flotacyjnej (c, d) podczas wykopaliśk archeologicznych na stanowisku kultury pucharów lejkowatych w Mozgawie, stan. 1-3. Fot. M. Korczyńska (a-b), M. Moskal-del Hoyo (c-d)

ilościowych pomiędzy próbkami lub różnymi stanowiskami. Po wysuszeniu prób następuje segregacja materiału roślinnego przy użyciu mikroskopu stereoskopowego o powiększeniach od 7-40× oraz wydzielenie diaspory i tkanek roślinnych, węgla drzewnych i innych materiałów nadających się do analiz specjalistycznych (np. szczątków kostnych i małakofauny). Przebrany materiał należy przechowywać w odpowiedni sposób w zależności od sposobu jego zachowania. Szczątki zwęglone można trzymać w opisanych woreczkach, pojemnikach lub celkach, natomiast szczątki storfiałe wymagają umieszczenia w płynie konserwującym (Lityńska-Zając i Wasylikowa 2005; Badura 2011).

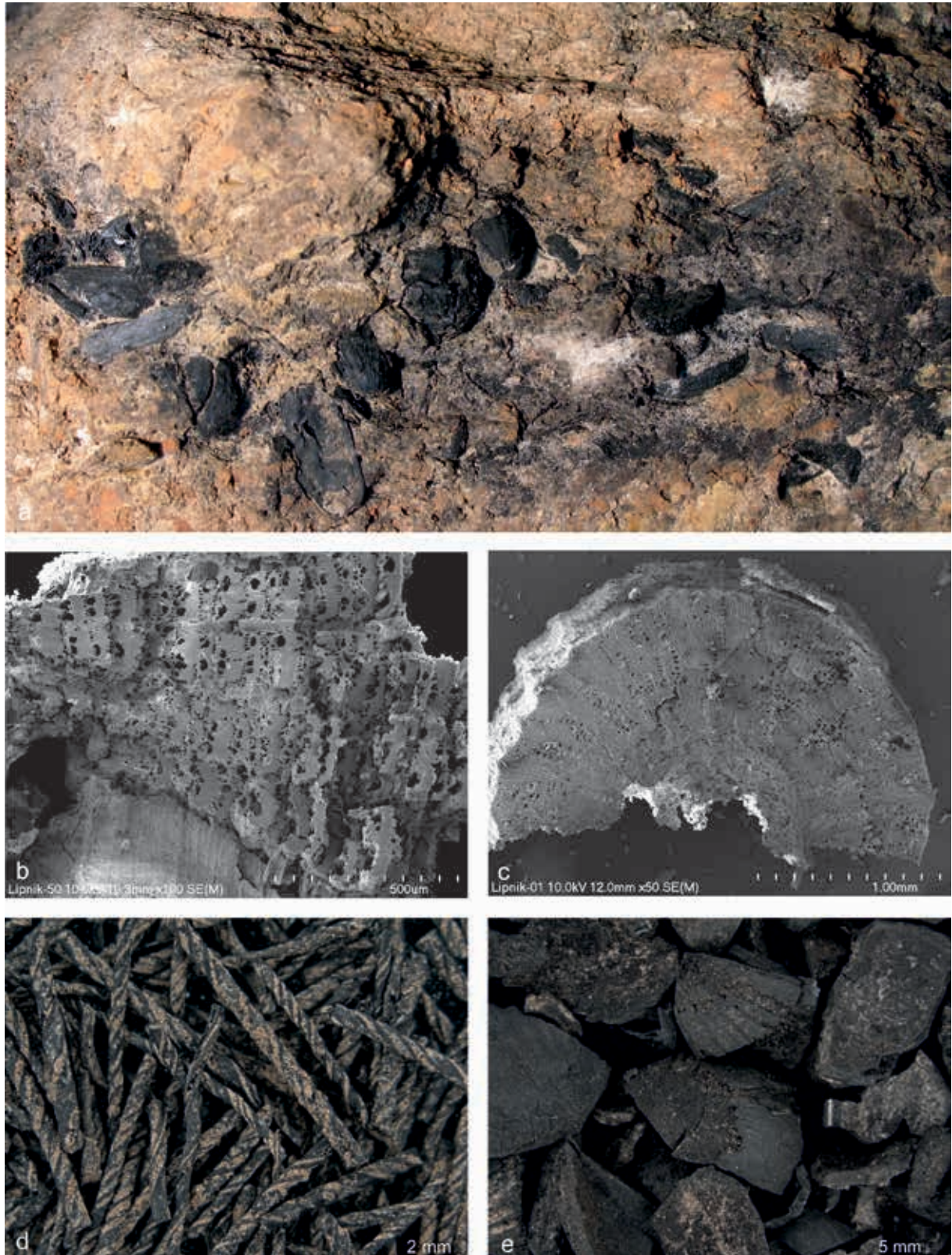
Podsumowując, przy pobieraniu prób archeobotanicznych należy przyjąć, że szczątki roślinne są dziedzictwem kulturowym w takim samym stopniu jak fragmenty ceramiki lub zabytki krzemienne i ich interpretacja jest tym pełniejsza, im bardziej oparta jest na kompletnych danych źródłowych.

Najczęściej niewiele można powiedzieć o ceramice danej kultury na podstawie jednej próbki z jednego obiektu i nikogo nie dziwi, że zbierane i dokumentowane są wszystkie fragmenty naczyń z badanego obiektu. Wobec tego podobnie należy postępować z materiałami botanicznymi i zdawać sobie sprawę, że rekonstrukcja gospodarki roślinnej w dużym stopniu zależy od liczby udokumentowanych szczątków roślin, ich zróżnicowania taksonomicznego i dokładnego zrozumienia kontekstu pozyskanego materiału roślinnego.

### Oznaczanie taksonomiczne szczątków roślinnych

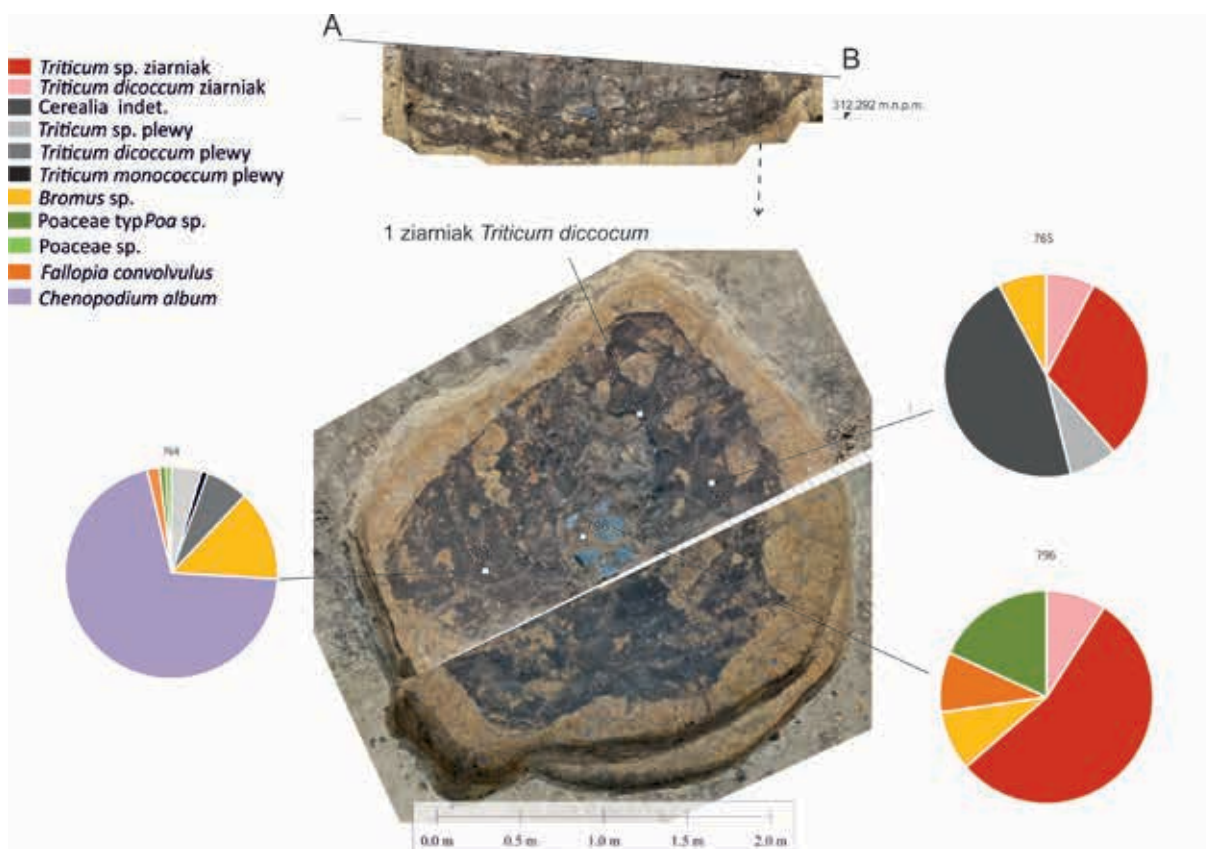
Analizę karpologiczną przeprowadza się metodą morfologiczno-porównawczą, obserwując analizowane okazy pod mikroskopem stereoskopowym przy powiększeniach do 100×. Oznaczenia należy





**Ryc. 4.** Zwęglone szczątki roślinne, w tym widoczne pozostałości żołądźi, znalezione w skupisku w jamie odkrytej na stanowisku nr 5 w Lipniku: a – różne typy roślin (ok. 70 taksonów, det. A. Mueller-Bieniek, M. Kapcia) były prawdopodobnie przechowywane w osobnych pojemnikach wykonanych np. z łyska lipowego (*Tilia* sp.) (b) i gałązek, prawdopodobnie wikliny (wierzba lub topola *Salix* sp. vel *Populus* sp.) (c) (det. M. Moskal-del Hoyo); d – nagromadzenie ości ostnicy (*Stipa* sp.) z obiektu kultury ceramiki wstęgowej rytej z wielokulturowego stanowiska nr 3 w Miechowie (det. M. Kapcia); e – nagromadzenie łupin orzecha laskowego (*Corylus avellana*) z obiektu kultury malickiej ze stanowiska nr 23 w Łańcucie (det. M. Moskal-del Hoyo). Fot. M. Moskal-del Hoyo (a-c), K. Stachowicz (d-e)



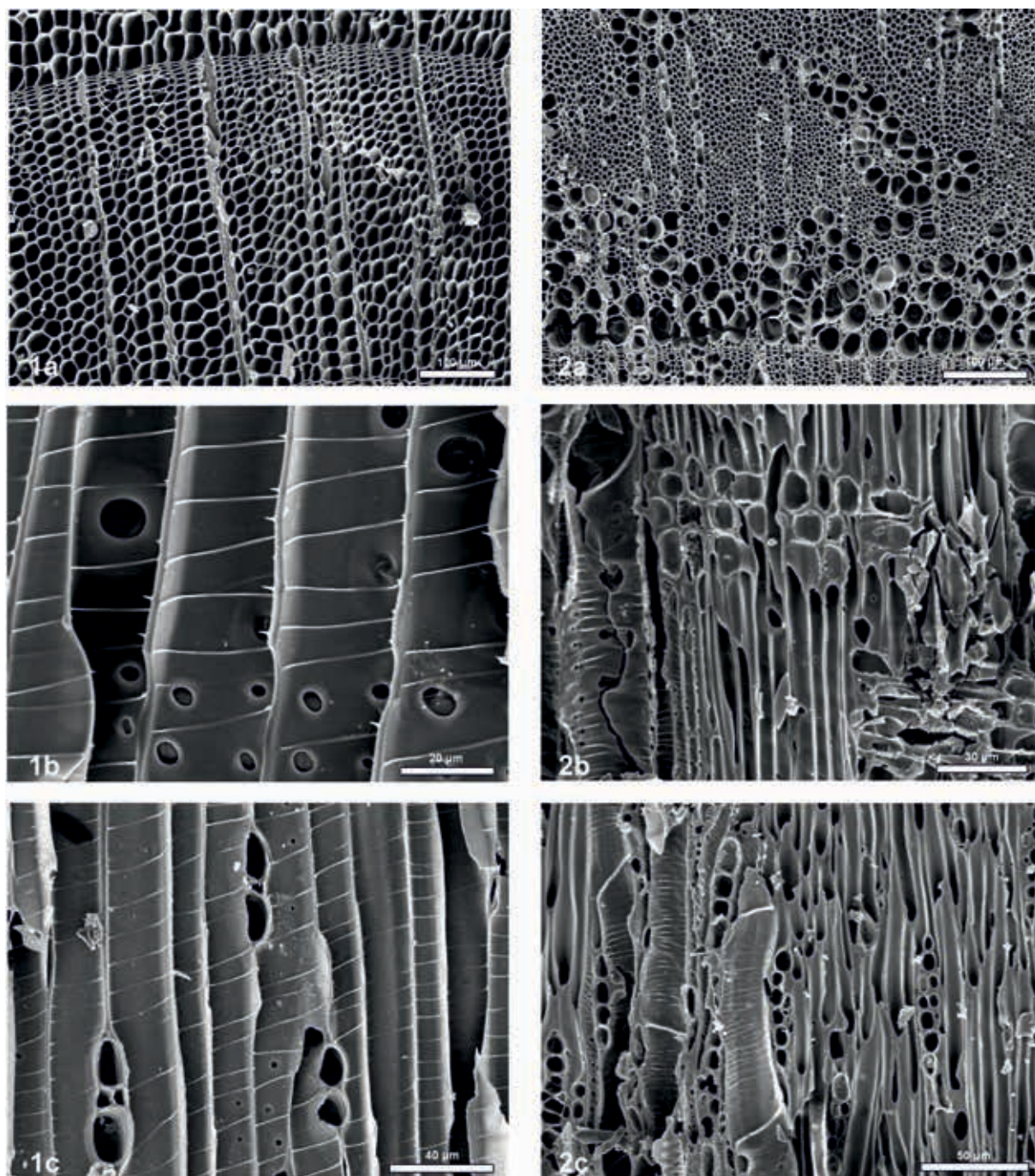


**Ryc. 5.** Przykład jamy związanej z tzw. długim domem kultury ceramiki wstęgowej rytej na stanowisku nr 18 w Biskupicach. Poziom ze śladami paleniska. Oprócz prób pobranych z każdego poziomu tego obiektu zastosowano także celowe próbkowanie polegające na pobraniu kilku prób z konkretnych i różniących się wypełniskiem obszarów. Jak obrazują wyniki analizy owoców i nasion (det. M. Kapcia), w każdej strefie wystąpiły zwęglone szczątki roślin o różnym składzie taksonomicznym i w przypadku pozostałości po zbożach w zróżnicowanej postaci (ziarna i plewy). Rys. M. Korczyńska

skonfrontować ze zbiorami porównawczymi owoców i nasion, których przykłady można znaleźć, np. w Instytucie Botaniki im. Władysława Szafera PAN w Krakowie (IB PAN) i w Pracowni Paleoeologii i Archeobotaniki Uniwersytetu Gdańskiego. W trakcie prac analitycznych posługiwać się należy odpowiednią literaturą przedmiotu (np. Kulpa 1974; Jacomet 2006; Cappers i in. 2006; 2009). W ostatnich latach w IB PAN przeprowadzono digitalizację wybranych przez K. Wasylkową i E. Madeyską okazów ze zbioru paleobotanicznego, który został udostępniony w Internecie i dostarcza cennych źródeł porównawczych (<https://www.rcin.org.pl/dlibra/collectiondescription/548>). Można również korzystać z innych stron internetowych (np. [www.plantatlas.eu/repository](http://www.plantatlas.eu/repository)). Na podstawie morfologii badane są również odciski zachowane w polepie i ceramice. Po rozbiciu poszczególnych grud polepy mogą ujawnić się odciski fragmentów tkanek lub diaspor roślin, jak również tego typu szczątki

mogą pojawić się w formie wysuszonej lub zwęglonej (Lityńska-Zajac i Wasylkowa 2005). Zbiory karpologiczne najlepiej jest dokumentować za pomocą aparatu fotograficznego podłączonego do mikroskopu stereoskopowego (np. ryc. 1). Szczegóły budowy anatomicznej można obserwować i zobrazować za pomocą mikroskopu elektronowego (SEM), np. w badaniach skulptury owoców i nasion (Kapcia i Mueller-Bieniek 2019) lub komórek epidermy plew i plewek (Moskal-del Hoyo i in. 2017b). Łacińskie nazwy oznaczonych roślin przyjmuje się zgodnie z obowiązującą dzisiaj nomenklaturą botaniczną (Mirek i in. 2002).

Oznaczanie drewna polega na wykonaniu obserwacji mikroskopowych elementów budowy anatomicznej w jego trzech przekrojach: poprzecznym, podłużnym promieniowym (radialnym) i podłużnym stycznym (ryc. 6). Identyfikacja taksonomiczna następuje na podstawie zestawienia diagnostycznych cech dla każdego gatunku poprzez porównanie

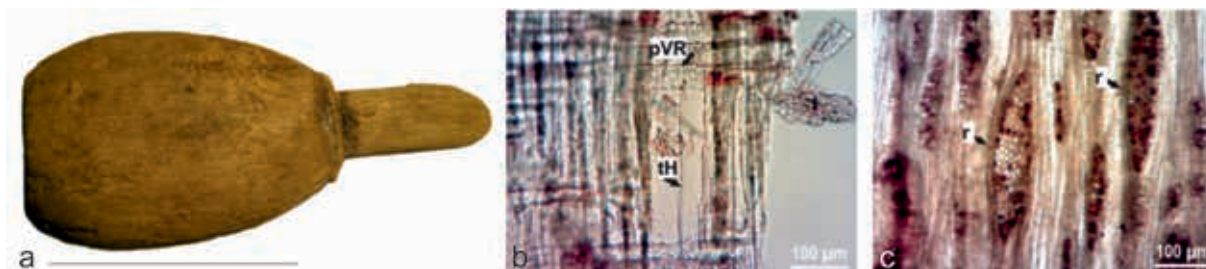


**Ryc. 6.** Drewno drzew i krzewów iglastych i liściastych w trzech przekrojach anatomicznych na przykładzie dwóch taksonów: 1 – cis pospolity (*Taxus baccata*); 2 – szakłak (*Rhamnus* sp.) (det. M. Moskal-del Hoyo). (a) przekrój poprzeczny, (b) przekrój podłużny promieniowy, (c) przekrój podłużny styczny. Skala: 100  $\mu\text{m}$  (1a, 2a), 20  $\mu\text{m}$  (1b), 30  $\mu\text{m}$  (2b), 40  $\mu\text{m}$  (1c), 50  $\mu\text{m}$  (2c). Fot. M. Moskal-del Hoyo

z atlasami anatomicznymi drewna (Greguss 1955; 1959; Schweingruber 1990a; 1990b) oraz z okazami z kolekcji porównawczej. Przykładem takiej kolekcji drewn i węgli drzewnych w Polsce jest zbiór należący do Grupy Paleobotaniki i Paleośrodowiska (IB PAN), natomiast bardzo bogata kolekcja

ksylologiczna (ksyloteka), założona jeszcze przed II wojną światową przez prof. J. Rafalskiego, znajduje się w Katedrze Inżynierii Leśnej Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu. Dobrym rozwiązaniem jest też korzystanie z internetowej strony zawierającej opis, charakterystykę i mikrofotografie





**Ryc. 7.** a – przykład przedmiotu drewnianego (pałka?) wykonanego z drewna klonowego *Acer* sp. (det. K. Cywa) ze stanowiska Kraków Sławkowska 14/6 (zbiory Muzeum Archeologicznego w Krakowie, nr inw. MAK/S/82/2), skala: 5 cm. Przykład mikrofotografii w przekroju promieniowym (b): zgrubienia spiralne (tH), jamki w polach krzyżowych (pVR) i w przekroju stycznym (c): promienie rdzeniowe (r). Zmienione za: Cywa i in. 2018: Pl. 1.6, Pl. 2.3,4.

gatunków drzew i krzewów typowych dla Europy Środkowej, przygotowanej m.in. przez F. H. Schweingruber (www.woodanatomy.ch; Schoch i in. 2004). Warto dodać, że ze względu na brak wyraźnych cech diagnostycznych drewna drzew i krzewów występujących na terenie Polski kawałki drewna najczęściej oznaczane są do poziomu rodzaju, a nazwy gatunkowe mogą być przypisane tylko wtedy, kiedy dany rodzaj reprezentowany jest we florze przez jeden gatunek. Dotyczy to m.in. grabu pospolitego (*Carpinus betulus*) i buka zwyczajnego (*Fagus sylvatica*) (Lityńska-Zajac i Wasylikowa 2005). Badanie drewna najczęściej wymaga przygotowania preparatów ze skrawków drewna pobranych bezpośrednio z zachowanych przedmiotów lub budowli drewnianych. Materiał można zalać mieszaniną gliceryny z alkoholem i tymolem lub utrwalić w glicerożelatynie i zamknąć za pomocą werniksu damarowego (Cywa 2018b). Preparaty obserwowane są pod mikroskopem w świetle przechodzącym przy zastosowaniu powiększenia od 100-500×. Dzięki zamontowaniu aparatu fotograficznego w tubusie mikroskopu można wykonywać zdjęcia preparatów mikroskopowych dokumentujące oznaczenia taksonomiczne (np. ryc. 7).

Węgle drzewne zachowują budowę anatomiczną drewna, a ich oznaczenie polega na ręcznym przełamaniu każdego badanego fragmentu wzdłuż trzech anatomicznych płaszczyzn drewna i obserwacji cech diagnostycznych na ich świeżych przełamach. W tym celu wykorzystywany jest mikroskop ze światłem odbitym z możliwością obserwacji przy powiększeniach do 500×. Chociaż możliwe jest oznaczenie fragmentów wielkości 1 mm<sup>3</sup>, to w celu spostrzeżenia wszystkich szczegółów anatomicznych charakterystycznych dla gatunku zaleca się badanie fragmentów większych niż 4 mm<sup>3</sup>. Tym

samym wielkość fragmentów węgla drzewnych i ich charakterystyka anatomiczna mają wpływ na wyniki analizy i dany fragment może zostać oznaczony do poziomu gatunku, rodzaju lub rodziny albo tylko ogólnie może być zaliczony do grupy drzew i krzewów liściastych lub szpilkowych. Stan zachowania ma również niebagatelny wpływ na rangę identyfikacji węgla drzewnych. Niekiedy materiał ten ma silnie spieczoną strukturę anatomiczną. Nie można jednoznacznie stwierdzić, co powoduje występowanie tego typu szklistej struktury. Przypuszczalnie jest ona wynikiem działania wysokiej temperatury lub spalania wilgotnego drewna (Chabal i in. 1999; Théry-Parisot 2001; Carrión Marco 2005; Lityńska-Zajac i Wasylikowa 2005). Przy oznaczeniu taksonomicznym widoczne są niekiedy kanały wydrążone przez insekty z grupy drewnojadów (ryc. 8g, h), które występowały w drewnie przed jego spalaniem. Czasami przy dużych powiększeniach można zaobserwować ślady działalności grzybów w postaci wydrążań w ścianach komórkowych oraz same strzępki grzybów (ryc. 8e, f), co może mieć znaczenie przy interpretacji typu użytego drewna, np. chruštu (Moskal-del Hoyo i in. 2010). Ponadto analizując węgle drzewne i słoje przyrostów rocznych (np. ich krzywiznę), w niektórych przypadkach można określić, czy drewno pochodziło z pnia, czy np. z gałązki (ryc. 8a, b) (Schweingruber i in. 2006).

Dokumentacji mikrofotograficznej węgla drzewnych można dokonać poprzez zainstalowanie aparatu do mikroskopu z oprogramowaniem pozwalającym scalać kilka ujęć w jedno zdjęcie, gdyż ręcznie przełamane fragmenty obserwowane przy dużych powiększeniach nie dają płaskiego obrazu. Najlepiej jednak wykonuje się dokumentację mikrofotograficzną za pomocą mikroskopu elektronowego (SEM) (ryc. 6 i 8). Przygotowanie próbek

do obrazowania SEM polega na przyklejeniu fragmentów węgla drzewnych lub drewna w odpowiednich przekrojach anatomicznych na taśmę węglową, która zamocowana jest na niewielki uchwyt (ok. 2 cm średnicy) mieszczący się w komorze pomiarowej. Następnie próbkę należy napylić cienką warstwą materiału przewodzącego elektrycznie, najczęściej złota.

W przypadku materiałów karpologicznych zliczane są owoce i nasiona zachowane w całości oraz ich fragmenty odpowiednio przeliczane na całość. Przy niektórych taksonach osobno podaje się liczbę szczątków reprezentujących różne części owocu lub owocostanu (np. ziarniaki, plewy i plewki u zbóż). Osobno zliczane są szczątki znalezione w różnych formach fosylizacji (np. zwęglone, zmineralizowane, wysuszone). W wyjątkowych przypadkach wystąpienia dużego nagromadzenia materiałów roślinnych, zarówno zwęglonych, jak i storfiałych, stosowany jest podział próby na podpróbki (np. połowa, jedna dziesiąta próby), a przedstawiane wyniki analiz jakościowych i ilościowych odnoszą się tylko do zbadanej podpróbki. Dane karpologiczne można przedstawić w postaci tabel lub wykresów podających liczebność (obfitość, *abundance*) okazów oraz wykresów ilustrujących frekwencję taksonów (*frequency*, *ubiquity*), czyli liczbę prób, w których dany takson występuje (Lityńska-Zajac i Wasylińska 2005; Badura 2011). Dobrym rozwiązaniem jest przygotowanie zestawień danych liczbowych pochodzących z próbek o tej samej objętości lub przeliczanych na wybraną objętość (Badura 2011). W zależności od potrzeb można zastosować różne analizy statystyczne.

W przypadku węgla drzewnych dane liczbowe oparte są na liczeniu ich fragmentów, niezależnie od ich wielkości. Stanowi to najłatwiejszą i najczęściej spotykaną metodę przedstawienia liczebności taksonów w próbie. Jej wyniki są porównywalne z innymi sposobami oszacowania udziału taksonów, np. na podstawie ważenia ich fragmentów (Chabal 1990) czy przeliczenia według miary najdłuższego fragmentu (Kadrow i Lityńska-Zajac 1994). W próbach o niewielkiej liczebności oznaczane i liczone są wszystkie zachowane kawałki, natomiast w próbach charakteryzujących się znaczną wtórną fragmentacją i/lub dużą liczebnością szczątków oznaczana i liczona jest tylko część zachowanego zespołu. Liczbę badanych okazów wyznacza liczba identyfikowanych nowych taksonów podczas analizy

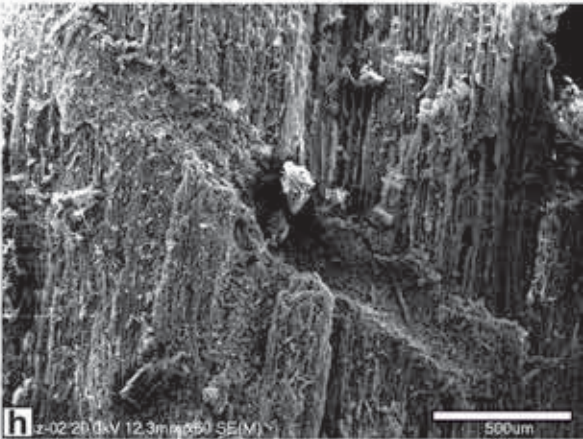
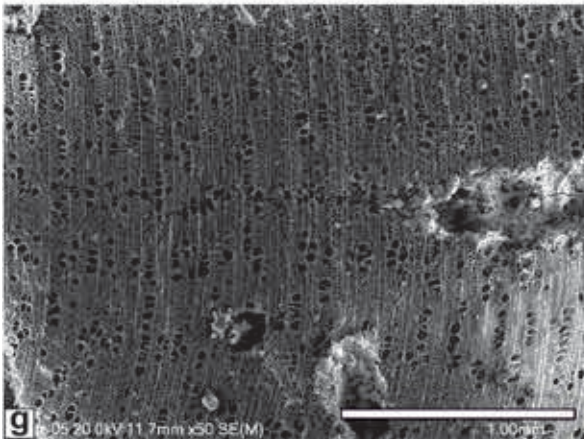
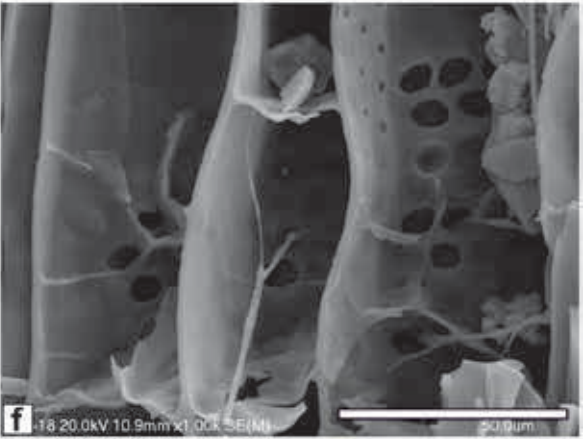
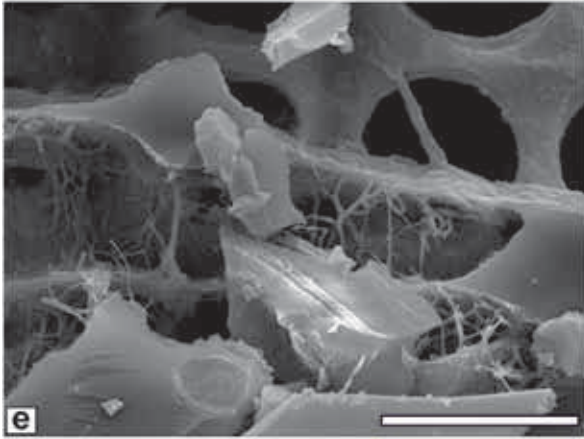
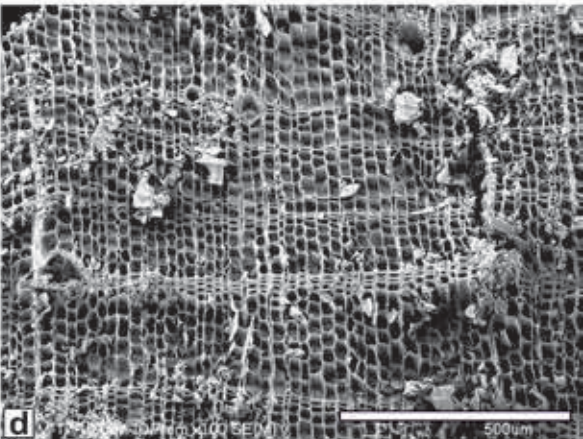
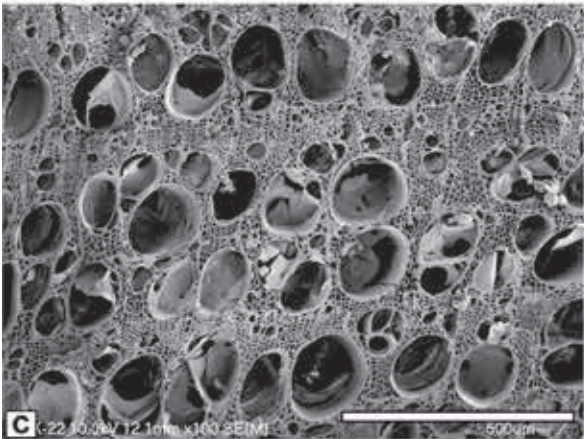
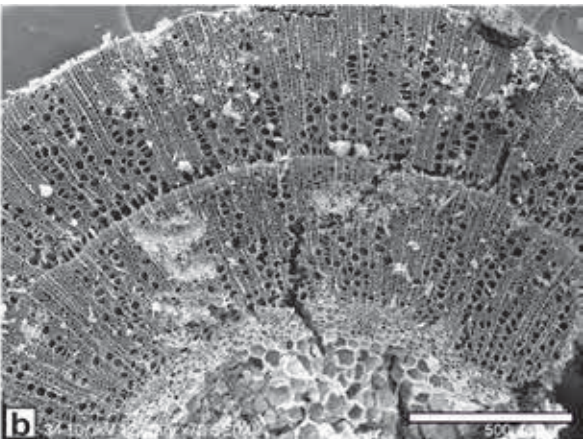
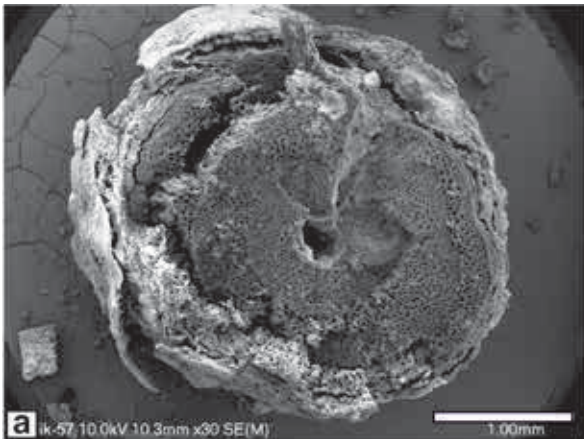
kolejnych fragmentów. Przebieg takiej analizy można zilustrować za pomocą wykresu taksonomicznego (Chabal 1988; 1997; Badal García 1992; Ntinou 2002; Carrión Marco 2005; Moskal-del Hoyo 2014). Na osi Y zaznacza się pojawianie się poszczególnych taksonów, a na osi X podaje się liczbę analizowanych fragmentów węgla drzewnych. Najliczniej reprezentowane taksony spotykane są z reguły jako pierwsze, natomiast najrzadsze mogą wystąpić na początku analizy albo też, co jest najczęściej spotykane, po oznaczeniu większej liczby fragmentów. Podczas pracy, pomimo dalszej analizy, w pewnym momencie nie są już dokumentowane kolejne nowe taksony i wykres zaczyna się stabilizować, wyznaczając tym samym minimalną liczbę fragmentów, które należy oznaczyć w celu uzyskania różnorodności taksonomicznej w próbie.

Wyniki badań antrakologicznych przedstawione są najczęściej jako suma zliczeń fragmentów węgla drzewnych należących do poszczególnych taksonów oraz podawane są ich wartości procentowe. Stosuje się różnego rodzaju wykresy oraz diagramy antrakologiczne w przypadku prób pochodzących z różnych poziomów (ryc. 9). Można także opierać wyniki o frekwencję taksonów w danej próbie i podkreślać częstość występowania danego gatunku lub rodzaju drzew i krzewów w próbach na stanowisku. W celu przeprowadzenia interpretacji paleośrodowiskowej wykorzystuje się węgle oznaczone do poziomu gatunku, rodzaju czy rodziny, pomijając okazy zaliczone do drzew liściastych czy szpilkowych oraz nieoznaczone, co w lepszy sposób obrazuje udział poszczególnych drzew i krzewów w próbach. W zależności od pytań badawczych i powiązania danych antrakologicznych z innymi zmiennymi można zastosować analizy statystyczne do opracowania wyników (Moskal-del Hoyo 2021).

### **Interpretacja pozostałości owoców i nasion oraz części wegetatywnych roślin na stanowiskach archeologicznych**

Od najdawniejszych dziejów człowieka rośliny stanowiły ważny składnik pożywienia i były wykorzystywane do innych czynności życiowych. Początkowo użytkowane były tylko rośliny dzikie, a potem stopniowo pojawiały się różne gatunki roślin uprawnych, co nie eliminowało całkowicie użytkowania w dalszym ciągu wielu roślin zbieranych ze





stanu dzikiego. Badania archeobotaniczne wskazują na konsumpcję roślin dzikich w paleolicie i epipaleolicie (Hillman i in. 2001; Asouti i in. 2018; 2020) i mezolicie (Kubiak-Martens 1995; 1999; Dunne i in. 2021), ale dopiero od neolitu pojawiają się liczne dowody zwiększającej się roli roślin w gospodarce i kulturze ludów europejskich związanej z rozprzestrzenianiem się gatunków udomowionych w Europie (Bogaard 2004; Coward i in. 2008; Lityńska-Zajac i Wasylikowa 2005; Zohary i in. 2012).

Na terenie Europy Środkowej najważniejszą grupę roślin uprawnych znajdowanych od początku neolitu stanowiły zboża. Ziarno, kłosa i fragmenty oplewiania, zachowane najczęściej w formie zwęglonej, umożliwiały określanie gatunków, śledzenie ich dróg ekspansji i podejmowanie prób określenia roli poszczególnych gatunków na różnych terenach i w różnych okresach pradziejów. Wśród najstarszych roślin uprawnych z terenu Polski wymienić należy pszenice oplewione, takie jak płaskurka (*Triticum diccocon* Schrank) i samopsza (*T. monococcum* L.), jęczmień zwyczajny (*Hordeum vulgare* L.), rośliny motylkowe, tj. groch zwyczajny (*Pisum sativum* L.) i soczewicę jadalną (*Lens culinaris* Medik) oraz rośliny włókno- i olejodajne, w tym len zwyczajny (*Linum usitatissimum* L.) (Klichowska 1975; Bieniek 2007; Lityńska-Zajac 2007; 2018b; Lityńska-Zajac i Wasylikowa 2005; Lityńska-Zajac i in. 2017). W zespołach najstarszych roślin uprawnych znajduje się także tzw. nowy typ pszenicy oplewionej (Bieniek 2005), który dzięki nowoczesnym badaniom genetycznym i potwierdzeniu obecności genomu G może być łączony z pszenicą (*T. timopheevii* Zhuk). Wyniki te oparto m.in. na szczątkach oplewiania znalezionych na wczesnoneolitycznym stanowisku nr 4 w Miechowicach i oznaczonych przez Aldonę Mueller-Bieniek (Czajkowska i in. 2020). Interesujące jest również prawdopodobne wykluczenie z zestawu najstarszych roślin

uprawnych prosa zwyczajnego (*Panicum miliaceum* L.) w świetle nowych analiz tego gatunku w powiązaniu z datowaniem metodą AMS jego ziarniaków z wielu stanowisk europejskich, w tym polskich (Filipović i in. 2020). Historię pozostałych gatunków roślin uprawnych na ziemiach polskich można prześledzić na podstawie danych pochodzących z licznych stanowisk archeologicznych. Oprócz zbóż, w formie spalonej lub niespalonej i w postaci odcisków, na stanowiskach archeologicznych różnego wieku zachowały się także inne rośliny uprawne, np. rośliny motylkowe (bób *Vicia faba* L.) i olejodajne (konopie siewne *Cannabis sativa* L. i lnicznik siewny (*Camelina sativa* (L.) Crantz), warzywa (np. kapusty *Brassica* sp. i marchew zwyczajna *Daucus carota* L.) i przyprawy (np. koper ogrodowy *Anethum graveolens* L. i kminek zwyczajny *Carum carvi* L.) oraz pestki owoców mięsistych i orzechy (np. jabłoń *Malus domestica* Borkh., czereśnia *Cerasus avium* (L.) Moench, wiśnia *C. vulgaris* (L.) Mill. i orzech włoski *Juglans regia* L.). Pomimo rozwoju rolnictwa i ogrodnictwa rośliny dziko rosnące nadal były wykorzystywane nie tylko jako pożywienie, ale także w lecznictwie i w różnorodnych działaniach rytualnych (m.in. Lityńska-Zajac i Wasylikowa 2005; Badura 2011; Mueller-Bieniek 2012).

Wyniki badań archeobotanicznych pozwalają także na rekonstrukcję zbiorowisk roślinnych na podstawie metod fitosocjologicznych i autekologicznych, przy obarczonego pewnymi błędami założeniu, że zbiorowiska w przeszłości miały wymagania ekologiczne podobne do dzisiejszych. Zgodnie z zasadą aktualizmu przy tego typu analizach można posłużyć się dzisiejszą przynależnością poszczególnych gatunków do określonych syntaksonów, czyli do jednostek klasyfikacji fitosocjologicznej takich jak np. zespół roślinny (Medwecka-Kornaś i in. 1972; Matuszkiewicz 2001). W celu scharakteryzowania warunków siedliskowych

←  
**Ryc. 8.** Wybór węgli drzewnych ze stanowisk archeologicznych (det. M. Moskal-del Hoyo). a – wierzba lub topola (*Salix* sp. vel *Populus* sp.), gałązka w przekroju poprzecznym z Lipnika (średnia epoka brązu); b – leszczyna pospolita (*Corylus avellana*), gałązka w przekroju poprzecznym z Korzkwi (wczesne średniowiecze); c – jesion wyniosły (*Fraxinus excelsior*), przekrój poprzeczny z widocznymi wąskimi słojami rocznymi z Ułowa (epoka żelaza); d – świerk pospolity lub modrzew europejski (*Picea abies* vel *Larix decidua*), przekrój poprzeczny z widocznymi wąskimi słojami rocznymi z Jaskini Mamutowej (paleolit); e – sosna zwyczajna (*Pinus sylvestris*), przekrój podłużny promieniowy. Widoczne ślady działalności grzybów w cewkach drewna sprzed spalania ze stanowiska Tominy (wczesny neolit); f – topola (*Populus* sp.), przekrój podłużny promieniowy. Widoczne ślady działalności grzybów w naczyniach drewna sprzed spalania ze stanowiska Stryjów (późny neolit); g, h – olsza (*Alnus* sp.), ślady po drewnojadach zaobserwowane na przekroju poprzecznym (g) i podłużnym promieniowym ze stanowiska Maszkowice (wczesna epoka brązu). Skala: 1 mm (a, g), 500 µm (b, c, d, h), 40 µm (e), 50 µm (f). Fot. M. Moskal-del Hoyo



można zastosować ekologiczne liczby wskaźnikowe, które do opisu warunków panujących w Polsce najczęściej opierają się na danych regionalnych (Zarzycki i in. 2002). Analizy przeprowadzane są głównie dla trzech wskaźników edaficznych, tj. wilgotności, trofizmu i odczynu gleby. Do najczęściej wyróżnianych w badaniach archeobotanicznych syntaksonów należą zbiorowiska pól uprawnych, zbiorowiska ruderalne oraz zbiorowiska antropogenicznych łąk i pastwisk. Szczegółowe omówienie podstaw teoretycznych tego typu rekonstrukcji zostało przedstawione w *Przewodniku do badań archeobotanicznych* (Lityńska-Zajac i Wasylińska 2005) oraz w obszernej pracy na temat zbiorowisk chwastów (Lityńska-Zajac 2005). W celu przygotowania zestawień danych karpologicznych można posilkować się bazami danych, np. ArboDatMulti (Kreuz i Schäfer 2002; Pokorná i in. 2011), które po wpisaniu poszczególnych taksonów dzielą materiały archeobotaniczne według grup ekologicznych, np. roślin uprawnych, synantropijnych (chwasty lub rośliny ruderalne), łąkowych lub pastwiskowych, z uwzględnieniem lokalnych warunków siedliskowych (Mueller-Bieniek i Woch 2012). Na uwagę też zasługuje wykorzystanie autekologicznych właściwości gatunków w badaniach archeobotanicznych poprzez stosowanie metody funkcjonalnej interpretacji danych botanicznych (ang. *functional interpretation of botanical survey*, FIBS). Wówczas analizowane są strategie życiowe roślin, m.in. wielkość, typ wzrostu, tempo rozwoju ontogenetycznego, płodność czy długowieczność, które w przypadku gatunków przystosowanych w wyniku adaptacji do warunków środowiska mają odpowiedni typ funkcjonalny. Badania te wykorzystywane są głównie w stosunku do rekonstrukcji metod rolniczych, w tym określania warunków panujących na dawnych polach uprawnych (np. uprawy jare lub ozime) (m.in. Jones i in. 2000; Bogaard i in. 2001; Lityńska-Zajac i Wasylińska 2005).

### **Interpretacja pozostałości drewna na stanowiskach archeologicznych**

#### **Wykorzystywanie surowca drewnianego**

Nie ulega wątpliwości, że ludzie w pradziejach i czasach historycznych doskonale znali właściwości technologiczne drewna i wykorzystywali ten surowiec,

uwzględniając poszczególne cechy drewna w zależności od swoich potrzeb jako materiał konstrukcyjny i surowiec potrzebny do wykonania różnego rodzaju przedmiotów codziennego użytku (m.in. Molski 1968; Gale i Cutler 2000; Cywa 2018a; 2018b; Cywa i in. 2018; Cywa i Wacnik 2020). Jako surowca do wznoszenia konstrukcji używano głównie drewna dębu (*Quercus* sp.), co zostało potwierdzone m.in. na neolitycznej osadzie kultury ceramiki wstęgowej rytej w Brzeziu, na stan. 17 (Lityńska-Zajac i Czekaj-Zastawny 2021) i na słynnym grodzisku w Biskupinie, na którym odkryto ponad sto jednakowych domów stojących wzdłuż ulic wymoszczonych drewnem (Żurowski 1950; Ważny 1993). Wynika to zapewne z tego, że drewno dębu cechuje się dużą twardością i wytrzymałością, dzięki czemu nadaje się bardzo dobrze do wznoszenia solidnej konstrukcji (Krzysik 1957; Podbielkowski 1985; Zielski i Krąpiec 2004; Cywa i in. 2018). Drewno innych gatunków, m.in. sosny zwyczajnej, charakteryzującej się także dużą wytrzymałością, było również użytkowane jako materiał konstrukcyjny (Zielski i Krąpiec 2004; Pydyn i Rembisz 2010).

Badania porównawcze przedmiotów drewnianych z okresu średniowiecza z terenu Polski wykazały, że do wyrobu pewnych ich grup korzystano najczęściej z niektórych tylko gatunków drzew lub krzewów. Przykładowo, przedmioty darte (np. deski i łuczywa) oraz darte/łupane i ciosane wykonywano zazwyczaj z drewna o dużej łupliwości należącego do sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris*), dębu, świerka lub modrzewia (*Picea abies* vel *Larix decidua*) i cisa (*Taxus baccata*). Do toczenia użytkowano głównie drewno jesionu wyniosłego (*Fraxinus excelsior*) najczęściej na miski i talerze, sosny (wrzeciona i miski), olszy (*Alnus* sp.) i klonu (*Acer* sp.) (głównie naczynia) (np. ryc. 7) oraz trzmieliny (*Euonymus europaea*) (wrzeciona) (Cywa 2018a; 2018b). Wyroby drewniane były także podstawą wymiany handlowej, o czym świadczą np. średniowieczne importy grzebieni wykonane z bukszpanu *Buxus sempervirens*. Drewno tego gatunku pochodzi z terenów śródziemnomorskich, a jego znaleziska daleko poza obszarem występowania świadczyć mogą o szlakach handlowych prowadzących ze wschodniej części basenu Morza Śródziemnego (Cywa i Wacnik 2020).

Drewno było wykorzystywane na opał. Jego szczątki, w zależności od chronologii stanowiska, występują w strukturach o różnej funkcji, począwszy od najprostszych palenisk poprzez bardziej

wyspecjalizowane piece potrzebne do użytku domowego lub do wypału naczyń ceramicznych, a skończywszy na piecowiskach przemysłowych służących do produkcji żelaza. W paleniskach często znaleźć można duże nagromadzenia węgla drzewnych. Ich oznaczenie taksonomiczne wskazuje na małą różnorodność jakościową i dużą nadreprezentację pojedynczych taksonów, co jest związane najczęściej z krótkotrwałym, wielokrotnie nawet jednorazowym, użyciem ognia. W konsekwencji wyniki są głównie źródłem danych na temat użytkowania drewna opałowego, którym najczęściej jest łatwo dostępne lokalne drewno (Chabal 1988; Badal García 1992; Théry-Parisot 2001; Ntinou 2002; Asouti i Austin 2005; Carrión Marco 2005). Podobne wnioski wysunięto nawet w przypadku badanych mielerzy, wyspecjalizowanych struktur służących do produkcji węgla drzewnych. Zaobserwowano, że zarówno spektrum taksonomiczne, jak i dominujące rodzaje drzew znalezionych w mielerzach wykazywały silny związek z typem lokalnego siedliska i tym samym z typem lasu, który mógł się na nim rozwinąć (Ludemann 2010). Na niektórych terenach odnotowano jednak bardziej selektywne użytkowanie drewna i preferowane były np. gatunki drzew iglastych (Rutkiewicz i in. 2017). Wanda Giźbert i Irena Gluza analizowały wykorzystywanie węgla drzewnych w hutnictwie żelaza w Polsce, w epoce żelaza. Zauważono wyraźną preferencję w stosunku do niektórych rodzajów drzew, jednak głównie ta obserwacja odnosiła się do tego samego stanowiska, podczas gdy na innych obszarach wybierano odmienne rodzaje drzew, co związane było z lokalną dostępnością (Bielenin 1993).

Zespoły węgla drzewnych badane były także z obiektów sepulkralnych, pozwalając na zrozumienie użytkowania tego surowca podczas obrzędów pogrzebowych w różnych okresach z obszaru Polski (Lityńska-Zajac 2004; Wrzesińska i Wrzesiński 2002). Ze stanowiska nr 19 w Kokotowie przebadano węgle drzewne ze 112 grobów odsłoniętych na cmentarzysku kultury łużyckiej. Potwierdzono, że do budowy stosu ciałopального używano przynajmniej 15 różnych gatunków i rodzajów drzew i krzewów, przy czym dominowały węgle drzewne dębu, a w następnej kolejności sosny zwyczajnej i brzozy (*Betula* sp.). Interesujące jest częste występowanie wrzosu (*Calluna vulgaris*), który jest wyjątkowym znaleziskiem na stanowiskach archeologicznych. Roślina ta mogła być wykorzystywana

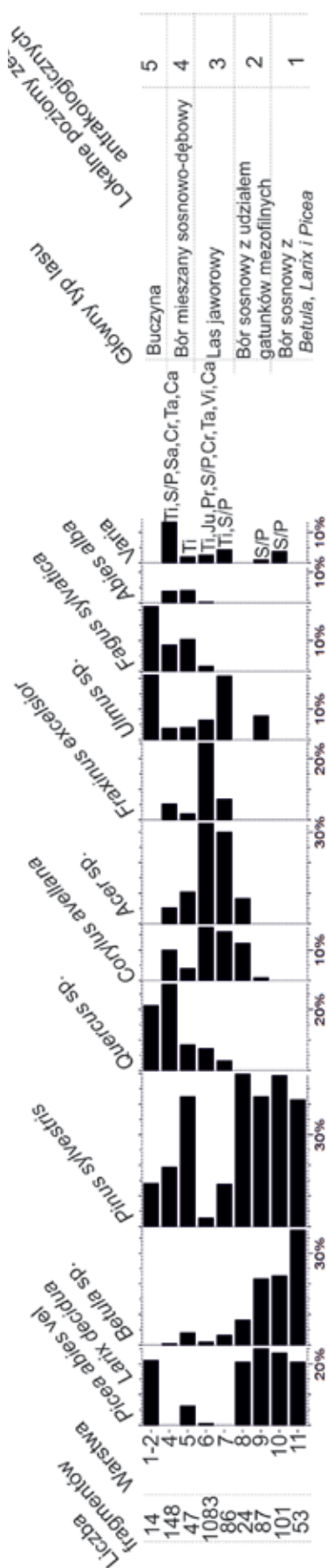
zarówno celowo, ze względu na jej cechy oraz przypisywane jej być może znaczenie rytualne, jak i mogła dostawać się do resztek stosu w sposób przypadkowy, np. w wyniku porostania miejsc po ustrynach (Moskal-del Hoyo 2012; 2014). W obiektach grobowych tej samej kultury na pobliskich stanowiskach 10, 11 i 12 w Targowisku wśród różnych taksonów zanotowano duży udział brzozy. Drewno to mogło być preferowane do budowy stosu przy rytuałach ciałopalenia, gdyż jego kora zawiera betulinę, która sprawia, że świeże drewno pali się szybciej i osiąga wysoką temperaturę (Lityńska-Zajac i in. 2014). Na nekropoliach z okresu rzymskiego, reprezentujących ludność kultur wielbarskiej i przeworskiej, często dominowała sosna, co mogło być związane z jej znaczeniem w obrzędowości pogrzebowej (Stępnik 2001; Lityńska-Zajac 2015) i/lub z jej przewagą na terenach piaszczystych, na których zlokalizowane były niektóre cmentarzyska (Stępnik 2001; Moskal-del Hoyo 2012).

Przedmioty wykonane z kory drzew mogą być szczególnym przejawem użytkowania drzew. Spektakularnego przykładu dostarczyły przedmioty znalezione przy neolitycznym człowieku z lodowca zwanym Ötzi, wśród których odkryto naczynia z kory brzozy oraz przedmioty z łyka lipowego (*Tilia* sp.), takie jak pochewka na nóż i części obuwia (Oeggl 2009). Wyjątkowym znaleziskiem jest niespalony fragment przedmiotu wykonanego z tego samego materiału (ryc. 10), który został znaleziony w Opatowie na stan. 1 (Kłobuck) w ciałopalnym grobie popielnicowym kultury łużyckiej należącej do kobiety. Przedmiot interpretowany jest jako część przepaski bądź czepca służącego do nakrycia głowy. Mineralizacja metalowych części wyposażenia grobu doprowadziła do jego impregnacji i zachowania go do naszych czasów. Tym samym udokumentowano nowe praktyki związane z wykorzystaniem materiału roślinnego w kulturze łużyckiej (Moskal-del Hoyo i Badal 2009).

#### *Rekonstrukcja charakteru lasów na podstawie węgla drzewnych*

Już w pierwszych publikacjach dotyczących badań antrakologicznych z Polski zauważono, że węgle drzewne mają duży potencjał do odtworzenia lokalnych drzewostanów (Seidl 1936a; Zabłocki 1952), zwłaszcza jeśli pochodzą z przydomowych palenisk





**Ryc. 9.** Przykładowy diagram antrakologiczny z Jaskini Żarskiej obrazujący wyniki analizy węgla drzewnego pochodzących z 11 warstw datowanych na schyłkowy plejstocen (warstwy 10-11) i na holocen (1-9). Na podstawie udziału i dominacji poszczególnych taksonów drzew i krzewów wydzielono 5 lokalnych poziomów zespołów antrakologicznych odpowiadających zmianom głównych typów lasów rozwijających się w okolicy stanowiska, od plejstocenijskiego boru sosnowego (1), poprzez las w typie współczesnej jaworzyny z okresu optimum klimatycznego (3), do początku rozwoju buczyny w okresie subatlantyckim (5). Jedynie zespół nr 3 jest oparty na danych reprezentatywnych, natomiast pozostałe zespoły zawierają niewielką liczbę analizowanych fragmentów węgla drzewnego. Niemniej jednak ich skład taksonomiczny, podobnie jak analiza ilościowa, pozwala na wyznaczenie ogólnej tendencji w rozwoju zbiorowisk leśnych. Diagram przygotowany w programie POLPAL (Nalepka i Walanus 2003). Analiza: M. Moskal-del Hoyo. Zmienne za: Wilczyński i in. 2020

(Dzieduszycki 1976) i licznych warstw kulturowych (Wasylikowa i in. 1992). Zagadnieniom związanym z możliwością przeprowadzenia rekonstrukcji paleośrodowiskowych poświęcono wiele prac antrakologicznych poczynając od lat 80. ubiegłego wieku w tzw. szkole z Montpellier (m.in. Chabal 1988; 1997; Thiébault 1988; Badal García 1992; Figueiral 1992; Heinz i Thiébault 1998; Théry-Parisot 2001). Opracowano główne założenia metodyczne, które następnie były wielokrotnie weryfikowane i dyskutowane (m.in. Ntinou 2002; Asouti i Austin 2005; Carrión Marco 2005; Lityńska-Zajac i in. 2008; Théry-Parisot i in. 2010; Moskal-del Hoyo 2013; 2016; Moskal-del Hoyo i in. 2017a; 2018a; 2018b; Kabukcu 2018; Kabukcu i Chabal 2021). Jednym z podstawowych zagadnień badawczych było odtworzenie pochodzenia zespołu węgla znajdowanego w nawarstwieńcach archeologicznych. Miejsce zachowania tego typu szczątków jednoznacznie wskazuje, że były one bezpośrednio związane z działalnością człowieka, czyli z potencjalną selekcją preferowanych gatunków i rodzajów drzew i krzewów. Wymieniony czynnik mógł wpływać na zniekształcenia obrazu dawnej roślinności leśnej uzyskanej na podstawie analizy resztek drewna. Zaobserwowano jednak, że mając do czynienia z pozostałościami po drewnie opałowym, w większości przypadków często zbieranym i łatwo dostępnym, może ono stanowić pewnego rodzaju próbę lokalnej roślinności leśnej. Ze względu na ciągłe i duże zapotrzebowanie opału gromadzono według „zasady minimalnego wysiłku” (Shackleton i Prins 1992), czyli wybierano suche drewno (chrust) łatwo dostępne, bez selekcji konkretnych gatunków. Liczne prace skupione na aspektach metodycznych wykazały, że węgle drzewne ze stanowisk archeologicznych (choć nie wszystkie) są cennym materiałem do rekonstrukcji dawnych lasów, pod warunkiem że badane są specjalne zespoły spalonego drewna (*dispersed charcoal, long-term deposits* według Asouti i Austin 2005; oraz *sensu* Théry-Parisot i in. 2010: 143, tzw. rozproszone węgle drzewne), które reprezentują długotrwały proces zbierania drewna opałowego (m.in. Chabal 1997; Asouti i Austin 2005; Théry-Parisot i in. 2010; Kabukcu 2018).

Dla właściwej interpretacji materiału i w celu otrzymania wiarygodnych danych tzw. rozproszone węgle drzewne powinny reprezentować materiał zalegający na stanowiskach archeologicznych w warstwach związanych z długotrwałą działalnością człowieka. Niektóre obiekty, np. jamy odpadowe,



**Ryc. 10.** Przykład przedmiotu, prawdopodobnie przepaski, wykonanego z kory brzozonej (*Betula* sp.) (a) (det. M. Moskal-del Hoyo, E. Badal); b – fragment z powiększoną częścią otworów i szycia „na okrętkę”; c – ułożenie komórek korka brzozy obserwowane pod mikroskopem na światło przechodzące; d – mikrofotografia SEM struktury anatomicznej przepaski w przekroju promieniowym z widocznymi komórkami felemu i feloidu. Skala: 1 cm (a), 50  $\mu$ m (c), 25  $\mu$ m (d). Zmienione za: Moskal-del Hoyo i Badal 2009

jamy gospodarcze z wtórnym wypełniskiem, czy też dołki przysłupowe (m.in. Bernabeu i Badal 1992; Lityńska-Zajac i in. 2008; Moskal-del Hoyo 2013; 2016; Lityńska-Zajac i in. 2014a; 2014b; 2014c; 2014d; Moskal-del Hoyo i in. 2017; 2018a; 2018b) również w dużym stopniu mogą dostarczyć tego typu materiału. W związku z tym pozostałości zwęglonych drzew i krzewów muszą pochodzić z odpowiednio pobranych prób, tak aby uzyskany materiał był liczny i reprezentatywny dla wszystkich obiektów czy warstw archeologicznych, odpowiadających danemu horyzontowi chronologicznemu. Wtedy jako rezultat badań otrzymuje się zazwyczaj dane o urozmaiconym taksonomicznym składzie i charakteryzujące się dużą powtarzalnością wyników, nie tylko w obrębie jednego stanowiska, ale również na stanowiskach o podobnej chronologii i charakteryzujących się podobnymi warunkami siedliskowymi (lit. wyżej cytowana oraz m.in. Ntinou 2002; Carrión Marco 2005; Novák i in. 2021). Wykazano, że suma 250-400 fragmentów węgla drzewnych z danej warstwy archeologicznej jest wystarczająca do opisu lokalnej roślinności, niemniej jednak liczba fragmentów węgla potrzebnych do analizy zależy w większym stopniu od bogactwa dendroflory (Badal i Garcia 1992; Chabal 1997; Chabal i in. 1999; Ntinou 2002; Carrión Marco 2005; Lityńska-Zajac i Wasylikowa 2005).

Zazwyczaj węgle drzewne były sporadycznie brane pod uwagę przy rekonstrukcjach zbiorowisk roślinnych z Polski, a ponadto tylko w nielicznych przypadkach opierały się na systematycznie pobieranych reprezentatywnych próbach (np. Lityńska-Zajac 1994; Lityńska-Zajac i in. 2014a; 2014b; 2014c; 2014d; 2015; Kruk i in. 2016; Moskal-del Hoyo i in. 2017a; 2018a; Lityńska-Zajac i Makowicz-Polisztot 2019). Wypada jeszcze

zaznaczyć, że w porównaniu z rekonstrukcją roślinności uzyskaną na podstawie danych palinologicznych czy makroskopowych szczątków roślin, antrakologia opiera się na oznaczeniach taksonomicznych tylko szczątków drzew i krzewów i tym samym umożliwia opis pewnej części roślinności leśnej, przede wszystkim w skali lokalnej. Ponadto oznaczenia taksonomiczne w większości przypadków do poziomu rodzaju sprawiają, że odtworzenie zbiorowisk leśnych na podstawie taksonów tej rangi jest utrudnione, ponieważ gatunki reprezentujące dany rodzaj charakteryzują się zróżnicowanymi wymaganiami ekologicznymi i siedliskowymi. Jednakże analiza dominujących taksonów w zespole węgla drzewnych dostarcza ważnej wskazówki do odtworzenia składu zbiorowisk leśnych, gdyż zazwyczaj główne typy lasów charakteryzują się dominacją pojedynczych lub kilku gatunków drzew. Dodatkowo znajomość siedliska, typów zbiorowisk leśnych oraz poznanie potencjalnej roślinności naturalnej (Medwecka-Kornaś i in. 1972; Matuszkiewicz 2005; 2008), która mogłaby się rozwinąć w okolicy danego stanowiska archeologicznego, pomaga w interpretacji i odtworzeniu głównych typów lokalnej roślinności leśnej.

### Datowanie szczątków roślinnych

Materiały roślinne służą od lat do datowania warstw lub obiektów archeologicznych i zakłada się, że są one tego samego wieku co badane obiekty i poszczególne warstwy, zwłaszcza gdy pochodzą z jednorodnych pod względem chronologii nawarstwień (Lityńska-Zajac i Wasylikowa 2005). Należy jednak podkreślić, że datowane bezpośrednio są tylko szczątki roślinne i dlatego powinny

być one oznaczone taksonomicznie przed wysłaniem próbki do pomiaru wieku (Lityńska-Zajac 1994; Walanus i Goslar 2004; Carrión Marco 2005; Lityńska-Zajac i Wasylińska 2005; Moskal-del Hoyo i Kozłowski 2009; Nowak i in. 2017). Wiele przykładów pokazało, że niekoniecznie trafne jest założenie, że szczątki roślinne są równoczesne analizowanym obiektom lub warstwom archeologicznym i spotykane są wyniki pomiaru wieku niezgodne z oczekiwanym. Często nawet dokładne obserwacje terenowe nie pozwalają na wskazanie śladów zanieczyszczeń prób młodszych lub starszym materiałem. W konsekwencji w jednej próbie wysyłanej do laboratorium radiowęglowego mogą znaleźć się materiały przemieszane w wyniku zaburzenia pierwotnego ułożenia warstw na stanowisku związanych z naturalnymi procesami podepozycyjnymi lub będące efektem działalności ludzi i zwierząt. Do kontaminacji materiałów może także dojść poprzez błędy popełnione w czasie eksploracji obiektów lub w laboratorium w trakcie przygotowania i opracowania materiału. Niespodziewana data może być także rezultatem wykorzystywania starszego materiału przez ludność badanego stanowiska (Harkness 1975; Pilcher 1991; Badal i in. 1994; Moskal-del Hoyo i Kozłowski 2009; Nowak i in. 2017). Przykładem może być też tzw. problem „starego drewna”, gdyż surowiec ten mógł posłużyć za opał, a pochodzić mógł np. ze starej konstrukcji drewnianej lub z części twardej kilkusetletnich drzew lub mógł wówczas być drewnem subfossylnym (Schiffer 1996; Lityńska-Zajac i Wasylińska 2005).

Najlepszym rozwiązaniem, które pozwala na wybór odpowiedniej do datowania próbki, jest oznaczenie taksonomiczne materiałów. Dotyczy to przede wszystkim węgla drzewnych, owoców i nasion. Analiza antrakologiczna, podobnie jak karpologiczna w przypadku materiałów zwęglonych, nie przyczynia się do zniszczenia materiałów roślinnych, które przy braku użycia jakichkolwiek środków chemicznych znakomicie nadają się do datowania. Selekcjonując węgle drzewne, za każdym razem polecane jest wydatowanie tylko jednego fragmentu, w innym przypadku nie ma bowiem pewności, że kilka ułamków będzie równoczesowych, nawet jeśli reprezentują ten sam takson. Poza tym niekiedy sama identyfikacja taksonomiczna węgla drzewnych wskazać może na występowanie zaburzeń stratygraficznym, gdyż w zależności

od chronologii i lokalizacji badanego stanowiska można spodziewać się pewnej grupy taksonów. Na przykład badając warstwy paleolityczne, najczęściej spotykamy węgle drzewne należące do drzew i krzewów szpilkowych, wśród których wyróżnić można sosnę, limbę czy modrzew lub świerk (Wilczyński i in. 2020; Kot i in. 2021), natomiast jeśli pracujemy na stanowiskach neolitycznych, powinno się unikać datowania węgla drzewnych późno migrujących gatunków drzew, takich jak buk, grab i jodła (*Abies alba*), których szczątki znalezione w warstwach neolitycznych po wydatowaniu mogą okazać się materiałem młodszym, datowanym na okres subatlantycki (Lityńska-Zajac i in. 2008; Moskal-del Hoyo i in. 2015; Lityńska-Zajac i Moskal-del Hoyo 2021). Wybór węgla drzewnych do datowania metodą radiowęglową nie tylko uwzględnia oznaczenie taksonomiczne i wskazanie gatunków o najwyższym prawdopodobieństwie występowania w danym okresie klimatycznym, lecz także polega na analizie dendrologicznej wskazującej część rośliny, z której dany fragment pochodzi. Najbezpieczniej jest wyselekcjonować drobne kilkuletnie gałązki (ryc. 8a, b) oraz fragmenty zachowane wraz z korą, zwłaszcza w przypadku gatunków drzew długowiecznych takich jak dąb. Można wykorzystać też młode pędy, fragmenty szyszek, żołędzie, które ze względu na ich krótkie życie znakomicie nadają się do pomiaru wieku. Z tego samego powodu rekomendowany jest wybór owoców i nasion, jeśli na stanowiskach znajdowane są materiały karpologiczne. Materiały tego typu są krótkowieczne i najlepiej oddają okres ich wykorzystania. W przypadku diaspor oraz drobnych węgla drzewnych najczęściej należy stosować metodę akceleratorową (AMS) (Lityńska-Zajac i Wasylińska 2005; Moskal-del Hoyo i Kozłowski 2009; Nowak i in. 2017).

## GOSPODARKA ROŚLINNA: WYBRANE ASPEKTY BADAŃ ARCHEOBOTANICZNYCH

### Co jedli pierwsi rolnicy kultury ceramiki wstęgowej rytej na Pogórzu Karpackim?

Jednym z ważnych elementów badań archeobotanicznych jest odtworzenie podstaw gospodarki rolnej przyjętej przez najstarsze ugrupowania



neolityczne. Pierwsze grupy rolnicze pochodzenia naddunajskiego przybyły na obszary wyżynne południowo-wschodniej Polski w drugiej połowie VI tysiąclecia p.n.e. (Kaczanowski i Kozłowski 1998). Badania przeprowadzone w ostatnich dziesięcioleciach wykazały, że grupy te zasiedliły również tereny prawobrzeża Wisły, w tym Podgórze Bocheńskie (m.in. Czekaj-Zastawny 2017) i dalej na południe obszary Pogórza Karpackiego (Valde-Nowak 2014; Czekaj-Zastawny i in. 2020). Przybysze reprezentujący archeologiczną kulturę ceramiki wstęgowej rytej pojawili się z pełnym zestawem kulturowym, tzw. pakietem neolitycznym, wprowadzającym rolnictwo polegające na produkcji pożywienia w oparciu o udomowione, poza obecnymi obszarami ziem Polski, gatunki roślin i zwierząt (Klichowska 1975; Milisauskas i Kruk 1989; Kaczanowski i Kozłowski 1998; Bieniek 2007; Lityńska-Zajac 2007; Lityńska-Zajac i in. 2017). Jako przykład najstarszych roślin uprawianych przez ludność tej kultury na ziemiach polskich może posłużyć stanowisko nr 2 w Gwoźdźcu na Pogórzu Karpackim badane archeologicznie przez Agnieszkę Czekaj-Zastawną i Agnieszkę Kukulkę (Czekaj-Zastawny i in. 2020). Maria Lityńska-Zajac opracowała zespół owoców i nasion z kilku faz osadniczych (od fazy Ib do IIIa) i potwierdziła uprawę dwóch gatunków oplewionych pszenic, płaskurki (*Triticum dicoccon*) i samopszy (*T. monococcum*), jednak przy niewielkim udziale tej drugiej. Pojawia się w znikomych ilościach jęczmień zwyczajny (*Hordeum vulgare*) oraz wystąpiły nieliczne nasiona grochu zwyczajnego (*Pisum sativum*) i lnu (*Linum usitatissimum*) (Lityńska-Zajac i Moskal-del Hoyo 2021). Dane jakościowe i ilościowe dotyczące gatunków uprawnych mogą stanowić punkt wyjścia do rekonstrukcji struktury upraw, aczkolwiek jest to proces niezwykle trudny i obarczony możliwym błędem ze względu na obecność materiałów zachowanych fragmentarycznie i znalezionych z obiektach o różnej funkcji (Lityńska-Zajac i Wasylińska 2005). Interpretacja wykorzystania określonych gatunków opiera się na ich potencjalnych właściwościach użytkowych. Jak podsumowuje M. Lityńska-Zajac w obszernym opracowaniu (Lityńska-Zajac i Moskal-del Hoyo 2021), ziarno pszenic przeważnie było rozcierane na mąkę lub obtłukiwane na kasze, będąc dobrze przyswajalnym pokarmem zawierającym sporo węglowodanów, głównie w postaci skrobi, oraz znacznie mniej białka i tłuszczu. Ziarna jęczmienia mogły

być przeważnie przeznaczone na paszę. Groch uprawiany był na nasiona, paszę zieloną lub siano. Jego nasiona są bogate w białko oraz mogą być również rozcierane na mąkę i dodawane do wypieku chleba. Z pozostałych roślin uprawnych len zwyczajny mógł być wykorzystywany jako roślina olejo- i włóknodajna. Nasiona tej rośliny dają olej jadalny, a wytloki stanowią wartościową karmę. Siemię lniane mogło być stosowane także w lecznictwie. Z włókien uzyskanych z warstwy korowej łodygi u form długopędowych można było wytwarzać tekstylia (Lityńska-Zajac i Moskal-del Hoyo 2021). Dodatkowo ziarna zbóż z Gwoźdźca poddane były badaniom izotopowym. W pierwszych pracach podsumowujących wyniki badań izotopowych ze stanowisk neolitycznych z Polski potwierdzono wysoki udział białek roślinnych w diecie człowieka (Mueller-Bieniek i in. 2019a; Mnich i in. 2020).

Niewątpliwie rośliny zbierane ze stanu dzikiego odgrywały ważną rolę w uzupełnieniu diety opartej o zboża i strączkowe. Zbieranie całych roślin lub ich części należało do stałych strategii zdobywania pokarmu, wśród których wyróżnić można rozmaite sposoby ich gromadzenia i przetwarzania, np. na polewki, kiszonki czy produkty mączne (Łuczaj 2004; Lityńska-Zajac 2008; Colledge i Conolly 2014; Lityńska-Zajac i Moskal-del Hoyo 2021, tam cyt. lit.). Stanowisko archeologiczne w Gwoźdźcu jest jednym z najstarszych, na których potwierdzono ślady gromadzenia owoców jabłoni dzikiej (*Malus sylvestris*) (Bieniek i Lityńska-Zajac 2001), które mogły być spożywane na surowo lub po wysuszeniu (Lityńska 1986). Oprócz jabłek również inne rośliny dzikie mogły ewentualnie być wykorzystywane jako pożywienie (m. in. Bieniek 2003; Behre 2008; Lityńska-Zajac 2008; Lityńska-Zajac i in. 2017; Mueller-Bieniek i in. 2019a). Do grupy tej wśród szczątków znalezionych w Gwoźdźcu należą nasiona komosy białej (*Chenopodium album*) oraz ziarniaki traw dzikich, np. włośnicy sinej (*Setaria pumila*), chwastnicy jednostronnej (*Echinochloa crus-galli*) i różnych gatunków stokłosa (*Bromus*). Prawdopodobnie zjadano zielone części szczawiu (*Rumex*) i rdestu (*Polygonum*). Do rozmaitych celów, w tym leczniczych mogła być wykorzystywana mięta polna lub nadwodna (*Mentha arvensis* vel *M. aquatica*) (Lityńska-Zajac i Moskal-del Hoyo 2021).

Przedstawiony został tylko jeden z szeroko omówionych w monografii aspektów interdyscyplinarnych badań na stanowisku w Gwoźdźcu



(Czekaj-Zastawny i in. 2021). Odtworzenie gospodarki dawnych mieszkańców tej osady jest utrudnione ze względu na brak zachowania szczątków kostnych, które uzupełniłyby wiedzę na temat diety oraz warunków środowiska. Tego typu dane dostępne były na przedstawianej w następnej kolejności neolitycznej osadzie w Mozgawie.

### **Gospodarka i środowisko w świetle interdyscyplinarnych badań na stanowisku kultury pucharów lejkowatych w Mozgawie**

Bardziej kompletne dane można osiągnąć wtedy, gdy analizy archeobotaniczne są integralną częścią badań archeologicznych i są prowadzone w zespołach interdyscyplinarnych. Wyniki specjalistycznych analiz uzupełniają wiedzę na temat badanych zagadnień osadniczych, gospodarczych i paleośrodowiskowych oraz wzajemnie weryfikują możliwości interpretacyjne. Przykładem efektu ww. współpracy jest badanie osady kultury pucharów lejkowatych w Mozgawie (stan. 1-3), która dzięki analizom przeprowadzonym przez Marka Nowaka i Martę Korczyńską wyróżnia się pod względem zajmowanej powierzchni i może być zaliczona do grupy tzw. dużych osad, sądzi się bowiem, że zajmowała łącznie ok. 35/40 hektarów i mogła być użytkowana w okresie co najmniej ok. 3500-3200 p.n.e. (Nowak i in. 2019; Korczyńska i in. 2019). Oprócz typowych analiz materiałów archeologicznych i zagadnień osadniczych studia brały pod uwagę rezultaty badań palinologicznych, malakologicznych, makroskopowych szczątków roślinnych oraz resztek fauny (Moskal-del Hoyo i in. 2018b; Wilczyński i in. 2021), pochodzących ze stanowiska (tzw. *on-site analysis*) i pobranych z osadów naturalnych zlokalizowanych poza nim (tzw. *off-site analysis*). Łącznie na stanowisku odkryto 72 obiekty archeologiczne, z których zdecydowana większość reprezentuje kulturę pucharów lejkowatych z IV tysiąclecia p.n.e. Z obiektów archeologicznych pobrano ponad 550 prób osadu do badań archeobotanicznych i malakologicznych. U podnóża stoku, na którym znajduje się stanowisko archeologiczne w Mozgawie, pobrano profil T4/2015 do badań palinologicznych i geomorfologicznych, z którego oznaczono także makroskopowe szczątki roślinne, mięczaki i wybrano materiały do pomiaru wieku celem określenia

chronologii warstw zawierających ziarna pyłku. Główne wnioski z badań palinologicznych podsumowała Agnieszka Wacnik, wskazując, że w dolinie Nidy oraz na sąsiednich wzniesieniach lessowych pod koniec okresu atlantyckiego i zanim pojawili się osadnicy kultury pucharów lejkowatych przeważały niezbyt zwarte lasy o charakterze borów mieszanych z dominującą sosną, z nieznacznym udziałem dębu, świerka i brzozy, w typie współczesnych *Quercus-Pinetum*. Być może niewielkie powierzchnie zajmowały lasy liściaste z dębem, leszczyną, lipą i wiązem. Nieliczne krzewy leszczyny rosły w strefie okrajkowej, w podszybie, na nasłonecznionych stokach terasy. W strefie dolinnej, w miejscach okresowo podtapianych, występowały niewielkie powierzchnie olesów w typie *Carici elongatae-Alnetum* z olszą, brzozą i wierzbami. Lokalnie występowały tereny otwarte, najprawdopodobniej ograniczone do strefy brzegowej. Występowały też płaty roślinności kserotermicznej.

Na podstawie danych pyłkowych można wywnioskować, że w okresie rozwoju osadnictwa neolitycznego utrzymuje się dominacja borów mieszanych z przewagą sosny, domieszką świerka, dębu i brzozy. Dane te znalazły odzwierciedlenie w wynikach antrakologicznych, gdyż wśród 16 taksonów (det. M. Moskal-del Hoyo) dominowały sosna i dąb, przy dużym udziale olszy. Powierzchnia lasów zmniejszała się lub zmalała ich zwarcie. Wzrosła frekwencja roślin zielnych, szczególnie wskaźników antropogenicznych (*Artemisia*, *Chenopodiaceae*, *Polygonum aviculare* i *Urtica*). Lokalnie obecne były płaty zarówno suchych (*Knautia arvensis*, *Hypericum*, *Plantago media* i *P. lanceolata*), jak i wilgotnych (*Cyperaceae*, *Filipendula*, *Sanguisorba officinalis*, *Lychnis* i *Lythrum*) zbiorowisk o charakterze łąkowym. Na występowanie płatów roślinności kserotermicznej wskazują szczątki ości i ziarniaki ostnicy *Stipa* sp. (det. A. Mueller-Bieniek i M. Kapcia). Trawa ta jest dzisiaj składnikiem muraw kserotermicznych, ale może również rosnąć w zaroślach i świetlistych lasach (Ceynowa-Giełdon 2001). O obecności terenów otwartych, w tym suchych i kserotermicznych, świadczą też zespoły mięczaków, wśród których Witold Alexandrowicz potwierdził występowanie takich gatunków, jak *Truncatellina cylindrica*, *Vertigo pygmaea*, *Vallonia costata* i *V. pulchella*. Wśród kości zwierzęcych Jarosław Wilczyński i Sylwia Pospuła oznaczyli szczątki dzikiego konia (*Equus ferus*), których

znaleziska również mogą wskazywać na występowanie terenów częściowo otwartych. Ich szczątki poddano badaniom genetycznym i potwierdzono dużą odległość genetyczną pomiędzy populacjami lokalnymi udokumentowanymi w Mozgawie i pierwszymi udomowionych końmi pochodzącymi ze stepów pontyjsko-kaspijskich z północnego Kaukazu (Librado i in. 2021). Pojawienie się gospodarki wytwórczej w Mozgawie w początkach IV tysiąclecia p.n.e. oraz stabilizacja osadnictwa w okresie kilku stuleci zapoczątkowało proces intensywnego przekształcania lokalnego środowiska i przemiany szaty roślinnej. Analiza sedymentów przeprowadzona przez Piotra Szwarczewskiego wykazała, że rolnicza i osadnicza działalność człowieka przyczyniła się do uruchomienia silnych procesów stokowych i przzerwania zapisu pyłkowego w profilu (Moskal-del Hoyo i in. 2018b).

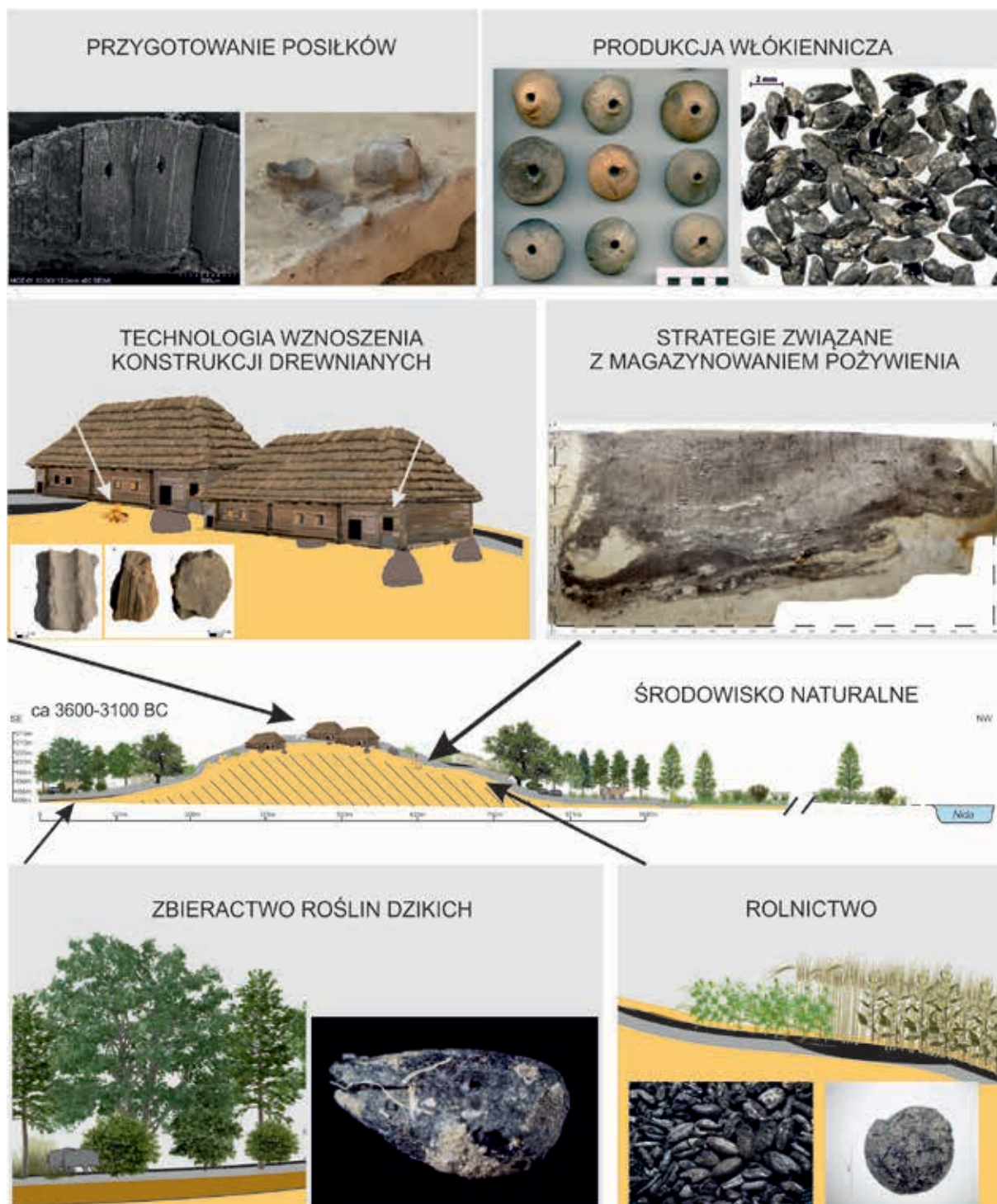
Aldona Mueller-Bieniek wraz z Magdą Kapcią i Krzysztofem Kotynią opracowali wyjątkowo bogaty jak na kulturę pucharów lejkowatych w Polsce zbiór owoców i nasion (Nowak i in. 2020). Warto podkreślić, że jest on wynikiem systematycznego pobierania prób archeobotanicznych, dzięki któremu odkryto znaczne nagromadzenia płaskurki (ryc. 1a, b), lnu (ryc. 1e) i przede wszystkim rzadko spotykanych na ziemiach polskich w neolicie roślin strączkowych, w tym grochu i soczewicy (ryc. 1d) (Mueller-Bieniek i in., w druku). Potwierdzono także wiele taksonów należących do roślin dzikich, które mogły stanowić pożywienie, takich jak komosa biała (ryc. 1f), stokłosa (ryc. 1h) czy poziomka (ryc. 1g). Na uwagę zasługuje także obecność ślimaka (*Mediterranea inopinata*), który jest kserofilnym gatunkiem często żyjącym w glebie na terenach rolniczych i dlatego jego występowanie może być wskaźnikiem rolniczego użytkowania ziemi (Moskal-del Hoyo i in. 2018b). Badanie szczątków kostnych potwierdziło hodowlę wszystkich znanych w neolicie udomowionych zwierząt (bydło *Bos taurus*, świnia *Sus scrofa* f. *domestica* i owca/koza *Capra hircus*/*Ovis aries*). Wśród fauny udokumentowano także obecność psa (*Canis familiaris*). Dieta była również uzupełniana przez łowiectwo, o czym świadczą kości dzikich zwierząt (dziki koń, dzik *Sus scrofa*, jeleni szlachetny *Cervus elaphus*, sarna europejska *Capreolus capreolus*, zając szarak *Lepus europaeus*, lis rudy *Vulpes vulpes* i bóbr europejski *Castor fiber*). Dużą różnorodność zaobserwowano w zespole ryb (m.in. miętus pospolity *Lota lota*, szczupak

pospolity *Esox lucius*, płotka *Rutilus rutilus* i okoń pospolity *Perca fluviatilis*), w tym napotkano na ślady sugerujące przechowywanie, prawdopodobnie w formie kiszenia. Również dość dobrze reprezentowane na tym stanowisku były pozostałości dzikich ptaków (m.in. gęś gęgawa *Anser anser/fabalis*, krzyżówka zwyczajna *Anas platyrhynchos* i gągoł krzykliwy *Bucephala clangula*), wśród których wyróżniają się szczątki charakterystyczne dla gęsi domowej cf. *Anser anser domesticus* (Wilczyński i in. 2021).

Interdyscyplinarne badania przyczyniły się do lepszego zrozumienia strategii związanej z pozyskiwaniem pożywienia przez ludność kultury pucharów lejkowatych w Mozgawie oraz pozwoliła na zrekonstruowanie lokalnych warunków środowiskowych i przemian środowiska wynikłych pod wpływem czynników antropogenicznych (ryc. 11).

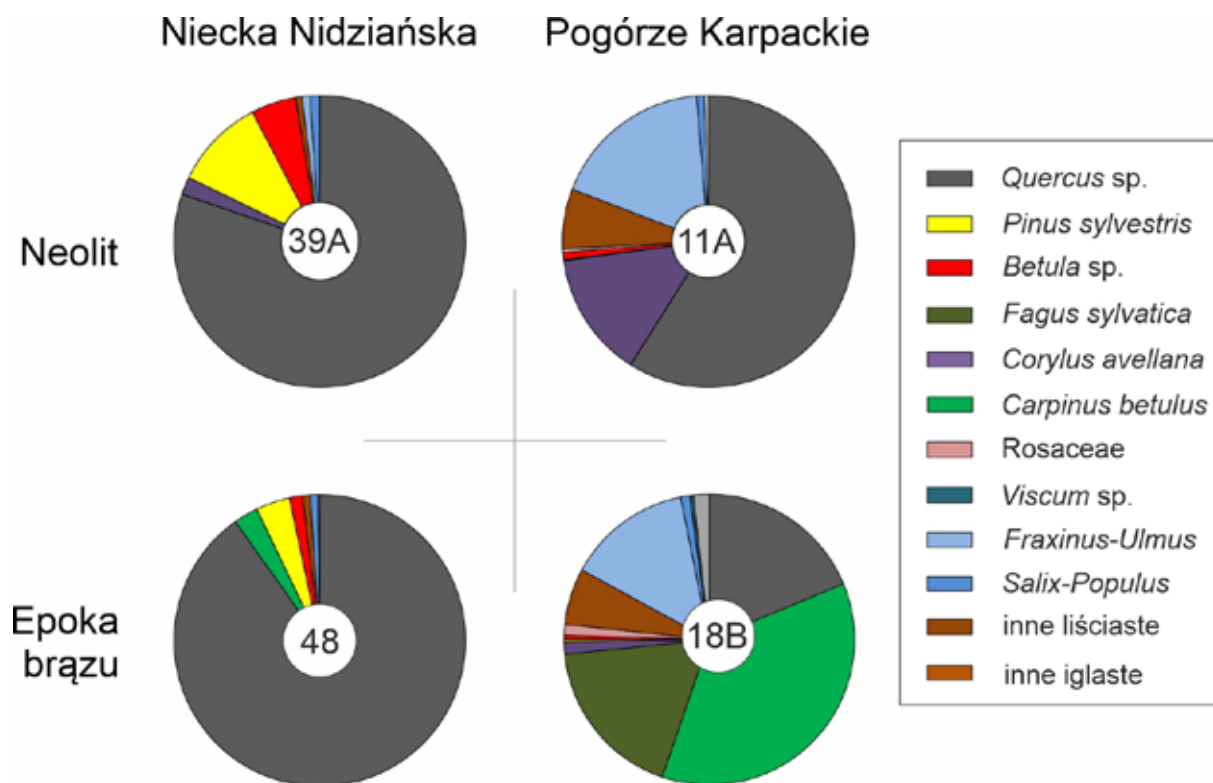
### Rekonstrukcja charakteru lasów rozwijających się na terenach lessowych południowej Polski

Przykładem wykorzystania węgla drzewnych do rekonstrukcji charakteru lasów rozwijających się w okresach atlantyckim i subborealnym (od drugiej połowy VI tysiąclecia p.n.e. do początku III tysiąclecia p.n.e.) było podsumowanie badań antrakologicznych z obszarów Małopolski na podstawie danych pochodzących z 79 stanowisk archeologicznych. Celem badań był opis charakteru drzewostanów rozwijających się na terenach o podłożu lessowym (Moskal-del Hoyo 2021). Pomimo dobrego rozpoznania na podstawie danych palinologicznych składu lasów rozwijających się w okresie atlantyckim, historia roślinności obszaru wyżyn lessowych Małopolski nie jest jednak w pełni poznana (Ralska-Jasiewiczowa 1989; Ralska-Jasiewiczowa i Latałowa 1996; Ralska-Jasiewiczowa i in. 2004). Wynika to z niewielkiej liczby zbiorników, starorzeczy lub torfowisk, w których dochodziło do akumulacji biogenicznej (Żurek 1987), stwarzających odpowiednie warunki do zachowania ziaren pyłku i spor (Moore i in. 1991; Dybova-Jachowicz i Sadowska 2003). Sytuacja ta stwarza oczywistą trudność w odtworzeniu dawnej szaty roślinnej na obszarach lessowych, które jako pierwsze były intensywnie zajmowane przez ludy neolityczne i których opisanie jest niezwykle ważne dla zrozumienia procesów osadniczych. Dodatkowo scharakteryzowanie lasów



**Ryc. 11.** Rekonstrukcja środowiska wokół osady kultury pucharów lejkowatych na podstawie interdyscyplinarnych badań archeologicznych i paleoekologicznych. Główny nacisk położony jest na obecność i znaczenie szczątków roślinnych, ale pozostałości fauny również dopełniają obraz dotyczący rolnictwa (hodowla) i pozyskiwania zwierząt ze stanu dzikiego (łowiectwo i rybołówstwo). Rys. M. Korczyńska.





**Ryc. 12.** Przykładowe wykresy prezentujące udział taksonomiczny drzew i krzewów w zespołach antrakologicznych pochodzących z dwóch regionów południowej Polski i z dwóch okresów chronologicznych. Na obszarze Niecki Nidziańskiej, zarówno w neolicie, jak i w epoce brązu, dominował dąb (*Quercus* sp.), a w epoce brązu zaznacza się pojawienie grabu (*Carpinus betulus*). Na Pogórzu Karpackim w neolicie oprócz dębu potwierdzono znaczny udział leszczyny (*Corylus avellana*), natomiast w epoce brązu grab i buk odgrywały już prawdopodobnie istotną rolę w lokalnych drzewostanach. Analiza: M. Moskal-del Hoyo; zmienione za: Moskal-del Hoyo 2021. Rys. A. Sojka

dominujących na omawianych obszarach poprzez, m.in. określenie składu taksonomicznego i stopnia zwarcia drzewostanów, może rzucić nowe światło na zrozumienie preferencji środowiskowych odpowiednich do prowadzenia działalności gospodarczej i tym samym osadniczej. Informacje te pozwalają również na zarysowanie strategii eksploatacji przez człowieka najbliższego otoczenia osad, co może wpłynąć na uzupełnienie wiedzy na temat przyrodniczych uwarunkowań pojawienia się stałego osadnictwa na obszarach lessowych. Ważnym problemem badawczym było również określenie oddziaływań społeczności na zastane zbiorowiska leśne oraz odpowiedź na pytanie, czy gospodarcza działalność pierwszych rolników wpływała w istotny sposób na lokalne środowisko. Podsumowując, celem analizy węgla drzewnych datowanych na fazę atlantycką holocenu było odtworzenie lasów rozwijających się na obszarach lessowych, zanim ważną rolę lasotwórczą uzyskały późno migrujące drzewa: buk zwyczajny, grab pospolity i jodła pospolita.

Ponieważ z tych samych stanowisk archeologicznych lub mikroregionów, z których uzyskano zespoły neolitycznych węgla drzewnych, pochodziły również młodsze zbiory tego typu szczątków, rozszerzono zakres chronologiczny prac o stanowiska archeologiczne datowane na II tysiąclecie p.n.e. Jest to okres przypadający na początek istotnych przemian w drzewostanach, jakie wystąpiły w wyniku pojawienia się wyżej wymienionych drzew (Ralska-Jasiewiczowa i in. 2004).

Na podstawie danych antrakologicznych pochodzących z obszarów lessowych południowej Polski zaobserwowano (Moskal-del Hoyo 2021), że występują różnice w uzyskanych spektrach antrakologicznych pochodzących ze wszystkich stanowisk archeologicznych pomiędzy obszarami wyżyn lessowych (wraz z Przedgórzem Karpackim) i Pogórzem Karpackim. Głównym taksonem neolitycznych zespołów węgla drzewnych z wyżyn lessowych i z Przedgórza Karpackiego był dąb, któremu towarzyszyły najczęściej szczątki sosny i brzozy.

Można to zilustrować na przykładzie danych ze stanowiska nr 3 w Miechowie (ryc. 12). Dane te sugerują, że w pasie lessowym wykształciły się przede wszystkim lasy dębowe o małym zwarcu, przypominające współczesne zbiorowiska ciepłolubnej dąbrowy świetlistej i/lub wielogatunkowe lasy liściaste zbliżone do grądów, choć zasadniczo bez grabu (z racji jego późniejszej migracji). Duży udział sosny wskazuje, że lokalnie mogły też rozwijać się bory mieszane sosnowo-dębowe. Na Pogórzu Karpackim zespoły neolitycznych węgla drzewnych charakteryzowały się dominacją dębu, ale z dużym udziałem jesionu, leszczyny (*Corylus avellana*), klonu i jabłkowych (Maloideae), co obrazują wyniki ze stanowiska nr 2 w Gwoźdźcu (ryc. 12). Dane te wskazują na rozwój wielogatunkowych lasów liściastych, w tym lasów dębowo-leszczynowych oraz zbiorowisk okrajkowych. Zwiększony udział węgla drzewnych *C. avellana* i Maloideae w późnej fazie kultury ceramiki wstęgowej rytej może sugerować wzrost udziału tych drzew i krzewów owocowych w wyniku działalności człowieka.

Obecność luźnych lasów z przewagą dębu prawdopodobnie przyczyniła się do przetrwania roślinności o charakterze stepowym. Być może w obrębie tego typu lasów istniały lokalnie płaty otwartego krajobrazu. Można założyć, że widne lasy dębowe wyróżniały się na tle innych wielogatunkowych lasów liściastych o większym zwarcu, gdyż przypominały one lasostep znany z ziem, z których się wywodzili (Magyari i in. 2010; Moskal-del Hoyo i in. 2018a). Można również postawić hipotezę, że wspomnianego typu krajobraz ze względu na podobieństwo roślinności i warunków siedliskowych związanych z podłożem lessowym i żyznymi glebami, głównie czarnoziemami, mógł być szczególnie preferowany przez pierwszych rolników. W konsekwencji uzyskanych rezultatów stara „teoria stepowa” sformułowana przez Gradmanna (1933) ponownie zaczyna być brana pod uwagę w zrozumieniu rozprzestrzeniania się najstarszego osadnictwa neolitycznego w Europie środkowej (Pokorný i in. 2015).

Uzyskane dane antrakologiczne posłużyły do wnioskowania, że lasy, w których dęby były głównymi drzewami, mogły stanowić jeden z podstawowych typów drzewostanów rozwijających się w fazie atlantyckiej na obszarach lessowych. Uważa się, że lasy dębowe fazy atlantyckiej, jak również lasy liściaste przypominające wielogatunkowe zbiorowiska w typie grądów, nie mają

bezpośredniej analogii w dzisiejszych zbiorowiskach. Podstawowym powodem jest brak występowania grabu w fazie atlantyckiej oraz nieporównywalny z czasami współczesnymi wpływ dużych roślinożerców na kształtowanie lasów (Vera 2000; Kreuz 2008; Jamrichová i in. 2012).

Głównymi taksonami zespołów węgla drzewnych uzyskanych ze stanowisk datowanych na epokę brązu z wyżyn lessowych (ryc. 12) i Przedgórza Karpackiego były nadal dąb, sosna i brzoza. Późnoholoceńscy migranci, tj. grab pospolity, buk zwyczajny i jodła pospolita, pojawiają się w materiałach z początku epoki brązu, niemniej jednak we wczesnych etapach rozprzestrzeniania się zyskują większy udział jedynie na stanowiskach karpackich, co obrazuje stanowisko w Janowicach (ryc. 12) i tych położonych na prawobrzeżu Wisły. Dane te potwierdzają południową migrację wspomnianych drzew, zaobserwowaną wcześniej na podstawie danych palinologicznych (Moskal-del Hoyo 2021).

## PODSUMOWANIE

Celem podejmowanych badań archeobotanicznych jest poznanie flory związanej z funkcjonowaniem danego typu stanowiska (np. obozowisko, osada stała i cmentarzysko) i rozpoznanie interakcji człowiek – roślina – środowisko, do której doszło w odpowiednim okresie chronologicznym. Uzyskane wyniki zależą w dużym stopniu od pozyskanego materiału roślinnego, na który z kolei ma wpływ wiele czynników, począwszy od funkcji i chronologii stanowiska, możliwego sposobu zachowania szczątków roślinnych, a skończywszy na strategii przyjętej przy pobieraniu prób archeobotanicznych. Niniejszy tekst nie wyczerpał oczywiście zagadnień związanych z analizami archeobotanicznymi i pominął wiele aspektów badań, zwłaszcza opartych na nowoczesnych technikach (np. badania skrobi, fitolitów, śladów po gotowanym, pieczonym lub fermentowanym jedzeniu oraz wykorzystywanie analiz izotopowych czy molekularnych). Praca ta miała na celu przede wszystkim zwrócić uwagę na ogromne zróżnicowanie materiałów roślinnych, które można spotkać na różnych typach stanowisk archeologicznych i które najczęściej nie są widoczne „gołym okiem”. Dopiero ich badania mikroskopowe odkrywają nowe obszary uzupełniające wiedzę na temat gospodarki i środowiska w przeszłości.

## LITERATURA

- Antolin, F., Steiner, B.L., Jacomet, S. 2017. The bigger the better? On sample volume and the representativeness of archaeobotanical data in waterlogged deposits. *Journal of Archaeological Science: Reports* 12: 323–333.
- Asouti, E., Austin, P. 2005. Reconstructing Woodland Vegetation and its Exploitation by Past Societies, based on the Analysis and Interpretation of Archaeological Wood Charcoal Macro-Remains. *Environmental Archaeology* 10: 1–18.
- Asouti, E., Baird, D., Kabukcu, C., Swinson, K., Martin, L., García-Suárez, A., Jenkins, E., Rasheed, K. 2020. *The Zagros Epipalaeolithic revisited: new excavations and 14C dates from Palegawra cave in Iraqi Kurdistan*. *PLoS One* 15(9): 1–99.
- Asouti, E., Ntinou, M., Kabukcu, C. 2018. *The impact of environmental change on Palaeolithic and Mesolithic plant use and the transition to agriculture at Franchthi Cave, Greece*. *PLoS One* 13(11): 1–38.
- Ayerdi, M., Echazarreta-Gallego, M., de Francisco-Rodriguez, F., Hernández, H. H., Sarasketa-Gartzia, I. 2016. Acorn cake during the Holocene: experimental reconstruction of its preparation in the western Pyrenees, Iberia. *Vegetation History and Archaeobotany* 25: 443–457.
- Badal García, E. 1992. Lanthracologie préhistorique: à propos de certains problèmes méthodologiques. *Bulletin de la Société Botanique de France. Actualités Botaniques* 139: 167–189.
- Badal, E., Bernabeu, J., Vernet, J.L. 1994. Vegetation changes and human action from the Neolithic to the Bronze Age (7000–4000 B.P.) in Alicante, Spain, based on charcoal analysis. *Vegetation History and Archaeobotany* 3(3): 155–166.
- Badura, M. 2000. Środowisko przyrodnicze i użytkowanie roślin – badania archeobotaniczne średniowiecznego Kołobrzegu, (w:) L. Leciejewicz, M. Rębkowski (red.), *Salsa Cholbergiensis. Kołobrzeg w średniowieczu*. Kołobrzeg, 197–204.
- Badura, M. 2011. *Rośliny użytkowe w historycznym Gdańsku – studium archeobotaniczne*. Gdańsk.
- Badura, M. 2016. Materiał roślinny, (w:) B. Wywrot-Wyszkowska, M. Dworaczyk, M. Rębkowski (red.), *Archeologia średniowiecznego Kołobrzegu* 6. Kołobrzeg, 257–267.
- Badura, M., Latałowa, M., Jarosińska, J., Święta, J. 2004. Rośliny użytkowe w średniowiecznych i nowożytnych materiałach archeobotanicznych z miast północnej Polski (Kołobrzeg, Gdańsk, Elbląg), (w:) R. Czaja, G. Nawrońska, M. Rębkowski, J. Tandecki (red.), *Archeologia et Historia Urbana*. Elbląg, 277–286.
- Badura, M., Noryśkiewicz, A. M. 2020. Wyspy jeziorne jako element wczesnośredniowiecznej struktury osadniczej w świetle danych archeobotanicznych, (w:) W. Chudziak, R. Kaźmierczak (red.), *Człowiek na Pograniczu. Na peryferiach Civitas Schinesghe*. T I: 2. Ziemia Lubuska. Toruń, 107–143.
- Beal, F.C., Blankenhorn, P.R., Moore, G.R. 1974. Carbonized Wood – Physical Properties and Use as An SEM Preparation. *Wood Science* 6: 212–219.
- Behre, K.-E. 2008. Collected seeds and fruits from herbs as prehistoric food. *Vegetation History and Archaeobotany* 17: 65–73.
- Bernabeu, J., Badal, E. 1992. A view of the vegetation and economic exploitation of the forest in the Late Neolithic site of Les Jovades and Niuët (Alicante, Spain). *Bulletin de la Société botanique de France* 139: *Actualités Botaniques* (2/3/4): 697–714.
- Bielenin, K. 1993. *Starożytne górnictwo i hutnictwo żelaza w Górach Świętokrzyskich*. Kielce.
- Bieniek, A. 2003. Trawy o małych ziarniakach z wczesnoneolitycznych stanowisk na Kujawach, (w:) E. Zastwiniak (red.), *Paleobotanika na przełomie wieków*. *Botanical Guidebooks* 26, 249–266.
- Bieniek, A. 2005. „Nowy” typ pszenicy oplewionej w materiałach archeobotanicznych, (w:) K. Wasylkowa, M. Lityńska-Zajac, A. Bieniek (red.), *Roslinne ślady człowieka*. *Botanical Guidebooks* 28, 265–280.
- Bieniek, A. 2007. Neolithic plant husbandry in the Kujawy region of central Poland, (w:) S. Colledge, J. Conolly (red.), *The Origins and Spread of Domestic Plants in Southwest Asia and Europe*. Routledge, 327–342.
- Bieniek, A., Lityńska-Zajac, M. 2001. New finds of *Malus sylvestris* Mill. (wild apple) from Neolithic sites in Poland. *Vegetation History and Archaeobotany* 10: 105–106.
- Bogaard, A. 2004. *Neolithic Farming in Central Europe*. London.
- Bogaard, A., Jones, G., Charles, M., Hodgson, J.G. 2001. On the archaeobotanical inference of crop sowing time using the FIBS method. *Journal of Archaeological Science* 28: 1171–1183.
- Burchardówna, H. 1953. Rośliny uprawne w pradziejach Polski. *Przegląd Archeologiczny* 11(2/3): 153–176.
- Cappers, R.T.J., Bekker, R.M., Jans, J.E.A., 2006. *Digital Seed Atlas of the Netherlands*. Groningen Archaeological Studies. Barkhuis.
- Cappers, R.T.J., Neef, R., 2012. *Handbook of plant paleoecology*. Groningen.
- Cappers, R.T.J., Neef, R., Bekker, R.M., 2009. *Digital Atlas of Economic Plants*. parts 1, 2a, 2b. Groningen Archaeological Studies. Barkhuis.
- Ceynowa-Gieldon, M. 2001. *Stipa joannis Čelek*. Ostnica Jana, (w:) R. Kaźmierczakowa, K. Zarzycki, (red.), *Polska czerwona księga roślin. Paprotniki i rośliny kwiatowe*. Kraków, 461–463.
- Carrión Marco, Y. 2005. *La vegetación mediterránea y atlántica de la Península Ibérica. Nuevas secuencias antracológicas*, S.I.P. Serie de Trabajos Varios, 104. Valencia.
- Chabal, L. 1988. Pourquoi et comment prélever les charbons de bois pour la période antique, les méthodes utilisées sur le site de Lattes (Hérault). *Lattara* 1, 187–222.



- Chabal, L. 1990. l'étude paléocéologique de sites protohistoriques à partir de charbons de bois: la question de l'unité de mesure. Dénombrements de fragments ou pesées?, (w:) T. Hackens, A.V. Munaut, Cl. Till (red.), *Wood and Archaeology. First European Conference, Louvain-la-Neuve, October 2nd-3rd 1987. Pact* 22: III.5, 189–205.
- Chabal, L. 1997. *Forêts et sociétés en Languedoc (Néolithique final, Antiquité tardive). L'anthracologie, méthode et paléocéologie*. Documents d'Archéologie Française 63. Paris.
- Chabal, L., Fabre L., Terral, J.-F., Théry-Pariset, I. 1999. L'Anthracologie, (w:) A. Ferdière, Ch. Bourquin-Mignot, J.-E. Brochier, L. Chabal, S. Crozat, L. Fabre, J.-F. Terral, I. Théry-Pariset (red.), *La Botanique*. Collection "Archéologiques". Paris, 43–104.
- Colledge, S., Conolly, J. 2014. Wild plant use in European Neolithic subsistence economies: a formal assessment of preservation bias in archaeobotanical assemblages and the implications for understanding changes in plant diet breadth. *Quaternary Sciences Reviews* 101: 193–206.
- Coward, F., Shennan, S., Colledge, S., Conolly, J., Collard, M. 2008. The spread of Neolithic plant economies from the Near East to northwest Europe: a phylogenetic analysis. *Journal of Archaeological Science* 35: 42–56.
- Cywa, K. 2018a. Trees and shrubs used in medieval Poland for making everyday objects. *Vegetation History and Archaeobotany* 27(1): 111–136.
- Cywa, K. 2018b. *Uwarunkowania doboru surowca drzewnego w polskich grodach i ośrodkach wczesnomiejskich w średniowieczu – analiza ksylologiczna przedmiotów użytkowych*. Rozprawa doktorska. Instytut Botaniki im. W. Szafera PAN, Kraków.
- Cywa, K., Wacnik, A. 2020. First representative xylological data on the exploitation of wood by early medieval woodcrafters in the Polesia region, southwestern Belarus. *Journal of Archaeological Science: Reports* 30: 102252.
- Cywa K., Wacnik, A., Lityńska-Zajac, M. 2018. Factors of selection and quality of wood used for woodcraft in medieval Polish strongholds and early urban centres. *Acta Palaeobotanica* 58(2): 231–287.
- Czajkowska, B.I., Bogaard, A., Charles, M., Jones, G., Kohler-Schneider, M., Mueller-Bieniek, A., Brown, T.A. 2020. Ancient DNA typing indicates that the "new" glume wheat of early Eurasian agriculture is a cultivated member of the *Triticum timopheevii* group. *Journal of Archaeological Science* 123: 105258.
- Czekaj-Zastawny, A. 2017. The first farmers from the south – Linear Pottery culture, (w:) P. Urbańczyk (red.), *The past societies. Polish lands from the first evidence of human presence to the Early Middle Ages 2: 5500-2000 BC*. Warsaw.
- Czekaj-Zastawny, A., Rauba-Bukowska, A., Kukułka, A. (red.) 2021. *Najstarsza osada kultury ceramiki wstęgowej rytej z terenu Polski. Gwoździec stan. 2, gm. Zakliczyn* [The earliest settlement of the Linear Pottery Culture from the territory of Poland. Gwoździec site 2, com. Zakliczyn]. Kraków.
- Czekaj-Zastawny, A., Rauba-Bukowska, A., Kukułka, A., Kufel-Diakowska, B., Lityńska-Zajac, M., Moskal-del Hoyo, M., Wilczyński, J. 2020. The earliest farming communities north of the Carpathians: The settlement at Gwoździec site 2. *PLoS One* 5(1): e0227008.
- Dembińska, M. 1967. Udział zbieractwa w średniowiecznej konsumpcji zbożowej. *Studia z Dziejów Gospodarstwa Wiejskiego* 9: 83–104.
- Dunne, J., Jórdeczka, M., Chłodnicki, M., Hardy, K., Kubiak-Martens, L., Moskal-del Hoyo, M., Osypińska, M., Portillo, M., Sobkowiak-Tabaka, I., Delgado-Raack, S., Bobrowski, P., Breeze, P.S., Drake, N., Manning, K., Evershed, R.P. 2021. Holocene resource exploitation along the Nile: diet and subsistence strategies of Mesolithic and Neolithic societies at Khor Shambat 1, Sudan. *Antiquity* 95(384): 1426–1445.
- Dybova-Jachowicz, S., Sadowska, A. 2003. *Palinologia*. Kraków.
- Dzieduszycki, W. 1976. Wykorzystywanie surowca drzewnego we wczesnośredniowiecznej i średniowiecznej Kruszwicy. *Kwartalnik Historii Kultury Materialnej* 24(1): 35–54.
- Figueiral, I. 1992. Méthodes en anthracologie: étude des sites du Bronze final et de l'âge du Fer du nord-ouest du Portugal. *Bulletin de la Société botanique de France, Actualités Botaniques* 139: 191–204.
- Filipović, D., Meadows, J., Corso, M.D., Kirleis, W., Alsleben, A., Akeret, Ö., Bittmann, F., Bosi, G., Ciută, B., Dreslerová, D., Effenberger, H., Gyulai, F., Heiss, A.G., Hellmund, M., Jahns, S., Jakobsch, T., Kapcia, M., Kloß, S., Kohler-Schneider, M., Kroll, H., Makarowicz, P., Marinova, E., Märkle, T., Medović, A., Mercuri, A.M., Mueller-Bieniek, A., Nisbet, R., Pashkevich, G., Perego, R., Pokorný, P., Pospieszny, Ł., Przybyła, M., Reed, K., Rennwanz, J., Stika, H.-P., Stobbe, A., Tolar, T., Wasylukowa, K., Wiethold, J., Zerl, T. 2020. New AMS <sup>14</sup>C dates track the arrival and spread of broom-corn millet cultivation and agricultural change in prehistoric Europe. *Scientific Reports* 10: 13698.
- Gale, R., Cutler, D. 2000. *Plants in archaeology: identification manual of vegetative plant materials used in Europe and the Southern Mediterranean to c.1500*. Kew.
- Gizbert, W. 1960. Studium porównawcze nad ziarnami żyta kopalnego (neolit, późny okres rzymski i wczesne średniowiecze). *Archeologia Polski* 5: 81–90.
- Gizbert, W., Żaki, A. 1954. Odkrycie rośliny „Sorgo” w warstwie wczesnośredniowiecznej w Krakowie na Wawelu. *Wiadomości Archeologiczne* 20(4): 397–497.
- Gluza, I. 1977. Remains of the Genus *Bromus* from a Neolithic Site in Krakow. *Acta Palaeobotanica* 18(2): 17–34.
- Gluza, I. 1984. Neolithic cereals and weeds from the locality of the Lengyel Culture at Nowa Huta-Mogiła near Cracow. *Acta Palaeobotanica* 23(2): 123–184.
- Gluza, I., Tomczyńska, Z., Wasylukowa, K. 1988. Uwagi o użytkowaniu drewna w neolicie na podstawie analizy węgli

- drzewnych ze stanowisk archeologicznych w Krakowie-Nowej Hucie. *Materiały Archeologiczne Nowej Huty* 12: 7–25.
- Gradmann, R. 1933. Die Steppenheidetheorie. *Geographische Zeitschrift* 39(5): 265–278.
- Greguss, P. 1955. Xylotomische Bestimmung der heute lebenden Gymnospermen. *Académiai Kiadó*, Budapest.
- Greguss, P. 1959. Holtzanatomie der europäischen Lauhölzer und stauncher. Budapest.
- Harkness, D.D. 1975. The Role of the Archaeologist in C-14 Age Measurement, (w:) T. Watkins (red.), *Radiocarbon: Calibration and Prehistory*. Edinburgh, 128–135.
- Helbæk, H. 1959. Die Paläoethnobotanik des Nehen Ostens und Europas. *Opuscula Ethnological Memoriae Ludovici Biro Sacra*. Budapest, 265–289.
- Hillman, G.C., Hedges, R., Moore, A., Colledge, S., Pettitt, P. 2001. New evidence of Late Glacial cereal cultivation at Abu Hureyra on the Euphrates. *The Holocene* 11(4): 383–393.
- Heinz C., Thiébaud, S. 1998. Characterization and palaeoecological significance of archaeological assemblages during Late and Post-Glacial phases in Southern France. *Quaternary Research* 50: 56–68.
- Jacomet, S. 2006. *Identification of cereal remains from archaeological sites*. Basel University.
- Jacomet, S., Schlichtherle, H. 1984. Der kleine Pfahlbauweizen Oswald Heer's – Neue Untersuchungen zur Morphologie neolithischer Nacktweizen-Ähren, (w:) W. van Zeist i W.A. Casparie (red.), *Plants and Ancient Man. Proceedings of the sixth symposium of the international work group for palaeoethnobotany 1983 in Groningen*. Rotterdam, 153–176.
- Jamrichová, E., Szabó P., Hédl, R., Kunes, P., Bobek, P., Pelánková, B. 2012. Continuity and change in the vegetation of a Central European oakwood. *The Holocene* 23: 46–56.
- Jaroń, B. 1938. Szczątki roślinne z wczesnego okresu żelaznego w Biskupinie, Wielkopolska, (w:) J. Kostrzewski (red.), *Gród prasłowiański w Biskupinie w pow. żnińskim. Sprawozdanie z badań w latach 1936 i 1937 z uwzględnieniem wyników z lat 1934–1935*. Poznań, 104–132.
- Jaroń, B. 1939. Średniowieczne szczątki roślinne z wykopalisk w Gnieźnie, (w:) J. Kostrzewski (red.), *Gniezno w zarysie dziejów (od VIII do XIII wieku) w świetle wykopalisk*. Biblioteka Prehistoryczna 4: 273–316.
- Jarosińska, J. 2004. Szczątki roślin dziko rosnących w materiałach archeobotanicznych z Elbląga jako źródło wiedzy na temat warunków przyrodniczych i działań gospodarczych w okresie od XIII do XIV wieku, (w:) R. Czała, G. Nawrońska, M. Rębkowski, J. Tandecki (red.), *Archeologia et Historia Urbana*. Elbląg, 295–303.
- Jarosińska, M., Nowak, S., Noryśkiewicz, A.M., Badura, M. 2019. Plant Identification and Significance in Funeral Traditions Exemplified by Pillow Filling from a Child Crypt Burial in Byszewo (18th/19th centuries). *Analecta Archaeologica Ressoviensia* 14: 187–196.
- Jedliczka, A. 1965. Wczesnośredniowieczne szczątki roślinne z wykopalisk na placu Wita Stwosza w Krakowie. *Materiały Archeologiczne* 6: 181–182.
- Jones, G.E.M. 1991. Numerical analysis in archaeobotany, (w:) W. van Zeist, K. Wasylikowa, K.-E. Behre, *Progress of the Old World Palaeoethnobotany*. Rotterdam, 63–80.
- Jones, G., Bogaard, A., Charles, M., Hodgson, J.G. 2000. Distinguishing the effects of agricultural practices relating to fertility and disturbance: a functional ecological approach in archaeobotany. *Journal of Archaeological Science* 27: 1073–1084.
- Kabukcu, C. 2018. *Wood charcoal analysis in archaeology*, (w:) E. Pişkin, A. Marciniak, M. Bartkowiak (red.), *Environmental Archaeology. Current Theoretical and Methodological Approaches. Interdisciplinary Contributions to Archaeology*. Davis, 133–154.
- Kabukcu, C., Chabal, L. 2021. *Sampling and quantitative analysis methods in anthracology from archaeological contexts: Achievements and prospects*. *Quaternary International* 593–594: 6–18.
- Kaczanowski, P., Kozłowski, J.K. 1998. *Najdawniejsze dzieje ziem polskich (do VII w.)*. Wielka Historia Polski, tom I. Kraków.
- Kadrow, S. 2005. Próbkowanie i zagadnienie badań reprezentatywnych w archeobotanice, (w:) M. Lityńska-Zajac, K. Wasylikowa (red.), *Przewodnik do badań archeobotanicznych*. *Vademecum Geobotanicum*. Poznań, 159–166.
- Kadrow, S., Lityńska-Zajac, M. 1994. Analiza materiałów roślinnych ze stanowisk z wczesnej epoki brązu w Iwanowicach, (w:) K. Wasylikowa (red.), *Warsztaty Archeobotaniczne*. Igołomia. Polish Botanical Studies. Guidebook Series 11, 31–54.
- Kapcia, M., Mueller-Bieniek, A. 2019. An insight into Bronze Age subsistence strategy in forested Carpathian foothills, based on plant macro-remains. *Archaeological and Anthropological Sciences* 11: 2879–2895.
- Klichowska, M. 1953. Szczątki roślinne z Gieczy z badań wykopaliskowych w roku 1951. *Z Otchłani Wieków* 22(3): 102–103.
- Klichowska, M. 1956. Szczątki roślinne odkryte na Wawelu w 1954. *Sprawozdania Archeologiczne* 2: 108–111.
- Klichowska, M. 1961. Wczesnośredniowieczne szczątki roślinne odkryte w Wolinie na stanowisku wykopaliskowym 4 w latach 1953–1955. *Materiały Zachodniopomorskie* 7: 457–461.
- Klichowska, M. 1975. *Najstarsze zboża z wykopalisk polskich*. *Archeologia Polski* 20 (1): 83–143.
- Korczyńska, M., Cappenberg, K., Nowak, M., Szwarczewski, P., Moskal-del Hoyo, M. 2019. Multi-methodological approaches to investigate large archaeological sites: The case study of the Eneolithic settlement in Mozgawa,

- western Lesser Poland. *Journal of Archaeological Science: Reports* 27: 101941.
- Koszałka, J. 2000. Makroskopowe znaleziska roślinne z wczesnośredniowiecznych warstw kulturowych i osadów jeziornych w Gnieźnie – rdzeń Gn 22/XIII i Sw 3/91. *Studia Lednickie* 6: 389–416.
- Koszałka, J. 2005a. Badania archeobotaniczne zespołu grodowego na Ostrowie Tumskim w Poznaniu – historia i najnowsze wyniki, (w:) K. Wasylikowa, M. Lityńska-Zajac, A. Bieniek (red.), *Roślinne ślady człowieka*. Kraków, 173–194.
- Koszałka, J. 2005b. Depozyt prosa ze stanowiska Ostrów Tumski 9/10 w Poznaniu. *Poznań we wczesnym średniowieczu* 5. Poznań, 83–90.
- Koszałka, J. 2008. Between stronghold and village. Studies on plant economy of the Early Medieval Poznań, (w:) L. Polaček (red.), *Das wirtschaftliche Hinterland der frühmittelalterlichen Zentren*. Praha, 127–137.
- Kot, M., Krajcarz, M.T., Moskal-del Hoyo, M., Gryczewska, N., Wojenka, M., Pyżewicz, K., Sinet-Mathiot, V., Diakowski, M., Fedorowicz, S., Gąsiorowski, M., Marciszak, A., Lipecki, G., Mackiewicz, G. 2021. Chronostratigraphy of Jerzmanowician. New data from Kozłarnia Cave, Poland. *Journal of Archaeological Science: Reports* 38: 103014.
- Kozłowska, A. 1921. O zbożach kopalnych z okresu neolitu w Polsce. *Rozprawy Wydziału Matematyczno-Przyrodniczego Polskiej Akademii Umiejętności (Seria III. Dział B)* 20: 1–20.
- Kreuz, A. 2008. Closed forest or open woodland as natural vegetation in the surroundings of Linearbandkeramik settlements?. *Vegetation History and Archaeobotany* 17: 51–64.
- Kreuz, A., Schäfer, E. 2002. A New Archaeobotanical Database Program. *Vegetation History and Archaeobotany* 11(1-2): 177–80.
- Kruk, J. 1980. *Gospodarka w Polsce południowo-wschodniej w V-III tysiącleciu p.n.e.* Wrocław.
- Kruk, J., Lityńska-Zajac, M., Milisauskas, S. 2016. *Gospodarka roślinna w neolicie. Studium przypadku. (Neolithic plant cultivation at Bronocice)*. Kraków.
- Krukowski, S. 1939–1948. Paleolit, (w:) *Prehistoria ziem polskich*. Encyklopedia Polska PAU (cz. IV). Kraków.
- Krzysik, K. 1957. *Nauka o drewnie*. Warszawa.
- Kulpa, W. 1974. *Nasionoznawstwo chwastów*. Warszawa.
- Kubiak-Martens, L. 1996. Evidence for possible use of plant foods in Palaeolithic and Mesolithic diet from the site of Całowanie in the central part of the Polish Plain. *Vegetation History and Archaeobotany* 5: 33–38.
- Kubiak-Martens, L. 1999. The plant food component of the diet at the Late Mesolithic (Ertebølle) settlement at Tybrind Vig, Denmark. *Vegetation History and Archaeobotany* 8: 117–127.
- Latałowa, M. 1999. Palaeoecological reconstruction of environmental conditions and economy in early medieval Wolin. *Acta Palaeobotanica* 39: 183–271.
- Latałowa, M., Badura, M., Jarosińska, J. 2003. Archaeobotanical samples from non-specific urban contexts as a tool for reconstructing environmental conditions (examples from Elbląg and Kołobrzeg, northern Poland). *Vegetation History and Archaeobotany* 12: 93–104.
- Librado, P., Khan, N., Fages A. i in. 2021. The origins and spread of domestic horses from the Western Eurasia steppes. *Nature* 598: 634–640.
- Lityńska, M. 1986. Nowe znalezisko owoców dzikiej jabłoni *Malus sylvestris* (L.) Mill. z neolitu Polski. *Sprawozdania Archeologiczne* 38: 49–55.
- Lityńska-Zajac, M. 1990. Zboża i chwasty z neolitycznego stanowiska Iwanowice-Klin, woj. Kraków (Cereals and weeds from the Neolithic site of Iwanowice-Klin, voiv. Kraków). *Sprawozdania Archeologiczne* 42: 105–109.
- Lityńska-Zajac, M. 1994. Problem datowania szczątków roślinnych ze stanowisk archeologicznych, (w:) K. Wasylikowa (red.), *Archaeological Workshop*. Igołomia 1990-1993. Polish Botanical Studies. Guidebook Series. 11, 169–174.
- Lityńska-Zajac, M. 1997a. Środowisko i uprawa roślin w czasach pra- i wczesnohistorycznych, (w:) K. Tunia (red.), *Z archeologii Małopolski. Historia i stan badań zachodniomałopolskiej wyżyny lessowej*. Kraków, 459–482.
- Lityńska-Zajac, M. 1997b. Roślinność i gospodarka rolna w okresie rzymskim. Studium archeobotaniczne (Vegetation and agriculture in the Roman Iron Age. An archaeobotanical study). Kraków.
- Lityńska-Zajac, M. 1998. Węgle drzewne z wczesnośredniowiecznych wałów podgrodzi w Stradowie, gm. Czarnocin. *Sprawozdania Archeologiczne* 50: 271–275.
- Lityńska-Zajac, M. 2004. Drewno i węgle drzewne z cmentarzyska kultury łużyckiej w Opatowie, pow. Kłobuck, woj. Śląskie. *Sprawozdania Archeologiczne* 56: 459–464.
- Lityńska-Zajac, M. 2005. *Chwasty w uprawach roślinnych w pradziejach i wczesnym średniowieczu*. Kraków.
- Lityńska-Zajac, M. 2007. Early Neolithic agriculture in south Poland as reconstructed from archaeobotanical plant remains, (w:) S. Colledge, J. Conolly (red.), *The Origins and Spread of Domestic Plants in Southwest Asia and Europe*. Walnut Creek, 315–326.
- Lityńska-Zajac, M. 2008. Usable wild plants in the archaeological record from Poland: selected examples, (w:) Z. Sulgostowska, J. Tomaszewski (red.), *Man – Millennia – Environment. Studies in honour of Romuald Schild*. Warszawa, 107–112.
- Lityńska-Zajac, M. 2018a. Badania botaniczne nad przeszłością – źródła roślinne. *Kwartalnik Historii Kultury Materialnej* 66(2): 189–198.
- Lityńska-Zajac, M. 2018b. A Man and a Plant: Archaeobotany, (w:) E. Piskin, A. Marciniak, M. Bartkowiak (red.),



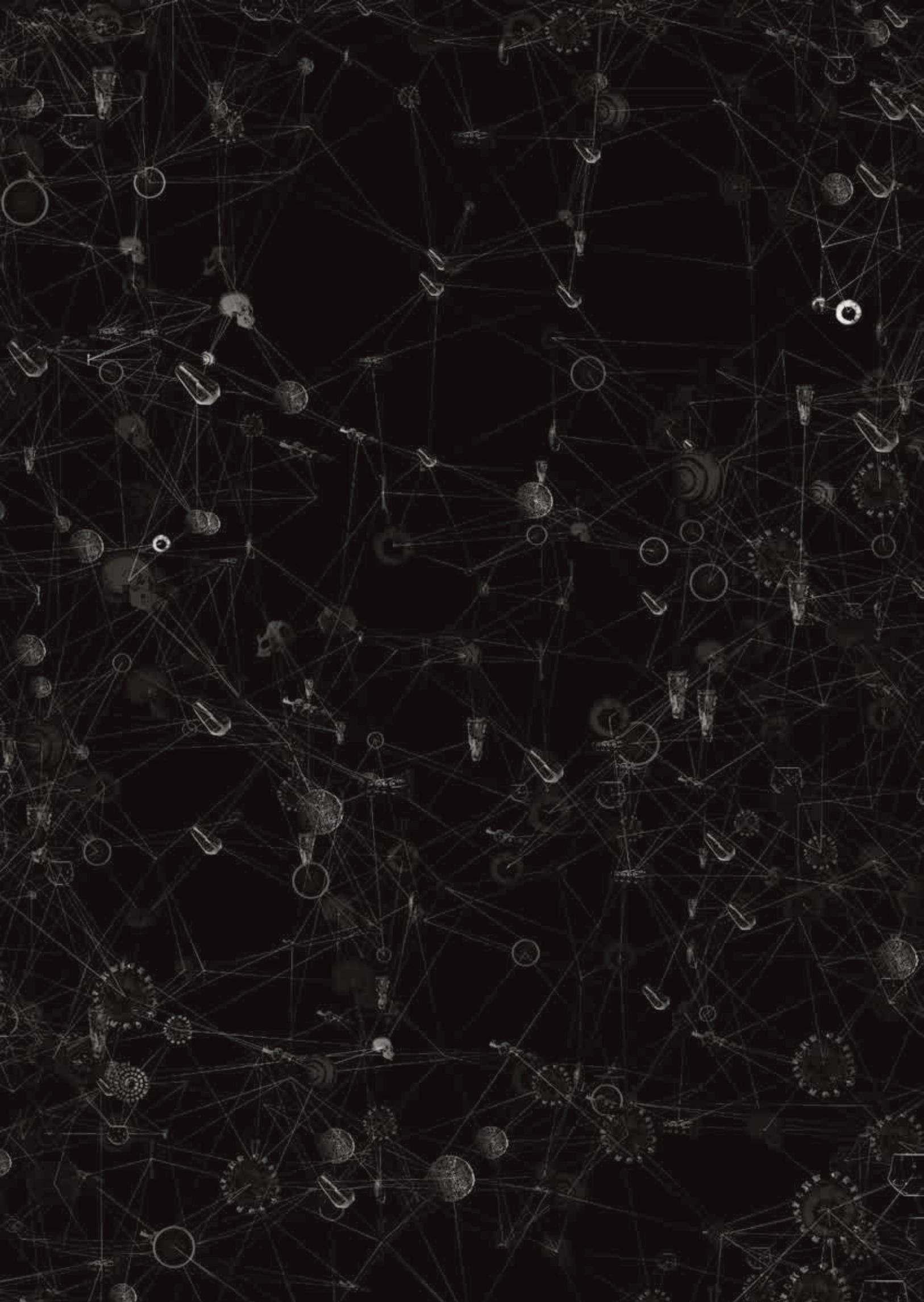
- Environmental Archaeology: Current Theoretical and Methodological Approaches. Interdisciplinary Contributions to Archaeology*. Davis, 75–110.
- Lityńska-Zajac, M. 2015. Die Holzkohle vom Gräberfeld der Przeworsk-Kultur von Opatów, Fpl. 1, (w:) R. Madyda-Legutko, J. Rodzińska-Nowak, J. Andrzejowski (red.), *Opatów Fpl. 1. Ein Gräberfeld der Przeworsk-Kultur im nordwestlichen Klempolen. Naturwissenschaftliche Analysen*. Monumenta Archaeologica Barbarica XV(4), 107–115.
- Lityńska-Zajac, M., Czekaj-Zastawny, A. 2021. Utilisation of plant materials in houses of the Linear Pottery Culture. A case study of Brzezine. *Journal of Archaeological Science: Reports* 35: 102710.
- Lityńska-Zajac, M., Czekaj-Zastawny, A., Rauba-Bukowska, A. 2017. Utilisation of cultivated and wild plants in the economy of the Linear Pottery culture in the Upper Vistula Basin. *Sprawozdania Archeologiczne* 69: 271–296.
- Lityńska-Zajac, M., Moskal-del Hoyo, M. 2021. *Szczątki roślinne*, (w:) A. Czekaj-Zastawny, A. Rauba-Bukowska, A. Kukułka A. (red.), *Najstarsza osada kultury ceramiki wstęgowej rytej z terenu Polski. Gwoździec stan. 2, gm. Zakliczyn* [The earliest settlement of the Linear Pottery Culture from the territory of Poland. Gwoździec site 2, com. Zakliczyn]. Warszawa.
- Lityńska-Zajac, M., Moskal-del Hoyo, M., Cywa, K. 2014a. Plant remains found in archaeological sites in the Carpathian Foothills – preliminary report (w:) T.L. Kienlin, P. Valde-Nowak, M. Korczyńska, K. Cappenberg, J. Ociepka (red.), *Settlement, Communication and Exchange around the Western Carpathians*. International Workshop at the Institute of Archaeology, Jagiellonian University in Kraków, October 27–28, 2012. Oxford, 207–221.
- Lityńska-Zajac, M., Makowicz-Paliszot, D. 2019. *Gospodarka rolno-hodowlana ludności kultury trzcinieckiej na podstawie źródeł przyrodniczych ze stanowiska G w Słonowicach, gm. Kazimierza Wielka*. Kraków.
- Lityńska-Zajac, M., Moskal-del Hoyo, M., Nowak, M. 2008. Plant Remains from Early Neolithic Settlement at Moravany (Eastern Slovakia). *Vegetation History and Archaeobotany* 17, Supplement 1: 81–92.
- Lityńska-Zajac, M., Wasylukowa, K. 2005. *Przewodnik do badań archeobotanicznych*. Vademecum Geobotanicum. Poznań.
- Lityńska-Zajac, M., Wasylukowa, K., Cywa, K., Madeyska, E., Tomczyńska, Z. 2014b. Badania archeobotaniczne na stanowiskach 10, 11 i 12 w Targowisku, pow. wielicki. Osady i cmentarzysko kultury łużyckiej, (w:) J. Górski (red.), *Kompleks osadniczy kultury łużyckiej w Targowisku, stan. 10-12, pow. wielicki*. Via Archaeologica, Źródła z badań wykopaliskowych na trasie autostrady A4 w Małopolsce. Kraków, 243–276.
- Lityńska-Zajac, M., Wasylukowa, K., Cywa, K., Tomczyńska, Z., Madeyska, M., Koziarska, A., Skawińska-Wieser, K. 2014c. Brzezine, stan. 17, gm. Kłaj. Materiały archeobotaniczne z obiektów kultury ceramiki wstęgowej rytej, (w:) A. Czekaj-Zastawny (red.), *Brzezine 17. Osada kultury ceramiki wstęgowej rytej*. Via Archaeologica. Źródła z badań wykopaliskowych na trasie autostrady A4 w Małopolsce. Kraków, 405–436.
- Ludemann, T. 2010. Past fuel wood exploitation and natural forest vegetation in the Black Forest, the Vosges and neighbouring regions in western Central Europe. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 291(1/2): 154–165.
- Łuczaj, Ł. 2004. *Dzikie rośliny jadalne Polski*. Przewodnik survivalowy. Krosno.
- Maciejewska, K., Miśkowicz, I., Pińska, K., Święta-Musznicka, J., Badura, M. 2020. Przekształcenia lokalnego środowiska przyrodniczego i użytkowanie roślin w późnośredniowiecznym Pucku. *Pomorania Antiqua* 29: 127–154.
- Magyari, E.K., Chapman, J.C., Passmore, D.G., Allen, J.R.M., Huntley, J.P., Huntley, B. 2010. Holocene persistence of wooded steppe in the Great Hungarian Plain. *Journal of Biogeography* 37: 915–935.
- Makohonienko, M., Kara, M., Koszałka, J. 2011. Przyrodnicza historia Gniezna – plemiennego ośrodka kultu i centrum wczesnopiastowskiego państwa polskiego Civitas Schinesge. *Landform Analysis* 16: 39–45.
- Matuszkiewicz, W. 2005. *Zespoły leśne Polski*. Warszawa.
- Matuszkiewicz, J.M. 2008. *Potencjalna roślinność naturalna Polski*. Warszawa.
- Matuszkiewicz, W. 2001. *Przewodnik do oznaczania zbiorowisk roślinnych Polski*, (w:) J.B. Faliński (red. ser.), *Vademecum Geobotanicum* 3. Warszawa.
- Medwecka-Kornaś, A., Kornaś, J., Pawłowski, B., Zarzycki, K. 1972. Przegląd ważniejszych zespołów roślinnych Polski, (w:) W. Szafer, K. Zarzycki (red.), *Szata roślinna Polski*, t. 1. Warszawa, 279–382.
- Miler, A.T., Czerniak, A., Mucha, K. 2009. Profesor Julian Rafalski (1879-1949) twórca największej krajowej ksyloteki. *Studia i Materiały Ośrodka Kultury Leśnej* 8: 59–68.
- Milisauskas, S., Kruk, J. 1989. Economy, Migration, Settlement Organization, and Warfare During the Late Neolithic in Southeastern Poland. *Germania* 67(1), 77–96.
- Mirek, Z., Piękoś-Mirek, H., Zajac, A., Zajac, M. 2002. *Flowering plants and pteridophytes of Poland. A checklist*, (w:) Z. Mirek (red. ser.), *Biodiversity of Poland* 1. Kraków.
- Mnich, B., Mueller-Bieniek, A., Nowak, M., Wilczyński, J., Popuła, S., Szostek, K. 2020. Terrestrial diet in prehistoric human groups from southern Poland based on human, faunal and botanical stable isotope evidence. *Journal of Archaeological Science: Reports* 32: 102382.
- Molski, B. 1968. Gatunki drewna używane w średniowiecznym Szczecinie do wyrobu przedmiotów codziennego użytku. *Archeologia Polski* 13(2), 491–502.
- Moore, P.D., Webb, J.A., Collinson, M.E. 1991. *Pollen Analysis*. Oxford, London.

- Moskal-del Hoyo, M. 2012. The use of wood in funerary pyres: random gathering or special selection of species? Case study of three necropolises from Poland. *Journal of Archaeological Science* 39(11): 3386–3395.
- Moskal-del Hoyo, M. 2013. Mid-Holocene forests from Eastern Hungary: new anthracological data. *Review of Palaeobotany and Palynology*: 193, 71–80.
- Moskal-del Hoyo, M. 2014. Medieval charcoals from the Kokotów site 19 (gm. Wieliczka) – some remarks on the sampling method and interpretation of the anthracological assemblages. *Sprawozdania Archeologiczne* 66: 155–176.
- Moskal-del Hoyo, M. 2016. Composition of Atlantic forest in northern Carpathian foothills, from a charcoal record from a Neolithic domestic site at Żerków (Poland): The relevance of oak and hazel. *Acta Palaeobotanica* 56(1): 91–109.
- Moskal-del Hoyo, M. 2021. Open canopy forests of the loess regions of southern Poland: A review based on wood charcoal assemblages from Neolithic and Bronze Age archaeological sites. *Quaternary International* 593–594: 204–223.
- Moskal-del Hoyo, M., Badal, E. 2009. Botanical analysis of an organic matter object found in the urn grave 1395 from the Opatów necropolis (Kłobuck, Silesia). Analiza botaniczna fragmentów organicznych znalezionych w grobie ciałopalnym 1395 na cmentarzysku w Opatowie, pow. Kłobuck, woj. śląskie. *Sprawozdania Archeologiczne* 61: 243–252.
- Moskal-del Hoyo, M., Kozłowski, J.K. 2009. Botanical identification of wood charcoal remains and radiocarbon dating – new examples of the importance of taxonomical identifications prior to  $^{14}\text{C}$  dating. Oznaczenie węgla drzewnych a pomiar wieku metodą  $^{14}\text{C}$  – nowe przykłady przydatności oznaczeń taksonomicznych. *Sprawozdania Archeologiczne* 61: 253–271.
- Moskal-del Hoyo, M., Lityńska-Zajac, M., Korczyńska, M., Cywa, K., Kienlin, T.L., Cappenberg, K. 2015. Plants and environment: results of archaeobotanical research of the Bronze Age settlements in the Carpathian Foothills in Poland. *Journal of Archaeological Science* 53: 426–444.
- Moskal-del Hoyo, M., Lityńska-Zajac, M., Raczky, P., Anders, A., Magyari, E.K. 2018a. Character of the Atlantic oak woods of the Great Hungarian Plain. *Quaternary International* 463, 337–351.
- Moskal-del Hoyo, M., Mueller-Bieniek, A., Alexandrowicz, W.P., Wilczyński, J., Wędzicha, S., Kapcia, M., Przybyła, M.M. 2017a. The continuous persistence of open oak forests in the Miechów Upland (Poland) in the second half of the Holocene. *Quaternary International* 458: 14–27.
- Moskal-del Hoyo, M., Rauba-Bukowska, A., Lityńska-Zajac, M., Mueller-Bieniek, A., Czekaj-Zastawny, A. 2017b. Plant materials used as temper in the oldest Neolithic pottery from south-eastern Poland. *Vegetation History and Archaeobotany* 26: 329–244.
- Moskal-del Hoyo, M., Wachowiak, M., Blanchette, R.A. 2010. Preservation of fungi in archaeological charcoal. *Journal of Archaeological Science* 37(9), 2106–2116.
- Moskal-del Hoyo, M., Wacnik, A., Alexandrowicz, W.P., Stachowicz-Rybka, R., Wilczyński, J., Wędzicha, S., Szwarczewski, P., Korczyńska, M., Cappenberg, K., Nowak, M. 2018b. Open country species persisted in loess regions during the Atlantic and early Subboreal phases: new multidisciplinary data from southern Poland. *Review of Palaeobotany and Palynology* 253: 49–69.
- Mueller-Bieniek, A. 2012. *Rośliny w życiu codziennym mieszkańców średniowiecznego Krakowa*. Kraków.
- Mueller-Bieniek, A., Bogucki, P., Pyzel, J., Kapcia, M., Moskal-del Hoyo, M., Nalepka, D. 2019a. The role of *Chenopodium* in the subsistence economy of pioneer agriculturalists on the northern frontier of the Linear Pottery culture in Kuyavia, central Poland. *Journal of Archaeological Science* 111: 105027.
- Mueller-Bieniek, A., Nowak, M., Styring, A., Lityńska-Zajac, M., Moskal-del Hoyo, M., Sojka, A., Paszko, B., Tunia, K., Bogaard, A. 2019b. Spatial and temporal patterns in Neolithic and Bronze Age agriculture in Poland based on the stable carbon and nitrogen isotopic composition of cereal grains. *Journal of Archaeological Science: Reports* 27: 101993.
- Mueller-Bieniek, A., Woch, M. W. 2012. Właściwości użytkowe i ekologiczne oraz kody roślin znalezionych w warstwach archeologicznych średniowiecznego Krakowa, (w:) Mueller-Bieniek A. (red.), *Rośliny w życiu codziennym średniowiecznego Krakowa*. Kraków, 167–184.
- Mueller-Bieniek, A., Moskal-del Hoyo, M., Kapcia, M., Korczyńska, M., Nowak, M. w druku. Plant macro-remains from a large Eneolithic site in S Poland – internal diversification and possible status of the settlers.
- Nalepka, D., Walanus, A., 2003. Data processing in pollen analysis. *Acta Palaeobotanica* 43(1): 125–134.
- Nesbitt, M., Samuel, D. 1996. From staple crop to extinction? The archaeology and history of the hulled wheats, (w:) S. Padulosi, K. Hammer, J. Heller (red.), *Hulled wheats*. Proceedings of the First International Workshop on Hulled Wheats, 21–22 July 1995, Castelvecchio Pascoli, Tuscany, Italy. Rome, 41–100.
- Novák, J., Kočárová, R., Kočár, P., Abraham, V. 2021. Long-term history of woodland under human impact, archaeoanthracological synthesis for lowlands in Czech Republic. *Quaternary International* 593–594: 195–203.
- Nowak, M., Korczyńska, M., Cappenberg, K., Ociepka, J., Moskal-del Hoyo, M. 2019. Czy w małopolskich ugrupowaniach kultury pucharów lejkowatych funkcjonowały duże osady?, (w:) M. Szmyt, P. Chachlikowski, J. Czebreszuk, M. Ignaczak, P. Makarowicz (red.), *VIR BIMARIS. Od kujawskiego matecznika do stepów nadczarnomorskich. Studia z dziejów międzymorza bałtycko-pontyjskiego*

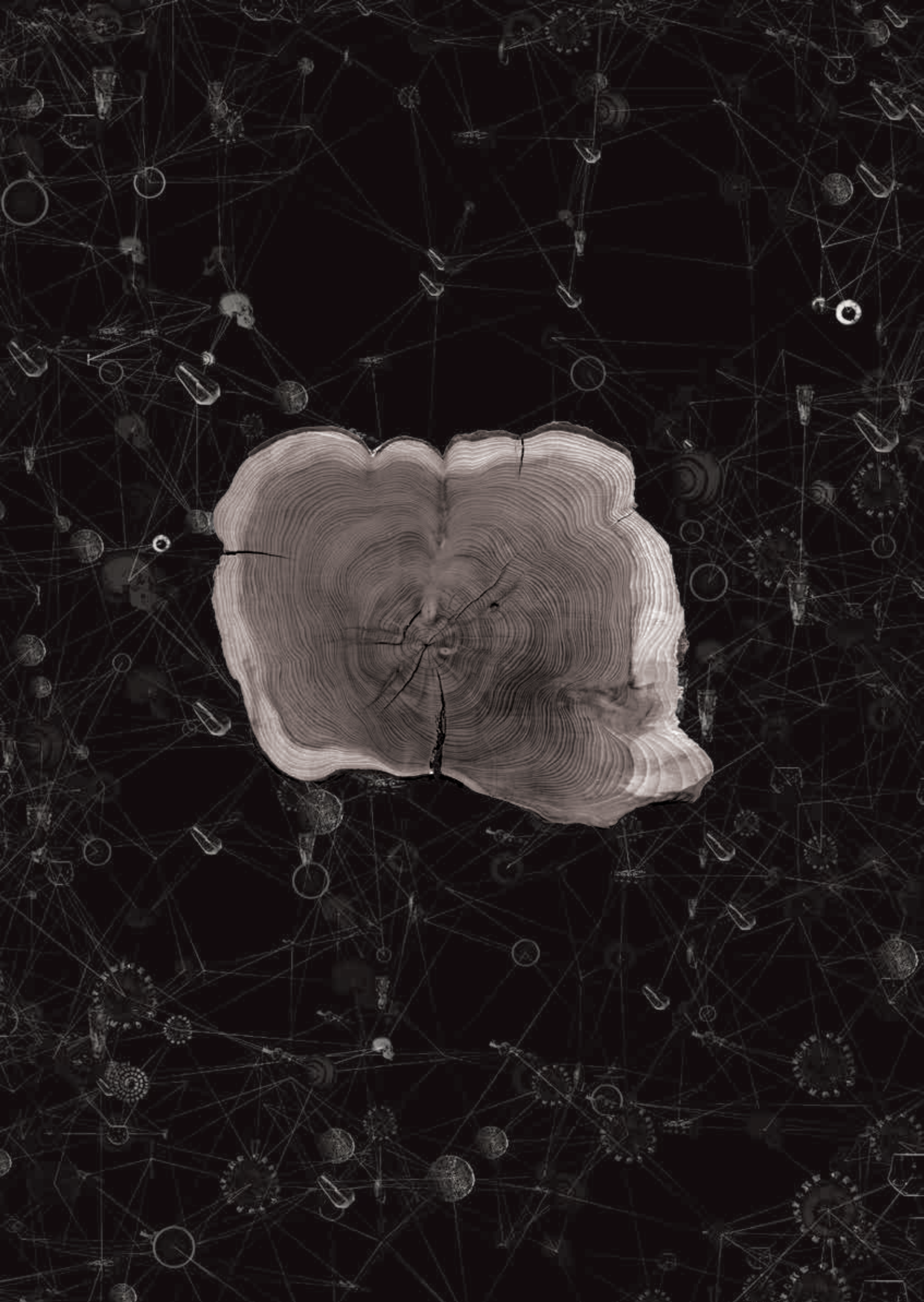
- ofiarowane Profesorowi Aleksandrowi Koško. Seria Archaeologia Bimaris. Poznań, 384–398.
- Nowak, M., Lityńska-Zajac, M., Moskal-del Hoyo, M., Mueller-Bieniek, A., Kapcia, M., Kotynia, K. 2020. Plants of the Funnel Beaker culture in Poland. *Sprawozdania Archeologiczne* 72(1): 87–114.
- Nowak, M., Moskal-del Hoyo, M., Mueller-Bieniek, A., Lityńska-Zajac, M., Kotynia, K. 2017. Benefits and weaknesses of radiocarbon dating of plant material as reflected by Neolithic archaeological sites from Poland, Slovakia and Hungary. *Geochronometria* 44: 188–201.
- Ntinou, M. 2002. La Paleovegetación en el Norte de Grecia desde el Tardiglaciario hasta el Atlántico. Formaciones Vegetales, Recursos y Usos. *BAR IS*, 1083, Oxford.
- Oeggl, K. 2009. The significance of the Tyrolean Iceman for the Archaeobotany for Central Europe. *Vegetation History and Archaeobotany* 19: 1–11.
- Ostrowska, E. 1962. Drewniane budownictwo i obróbka drewna we wczesnośredniowiecznym Wrocławiu. *Etnografia Polska* 6: 302–319.
- Pawlikowa, B. 1965. Drewna i węgle drzewne z warstw wczesnośredniowiecznych na Rynku Głównym w Krakowie. *Materiały Archeologiczne* 6: 183–190.
- Pawlikowa, B. 1969. Wczesnośredniowieczne węgle drzewne z badań archeologicznych w wykopie III i IV na skarpie w Krakowie. *Materiały Archeologiczne* 10: 191–194.
- Pearsall, D.M. 2015. *Palaeoethnobotany: a handbook of procedures* (third edition). London-New York.
- Pilcher, J.R. 1991. Radiocarbon Dating, (w:) P.L. Smart, P.D. Frances (red.), *Quaternary Dating Methods – a User's Guide*. Cambridge, 16–36.
- Pińska, K., Badura, M. 2017. Warunki przyrodnicze i dieta roślinna mieszkańców Pucka w późnym średniowieczu, (w:) M. Starski (red.), *Puck – kultura materialna małego miasta w późnym średniowieczu*. Warszawa, 431–450.
- Pirożnikow, E., Szymański, W. M. 2005. The role of wild plants in nutrition of inhabitants of the settlement of the roman time and great migration period at Paprotki Kolonia site 41 in the Great Mazurian Lakeland. *Sprawozdania Archeologiczne* 57: 525–553.
- Pluskowski, A., Badura, M., Jarzembowski, M. 2019. Exploiting plants: macrobotanical remains from Prussia, (w:) A. Pluskowski (red.), *Environment, colonization and the Baltic Crusader states*. Terra Sacra I. Turnhout, 377–403.
- Podbielkowski, Z. 1985. *Słownik roślin użytkowych*. Warszawa.
- Pokorná, A., Dreslerová, D., Křivánková, D. 2011. Archaeobotanical Database of the Czech Republic, an Interim Report. *Interdisciplinaria Archaeologica Natural Sciences in Archaeology* 2(1): 49–53.
- Pokorný, P., Chytrý, M., Juříčková, L., Sádlo, J., Novák, J., Ložek, V. 2015. Mid-Holocene bottleneck for central European dry grasslands: Did steppe survive the forest optimum in northern Bohemia, Czech Republic? *The Holocene* 25(4): 716–726.
- Pydyn, A., Rembisz, A. 2010. *Osadnictwo ludności łężyckich pól popielnicowych w strefie brzegowej Jeziora Powidzkiego*, (w:) A. Pydyn (red.), *Archeologia Jeziora Powidzkiego*. Toruń, 97–128.
- Ralska-Jasiewiczowa, M. 1989. *The Uplands*. *Acta Palaeobotanica* 29 (2): 43–44.
- Ralska-Jasiewiczowa, M., Latałowa, M. 1996. Poland, (w:) B.E. Berglund, H.J.K. Birks, M. Ralska-Jasiewiczowa, H.E. Wright (red.), *Palaeoecological events during the last 15 000 years. Regional Synthesis of Palaeoecological Studies of Lakes and Mires in Europe*. Chichester-New York, 403–472.
- Ralska-Jasiewiczowa, M., Latałowa, M., Wasylkowa, K., Tobolski, K., Madeyska, E., Wright, Jr. H.E., Turner, Ch. (red.), 2004. *Late Glacial and Holocene history of vegetation in Poland based on isopollen maps*. Kraków.
- Reymanówna, M. 1960. Węgle drzewne z palenisk paleolitycznych w Górze Puławskiej. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego* 150, 139–146.
- Rutkiewicz, P., Malik, I., Wistuba, M., Sady, A., 2017. Charcoal kilns as a source of data on the past iron industry (an example from the River Czarna valley, Central Poland). *Environmental & Socio-economic Studies* 5(3): 12–22.
- Sady, A. 2018. *Wyniki analizy botanicznej materiałów roślinnych z Wrocławia*. Maszynopis, niepublikowane.
- Sady-Bugajska, A. 2020. Wyniki analizy mchu użytego do uszczelnienia konstrukcji drewnianych na terenie stanowiska Lublin-Zamek, (w:) M. Stasiak-Cyran (red.), *Relikty średniowiecznej drewnianej zabudowy wzgórze zamkowe w Lublinie – badania interdyscyplinarne i konserwacja*. Lublin, 95–99.
- Salavert, A., Bosquet, D., Damblon, F. 2014. *Natural woodland composition and vegetation dynamic during the Linearbandkeramik in north-western Europe (central Belgium, 5200–5000 BC)*. *Journal of Archaeological Science* 51: 84–93.
- Schiffer, M.B. 1996. *Formation processes of the Archaeological Record*. Salt Lake City.
- Schoch, W., Heller, I., Schweingruber, F.H., Kienast, F. 2004. *Wood anatomy of central European Species*. Online version: [www.woodanatomy.ch](http://www.woodanatomy.ch).
- Schweingruber, F.H. 1990a. *Mikroskopische Holzanatomie*, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft. Birmensdorf.
- Schweingruber, F.H. 1990b. *Anatomie Europäischer Hölzer*. Bern-Stuttgart.
- Schweingruber, F.H., Börner, A., Schulze, E.-D. 2006. *Atlas of Woody Plant Stems. Evolution, Structure, and Environmental Modifications*. Berlin-Heidelberg.
- Seidl, O. 1936a. Węgle drzewne i drewna z kilku przedhistorycznych stanowisk małopolski wschodniej. *Wiadomości Archeologiczne* 14: 96–105.



- Seidl, O. 1936b. Przedhistoryczne węgle i owocki *Lithospermum* z kopca wschodniego w Rosiejowie w pow. Pińczowskim. *Wiadomości Archeologiczne* XIV, 106–115.
- Shackleton, C.M., Prins, F. 1992. Charcoal Analysis and the “Principle of Least Effort” — Conceptual Model. *Journal of Archaeological Science* 19: 631–637.
- Sławiński, W., Gierasimow, M., Kościak, A. 1958. Szczątki roślinne z kurhanów z okresu rzymskiego odkryte na Suwalszczyźnie. *Wiadomości Archeologiczne* 25: 145–148.
- Stępnik, T. 2001. Skład taksonomiczny prób drewna i węgli drzewnych z Kowalewka, stan. 12, gm. Oborniki, (w:) T. Skorupka (red.), *Kowalewko 12. Cmentarzysko brytualne ludności kultury wielbarskiej (od połowy I w. n.e. do początku III w. n.e.)*. Archeologiczne badania ratownicze wzdłuż trasy gazociągu tranzytowego, vol. II: Wielkopolska. Poznań, 467–470.
- Szafer, W. 1972. *Szata roślinna Polski niżowej*, (w:) W. Szafer, K. Zarzycki (red.), *Szata roślinna*. Warszawa, 17–188.
- Szafer, W. 1946. *Epoka lodowa*. Warszawa.
- Świąta-Musznicka, J., Latałowa, M. 2016. From wetland to commercial centre: the natural history of Wyspa Spichrzów (“Granary Island”) in medieval Gdańsk, northern Poland. *Vegetation History and Archaeobotany* 25: 583–599.
- Świąta-Musznicka, J., Latałowa, M., Szmaja, J., Badura, M. 2011. *Salvinia natans* in medieval wetland deposits in Gdańsk, northern Poland: evidence for the early medieval climate warming. *Journal of Paleolimnology* 45, 369–383.
- Théry-Parisot, I. 2001. *Économie du combustible au Paléolithique. Anthracologie, Expérimentation, Taphonomie*, Dossier de Documentation Archéologique, 20. C.N.R.S., Paris.
- Théry-Parisot, I., Chabal, L., Chravzez, J. 2010. Anthracology and taphonomy, from wood gathering to charcoal analysis. A review of the taphonomic processes modifying charcoal assemblages, in archaeological contexts. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 291, 142–153.
- Thiébaut, S. 1988. *L'Homme et le milieu végétal. Analyses anthracologiques de six gisements des Préalpes au Tard- et au Postglaciaire*. Documents d'Archéologie Française. Paris.
- Valde-Nowak, P. 2014. *Long houses on hilltop – Camps in the Mountains: Some Aspects of the Neolithic in the Duna-jec Project*, (w:) T.L. Kienlin, P. Valde-Nowak, M. Korczyńska, K. Cappenberg, J. Ociepka (red.), *Settlement, Communication and Exchange around the Western Carpathians*. Oxford, 27–49.
- Vera, F.W.M. 2000. *Grazing ecology and forest history*. New York.
- Walanus, A., Goslar, T. 2004. *Wyznaczanie wieku metodą <sup>14</sup>C dla archeologów*. Rzeszów.
- Wasylikowa, K. 1978. Plant remains from Early and Late Medieval time found on the Wawel Hill in Cracow. *Acta Palaeobotanica* 19: 115–200.
- Wasylikowa, K. 1981. The role of fossil weeds for the study of former agriculture. *Zeitschrift für Archäologie* 15: 1123.
- Wasylikowa, K. 1983. Antropogeniczne zmiany roślinności w holocenie, (w:) J.K. Kozłowski, S. Kozłowski (red.), *Człowiek i środowisko w pradziejach*. Warszawa, 53–71.
- Wasylikowa, K., Gluza, I., Lityńska-Zajac, M., Tomczyńska, Z. 1992. Charcoals from three Neolithic settlements in the loess area of south-central Poland. *Bulletin de la Société botanique de France, Actualités Botaniques* 139: 373–382.
- Ważny, T. 1993. Dendrochronological dating of the Lusatian culture settlement at Biskupin, Poland – first results. *News WARP* 14: 3–5.
- Wieserowa, A. 1967. Wczesnośredniowieczne szczątki zbóż i chwastów z Przemyśla. *Folia Quaternaria* 28: 1–16.
- Wilczyński, J., Krajcarz, M.T., Moskal-del Hoyo, M., Alexandrowicz, W.P., Miękina, B., Pereswiet-Soltan, A., Wertz, K., Lipecki, G., Marciszak, A., Lõugas, L., Gradziński, M., Szczepanek, A., Zastawny, A., Wojenka, M. 2020. Late Glacial and Holocene paleoecology and paleoenvironmental changes in the northern Carpathians foreland: The Żarska Cave (southern Poland) case study. *The Holocene* 30(6): 905–922.
- Wilczyński, J., Pospuła-Wędzicha, S., Wertz, K., Lõugas, L., Moskal-del Hoyo, M., Korczyńska, M., Nowak, M. 2021. Animal Husbandry of Funnel Beaker Culture: Case Study of Mozgawa Site (Poland, Lesser Poland), (w:) E. Piśkin (red.), *13th International Council of Archaeozoology Conference. Archaeological, biological and historical approaches in archaeozoological research*. (BAR International Series 3028). Oxford: 47–59.
- Wrzesińska, A., Wrzesiński, J. 2002. Z problematyki węgli drzewnych w jamach grobowych – częstość występowania węgli w grobach wczesnośredniowiecznego cmentarzyska „Mały Skansen”. *Studia Lednickie* 7: 143–161.
- Zabłocki, J. 1952. Szczątki roślinne ze stanowiska wczesnośredniowiecznego w Jeziorcu, powiat Giżycko wydobyte w r. 1950. *Materiały wczesnośredniowieczne* 2: 211–225.
- Zarzycki, K., Trzcińska-Tacik, H., Różański, W., Szeląg, Z., Wołek, J., Korzeniak, U. 2002. Ecological indicator of vascular plants of Poland, (w:) Z. Mirek (red.), *Biodiversity of Poland*. Kraków, 7–183.
- Zemanek, A. 2000. *Józef Rostafiński botanik i humanista*. Komisja Historii Nauki. Monografie 1. Kraków. 13–106.
- Zielski, A., Krapiec, M. 2004. *Dendrochronologia*. Warszawa.
- Zohary, D., Hopf, M., Weiss, E. 2012. *Domestication of plants in the Old World*, 4<sup>th</sup> ed. Oxford.
- Żurek, S. 1987. *The peat deposits of Poland against the peat zones of Europe*. Dokumentacja Geograficzna 4: 1–84.
- Żurowski, T. 1950. Budowle kultury łużyckiej w Biskupinie. Próba rekonstrukcji, (w:) J. Kostrzewski (red.), *III Sprawozdanie z prac wykopaliskowych w grodzie kultury łużyckiej w Biskupinie w powiecie żnińskim, za lata 1938–1939 i 1946–1948*. Poznań, 286–370.









# Dendroarcheologia

Henryk P. Dąbrowski

---

## WSTĘP

Zgodnie z najkrótszą, ale kompletną definicją, dendrochronologia jest dyscypliną zajmującą się datowaniem słojów 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 słojów 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 Krapca (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 wywierców 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 ogłędzin 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 znanym 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).

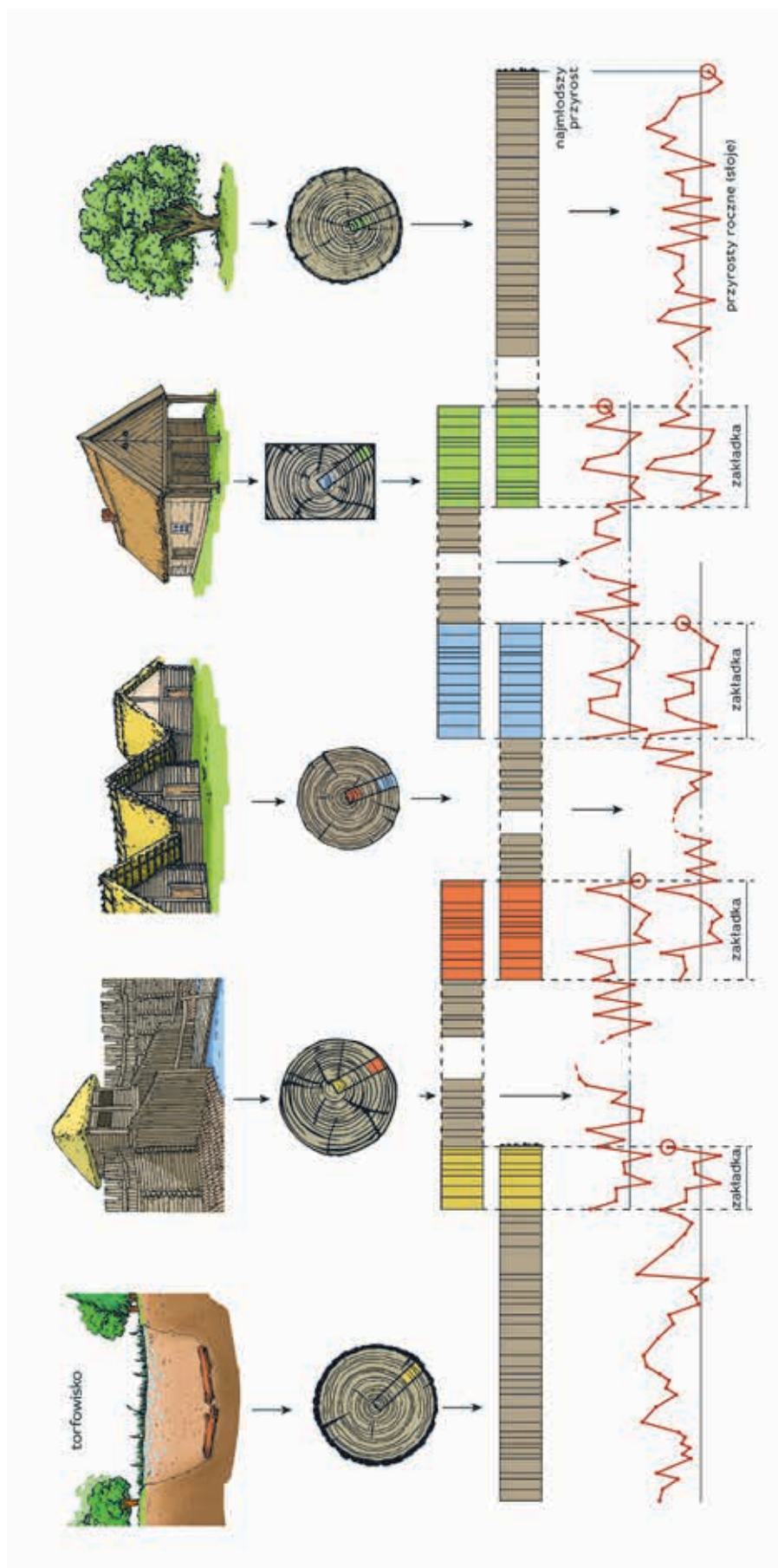
Chronologia „pływająca” (chronologia względna) złożona jest z wielu sekwencji przyrostowych wzajemnie skorelowanych o nieznanym jednak wieku (kolejne wartości ciągu nie są przyporządkowane latom kalendarzowym, czyli nie są wydatowane bezwzględnie).

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 znalezionej 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

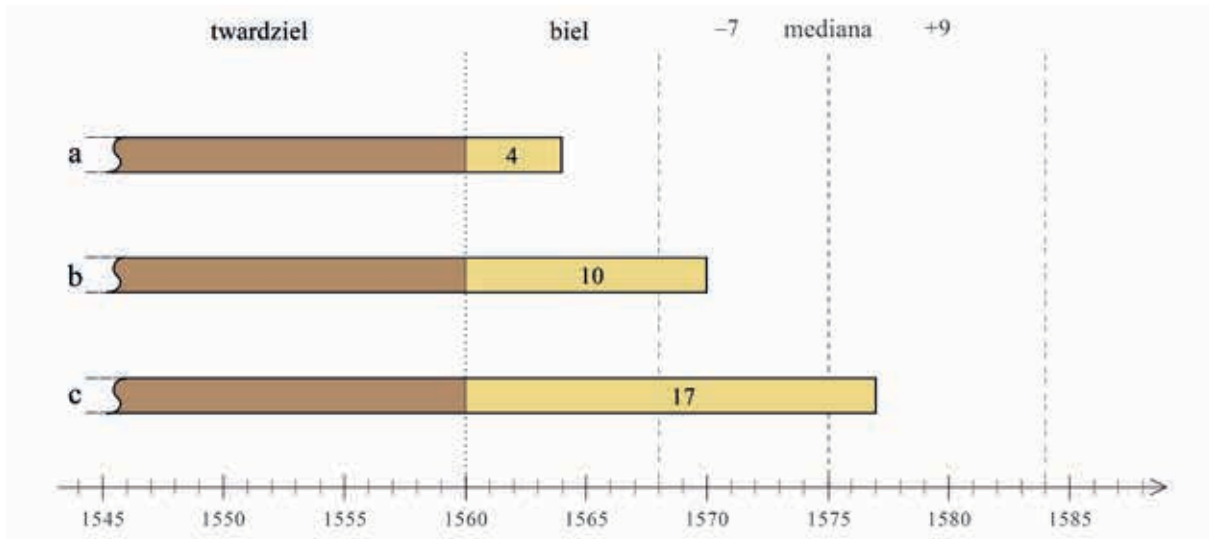
mówią o najmniejszej i największej szerokości tej warstwy (Zielski i Krąpiec 2004).

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.
- Krapiec, M. 1996a. Dendrochronologiczne datowanie zwęglonych prób drewna z wcześnieśredniowiecznej półziemianki z Krakowa-Nowej Huty-Wyciąża (stanowisko 5B). *Materiały Archeologiczne Nowej Huty* 19: 129–135.
- Krapiec, 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.
- Krapiec, M. 1998a. Bezwzględne datowanie zwęglonego drewna z wału 3B wcześnieśredniowiecznego grodziska w Stradowie. *Sprawozdania Archeologiczne*, 50: 265–270.
- Krapiec, M. 1998b. Oak dendrochronology of the Neoholocene in Poland. *Folia Quaternaria* 69: 5–134.
- Krapiec, M. 2001. Holocene dendrochronological standards for subfossil oaks from the area of southern Poland. *Studia Quaternaria* 18: 47–63.
- Krapiec, M., Krysztofiak, T. 2003. Potwierdzenie plemiennej metryki grodu w Gieczu, Wielkopolskie. *Sprawozdania Archeologiczne* 6: 32–51.
- Krapiec, M., Szychowska-Krapiec, 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.
- Krapiec, 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., Krapiec, 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. Późnolodowiecki 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.







# Mikroskamieniałości okrzemkowe

Monika Rzodkiewicz

---

## WSTĘP

Okrzemki (*Bacillariophyta*) to jednokomórkowe rośliny. Są niewielkie, ich rozmiar wynosi bowiem od 5  $\mu\text{m}$  do 5500  $\mu\text{m}$  (przeciętnie 10-200  $\mu\text{m}$ ). Należą do najczęściej spotykanych grup glonów, których występowanie związane jest z obecnością wody. Spotykane są w zbiornikach różnego typu, a więc w morzach, jeziorach, rzekach, potokach. Okrzemki mogą występować również w glebie i stosunkowo suchych miejscach, np. na murach, na powierzchni skał, pod głazami na obszarach pustynnych. Mogą egzystować wszędzie tam, gdzie znajdują wystarczające ilości wilgoci oraz światła, które jest niezbędne do przeprowadzania fotosyntezy (Nowicka-Krawczyk i in. 2014: 116-123; Pliński i Witkowski 2009: 10; Taylor i in. 2007: 4-6).

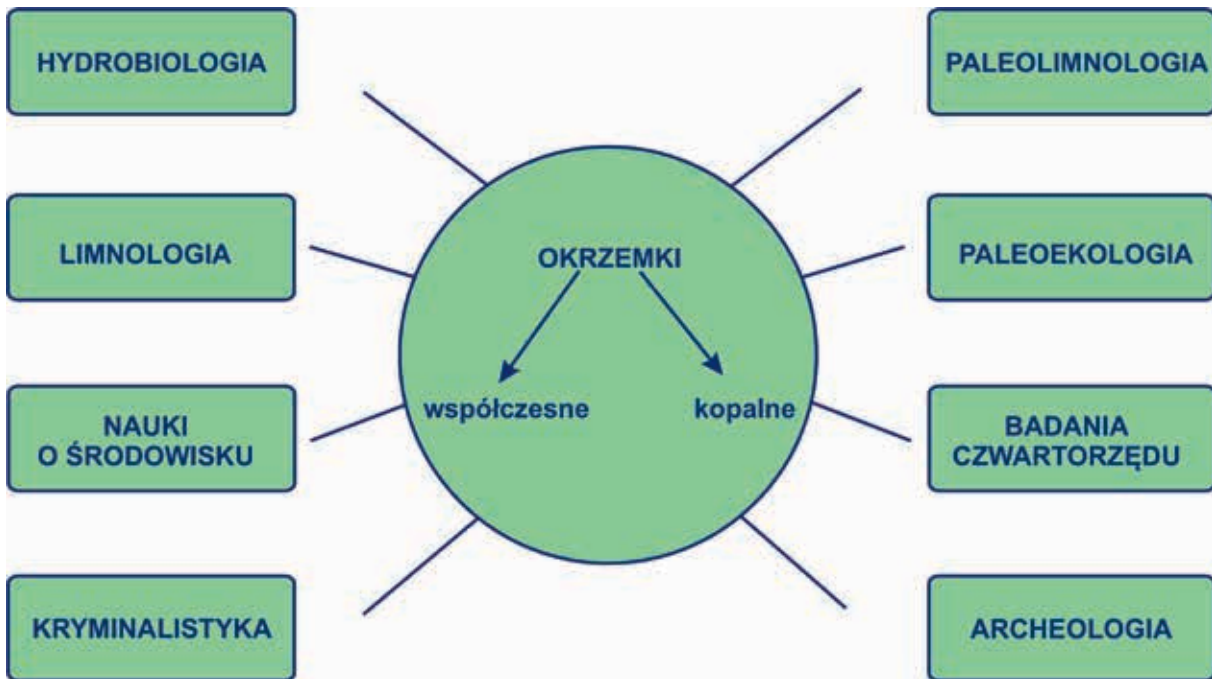
Okrzemki dostarczają informacji o warunkach istniejących w zbiornikach wodnych współcześnie, jak również w przeszłości. Wykorzystywane są powszechnie w rekonstrukcjach środowisk jeziornych, lagunowych i morskich, a ponadto w archeologii (ryc. 1) (Battarbee 1988: 621-644; Cameron 2013: 516-521; Denys 1992: 195-197; Hill i in. 2017: 79-102; Juggins i Cameron 2010: 514-522; Mannion, 1987: 131-147).

Wykazują zdolność przystosowania się do zmieniających się warunków środowiska, która pozwoliła tej grupie glonów przetrwać przez tysiące lat.

Dzięki tej umiejętności, jak również dobremu zachowaniu się w większości osadów okrzemki stały się jednym z najlepszych archiwów służących do rekonstrukcji środowiska przyrodniczego.

Badania kopalnej flory okrzemkowej są podstawą odtwarzania wahań poziomu wody, stanu troficznego, zasolenia (Anderson 1997: 427-440; Andrén 1999: 665-676; Bennion i in. 1996: 2004-2007; Fritz 1990: 1771-1781; Patrick 1984: 756-766). Ponadto okrzemki reagują na zmiany zawartości tlenu, pH i materii organicznej znajdującej się w zbiorniku (Birks i in. 1990: 263-278; Cox 1991: 33-39; John 2004: 95-104; Schoemann i Haworth 1984: 757-759). Mają stosunkowo dobrze określone zakresy tolerancji ekologicznej wobec szeregu czynników środowiskowych, dlatego wykorzystywane są jako bioindykatory, a zmiany w składzie gatunkowym flory okrzemkowej wykorzystywane są często jako podstawa do rekonstrukcji zmian warunków środowiskowych, jakie dokonały się po ustąpieniu lądolodu.

Najstarsze opisane okrzemki kopalne pochodzą z dolnej kredy (np. Sims i in. 2006: 361-402; Van Den Hoek i in. 1998: 627). W świetle badań polskich naukowców należy zaznaczyć, że okrzemki miały prawdopodobnie znacznie dłuższą historię niż ta, ponieważ istnieją doniesienia o skamieniałościach triasowych i prekambryjskich (Kwiecińska 2000: 75-95; Siemińska 2015: 115-117; Siemińska 2000: 55-74). Przykładem mogą być fragmenty



**Ryc. 1.** Zastosowanie analizy okrzemkowej (według Alhonen i Väkeväinen 1981)

okryw (ryc. 2) znalezione w proterozoicznych marmurach z Przeworna (Siemińska 1981: 203-206; Siemińska 1980: 733-737; Siemińska i Kwiecińska 2000: 97-121).

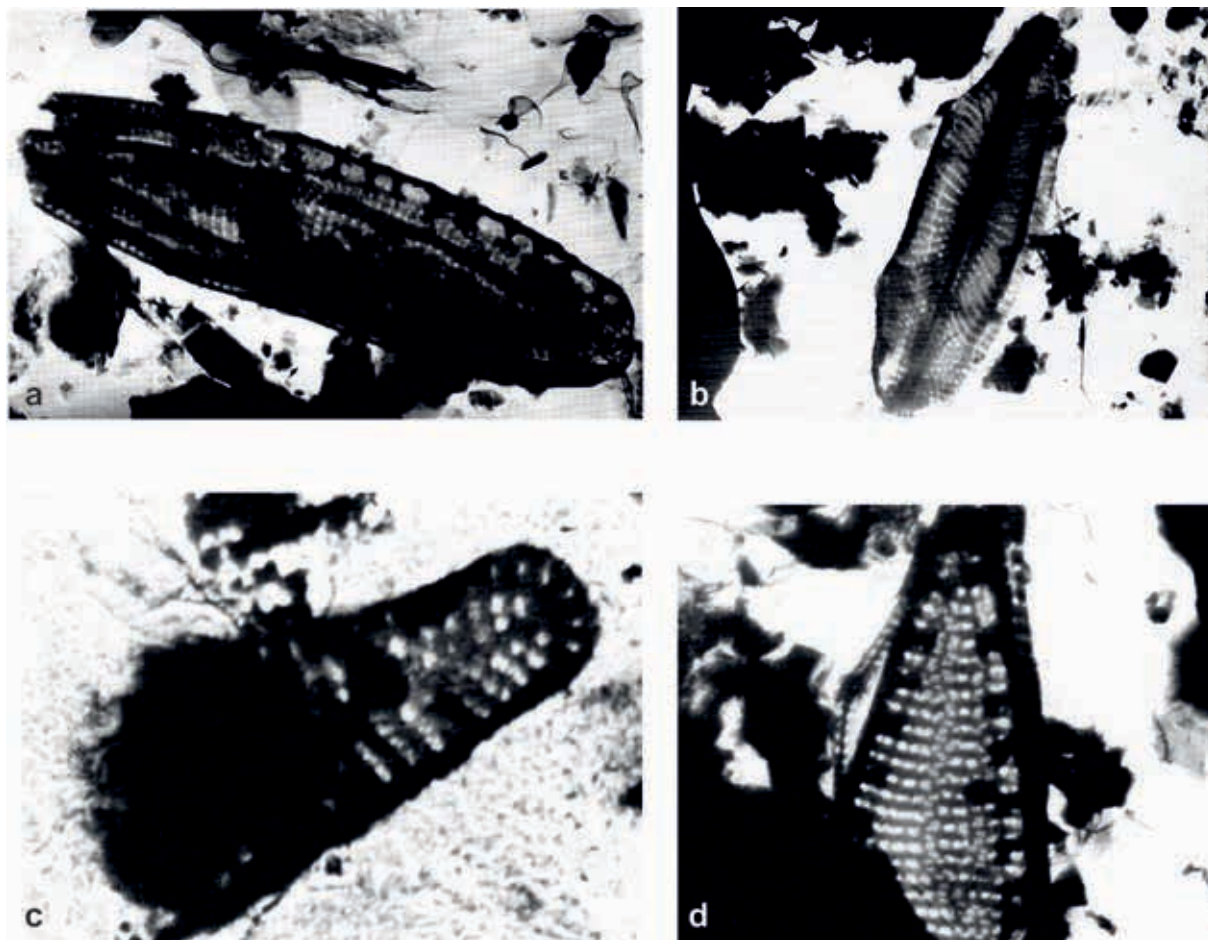
Okrzemki mogą żyć pojedynczo lub tworzyć kolonie: nici, wstęgi, łańcuchy, gwiazdki, krzaczki oraz bezkształtne skupienia (ryc. 4). Komórki bądź też kolonie mogą żyć swobodnie, mogą również łączyć się za pomocą galaretowatej substancji lub kolców lub też przyczepić się do podłoża (Taylor i in. 2007: 6).

Cechą, która odróżnia okrzemki od innych glonów, jest dwuczęściowa okrywa (pancerzyk, skorupka) zbudowana z dwutlenku krzemu uwodnionego małą ilością wody ( $\text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ). Zbudowany z krzemionki pancerzyk jest odporny na degradację i pozostaje w środowisku długi czas po obumarciu organizmu. Pancerzyk okrzemek składa się z kilku elementów. Są to dwie okrywy bogato ornamentowane oraz kilka mniejszych łączących je elementów tworzących tzw. pas obwodowy (ryc. 5). Ornamentacja może być w postaci otworków, prążków, żeberk i wyrostków, która jest charakterystyczna dla danego gatunku i stanowi obok kształtu i wielkości jedną z najważniejszych cech w systematyce okrzemek. Okrywy mogą mieć również podłużną szczelinę zwaną rafą, biegnącą wzdłuż

podłużnej osi symetrii. Każdy pancerzyk składa się z dwóch połówek. Starsza, większa okrywa (zwana wieczkiem) razem z połączonymi z nią elementami pasa zwana jest epiteką, natomiast młodsza, mniejsza okrywa (zwana denkiem) i połączone z nią elementy określa się mianem hypoteki.

Powierzchnia okryw jest płaska, tylko brzeg może być wygięty i niekiedy dość znacznie przedłużony, tworząc tzw. płaszcz. Pas obwodowy nie jest zrośnięty z okrywą, jedynie bardzo ściśle do niej przylega (ryc. 6). Niekiedy płaszcz jest tak silnie rozwinięty, że brak jest pasa obwodowego lub jest on bardzo wąski. U wielu gatunków między okrywą a pasem obwodowym znajduje się jedna lub kilka tzw. warstewek. Są to krzemionkowe tworzy mające kształt obręczy, które mogą być z jednej strony otwarte, półkoliste albo łuskowato zachodzące na siebie. Ilość warstewek uzależniona jest od wieku komórki. Niekiedy na wstawkach wystają do środka pancrzyka krzemionkowe blaszki, czyli przegródki (septa), dzieląc wnętrze komórki na kilka przedziałów, do których wnika protoplast. Są one równoległe do okryw, a wykształcają się albo tylko przy jednym z biegunów komórki, albo wzdłuż jej brzegów (ryc. 6) (Bąk i in. 2012: 9-12; Battarbee 1986: 527-570; Battarbee i in. 2001: 155-202; Mann 2002: 9-40).





**Ryc. 2.** Przykłady okryw okrzemkowych w marmurach z Przeworska (ryciny z Kwiecińska 2000: 91-92)

W wyniku zróżnicowania pancerzyka na denko i wieczko oraz pas obwodowy każda komórka okrzemek może być pokazana w dwóch pozycjach względem obserwatora. Określane są one mianem widoku od strony okrywy (wieczka, denka), gdy okrywa ustawiona jest prostopadłe względem obserwatora i widoku od strony pasa, gdy pas obwodowy jest prostopadły do obserwatora (ryc. 7).

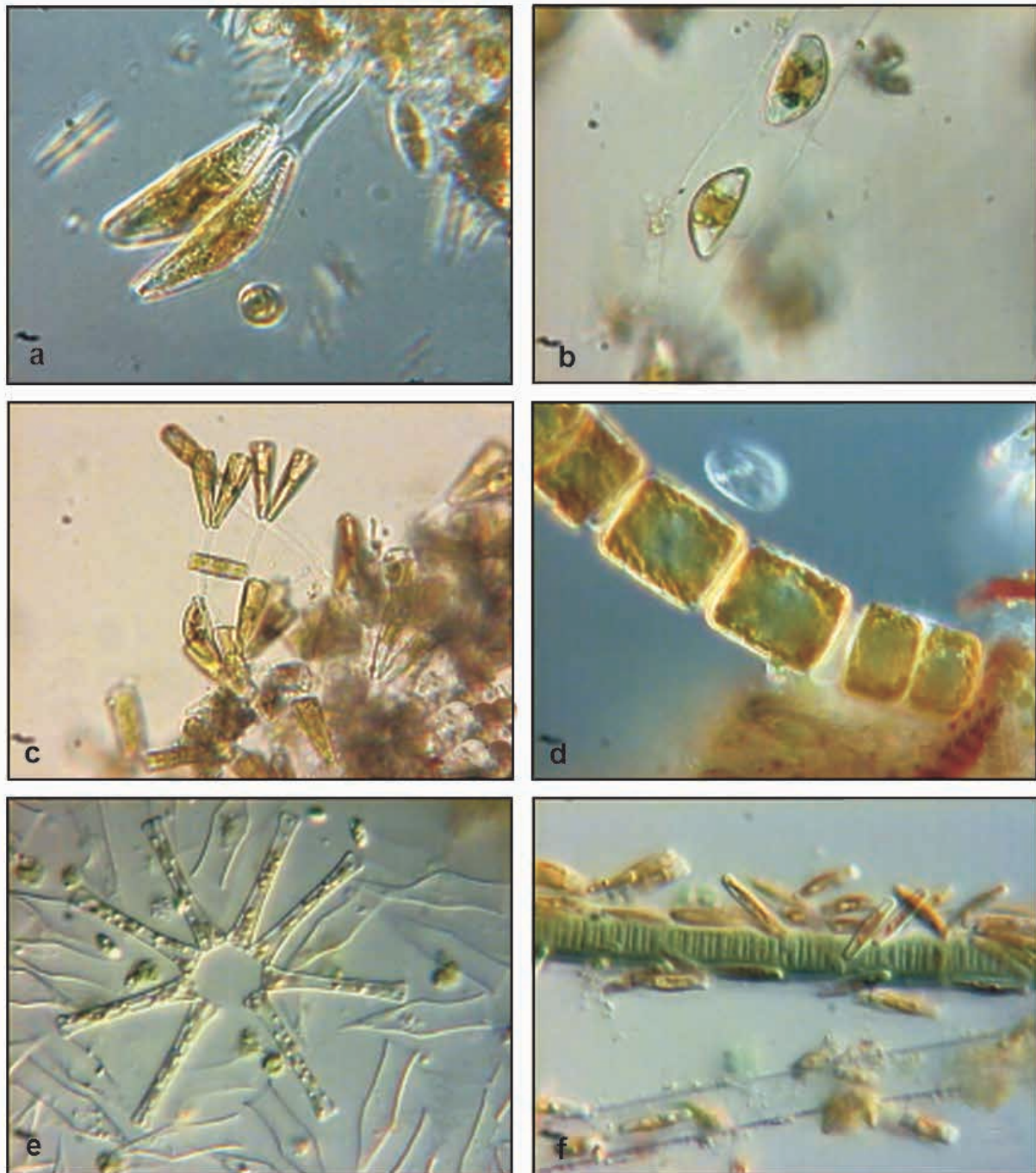
Dla właściwej identyfikacji komórki muszą być widziane od strony okrywy, chociaż w niektórych rodzajach *Chaetoceros* i *Rhizosolenia* bardziej przydatny do identyfikacji jest widok od strony pasa obwodowego (Bąk i in. 2012: 9-12).

Ułożenie prążków i kształt skorupki umożliwiły wyodrębnienie dwóch podklas: *Centricae* i *Pennatae* (ryc. 8). Okrzemki z obu tych podklas oznacza się m.in. na podstawie kształtu i ornamentacji krzemionkowych skorupki. *Centricae* mają okrywy okrągłe lub eliptyczne. Ornamentacja jest promienista, czasem nieregularna, ale ma wiele osi symetrii.

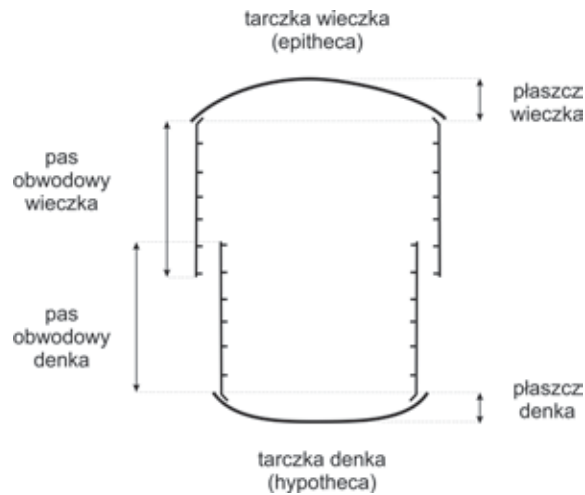


**Ryc. 3.** Lokalizacja obszaru badań (Kwiecińska 2000: 91-92)

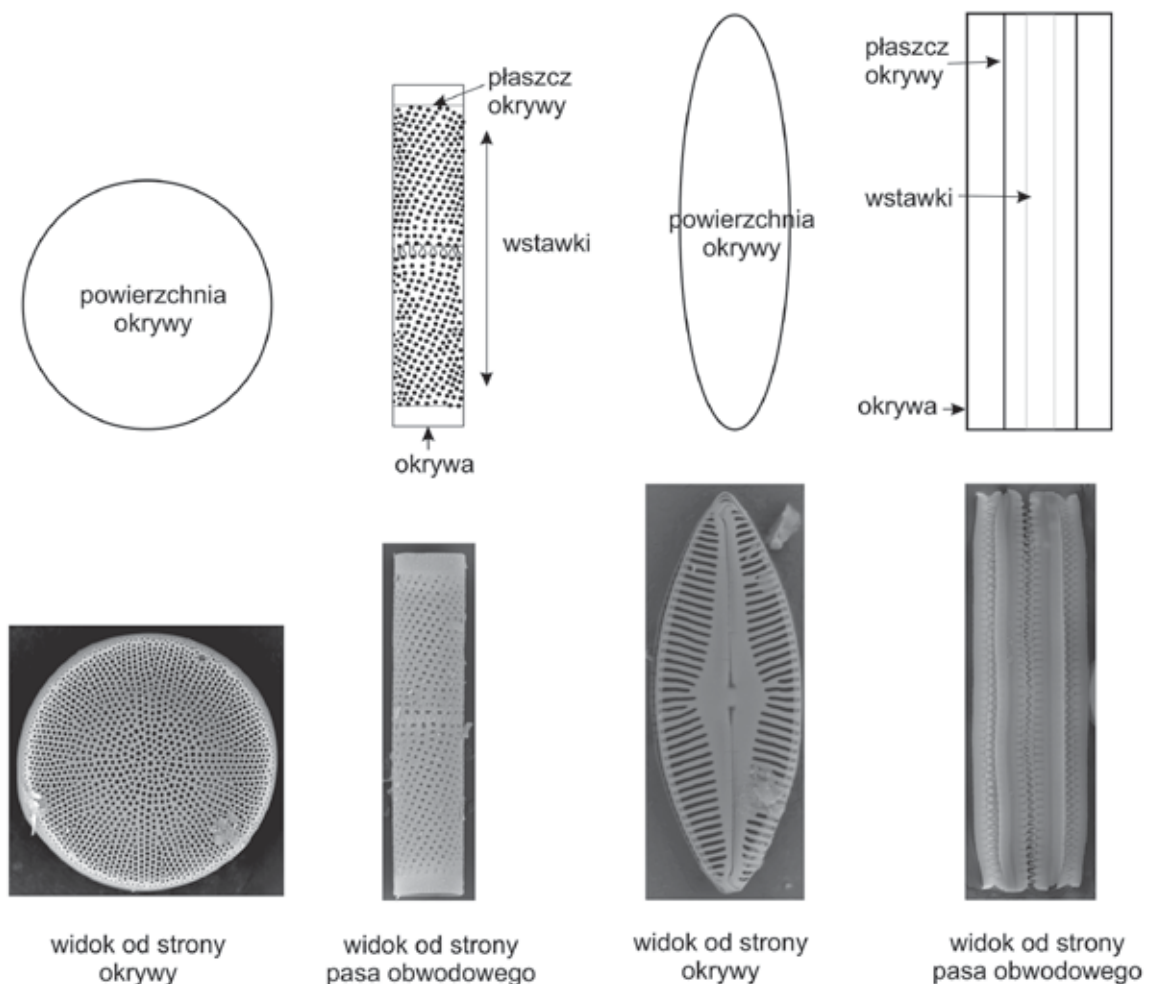
*Pennatae* mają podłużną szczelinę tzw. rafę lub pole podłużne. Te, które mają taką szczelinę, mogą pęłzać po podłożu. Jest to bardzo duża grupa,



**Ryc. 4.** Różne formy kolonii okrzemkowych (rycina z Taylor i in. 2007: 6) (a) *Cymbella* sp. przywiązana do podłoża za pomocą łodygi ze śluzu, (b) *Encyonema caespitosum* zamieszkujące rurki ze śluzu, (c) dychotomicznie rozgałęzienia śluzowatych łodyg, do których dołączone są komórki *Gomphonema* sp., (d) *Melosira varians* z komórkami przymocowanymi do podłoża, (e) kolonie gwiazdzisto ułożonych okrzemek *Asterionella formosa*, (f) *Achnanthyidium minutissimum* przymocowany za pomocą kleju roślinnego do łodygi *Lyngbya* sp.

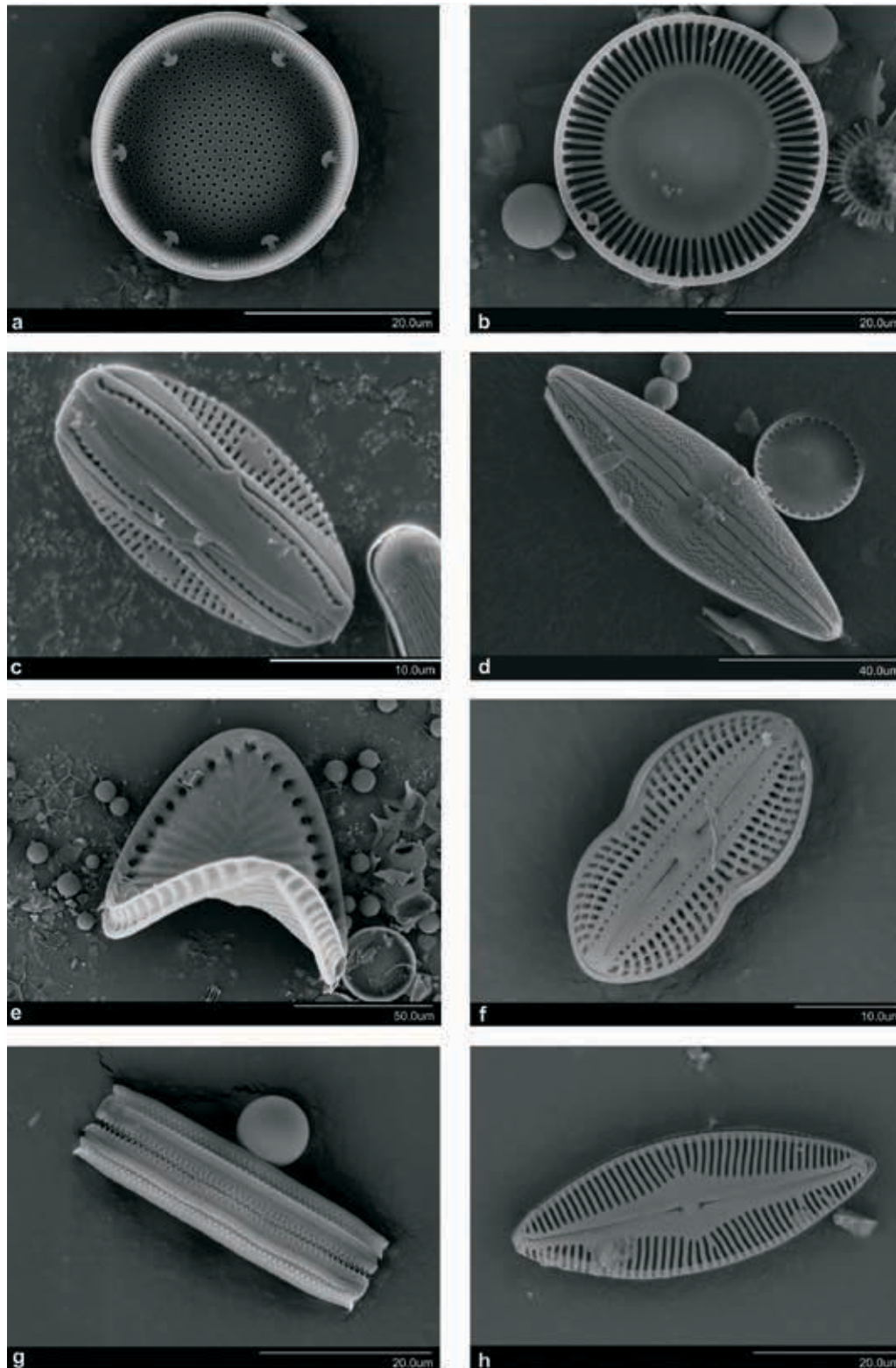


**Ryc. 5.** Schemat budowy pancerzyka (na podstawie Mann 2002: 17)

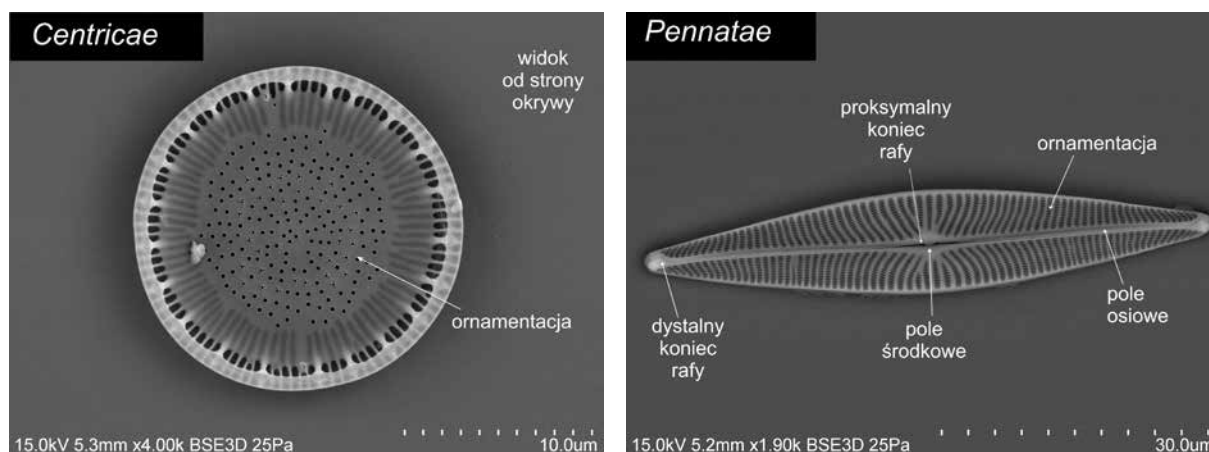


**Ryc. 6.** Cechy identyfikacyjne okryw okrzemkowych. Zdjęcia wykonano w Pracowni Mikroskopii Skaningowej i Mikroanalizy Wydziału Nauk Geograficznych i Geologicznych UAM w Poznaniu. Fot. M. Rzodkiewicz





**Ryc. 7.** Przykłady kształtu różnych okryw okrzemkowych. (a) *Actinocyclus normanii* (Gregory) Hustedt (widok od środka okrywy), (c) *Cyclotella meneghiniana* Kützing, (c) *Amphora copulata* (Kützing) Schoeman & R.E.M. Archibald, (d) *Anomoeoneis sphaerophora* f. *costata* (Kützing) Schmid, (e) *Campylodiscus clypeus* (Ehrenberg) Ehrenberg ex Kützing, (f) *Diploneis bombus* (Ehrenberg) Ehrenberg, (g) *Staurosira subsalina* (Hustedt) Lange-Bertalot, (h) *Navicula palpebralis* Brébisson ex W. Smith. Zdjęcia wykonano w Pracowni Mikroskopii Skaningowej i Mikroanalizy Wydziału Nauk Geograficznych i Geologicznych UAM w Poznaniu. Preparaty napyłono złotem. Fot. M. Rzodkiewicz



**Ryc. 8.** Dwie główne podklasy: *Centricae* i *Pennatae* *Centricae*: *Cyclotella radiosa* (Grunow) Lemmermann, *Pennatae*: *Navicula radiosa* Kützinger. Zdjęcia wykonano w Pracowni Mikroskopii Skaningowej i Mikroanalizy Wydziału Nauk Geograficznych i Geologicznych UAM w Poznaniu. Preparaty napylono złotem. Fot. M. Rządziejewicz

licząca około 10 tysięcy gatunków. Okrywy są lancetowate, proste, wygięte, mają pierzastą ornamentację. Można je spotkać w planktonie, w peryfitonie, w bentosie.

Bogactwo gatunkowe i ilościowe okrzemek zależy przede wszystkim od stopnia żyzności zbiornika. Najliczniej, zarówno pod względem ilości gatunków, jak i osobników, występują one w zbiornikach eutroficznych (o dużej dostępności substancji odżywczych), a najmniej licznie w zbiornikach oligotroficznych (ubogich w substancje odżywcze) i dystroficznych (ubogich w substancje odżywcze, ale z dużą domieszką substancji humusowych). Wysoka zawartość węglanów w wodzie, a także obfitość kwasów humusowych są dla nich niekorzystne. Obfitość okrzemek w stanie kopalnym może być więc wskaźnikiem eutrofizacji. Poza tym odmienny jest skład gatunkowy zespołów okrzemek w jeziorach o różnej żyzności.

Analizy okrzemkowe (diatomologiczne) w archeologii mogą być wykorzystywane do rekonstrukcji warunków środowiskowych, jakie istniały w okresie sedymentacji osadów badanego stanowiska archeologicznego i jego otoczenia. Ponadto mogą służyć do określania pochodzenia materiałów stosowanych do wyrobu naczyń ceramicznych i innych wyrobów z gliny odkrywanych na stanowiskach archeologicznych (Alhonen i in. 1980: 193-206; Alhonen i Matiskainen 1980: 45-62; Alhonen i Väkeväinen 1981: 67-77; Bąk i in. 2007: 233-243; Battarbee 1988: 621-644; Juggins i Cameron 2010: 514-522).

### POBÓR PRÓB, PRZYGOTOWANIE I ANALIZA PREPARATÓW MIKROSKOPOWYCH

W badaniach paleoekologicznych materiał do rekonstrukcji środowiskowych pobiera się zazwyczaj w postaci rdzeni osadów za pomocą urządzeń wiertniczych (ryc. 9), (wibrosondy, sondy grawitacyjne i in.). Często wykorzystuje się też osady pobierane w profilu z odsłoneń archeologicznych. W terenie bądź później w laboratorium opisuje się rdzenie pod względem litologicznym, a następnie pobiera się próbki do analiz okrzemkowych. Gęstość opróbowania rdzeni może być różna, np. co 1 cm, 2 cm, 5 cm lub co 10 cm, w zależności od tego, jakiej dokładności oczekujemy po wynikach analizy diatomologicznej. Próbkę mogą zostać pobrane również w nieregularnych odstępach, uzależnionych np. od litologii badanego rdzenia. W przypadku próbek ze stanowisk archeologicznych możliwe jest pobieranie próbek rzadziej, np. co 5 cm, z osadów sprzed czasów osadnictwa, a gęściej, np. co 1 cm, obejmujących czasy osadnictwa. Taki sposób próbkowania stosuje się jednak niezbyt często.

Przed przystąpieniem do badań laboratoryjnych należy określić wagę próbki po wysuszeniu. Aby uniknąć powstawania agregatów, nie jest wskazane suszenie w suszarce w temperaturze przekraczającej 50°C. Próbkę należy suszyć przez dłuższy czas w temperaturze pokojowej. Jeżeli jest to możliwe, wodę odparowuje się w ciekłym azocie lub próbkę poddaje się liofilizacji. Po wysuszeniu i zważeniu





**Ryc. 9.** Badania terenowe. (a) platforma pływająca z sondą tłokową Uwitec (Niederreiter) do pobierania osadów jeziornych; (b) pobieranie próbek osadów przy użyciu beztłokowego próbnika grawitacyjnego Limnos; (c) pobieranie próbek osadów do analiz okrzemkowych bezpośrednio z odsłonięcia; (d) fragment rdzenia osadów jeziornych. Sprzęt terenowy znajduje się na wyposażeniu Instytutu Geoekologii i Geoinformacji Wydziału Nauk Geograficznych i Geologicznych UAM w Poznaniu. Fot. M. Rzodkiewicz



próbek osadu przenosi się go do zlewek o pojemności min. 150 ml.

Przy identyfikacji okrzemek uwzględnia się przede wszystkim strukturę krzemionkowego pancerzyka, dlatego też w laboratorium próbki osadu poddawane są dalszej obróbce polegającej na stosowaniu stężonych kwasów lub substancji silnie utleniających.

Zestaw narzędzi:

- zlewki ze szkła borokrzemowego o pojemności np. 150-250 ml,
- szkiełka (np. zegarkowe) do przykrywania zlewki (zapobiegają zanieczyszczeniom między próbkami podczas wytrawiania materii organicznej),
- mikroskopowe szkiełka podstawowe,
- mikroskopowe szkiełka nakrywkowe,
- probówki do przechowywania przygotowanej zawiesiny (ok. 15 ml),
- pipety Pasteura lub mikropipety jednorazowe (do nanoszenia zawiesiny na szkiełka nakrywkowe),
- płyta grzewcza do podgrzewania materiału okrzemkowego i do utwardzania preparatów (umieszczona pod wyciągiem a najlepiej w dygestorium),
- odczynniki, np. HCl, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (wyraźnie oznaczone i prawidłowo przechowywane),
- gumowe rękawiczki,
- butelki na odpady chemiczne.

Najczęściej stosowaną metodą przygotowania preparatów mikroskopowych jest zaproponowana przez Battarbee (1986: 527-570). W celu wyeliminowania węglanu wapnia osad w zlewce zalewa się 10% kwasem solnym (HCl) w ilości ok. 10-20 ml (ryc. 10). Próbkę odstawiamy na kilka godzin, od czasu do czasu mieszając zawiesinę. Jeżeli mamy duże zanieczyszczenie węglanem wapnia, wówczas możemy próbki zalane kwasem solnym zostawić na całą noc. Po zakończeniu reakcji należy przepłukać materiał wodą destylowaną. Materię organiczną usuwa się z prób, zalewając je 37% nadtlenkiem wodoru (perhydrol; H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) i podgrzewa na płycie grzejnej aż do całkowitego zaniku reakcji. Następnie próbki należy ponownie kilkakrotnie przepłukać wodą destylowaną. Można to uczynić poprzez kilkakrotne odwirowanie lub poprzez dekantację.

Oczyszczony materiał w postaci zawiesiny może być badany zarówno przy użyciu mikroskopu świetlnego, jak i skaningowego. Preparaty do mikroskopu

świetlnego przygotowuje się poprzez naniesienie kilku kropeł zawiesiny na szkiełko nakrywkowe. Preparaty trwale wykonuje się, zatapiając oczyszczone pancerzyki okrzemek w ośrodku stałym, o wysokim współczynniku załamania światła (Pleurax, Hyrax, Naphrax lub balsam kanadyjski). Obecnie najczęściej stosowany jest Naphrax o współczynniku załamania światła ~1,7 (współczynnik załamania światła okryw krzemionkowych jest zbliżony do szkła i wynosi 1,43). W ten sposób przygotowane preparaty krótko podgrzewamy na płycie grzejnej w celu usunięcia z nich pęcherzyków powietrza i resztek wilgoci. Należy unikać nakrapiania zawiesiny na szkiełka podstawowe. Z każdej próbki wykonuje się co najmniej dwa preparaty mikroskopowe o różnym stopniu zagęszczenia materiału.

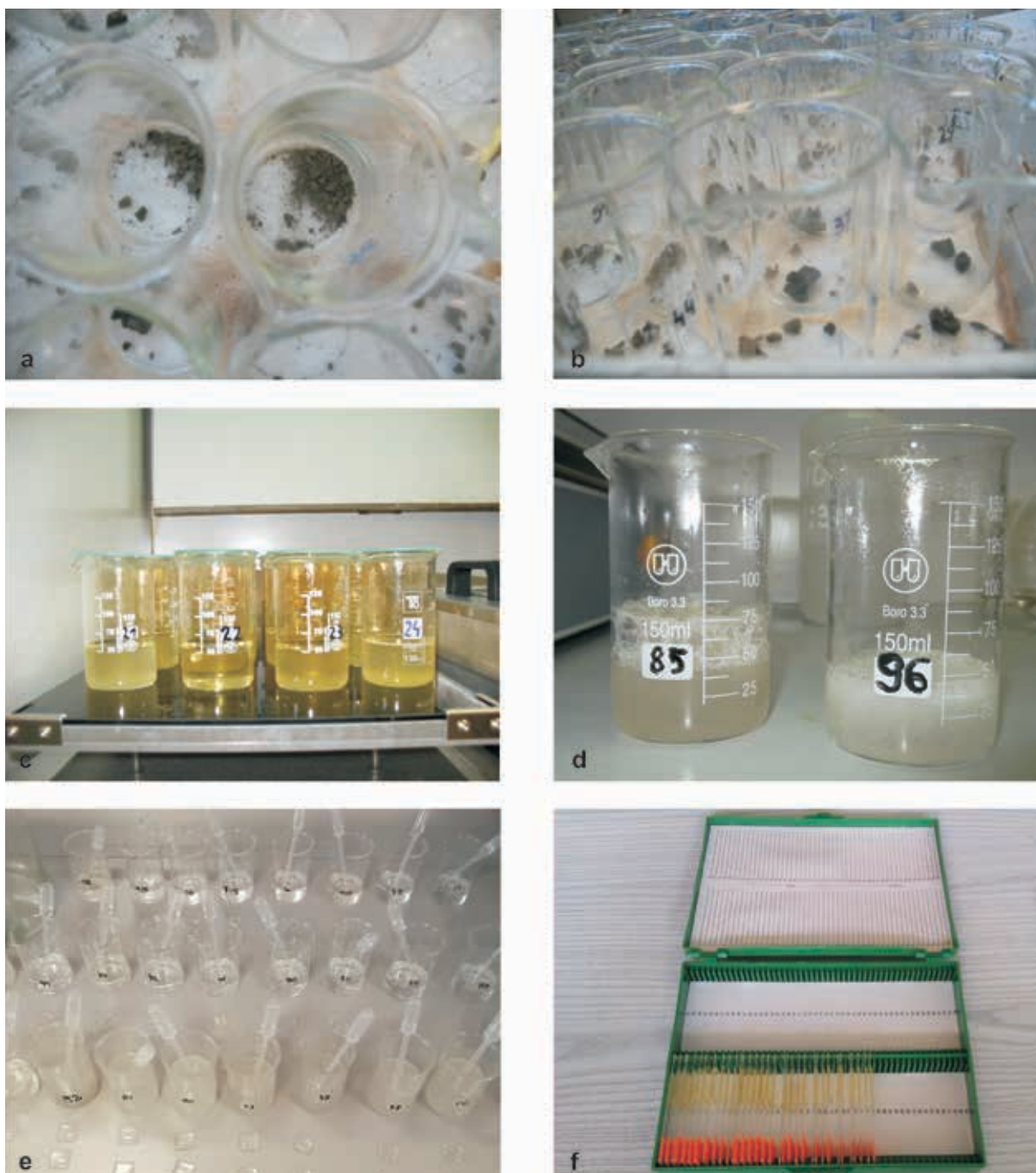
Preparaty do mikroskopu skaningowego przygotowuje się z tego samego oczyszczonego materiału (zawiesiny). W zależności od liczebności okryw okrzemkowych w próbce nanosi się od jednej do kilku kropeł zawiesiny na stoliczek pokryty warstwą przewodzącą, np. węglowym plasterkiem, suszy się w temperaturze pokojowej lub przy użyciu suszarki. Następnie wysuszoną próbkę napyla się złotem lub palladem (w zależności od typu mikroskopu skaningowego, na jakim będziemy oglądać próbkę).

Każdy preparat mikroskopowy musi być natychmiast po sporządzeniu zaopatrzony w etykietę z krótko podanymi najważniejszymi danymi dotyczącymi miejsca i daty dokonania zbioru, numeru próbki.

Oczyszczony materiał przechowuje się w probówkach lub innych pojemnikach w wodzie destylowanej z dodatkiem etanolu, w stężeniu wystarczająco wysokim, aby zapobiec rozwojowi bakterii i grzybów, jak również rozpuszczeniu krzemionki.

Zaleca się stosowanie alkoholu, ponieważ formalina powoduje korozję najdelikatniejszych elementów okryw (Pliński i Witkowski 2009: 37; Taylor i in. 2007: 25).

Próbki pobrane z fragmentów ceramiki czy cegieł poddaje się podobnym procedurom separacji okryw okrzemkowych, przy czym różnica polega na długotrwałym moczeniu (nawet do kilku tygodni) w kwasie solnym, aż do całkowitego ich rozpuszczenia. Należy unikać mechanicznego rozdrabniania ceramiki, gdyż istnieje duże prawdopodobieństwo zniszczenia zawartych w nich okryw okrzemkowych, co może uniemożliwić ich identyfikację.



**Ryc. 10.** Etapy przygotowania preparatów okrzemkowych, (a, b) przygotowanie odpowiedniej naważki, (c, d) spalanie materii organicznej, (e) nakrapianie zawiesiny na szkiełka nakrywkowe, (f) gotowe do analiz preparaty mikroskopowe. Fot. M. Rzodkiewicz

## OZNACZANIE TAKSONÓW OKRZEMEK

Okrzemki powinny być identyfikowane przy wykorzystaniu preparatów trwałych, przeglądanych pod powiększeniem co najmniej 1000×, a więc z użyciem obiektywu immersyjnego, tzn. specjalnego obiektywu do oglądania preparatów z użyciem olejku immersyjnego. Zastosowanie olejku immersyjnego powoduje zwiększenie zdolności rozdzielczej mikroskopu. Takie warunki analizy pozwalają na prawidłowe rozpoznanie cech budowy ściany komórkowej (okrywy), niezbędnych do oznaczenia taksonów okrzemek. Niezbędne jest również mierzenie komórek, w przypadku okrzemek z rzędu *Centrales* wykonuje się pomiar średnicy okrywy, a dla przedstawicieli *Pennales* zazwyczaj długość i szerokość. Dodatkowymi cechami metrycznymi jest liczba elementów ornamentacji okrywy, przeliczana najczęściej na odcinek 10 µm (prążki, punkty, lineale, areole itp.). Dlatego konieczne jest wyliczenie wartości mikrometrycznych dla każdego używanego obiektywu i okularów konkretnego mikroskopu lub stosowanie kamery i odpowiedniego programu analizy obrazu (Battarbee 1986: 527-570; Battarbee i in. 2001: 155-202).

Przy identyfikacji poszczególnych okryw okrzemkowych stosujemy opracowania w formie kluczy (m.in. Krammer i Lange-Bertalot 2011; 2010; 2008a; 2008b; Krammer 2002; Lange-Bertalot 1999; Lange-Bertalot i in. 2011; Lange-Bertalot, Genkal 1999; Lange-Bertalot i Krammer 1987; Lange-Bertalot i Metzeltin 1996).

Niezwykle istotne w badaniach diatomologicznych a zwłaszcza w kontekście rozkładu geograficznego (biogeografii), bioróżnorodności czy taksonomii okrzemek, są kolekcje porównawcze. Jedną z największych w Polsce znajduje się na Uniwersytecie Szczecińskim. Szczecin Diatom Culture Collection (SZCZ) powstała w 2013 roku w Zakładzie Paleoceanologii (Wydział Nauk O Ziemi, US) pod kierownictwem prof. dr. hab. Andrzeja Witkowskiego oraz członków jego zespołu badawczego. Kolekcja składa się z ponad 1800 szczepów okrzemek gromadzonych od 1990 roku i stale się powiększa. Zdecydowana większość wyizolowanych szczepów to gatunki bentosowe pochodzące ze strefy litoralnej rozmaitych miejsc, w szczególności jednak wybrzeży Oceanu Atlantyckiego i Indyjskiego i ich mórz marginalnych oraz zachodniego Pacyfiku ([\[geocentrum.usz.edu.pl/szczecin-diatom-culture-collection-szcz/\]\(http://geocentrum.usz.edu.pl/szczecin-diatom-culture-collection-szcz/\)\).](http://</a></p>
</div>
<div data-bbox=)

Wśród Europejskich kolekcji okrzemkowych należy wymienić najstarsze i największe z nich; są to:

- kolekcja The Natural History Museum w Londynie. Jest to największa i najstarsza kolekcja na świecie, zawiera ponad 300 000 okazów zgromadzonych od początku XIX w. do dzisiaj, (<https://www.nhm.ac.uk/our-science/collections/botany-collections/diatom-collections.html>);
- kolekcja Natural History Museum of Denmark. Kolekcja liczy około 400 000 gatunków obejmujących wszystkie grupy taksonomiczne glonów z różnych części świata. Kolekcja skupia się na makroglonach, a wśród mikroalg na okrzemkach z bardziej ograniczonymi kolekcjami innych grup mikroalg. Znajdują się tam okazy z niemal całej Danii oraz z Grenlandii, Islandii, Wysp Owczych, Wysp Kanaryjskich, Indii Zachodnich i Skandynawii (<https://samlinger.snm.ku.dk/en/dry-and-wet-collections/botany/algal-herbarium/>);
- kolekcja Hustedt Diatom Collection (przedtem Hustedt Arbeitsplatz für Diatomeenkunde), która znajduje się w Alfred-Wegener Institute Helmholtz-Zentrum für Polar und Meeresforschung, Bremerhaven. Jest to największa prywatna kolekcja i biblioteka Friedricha Hustedta przekazana Instytutowi w latach 60. XX w. Większa część kolekcji to owoce pracy Friedricha Hustedta. Pozostawił ponad 60 000 preparatów mikroskopowych i ponad 20 000 próbek materiału (suszonego lub na glicerynie). Zielnik Hustedta jest stale powiększany i obejmuje zbiory dr. Reimera Simonsena, dr. Dietricha Königa, prof. dr. Grethe Hasle oraz indywidualne preparaty innych pracowników. Kolekcja rozrosła się do ponad 100 000 slajdów i 50 000 próbek materiałów wraz z aktualną biblioteką (<https://www.awi.de/en/science/biosciences/polar-biological-oceanography/main-research-focus/hustedt-diatom-study-centre/diatom-collection.html>);
- kolekcja Royal Botanic Garden w Edynburgu. Okazy gromadzone są od 1850 r. i obecnie zbiory obejmują około 50 000 preparatów. Kolekcja pochodzi głównie z Wielkiej Brytanii, ze znaczącymi zbiorami z Europy, Azji i innych krajów (<https://www.rbge.org.uk/science-and-conservation/herbarium/our-collections/diatoms/>).



## ZASTOSOWANIE ANALIZY OKRZEMKOWEJ DO OKREŚLENIA POCHODZENIA GLINY I CERAMIKI

Analizę okrzemkową w badaniach archeologicznych z powodzeniem stosuje się od ponad 70 lat. Bezpośrednie jej zastosowanie najlepiej widoczne jest w badaniach artefaktów archeologicznych (m.in. ceramiki), ponieważ okrywy okrzemkowe nie ulegają zniszczeniu w procesie wypalania gliny (Juggins i Cameron, 2010: 514-522; Ognjanova-Rumenova 2008: 291-294). Zatem analiza okrzemkowa oferuje nową i potencjalnie skuteczną metodę identyfikacji źródeł gliny, jak również ustalenia pochodzenia gotowej ceramiki (Alhonen i in. 1980: 193-206; Jansma 1990: 301-309; 1984: 529-536; 1982: 229-236; 1981: 145-162; 1977: 77-85). Niestety metoda ta nie jest do końca pozbawiona wad z kilku powodów. Koncentracja okrzemek w ceramice może być bardzo niska, a okrywy słabo zachowane (Håkansson, Hulthén 1988: 39-45; 1986: 34-38; Ognjanova-Rumenova 2008: 291-294). Ponadto okrzemki mogą pochodzić z innych źródeł, a nie z samej gliny (Alhonen i Matiskainen 1980: 45-62; Gibson 1986: 129-143). Jednak głównym ograniczeniem tej metody jest brak jednoznacznego powiązania ceramiki ze złożem gliny. Do pełnej interpretacji wyników analizy okrzemkowej konieczna będzie znajomość składu okrzemkowego glin źródłowych (Juggins i Cameron 2010: 514; Ognjanova-Rumenova 2008: 293). Gdy takie informacje zostaną uzyskane, analiza wyrobów ceramicznych pod względem zawartości okrzemek będzie stanowić wielką pomoc przy interpretacji archeologicznej w kwestiach typologii, technologii i dróg transportu (Alhonen i in. 1980: 193-206), wyboru surowca (Alhonen i Matiskainen 1980: 147-157; Gibson 1986: 129-143; Jansma 1981: 145-162; Matiskainen i Alhonen 1984: 147-157), autochtonicznych składowych artefaktów archeologicznych (VanLandingham 2006: 101-116), przemieszczania i handlu surowcami lub towarami przemysłowymi (Alhonen i Väkeväinen 1981: 67-77; Jansma 1990: 301-309; 1977: 77-85).

Analizy okrzemkowe mogą również dostarczać dowodów na temat kontaktów między społecznościami prehistorycznymi oraz ich wędrówek (Alhonen i Väkeväinen 1981: 67-77). Wyroby garncarskie ze stanowisk położonych w głębi lądu zawierające okrzemki morskie mogą dostarczać

dowodów na transport i handel z rejonów nadmorskich. Ponadto analiza okrzemkowa ceramiki w połączeniu z wiedzą na temat regionalnej stratygrafii może posłużyć do wykazania, że glina lub wyroby ceramiczne były importowane na wyspy lub obszary przybrzeżne z kontynentu lub z głębi lądu. Interesującego przykładu odtwarzania dróg transportu i handlu naczyniami garncarskimi dostarczyły badania stanowiska subneolitycznego na Wyspach Ålandzkich na Morzu Bałtyckim. W głębi lądu natrafiono na wyroby ceramiczne wykonane z gliny zawierającej okrzemki słodkowodne typowe dla słodkowodnego Jeziora Ancylusowego, które zajmowało basen Bałtyku przed transgresją litorynową (Alhonen i Väkeväinen 1981: 67-77; Matiskainen i Alhonen 1984: 147-157). Na Wyspach Ålandzkich gliny Ancylusowe nie występują, w związku z tym albo gotowa ceramika, albo surowiec były importowane z lądu. Ponadto obecność naczyń o podobnym stylu i koncentracji okrzemek zidentyfikowano w osadach mułkowych z okolic Turku w południowej Finlandii, co sugeruje możliwy obszar pochodzenia gliny na kontynencie fińskim.

Oprócz analizy artefaktów archeologicznych analiza okrzemkowa może posłużyć również do identyfikacji źródła starożytnych materiałów budowlanych. Na przykład Flower (2006: 245-263) przeanalizował skład okrzemkowy próbek z cegieł błotnych użytych do budowy starożytnej egipskiej świątyni w Dimai w dolinie Nilu, datowanej na około 5000 lat p.n.e. Porównanie wyników analizy okrzemkowej z lokalnymi osadami ujawniło, że cegły były wykonane z ziemi okrzemkowej, która nagromadziła się w pobliskim dużym, płytkim jeziorze.

## STANOWISKA ARCHEOLOGICZNE – ANALIZA OSADÓW

Wiedza o pochodzeniu, stratygrafii i środowisku depozycyjnym osadów ma fundamentalne znaczenie dla archeologa w przypadku późniejszych analiz. Pierwotne lub położone *in situ* osady zawierają florę okrzemkową charakterystyczną dla warunków, jakie panowały w trakcie akumulacji osadów, i stosunkowo łatwo jest ten skład odróżnić od warunków czy osadów wtórnych lub przerobionych. Zatem analizy okrzemkowe mogą posłużyć do identyfikacji pochodzenia osadów, jak również charakterystyki

lokalnych środowisk depozycyjnych. Na przykład gdy na badanym stanowisku nie zaistniała możliwość bezpośredniej akumulacji osadów morskich lub erozji osadów starszych, to obecność taksonów morskich może stanowić dowód różnej działalności gospodarczej człowieka, takie jak solanki (Juggins 1992b: 4-5), zbieranie i wykorzystywanie skorupiaków (Denys 1992: 195-197) lub formowanie mat z alg (Foged 1985: 471-482).

Okrzemki słone lub słonawe stanowią dowód istnienia osadów powodziowych na obszarach przybrzeżnych, natomiast różnice w proporcjach allochtonicznych taksonów morskich można wykorzystać do wnioskowania o intensywności wezbrań sztoromowych, powodzi czy fal typu tsunami (Piotrowski 2007a: 77-78; 2007b: 58-60; Piotrowski i in. 2017: 973-986; 2015: 415; Piotrowski i Gałczyńska 2003: 9-19; Szczuciński 2008: 119-125), co z kolei mogło powodować opuszczanie terenów zamieszkania (Cameron 2013: 516-521; Jansma 1990: 301-309; 1982: 229-236; 1981: 145-162).

Dobrze ilustruje to zastosowanie analizy okrzemkowej do identyfikacji epizodów zalewowych na południowym wybrzeżu Waszyngtonu (USA) w czasach prehistorycznych (Cole i in. 1996: 165-177). Badania prowadzono na kilku stanowiskach archeologicznych zlokalizowanych wzdłuż wybrzeża. Horyzonty zdarzeń datuje się na okres od 1000 do 1700 n.e., próbki znaleziono w warstwie gleby leśnej, przykrytej cienką warstwą piasku oraz około 1 m warstwą osadu morskiego. Obecność okrzemek morskich i brakicznych (słonawowodnych) w osadach piaszczystych została uznana za osady typu tsunami (Hemphill-Haley 1996: 439-448), podczas gdy okrzemki w osadach powyżej sugerują akumulację osadów brakicznych po zalaniu terenu (Hemphill-Haley 1995: 367-378). Dowody na zalewanie tych terenów przez tsunami około 300 lat temu sugerują, że wiele miejsc w obecnej strefie pływów leży pogrzebanych i pomaga wyjaśnić brak pozostałości archeologicznych na obszarze, który był zamieszkiwany przez stosunkowo dużą populację tubylców we wczesnych czasach historycznych.

Winsborough i in. (2012: 602-614) podają inny, bardziej bezpośredni przykład katastrofalnych powodzi, które wpłynęły na osadę Pachacamac z wybrzeża Peru. Przebadane zostały rdzenie osadów pobranych wzdłuż wybrzeża laguny Urpi Kocha. W badaniach oprócz okrzemek zostały użyte też

inne wskaźniki biologiczne, jak pyłek i makrofity. Wyniki analiz dostarczyły dowodów na cztery katastrofalne powodzie występujące naprzemiennie z poważnymi suszami na wyżynach Andów w ciągu ostatnich 2000 lat.

Analizy okrzemkowe osadów jeziornych są wykorzystywane do badania wpływu społeczności ludzkich na środowisko, zwłaszcza na jakość wody (eutrofizację kulturową) (Douglas i in. 2004: 1613-1617; Fritz 1989: 182-202; Gillson i Ekblom 2009: 171-185; Haworth 1985: 60-79; Mannion 1987: 131-147; Miller i in. 2004: 287-298; Renberg i in. 2001: 496-502; Whitmore i in. 1996: 273-287). Ponadto mogą ujawniać wpływ mieszkańców na zanieczyszczenie lokalnych zbiorników wodnych przylegających do stanowisk archeologicznych lub znajdujących się w ich obrębie (Beneš i in. 2002: 107-120; de Wolf i Cleveringa 1996: 496-502; Ekdahl i in. 2007: 233-246; 2004: 745-748; Keevill 2004: 315).

Analiza okrzemkowa osadów archeologicznych może również pomóc w interpretacji funkcji różnych struktur archeologicznych. Na przykład Godbold i Turner (1993) zidentyfikowali okrzemki morskie w strukturach ujścia rzeki Severn w Wielkiej Brytanii, co pomogło w określeniu funkcji tych struktur. Wyniki badań pozwoliły wywnioskować, że wykorzystywane były jako pułapki na ryby. Natomiast obecność taksonów słodkowodnych struktury podobnej do dołu w Tehuacan Valley of Puebla w Meksyku pozwoliła na zidentyfikowanie tych struktur jako studni słodkowodnej (Neely i in. 1995: 38-40).

## REKONSTRUKCJE PALEOŚRODOWISKOWE

Znajomość lokalnego środowiska obszaru badań jest niezbędna, aby zrozumieć jego funkcję społeczno-gospodarczą. Szczególnie ujścia rzek są bogate w pozostałości archeologiczne. Mokradła i ujścia rzek mają bogate zasoby naturalne, a ich żeglowne wody zapewniły szlaki dla kupców i najeźdźców, zachęcając do rozwoju handlu i osadnictwa obronnego. Wiele miast świata rozwinęło się w ujściach rzek ze względu na ich znaczenie jako portów. Historyczny i prehistoryczny rozwój tych osad jest więc ściśle powiązany ze zmieniającymi się środowiskami ujść rzek, a analiza okrzemek może stanowić potężne narzędzie do badania powiązań między

morzem, szlakami żeglugowymi i handlowymi oraz ekonomiczną i militarną funkcją brzegów i nadbrzeży miejskich. Przykładem może być analiza okrzemkowa wykorzystana do rekonstrukcji środowiska osadowego wraków statków lub innych izolowanych struktur i artefaktów w celu zrekonstruowania lokalnych zmian poziomu morza na obszarach przylegających do estuariów (Battarbee i in. 1985: 111-120; Cameron 1997: 117-128; Clark 2004: 340; Foged 1973: 39-45; Marsden i in. 1989: 89-111; Miller 1995: 5-58; Miller i Robertsson 1981: 167-173; Nayling i McGrail 2004: 350; Wilkinson i in. 1988: 213-238) lub zmiany jakości wody w rzece i wpływu pływów na obszary miejskie (Demiddele i Ervynck 1993: 217-231; Juggins 1992a: 216).

Szczególnie dobry przykład pochodzi z badań nad Tamizą w centrum Londynu (Juggins 1992a: 216; Milne i in. 1983: 19-30). Tamiza jest teraz przepływem do Teddington Weir, 30 km nad City of London, ale istnienie pozostałości rzymskich 4 m poniżej obecnego poziomu przypływu doprowadziło archeologów do przypuszczenia, że we wczesnym okresie rzymskim w centrum Londynu rzeka była bez wody (I w. n. e.; Willcox 1975: 185-192). W obrębie miasta przedrzymski brzeg leży teraz około 100 m na północ od obecnego brzegu rzeki, a pozioma stratygrafia drewnianych i kamiennych nabrzeży i umocnień brzegowych obejmująca ostatnie 2000 lat jest zachowana pod nowoczesnym nabrzeżem. Wstępna analiza okrzemek osadów przybrzeżnych związanych z częścią I w. n.e. na stanowisku Pudding Lane wykazała dominację planktonicznej *Cyclotella striata* (Kützing) Grunow in Cleve & Grunow, gatunku powszechnego w dzisiejszych czasach dla wód słonawych. Ten takson, wraz z wieloma formami morskimi, dowodzi, że wbrew powszechnemu przekonaniu rzeka płynęła w środkowej części Londynu we wczesnym okresie rzymskim (Milne i in. 1983: 19-30). Zbadano również próbki przybrzeżne z I do XII wieku naszej ery i zastosowano rekonstrukcje zasolenia przy użyciu funkcji transferu (Juggins 1992b: 216). Wyniki wskazują na początkowy gwałtowny wzrost średniego zasolenia między I a II w. n.e., po którym następuje bardziej stopniowy wzrost od IX do XII w. Porównanie zrekonstruowanego paleozasolenia ze zmianami w zakresie pływów sugeruje, że wzrost zasolenia między I a XII w. był przede wszystkim wynikiem względnego wzrostu poziomu morza.

## WYBRANE PRZYKŁADY ZASTOSOWANIA ANALIZY OKRZEMKOWEJ W BADANIACH ARCHEOLOGICZNYCH Z OBSZARU POLSKI

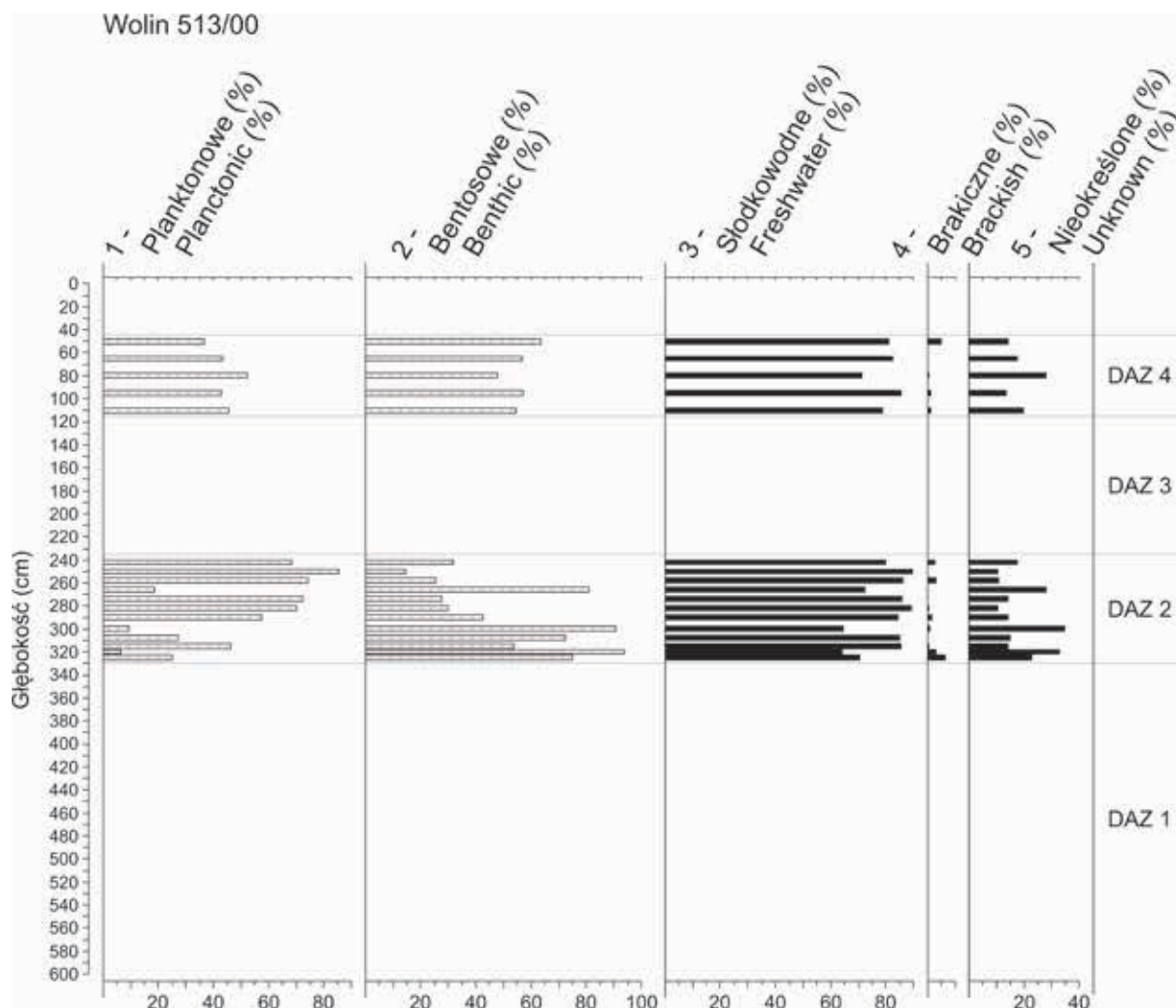
Zastosowanie analizy okrzemkowej przez archeologów w ostatnim czasie nabiera coraz większego znaczenia. Badania Bogaczewicz-Adamczak i in. (1987) na Pojezierzu Kaszubskim (Kępa Ostrowska) umożliwiły rekonstrukcję zmian środowiskowych, jakim podlegał region badań. Analizy okrzemkowe przeprowadzono na stanowiskach archeologicznych obejmujących osadnictwo mezolityczne i neolityczne, na terenie Kępy Ostrowskiej i Błot Karwieńskich. Wyniki analizy wykazały powstanie w wyniku transgresji, w okresie subborealnym, jeziora przymorskiego. Odcięte od otwartego morza mierzeją uległo następnie przekształceniu w torfowisko. W ostatniej fazie zaobserwowano rozwój procesów eolicznych, w rezultacie których utworzyły się wydmy. Wyniki analizy okrzemkowej pozwoliły wykazać wzrost poziomu wody, który uznano za przyczynę przemieszczania ludzkich siedlisk.

Kolejnym przykładem są badania prowadzone w rejonie wczesnośredniowiecznego Wolina (Borówka i in. 2014: 25-49). Analiza diatomologiczna wykazała, że w dolinie Dziwny istniał w przeszłości dość rozległy zbiornik jeziorny, w obrębie którego stwierdzono bardzo wyraźne wahania poziomu wody (ryc. 11). Wzrost poziomu wody mógł być spowodowany co najmniej dwoma czynnikami: (1) podniesieniem się poziomu morza u wybrzeży południowego Bałtyku oraz (2) kompaktacją holocenówskich osadów jeziornych zalegających pod torfami, w wyniku obciążenia ciężkimi konstrukcjami drewnianymi znanymi z wykopalisk oraz ich eksploatacją.

Najprawdopodobniej w I. poł. X w. część płaskich obszarów nadbrzeżnych wydawała się atrakcyjna dla ówczesnego budownictwa. Jednak zaraz po ich zajęciu okazało się, że jednoczesny wzrost poziomu wody w Dziwnie oraz obniżanie powierzchni gruntu wskutek osiadania zamieniły obszary przybrzeżne w obszary bagienne, często zalewane w okresach spiętrzeń sztormowych wód w Zatoce Pomorskiej i jednoczesnych wysokich cofek w samej Dziwnie.

W ramach projektu „Rozwój pradziejowych i historycznych systemów osadniczych i gospodarczych a holocenówskie przekształcenia rzeźby na przykładzie Środkowej Obry” (2P04E01630, kierownik prof. UAM dr hab. Iwona Hildebrandt-Radke, UAM Poznań) multidyscyplinarnym analizom



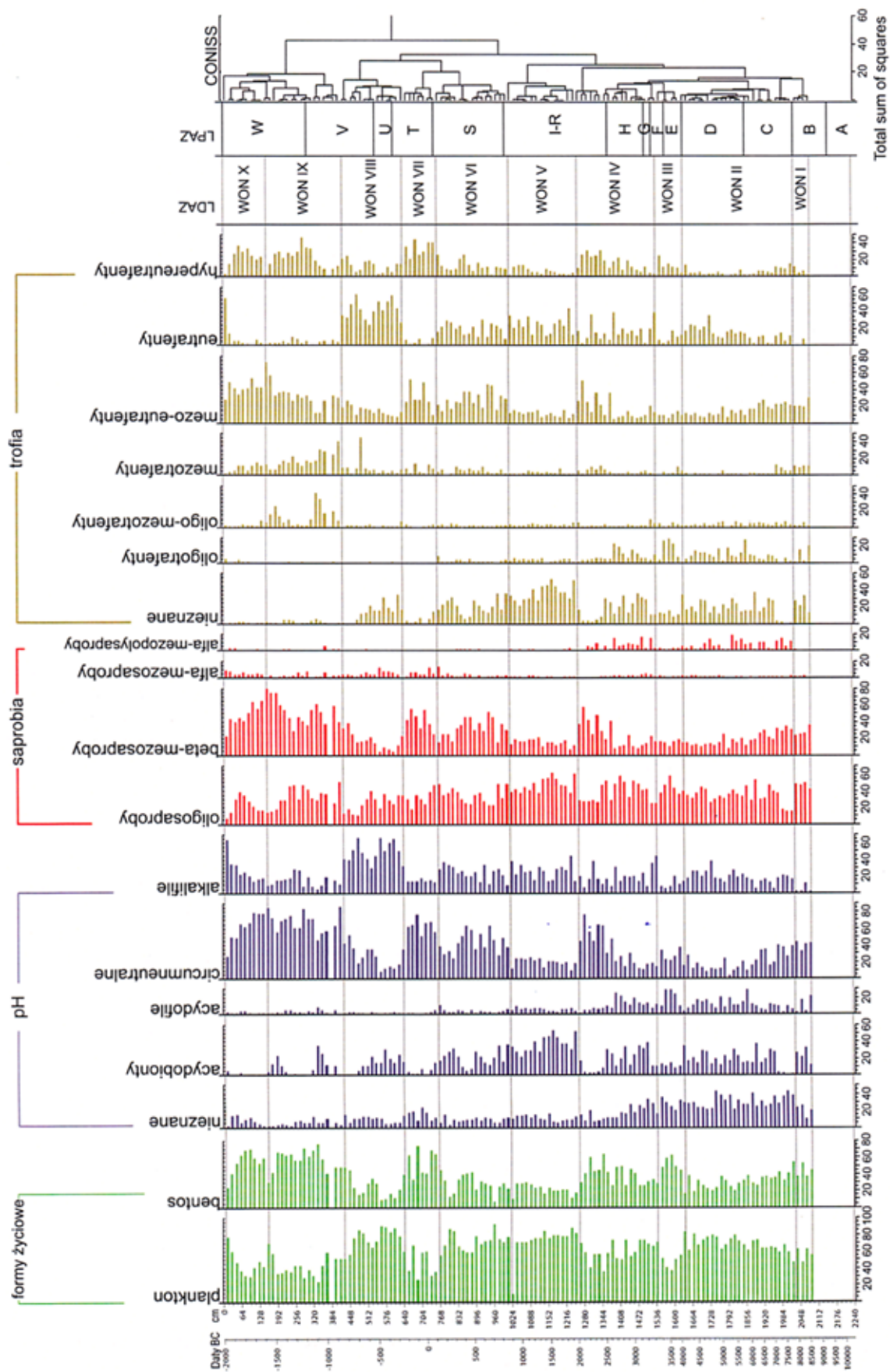


**Ryc. 11.** Stanowisko 513/00 (Wolin) – stratygraficzne zmiany zawartości wybranych grup ekologicznych okrzemek (analiza M. Rzodkiewicz (wcześniej jako Lutyńska) rycina z Borówka i in. 2014: 25-49)

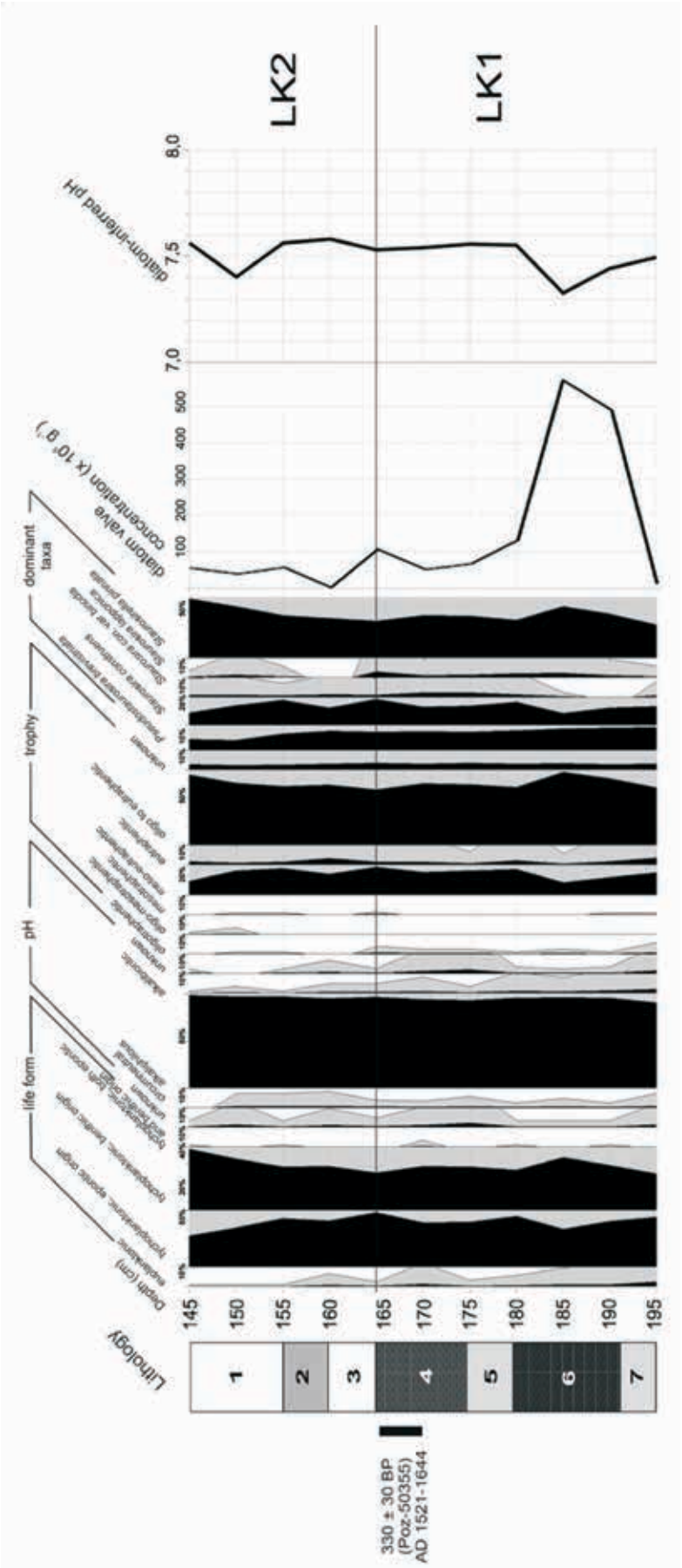
poddane zostały osady ze stanowiska wczesnej epoki brązu – Bruszczewo 5, stanowisko archeologiczne w Kiełczewie nr 45 reprezentujące osadnictwo z neolitu (kultura pucharów lejkowatych) i okresu wpływów rzymskich oraz cmentarzysko kurhanowe z wczesnej epoki brązu w Łękach Małych (Hildebrandt-Radke 2013: 26). Ponadto przebadano osady jeziora Wonieść (Równina Kościańska, Pojezierze Wielkopolskie), aby rozpoznać, jak w skali regionalnej zapisują się antropogeniczne przemiany środowiska. Badania flory okrzemkowej osadów jeziora Wonieść umożliwiło rekonstrukcję rozwoju jeziora. Ponadto rozpoznano okresy o podwyższonej eutrofizacji zbiornika, związanej z działalnością człowieka na tym obszarze (ryc. 12). Zauważono, że wzrost udziału okrzemek eutroficznych przypadał na okresy odlesienia, natomiast spadek zawartości okrzemek eutroficznych na fazy regeneracji

lasów (Dörfler i in. 2009a: 147-150; 2009b: 59-78; Hildebrandt-Radke 2013: 166; Hildebrandt-Radke i in. 2011a: 173-188; 2011b: 92-97).

„Opracowanie materiałów ze stan. 3a-c Lutomiernsk – Koziówki (Polska Centralna)” (1080/11/FPK/NID, kierownik dr hab. Piotr Kittel) dotyczyło wielokulturowego stanowiska archeologicznego datowanego od schyłkowego paleolitu po okres współczesny (Kittel 2012: 58). Multidyscyplinarne badania wykazały istnienie moczdyła z dużą zawartością szczątków makroskopowych i pyłku konopii (*Cannabis*) i lnu (*Linum*). Zbiornik ten był najprawdopodobniej wykorzystywany jako retuszer do produkcji konopii i włókna lnianego. Na podstawie analizy okrzemkowej określono zmiany paleoekologiczne moczdyła oraz wykorzystano funkcję transferu do rekonstrukcji pH zbiornika (ryc. 13) (Kittel i in. 2014: 318-337).

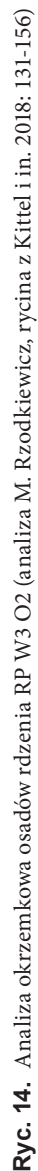


**Ryc. 12.** Formy życiowe okrzemek oraz preferencje pH, saprobii i trofi w składzie okrzemkowym profilu osadów z jeziora Wonieś (analiza M. Rzodkiewicz (wcześniej jako Lutyńska) rycina z Hildebrandt-Radke 2013: 122)

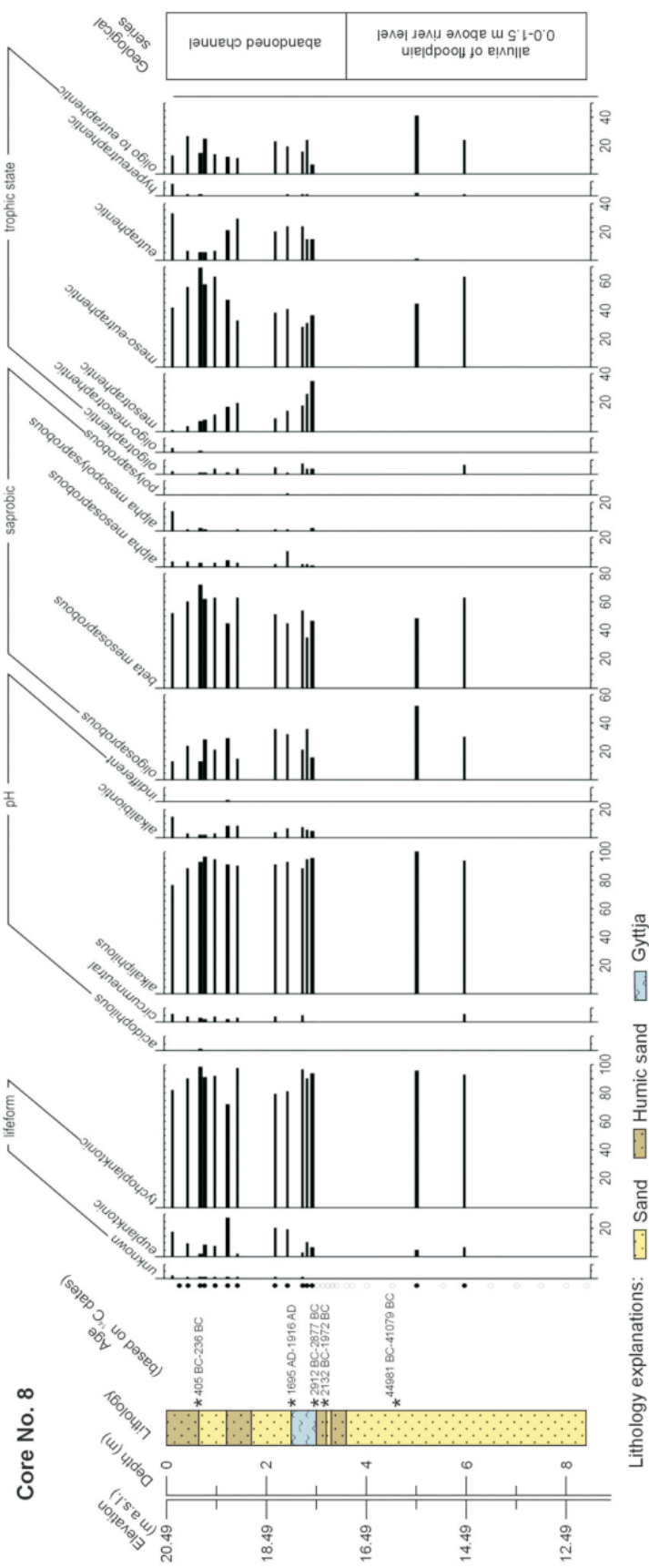


**Ryc. 13.** Analiza okrzemkowa osadów ze stanowiska Lutomiersk-Koziówki wraz z rekonstrukcją pH (analiza M. Rzodkiewicz (wcześniej jako Lutyńska), rycina z Kittel i in. 2014: 318-337)





**Ryc. 14.** Analiza okrzemkowa osadów rdzenia RP W3 O2 (analiza M. Rzodkiewicz, rycina z Kittel i in. 2018: 131-156)



**Ryc. 15.** Analiza okrzemkowa osadów rdzenia nr 8 ze stanowiska wczesnośredniowiecznego w Santoku (analiza M. Rządziejewicz, rycina z Zamelska-Monczak i in. 2021: 978-1008)

Natomiast projekt „Uwarunkowania środowiskowe rozwoju średniowiecznego ośrodka grodowego w Rozprzy w Polsce Środkowej w świetle badań multidyscyplinarnych” (2013/11/B/HS3/03785, kierownik dr hab. Piotr Kittel, UŁ Łódź) dotyczył szczegółowego rozpoznania uwarunkowań środowiskowych lokalizacji wczesnośredniowiecznego grodziska w Rozprzy oraz paleogeografii doliny Łuciąży w późnym holocenie. Analizom okrzemkowym poddano wypełnienia fosy w jej najgłębszym miejscu. Analizy diatomologiczne dowodzą, że w początkowej fazie (XIV-XV w.) fosa stanowiła płytki zbiornik, w którym dominowały okrzemki litoralne. Analiza trofii wykazała wzrost liczebności gatunków charakterystycznych dla wód eutroficznych oraz podwyższony udział taksonów charakterystycznych dla wód mezoeutroficznych (zbiorniki o średniej żyzności i niezbyt dużej ilości substancji biogennych i organicznych) (ryc. 14). Rekonstrukcja pH na bazie funkcji transferu wykazała, że sedymentacja osadów w badanej fosie zachodziła w środowisku o podwyższonym pH (Kittel i in. 2018: 131-156).

Kolejnym przykładem jest wykorzystanie analizy okrzemkowej w celu zidentyfikowania okresów powodziowych na obszarze wczesnośredniowiecznego grodziska w Santoku (Zamelska-Monczak i in. 2021: 978-1008; Rzodkiewicz i in. 2018a: 1128-1129; 2018b: 34). Badania realizowane były w ramach projektu badawczego „Warunki przyrodnicze i charakter antropopresji pogranicza geograficznego Wielkopolski i Pomorza we wczesnym średniowieczu w świetle badań geoarcheologicznych grodziska w Santoku i jego zaplecza” (NCN 2015/18/E/HS3/00425, kierownik dr Kinga Monczak-Zamelska z Instytutu Archeologii i Etnologii PAN), którego celem było rozpoznanie warunków naturalnych oraz charakteru i skali antropopresji we wczesnym średniowieczu na obszarze pogranicza Wielkopolski i Pomorza, w dolinie Warty-Noteci, na bazie materiałów z grodziska w Santoku (woj. lubuskie) (ryc. 15).

## WNIOSKI

Pomimo znacznego potencjału analizy okrzemkowej w badaniach archeologicznych jest to wciąż metoda niedostatecznie wykorzystywana i przez wielu archeologów słabo rozumiana. Powyższe przykłady ilustrują trend, w którym diatomolodzy coraz bardziej angażują się w badania archeologiczne. Taka współpraca przynosi korzyści w najnowszych badaniach

archeologicznych, ponieważ dostarcza informacji o środowisku geograficznym dawnych społeczności i ułatwia interpretację złożonych relacji między kulturą i środowiskiem. Ponadto pomaga zrozumieć, w jaki sposób dawne społeczności współdziałały przestrzennie, ekonomicznie, społecznie i kulturowo wraz z ich środowiskiem geograficznym.

W większości opublikowanych badań wykorzystano analizę okrzemek w celu uzyskania informacji o lokalnych i regionalnych paleośrodowiskach oraz do zidentyfikowania czynników środowiskowych, które wpłynęły na wzorce lokalizacji i organizacji osadnictwa. Analizy okrzemkowe możemy wykorzystać również do ustalenia pochodzenia zabytków archeologicznych (jak ceramika) czy zrozumienia funkcji różnych struktur archeologicznych (np. studnia). Ponadto mogą posłużyć do rekonstrukcji zmian poziomu morza, klimatu czy jakości wody, które również są istotne dla badań archeologicznych.

## FINANSOWANIE

Przykłady zastosowania analizy okrzemkowej z obszaru Polski zostały sfinansowane w ramach:

- projektu MNiSW 2P04E01630 „Rozwój pradziejowych i historycznych systemów osadniczych i gospodarczych a holocenijskie przekształcenia rzeźby na przykładzie Środkowej Obry” – kierownik prof. UAM dr hab. Iwona Hildebrandt-Radke (UAM Poznań);
- projektu „Opracowanie materiałów ze stan. 3a-c Lutomiersk – Koziówki” dofinansowanego ze środków Ministra Kultury i Dziedzictwa Narodowego z Funduszu Promocji Kultury w ramach programu Dziedzictwo Kulturowe, priorytet V „Ochrona zabytków archeologicznych” na podstawie umowy nr 1080/11/FPK/NID;
- projektu 2013/11/B/HS3/03785 „Uwarunkowania środowiskowe rozwoju średniowiecznego ośrodka grodowego w Rozprzy w Polsce Środkowej w świetle badań multidyscyplinarnych” – kierownik dr hab. Piotr Kittel (UŁ Łódź);
- projektu NCN 2015/18/E/HS3/00425 „Warunki przyrodnicze i charakter antropopresji pogranicza geograficznego Wielkopolski i Pomorza we wczesnym średniowieczu w świetle badań geoarcheologicznych grodziska w Santoku i jego zaplecza”; kierownik dr Kinga Monczak-Zamelska (Instytut Archeologii i Etnologii PAN).



## LITERATURA

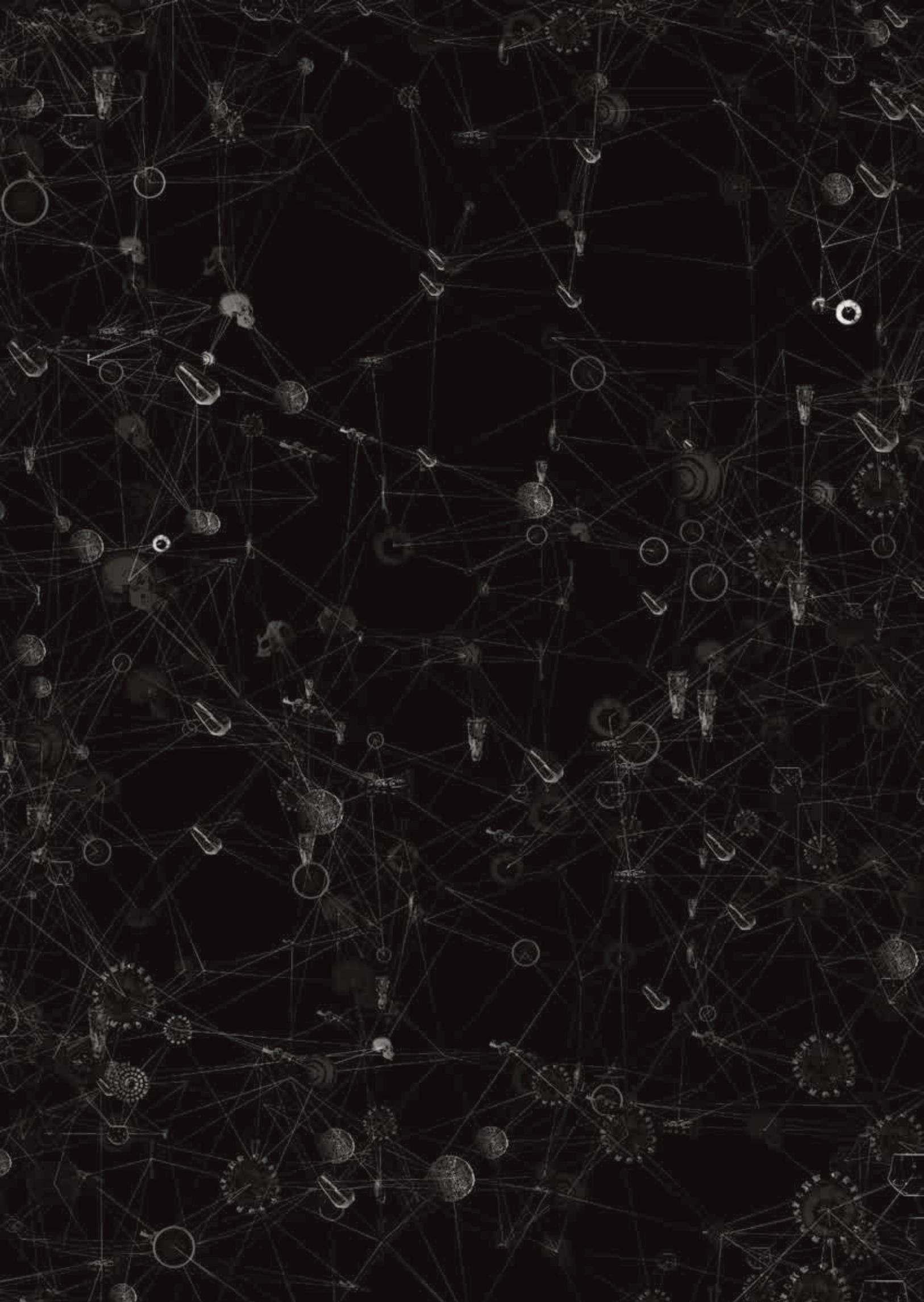
- Alhonen, P., Kokkonen, J., MatisKainen, H., Vuorinen, A. 1980. Applications of AAS, diatom analysis and stylistic studies on Finnish Subneolithic pottery. *Bulletin of the Geological Society of Finland* 52: 193–206.
- Alhonen, P., MatisKainen, H. 1980. Diatom analysis from prehistoric pottery sherds – an archaeological evaluation. *Proceedings of the Nordic Meeting of Diatomologists, Lammi Biological Station, Finland, May 6–7*.
- Alhonen, P., Väkeväinen, L. 1981. Diatom-analytical studies of early comb ceramic vessels in Åland. *Eripainos Suomen Museo*, 67–77.
- Anderson, N.J. 1997. Historical changes in epilimnetic phosphorus concentrations in six rural lakes in Northern Ireland. *Freshwater Biology* 38: 427–440.
- Andrén, E. 1999. Changes in the Composition of the Diatom Flora During the Last Century Indicate Increased Eutrophication of the Oder Estuary, South-western Baltic Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 48: 665–676.
- Bąk, M., Witkowski, A., Kierzek, A., Zamelczyk, K. 2007. Wykorzystanie badań diatomologicznych w archeologii, (w:) M. Makohonienko D. Makowiecki, Z. Kurnatowska (red.), *Środowisko-Człowiek-Cywilizacja, tom 1*, Poznań, 233–243.
- Bąk, M., Witkowski, A., Żelazna-Wieczorek, J., Wojtal, A.Z., Szczepocka, E., Szulc, K., Szulc, B. 2012. Klucz do oznaczania okrzemek w fitobentosie na potrzeby oceny stanu ekologicznego wód powierzchniowych w Polsce. *Biblioteka Monitoringu Środowiska*. Warszawa, 9–12.
- Battarbee, R.W. 1986. Diatom analysis, (w:) B.E. Berglund (red.), *Handbook of Holocene paleoecology and paleohydrology*. London, 527–570.
- Battarbee, R.W. 1988. The use of diatoms analysis in archeology: a review. *Journal of Archaeological Science* 15: 621–644.
- Battarbee, R.W., Jones, V.J., Flower, R.J., Cameron, N.G., Bennion, H., Carvalho, L., Juggins, S. 2001. Diatoms, (w:) J.P. Smol, H.J.B. Birks, W.M. Last (red.), *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Vol. 3, Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators*. Dordrecht, 155–202.
- Battarbee, R.W., Scaife, R.G., Phetean, S.J. 1985. Palaeoecological evidence for sea-level change in the Bann estuary in the early mesolithic period, (w:) P.C. Woodman (red.), *Excavations at Mount Sandel 1973–78*. Belfast, 111–120.
- Beneš, J., Kaštovský, J., Kočárová, R., Kočár, P., Kubečková, K., Pokorný, P., Starec, P. 2002. Archaeobotany of the Old Prague Town defence system, Czech Republic: archaeology, macro-remains, pollen, and diatoms. *Vegetation History and Archaeobotany* 11: 107–120.
- Bennion, H., Juggins, S., Anderson, N. 1996. Predicting epilimnetic phosphorus concentrations using an improved diatom-based transfer function, and its application to lake eutrophication management. *Environmental Science and Technology* 30: 2004–2007.
- Birks, H.J.B., Line, J.M., Juggins, S., Stevenson, A.C., ter Braak, C.J.F. 1990. Diatoms and pH Reconstruction. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences* 327: 263–278.
- Bogaczewicz-Adamczak, B., Drwal, J., Gołębiowski, R., Król, D., Miotk, G. 1987. Studia archeologiczno-paleogeograficzne Kępy Ostrowskiej na Pobrzeżu Kaszubskim. *Przegląd Archeologiczny* 34: 49–81.
- Borówka, R. K., Witkowski, A., Lutyńska, M., Tomkowiak, J., Kowalczyk, K., Duda, T., Wozniński, R. 2014. Przemiany środowiska przyrodniczego okolic Wolina podczas holocenu, ze szczególnym uwzględnieniem okresu wczesnego średniowiecza [en. Changes in the natural environment around Wolin during the Holocene, with particular focus on the early Middle Ages], (w:) B. Stanisławski i W. Filipowiak (red.), *Wolin Wczesnośredniowieczny. Część 2*. Warszawa, 25–49.
- Cameron, N.G. 1997. The diatom evidence, (w:) N. Nayling, A. Caseldine (red.), *Excavations at Caldicot, Gwent: Bronze Age Palaeochannels in the Lower Nedern Valley*, Council for British Archaeology Research, Report 108: 117–128.
- Cameron, N.G. 2013. Diatom methods. Use in archeology, (w:) S. A. Elias (red.), *Encyclopedia of Quaternary Science (2nd edition)*. Netherlands, UK, USA, 516–521.
- Clark, P. 2004. *The Dover Bronze Age Boat*, London.
- Cole, S.C., Atwater, B.F., McCutcheon, P.T., Stein, J.K., Hemphill-Haley, E. 1996. Earthquake-induced burial of archaeological sites along the southern Washington coast about A.D. 1700. *Geoarchaeology* 11: 165–177.
- Cox, E.J. 1991. What is the basis for using diatoms as monitors of river quality?, (w:) B.A. Witton E. Rott, G. Friedrich (red.), *Use of algae in monitoring rivers*. Düsseldorf, 33–39.
- Demiddele, H., Eryvynck, A. 1993. Diatomeen als ecologische indicatoren in de Vlaamse archeologie: Romeins en middeleeuws Oudenburg (prov. West-Vlaanderen). *Archeologie in Vlaanderen* 3: 217–231.
- Denys, L. 1992. On the significance of marine diatoms in freshwater deposits at archaeological sites. *Diatom Research* 7: 195–197.
- Dörfler, W., Hildebrandt-Radke, I., Spychalski, W., Lutyńska, M. 2009a. Osady jeziora Wonieść jako źródło informacji o regionalnym użytkowaniu terenu w pradziejach i czasach historycznych w dorzeczu środkowej Obry. *Zapis działalności człowieka w środowisku przyrodniczym*, Vol. 6., 147–150.
- Dörfler, W., Hildebrandt-Radke, I., Spychalski, W., Lutyńska, M. 2009b. Zapis palinologiczny, litologiczny, geochemiczny i diatomologiczny regionalnych zmian użytkowania terenu w osadach Jeziora Wonieść (Pojezierze Wielkopolskie. *Geneza, litologia i stratygrafia utworów czwartorzędowych V*, Seria Geografia (88). Poznań, 59–78.
- Douglas, M.S.V., Smol, J.P., Savelle, J.M. i Blais, J.M. 2004. Prehistoric Inuit whalers affected Arctic freshwater ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 101: 1613–1617.

- Ekdahl, E.J., Teranes, J.L., Guilderson, T.P., Turton, C.L., McAndrews, J.H., Wittkop, C.A., Stoermer, E.F. 2004. Pre-historical record of cultural eutrophication from Crawford Lake, Canada. *Geology* 32: 745–748.
- Ekdahl, E.J., Teranes, J.L., Wittkop, C.A., Stoermer, E.F., Reavie, E.D., Smol, J.P. 2007. Diatom assemblage response to Iroquoian and Euro-Canadian eutrophication of Crawford Lake, Ontario, Canada. *Journal of Paleolimnology* 37: 233–246.
- Flower, R. J. 2006. Diatoms in ancient building materials: application of diatom analysis to Egyptian mud bricks. *Nova Hedwigia* 130: 245–263.
- Foged, N. 1973. *The diatoms in a wreck from the late Middle Age*. University of Lund, Department of Quaternary Geology. Report 3: 39–45.
- Foged, N. 1985. Diatoms in a tomb from the early Bronze Age. *Nova Hedwigia* 41: 471–482.
- Fritz, S.C. 1989. Lake Development and Limnological Response to Prehistoric and Historic Land-Use in Diss, Norfolk, U.K. *The Journal of Ecology* 77: 182–202.
- Fritz, S.C. 1990. Twentieth-century salinity and water-level fluctuations in Devils Lake, North Dakota: test of a diatom-based transfer function. *Limnology and Oceanography* 35: 1771–1781.
- Gibson, A.M. 1986. Diatom analysis of clays and Late Neolithic pottery from the Milfield Basin, Northumberland. *Proceedings of the Prehistoric Society* 52: 89–103.
- Gillson, L., Ekblom, A. 2009. Untangling anthropogenic and climatic influence on riverine forest in the Kruger National Park, South Africa. *Vegetation History and Archaeobotany* 18: 171–185. doi:10.1007/s00334-008-0202-6
- Godbold, S., Turner, R.C. 1993. *Second Severn Crossing Archaeological Response: Phase 1: the Intertidal Zone in Wales*, Brentwood.
- Haworth, E.Y. 1985. The highly nervous system of the English lakes; aquatic ecosystem sensitivity to external changes, as demonstrated by diatom, *Annual Report, Freshwater Biological Association, Ambleside*. *Freshwater Biological Association*, 60–79.
- Håkansson, H., Hulthén, B. 1986. On the dissolution of pottery for diatom studies. *Norwegian Archaeological Review* 19: 34–38.
- Håkansson, H., Hulthén, B. 1988. Identification of diatoms in neolithic pottery. *Diatom Research* 3: 39–45.
- Hemphill-Haley, E. 1995. Diatom evidence for earthquake-induced subsidence and tsunami 300 yr ago in southern coastal Washington. *Geological Society of America Bulletin* 107: 367–378.
- Hemphill-Haley, E. 1996. Diatoms as an aid in identifying late-Holocene tsunami deposits. *The Holocene* 6: 439–448.
- Hildebrandt-Radke, I. 2013. *Pradziejowa i wczesnohistoryczna antropopresja i jej zapis w środowisku przyrodniczym na przykładzie regionu środkowej Obry (Wielkopolska)*. Poznań.
- Hildebrandt-Radke, I., Spychalski, W., Lutyńska, M. 2011a. Regionalna wymowa procesów antropogenizacji regionu środkowej Obry na podstawie badań osadów jeziora Wonieść. *Landform analysis* 16: 92–97.
- Hildebrandt-Radke, I., Spychalski, W., Lutyńska, M. 2011b. Sedimentological, geochemical and diatom investigations on sediments of Lake Wonieść in the context of climate changes and main stages of the Middle Obra River settlement, (w:) I. Hildebrandt-Radke, W. Dörfler, J. Czebreszuk, J. Müller (red.), *Anthropogenic Pressure in the Neolithic and Bronze Age on the Central European Lowlands*. Poznań-Bonn, 173–188.
- Hill, T., Whittaker, J., Brunning, R., Law, M., Bell, M., Ramsey, C.B., Dunbar, E., Marshall, P. 2017. Palaeoenvironmental investigations of a Mesolithic–Neolithic sedimentary sequence from Queen's Sedgemoor, Somerset, (w:) M. Williams T. Hill I. Boomer i I.P. Wilkinson (red.), *The Archaeological and Forensic Applications of Microfossils: A Deeper Understanding of Human History*. London, 79–102.
- Jansma, M.J. 1977. Diatom analysis of pottery. *Cingula* 4: 77–85.
- Jansma, M.J. 1981. Diatoms from coastal sites in the Netherlands, (w:) D. Brothwell i G. Dimbleby (red.), *In Environmental Aspects of Coasts and Islands*. Oxford, 145–162.
- Jansma, M.J. 1982. Diatom analysis from some prehistoric sites in the coastal area of the Netherlands. *Acta Geologica Academiae Scientiarum Hungaricae* 25: 229–236.
- Jansma, M.J. 1984. Diatom analysis of prehistoric pottery, (w:) D.G. Mann (red.), *In Proceedings of the Seventh International Diatom Symposium*. Königstein, 529–536.
- Jansma, M.J. 1990. Diatoms from a neolithic excavation on the Former Island of Schokland, IJsselmeerpolders, The Netherlands. *Diatom Research* 5: 301–309.
- John, J. 2004. Assessment of river health in Australia by diatom assemblages – a review. *Oceanological and Hydrobiological Studies* 33: 95–104.
- Juggins, S. 1992a. Diatom analysis, (w:) S. Woodwiss (red.), *In Iron Age and Roman salt production and the medieval town of Droitwich: excavations at the Old Bowling Green and Friar Street*. Council of British Archaeology Research Report 81, 4–5.
- Juggins, S. 1992b. *Diatoms in the Thames Estuary, England: ecology, palaeoecology, and salinity transfer function*. Stuttgart.
- Juggins, S., Cameron, N.G. 2010. Diatoms and archeology, (w:) J.P. Smol, E.F. Stoermer (red.), *The Diatoms: Applications for the Environmental and Earth Sciences, 2nd Edition*. Cambridge, 514–522.
- Keevill, G. 2004. *Historic Royal Palaces Monograph No.1: the Tower of London moat*. Oxford.
- Kittel, P. 2012. Wpływ georóżnorodności zlewni Neru (Polska środkowa) na lokalizację osadnictwa pradziejowego. *Landform Analysis* 19: 49–66.

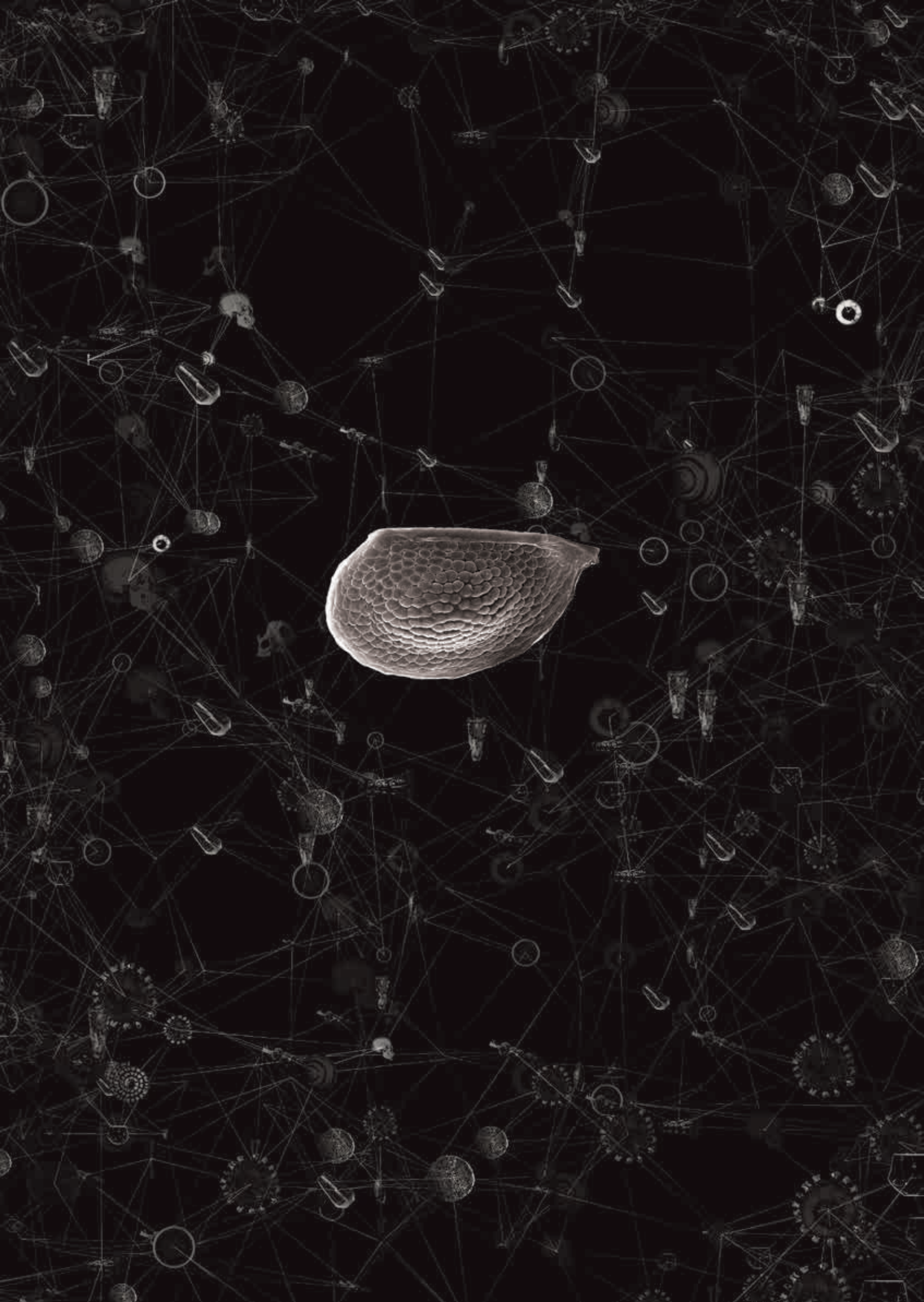
- Kittel, P., Antczak, O., Brooks, S.J., Elias, S.A. 2018. The palaeo-ecological development of the Late Medieval moat – Multiproxy research at Rozprza, Central Poland The palaeoecological development of the Late Medieval moat – Multiproxy research at Rozprza, Central Poland. *Quaternary Geochronology* 482: 131–156.
- Kittel, P., Muzolf, B., Plóciennik, M., Elias, S., Brooks, S. J., Lutyńska, M., Pawłowski, D., Stachowicz-Rybka, R., Wacnik, A., Okupny, D., Głąb, Z., Mueller-Bieniek, A. 2014. A multi-proxy reconstruction from Lutomiersk–Koziówki, Central Poland, in the context of early modern hemp and flax processing. *Journal of Archaeological Science* 50: 318–337.
- Krammer, K. 2002. Diatoms of the European Inland Waters and Comparable Habitats, (w:) H. Lange-Bertalot (red.), *Diatoms of Europe, Cymbella*, Vol. 3. Königstein-Rugell, 584.
- Krammer, K., Lange-Bertalot, H. 2008a. Bacillariophyceae 2, Ephitemiaceae, Bacillariaceae, Surirellaceae, (w:) H. Ettl, J. Gerloff, H. Heyning, D. Mollenhauer (red.), *Süßwasserflora von Mitteleuropa* 2. T 2, Fourth edition. Stuttgart, 596.
- Krammer, K., Lange-Bertalot, H. 2008b. Bacillariophyceae 3, Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae, (w:) H. Ettl, J. Gerloff, H. Heyning, D. Mollenhauer (red.), *Süßwasserflora von Mitteleuropa* 2. T 3, Third edition. Stuttgart, 577.
- Krammer, K., Lange-Bertalot, H. 2010. Bacillariophyceae 1. Naviculaceae, (w:) H. Ettl, J. Gerloff, H. Heyning, D. Mollenhauer (red.), *Süßwasserflora von Mitteleuropa* 2. T 1, Fourth edition. Stuttgart, 876.
- Krammer, K., Lange-Bertalot, H. 2011. Bacillariophyceae 4, Achnanthaceae, (w:) H. Ettl, G. Gärtner, J. Gerloff, H. Heyning, D. Mollenhauer (red.), *Süßwasserflora von Mitteleuropa* 2. T 4, Third edition. Stuttgart, 437.
- Kwiecińska, B. 2000. How the diatoms were found in the Proterozoic marbles at Przeworno, (w:) A. Witkowski, J. Siemińska (red.), *The origin and early evolution of the diatoms: fossil, molecular and biogeographical approaches*. Kraków, 75–95.
- Lange-Bertalot, H. 1999. Annotated Diatom Micrographs, Taxonomy. *Iconographia Diatomologica*. T. 8. Königstein-Rugell, 289.
- Lange-Bertalot, H., Bąk, M., Witkowski, A., Tagliaventi, N. 2011. Eunotia and related genera. *Diatoms of Europe* 6: 1–747.
- Lange-Bertalot, H., Genkal, S.I. 1999. Diatoms from Siberia I. Island in the Arctic Ocean (Yugorsky Shar Strait, (w:) H. Lange-Bertalot (red.), *Iconographia Diatomologica: Annotated Diatom Micrographs*, T. 6. Königstein-Vaduz, 294.
- Lange-Bertalot, H., Krammer, K. 1987. *Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae*. Königstein.
- Lange-Bertalot, H., Metzeltin, D. 1996. Indicators of Oligotrophy. 800 taxa representative of three ecologically distinct lake types, (w:) H. Lange-Bertalot (red.), *Iconographia Diatomologica: Annotated Diatom Micrographs*, T. 2. Königstein, 390.
- Mann, D.G. 2002. Diatoms: organism and image, (w:) H. du Buf, M.M. Bayer (red.), *Automatic diatom identification*. Singapore, 9–40.
- Mannion, A.M. 1987. Fossil diatoms and their significance in archeological research. *Oxford Journal of Archaeology* 6: 131–147.
- Marsden, P., Branch, N., Evans, J., Gale, R., Goodburn, D., Juggins, S., Marsden, P., McGrail, S., Rackham, J., Tyers, I., Vaughan, D., Whipp, D. 1989. A late Saxon logboat from Clapton, London Borough of Hackney. *International Journal of Nautical Archaeology* 18: 89–111.
- Matiskainen, H., Alhonen, P. 1984. Diatoms as indicators of provenance in Finnish sub-neolithic pottery. *Journal of Archaeological Science* 11: 147–157.
- Miller, U. 1995. Diatoms and submarine archaeology (siliceous microfossil analysis as a key to the environment of shipwrecks, harbour basin sand sailing routes. *Scientific Methods in Under-water Archaeology*, ed. I. Council for Europe. Rixensart, 53–58.
- Miller, U., Robertsson, A. 1981. Current biostratigraphical studies connected with archaeological excavations in the Stockholm region. *Striae* 14: 167–173.
- Miller, U., Robertsson, A., Karlsson, S., Risberg, J.A.N. 2004. Half a century of interdisciplinary studies on the development of the natural and cultural landscape in the Stockholm region. *Acta Palaeobotanica* 44: 287–298.
- Milne, G., Battarbee, R. W., Straker, V., Yule, B. 1983. The river Thames in London in the mid 1st century AD. *Transactions of the London and Middlesex Archaeological Society* 34: 19–30.
- Nayling, N., McGrail, S. 2004. *The Barland's Farm Romano-Celtic Boat*, Council for British Archaeology Research Report 115. York.
- Neely, J.A., Caran, S.C., Winsborough, B.M., Sorensen, F.R., Valastro, J.S. 1995. An early Holocene hand-dug water well in the Tehuacan Valley of Puebla, Mexico. *Current Research in the Pleistocene* 12: 38–40.
- Nowicka-Krawczyk, P., Żelazna-Wieczorek, J., Otlewska, A., Koziróg, A., Rajkowska, K., Piotrowska, M., Gutarowska, B., Żydzik-Białek, A. 2014. Diversity of an aerial phototrophic coating of historic buildings in the former Auschwitz II-Birkenau concentration camp. *Science of The Total Environment* 493: 116–123.
- Ognjanova-Rumenova, N. 2008. Palaeoenvironment and archaeology: the use of diatom analysis in archaeology, (w:) R.I. Kostov B. Gaydarska, M. Gurova (red.), *Geoarchaeology and Archaeomineralogy. Proceedings of the International Conference, 29-30 October 2008 Sofia*. Sofia.
- Patrick, R. 1984. Diatoms as indicators of changes in water quality, (w:) M. Ricard (red.), *Proceedings of the 8th International Diatom Symposium*, 756–766.



- Piotrowski, A. 2007a. Tsunami AD 1497. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego* 424: 77–78.
- Piotrowski, A. 2007b. Tsunami events in Kołobrzeg in the light of historical evidences. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego* 424: 73.
- Piotrowski, A., Gałczyńska, C.Z. 2003. Wineta, niedźwiedź morski, czyli o zmianach linii brzegowej pomiędzy Rugią a Uznamem. *Budowa geologiczna i rzeźba Rugii i Uznamu. Materiały IV Ogólnopolskiej Konferencji PTG*. Szczecin.
- Piotrowski, A., Szczuciński, W., Krzymińska, J., Sydor, P., Rzodkiewicz, M. 2015. Examples of catastrophic saltwater inundations (storms or tsunamis) on the southern coast of the Baltic Sea during the late Holocene, north Poland. *31st IAS Meeting of Sedimentology, 22-25 June, 2015, Kraków*. Kraków.
- Piotrowski, A., Szczuciński, W., Sydor, P., Kotrys, B., Rzodkiewicz, M., Krzymińska, J. 2017. Sedimentary evidence of extreme storm surge or tsunami events in the southern Baltic Sea (Rogowo area, NW Poland). *Geological Quarterly* 61: 973–986.
- Pliński, M., Witkowski, A. 2009. *Okrzemki – Bacillariophyta (Diatoms) (with the English key for the identification to the genus)*, Cz. 1: *Okrzemki Centryczne*. Gdańsk.
- Renberg, I., Bindler, R., Bradshaw, E., Emteryd, O., McGowan, S. 2001. Sediment Evidence of Early Eutrophication and Heavy Metal Pollution of Lake Mälaren, Central Sweden. *AMBIO: A Journal of the Human Environment* 30: 496–502.
- Rzodkiewicz, M., Zamelska-Monczak, K., Piotrowski, A., Sydor, P., Żuk, T., Krzymińska, J., Noryskiewicz, A.M. 2018a. Paleoenvironmental research of the organic fill of the small depression near the Early Medieval stronghold in Santok (west Poland). *Reflecting Futures. Abstract Book, vol. 2. 24th EAA Annual Meeting, Barcelona, 5-8 September*. Barcelona.
- Rzodkiewicz, M., Zamelska-Monczak, K., Piotrowski, A., Sydor, P., Żuk, T., Krzymińska, J., Noryskiewicz, A.M. 2018b. Paleoenvironmental research of the organic sediments Early Medieval stronghold in Santok (Lubusz Land, west Poland). *Natural Resource of Border Areas under a Changing Climate, 2nd International Scientific Conference NARBAC 2018, Słupsk-Smoldzino, 25-28 September*. Słupsk.
- Schoemann, F.R., Haworth, E.Y. 1984. Diatoms as indicators of pollution, (w:) M. Ricard (red.), *Proceedings of the 8th International Diatom Symposium*. Königstein, 757–759.
- Siemińska, J. 1980. Morphological and taxonomic features of the remains of diatom frustules found in Przeworno marbles in Poland. Plate I, II, (w:) T.V. Desicachary, V.N. Raja Rao (red.), *Taxonomy of algae*. Madras, 733–737.
- Siemińska, J. 1981. Structural details of diatom remains found in the Przeworno marbles, (w:) R. Ross (red.), *Proceeding of the Sixth Symposium on Recent and Fossil Diatoms*. Königstein, 203–206.
- Siemińska, J. 2000. The discoveries of diatoms older than Cretaceous, (w:) A. Witkowski, J. Siemińska (red.), *The origin and early evolution of the diatoms: fossil, molecular and biogeographical approaches*. Kraków, 55–74.
- Siemińska, J. 2015. On the age of fossil diatoms. *Acta Palaeobotanica* 55: 115–117.
- Siemińska, J., Kwiecińska, B. 2000. The Proterozoic diatoms from the Przeworno marbles, (w:) A. Witkowski, J. Siemińska (red.), *The origin and early evolution of the diatoms: fossil, molecular and biogeographical approaches*. Szczecin, 97–121.
- Sims, P.A., Mann, D.G., Medlin, L.K. 2006. Evolution of the diatoms: insights from fossil, biological and molecular data. *Phycologia* 45: 361–402.
- Szczuciński, W. 2008. Potencjalne skutki geologiczne i środowiskowe tsunami na wybrzeżu Bałtyku. *Holocenne przemiany wybrzeży i wód południowego Bałtyku – przyczyny, uwarunkowania i skutki*. Poznań-Bydgoszcz, 119–125.
- Taylor, J.C., Harding, W.R., Archibald, C.G.M. 2007. *A methods manual for the collection, preparation and analysis of diatom samples*. Republic of South Africa.
- Van Den Hoek, C., Mann, D., Jahns, H.M. 1998. *Algae, An Introduction to phycology*. Cambridge.
- VanLandingham, S. 2006. Diatom evidence for autochthonous artifact deposition in the Valsequillo region, Puebla, Mexico during the Sangamonian (sensu lato = 80,000 to ca. 220,000 yr BP and Illinoian (220,000 to 430,000 yr BP). *Journal of Paleolimnology* 36: 101–116.
- Whitmore, T.J., Brenner, M., Curtis, J.H., Dahlin, B.H., Leyden, B.W. 1996. Holocene climatic and human influences on lakes of the Yucatan Peninsula, Mexico: an interdisciplinary, palaeolimnological approach. *The Holocene* 6: 273–287.
- Wilkinson, T.J., Murphy, P., Juggins, S., Manson, K. 1988. Wetland development and human activity in Essex estuaries during the Holocene transgression, (w:) P. Murphy, C. French (red.), *The Exploitation of Wetlands*. Oxford, 213–238.
- Willcox, G.H. 1975. Problems and possible conclusions related to the history and archaeology of the Thames in the London region. *Transactions of the London and Middlesex Archaeological Society* 26: 185–192.
- Winsborough, B.M., Shimada, I., Newsom, L.A., Jones, J.G., Segura, R.A. 2012. Paleoenvironmental catastrophes on the Peruvian coast revealed in lagoon sediment cores from Pachacamac. *Journal of Archaeological Science* 39: 602–614.
- de Wolf, H., Cleveringa, P. 1996. The impact of the beer industry on medieval water quality, (w:) I. Mayama, J. Kozumi (red.), *Proceedings of the 14th Diatom Symposium*. Königstein.
- Zamelska-Monczak, K., Piotrowski, A., Sydor, P., Żuk, T., Rzodkiewicz, M., Noryskiewicz, A., Krzymińska, J., 2021. Geoarchaeological studies in the early medieval Santok stronghold (north-western Poland). *Geoarchaeology* 36(6): 978–1008.









# Wioślarki

Izabela Zawiska

---

## WPROWADZENIE I CHARAKTERYSTYKA ANALIZY SUBFOSYLNÝCH WIOŚLAREK

Zmiany środowiska przyrodniczego wynikają z naturalnej ewolucji ekosystemów przyrodniczych, a także są efektem działalności człowieka. Zachodzą od początku istnienia życia na Ziemi, jednak dla badań archeologicznych na obszarze Europy Środkowej szczególnie interesujący jest okres od momentu ustąpienia ostatniego zlodowacenia i ocieplenia klimatu rozpoczynającego trwającą współcześnie najmłodszą epokę geologiczną – Holocen. Za jej początek na obszarze Polski przyjmuje się datę ok. 11 500 cal BP (Goslar 1998). Zmiany środowiska w trakcie trwania Holocenu zostały poznane dzięki wieloaspektowej analizie osadów biogenicznych – torfów i osadów jeziornych, które akumulują w zagłębieniach terenu w wielu przypadkach nawet o kilka tysięcy lat wcześniej niż zaczął się Holocen. Osady biogeniczne, a dokładnie ich skład, układ warstw oraz zachowane w nich szczątki żyjących w przeszłości organizmów są bogatym źródłem wiedzy o środowisku (Tobolski 2000). Prezentowana w niniejszym rozdziale analiza szczątków wioślarek może być stosowana zarówno przy badaniu osadów torfowych, jak i jeziornych, jednak zdecydowanie więcej informacji na temat środowiska przyrodniczego można uzyskać, analizując skład gatunkowy wioślarek z osadów jeziornych. Dlatego też w dalszej części rozdziału

przybliżona zostanie analiza wioślarek w odniesieniu do badań osadów akumulowanych w zbiornikach wodnych.

Wioślarki (Cladocera) są słodkowodnymi skorupiakami planktonowymi, jednymi z głównych składników zooplanktonu wód słodkich; tylko kilka gatunków może żyć w wodach słonawych (Rybak i Błędzki 2010). Według systematyki należą do królestwa zwierząt (Animalia), typu stawonogi (Arthropoda), podtypu skorupiaki (Crustacea), gromady skrzelonogów (Branchiopoda), tworząc nadrzęd wioślarki (Cladocera) (Rybak i Błędzki 2010). Wioślarki żyją prawie na wszystkich kontynentach, dotychczas rozpoznano około 600 gatunków, w Europie ok. 210, a w Polsce ok. 100 (Rybak i Błędzki 2010). Wioślarki są organizmami o niewielkich rozmiarach ciała, w większości przypadków nie większymi niż 1 mm. Największym gatunkiem jest *Leptodora kindti* dochodząca do 18 mm, a najmniejszym *Alonella nana* mierząca ok. 0,2 mm (Rybak i Błędzki 2010). Wioślarki występują we wszystkich rodzajach wód słodkich, od dużych jezior do niewielkich stawów i rowów z wodą stojącą, niektóre gatunki żyją również na torfowiskach.

W jeziorach występują zarówno w strefie przybrzeżnej wśród roślin wodnych i przy dnie, jak i w strefie otwartej wody. Większość gatunków to filtratory, odżywiające się przede wszystkim glonami, bakteriami i drobną zawiesiną organiczną

(detrytusem). Występują nieliczne gatunki dra- pieżne, które polują na drobne skorupiaki i wrotki.

Poszczególne gatunki znacznie różnią się od siebie budową, jednak wszystkie okryte są chi- tynową skorupką. Dzięki dość twardemu pan- cerzykowi szczątki żyjących w jeziorze organi- zmów mogą przetrwać w osadzie przez tysiące lat.

Na rycinie 1 przedstawiono zdjęcia wybranych gatunków wioślarek żyjących w jeziorach Polski Północnej, ich różowy kolor jest efektem sztuczne- go zabarwienia próbek safraniną.

Cladocera rozmnażają się zarówno partenogene- tycznie, jak i płciowo. W trakcie sezonu letniego, gdy w jeziorze występują sprzyjające warunki do życia, samice wioślarek produkują patogenetycznie jaja, z któ- rych powstają identyczne osobniki żeńskie. W przy- padku pogorszenia się warunków środowiskowych wraz z nadejściem zimy lub z innych przyczyn (np. niedoborów tlenu) patogenetycznie wytwarzane są osobniki męskie, przy udziale których powstają póź- niej jaja przetrwalnikowe. Są one otoczone kilkoma warstwami chityny, co tworzy razem efipium (ryc. 2; ryc. 3). Jaja przetrwalnikowe – efipia są bardzo od- porne na niekorzystne warunki środowiskowe, mogą przetrwać nawet wyschnięcie zbiornika. Efipia zacho- wują się również w osadach jeziornych i są rozpozna- wane w preparatach (Rybak i Błędzki 2010).

Na świecie pierwsze informacje na temat wiośl- arek zbierano już w wieku XVII. Jednak znaczące ba- dania nad taksonomią gatunków zarówno w Polsce, jak i w innych regionach?, prowadzone były w wieku XIX. Wtedy udokumentowano istnienie dużej liczby gatunków. W Polsce znaczący rozwój badań nastą- pił po II wojnie światowej (Rybak i Błędzki 2010).

Szczątki wioślarek zachowują się w osadach je- ziornych i dzięki swoim cechom morfologicznym mogą być oznaczane do poziomu gatunku (ryc. 2). Ponieważ wioślarki są czułe na zmiany środowiska, ich szczątki zachowane w osadach mogą być wyko- rzystywane jako indykatory jego zmian w przeszłości.

Po raz pierwszy analiza szczątków wioślarek z osa- dów została wykorzystana do rekonstrukcji zmian śro- dowiska w latach 70. XX w. W Polsce jej prekursora- mi byli Czczuga i Mikulski (Szeroczyńska i Zawiska 2007). Obecnie w Polsce pracuje kilkunastu naukow- ców zajmujących się rekonstrukcjami środowiska przy- rodniczego z wykorzystaniem subfossylnych wioślarek.

Jak już wspomniano, wioślarki są organizmami czułymi na zmiany warunków środowiska, w któ- rym żyją.

Szczątki wielu gatunków po obumarciu dobrze zachowują się w osadach i mogą być rozpoznane i oznaczone do poziomu gatunku. Dlatego właśnie analiza subfossylnych wioślarek (szczątków zacho- wanych w osadzie) jest powszechnie stosowana na świecie i w Polsce m.in. do określania zmian: tem- peratury (klimatu), żyzności wód (trofii), poziomu wód i ich zakwaszenia (pH) (Korhola i Rautio 2001).

Wnioskowanie prowadzi się, stosując podejście ja- kościowe, czyli analizując zmiany proporcji wystę- powania poszczególnych gatunków i grup gatun- ków charakterystycznych dla różnych siedlisk w je- ziorze (np. żyjących wśród roślin, w płytkiej strefie jeziora czy w toni wodnej), biorąc pod uwagę po- jawianie się gatunków wskaźnikowych, zależności pomiędzy grupami gatunków (np. stosunek gatun- ków planktonowych do litoralnych P/L). Badania nad ekologią wioślarek doprowadziły do poznania warunków i siedlisk, jakie preferują poszczególne gatunki. Współcześnie w badaniach naukowych do wnioskowania o zmianach środowiska coraz częś- ciej stosuje się metody ilościowe, zastosowanie me- tod statystycznych umożliwia rekonstrukcję war- tości liczbowych wybranych parametrów środowi- ska, np. takich jak temperatura (Zawiska i in. 2015). Zakłada się, że aby rekonstrukcja zmian środowiska była jak najbardziej prawdziwa, powinno się poznać regionalne zależności pomiędzy poszczególnymi ga- tunkami wioślarek a zmiennymi środowiskowymi. W tym celu w grupie jezior o różnych wartościach poszczególnych czynników środowiskowych pobie- ra się powierzchniowe próby osadów, jednocześ- nie mierząc parametry fizyczne i chemiczne wody. W pobranych osadach analizuje się skład gatunko- wy wioślarek, przeprowadza wieloczynnikową ana- lizę statystyczną i identyfikuje czynniki najsilniej wpływające na występowanie poszczególnych gatun- ków. Zastosowanie tej metody umożliwia ilościową rekonstrukcję wybranego dominującego czynnika środowiskowego na podstawie składu gatunkowe- go stwierdzonego w osadach jeziornych.

## WYMAGANIA EKOLOGICZNE WYBRANYCH GATUNKÓW WIOŚLAREK

Wioślarki żyją zarówno w strefie wody otwartej, jak i litoralnej. Wykształciły szereg cech anatomicz- nych przystosowujących je do miejsca życia, zwią- zanego z tym sposobu odżywiania i poruszania

się. Skorupki wielu gatunków są silnie urzeźbione, strukturę powierzchni widać dobrze pod mikroskopem świetlnym, jednak najlepiej jest ona widoczna podczas obrazowania za pomocą mikroskopu skaningowego (SEM) (Zawiska i in. 2016) (ryc. 3). Najliczniejszą i najbardziej znaną rodziną zamieszkującą strefę otwartej wody są rozwielitki (Daphniidae). Najczęściej w osadach znajdowane są szczątki przedstawicieli dwóch grup gatunków *Daphnia longispina* i *Daphnia pulex*. Daphniidae doskonale przystosowały się do życia w prawie całkowicie oderwaniu od dna. Wyspecjalizowane aparaty filtracyjne umożliwiają im odżywanie się zawieszoną w wodzie substancją organiczną i mikroorganizmami (sestonem). Dzięki prawie przezroczystemu chitynowemu pancerzykowi są słabo widoczne i trudniejsze do upolowania dla drapieżników. Innym przystosowaniem do życia w toni wodnej jest umiejętność pionowych migracji, w dzień ukrywają się przed polującymi na nie rybami na większych głębokościach, gdzie są gorsze warunki świetlne, w nocy zaś migrują w stronę powierzchni wody i tam żerują (Rybak i Błędzki 2010).

W strefie otwartej wody żyje również jeden z największych gatunków Cladocera *Leptodora kindtii*, osiągający długość 18 mm (ryc. 1). Jest to jedyny drapieżnik wśród wioślarek. Jego ciało jest prawie zupełnie przezroczyste, co sprawia, że jest słabo widoczny w wodzie i łatwiej może polować.

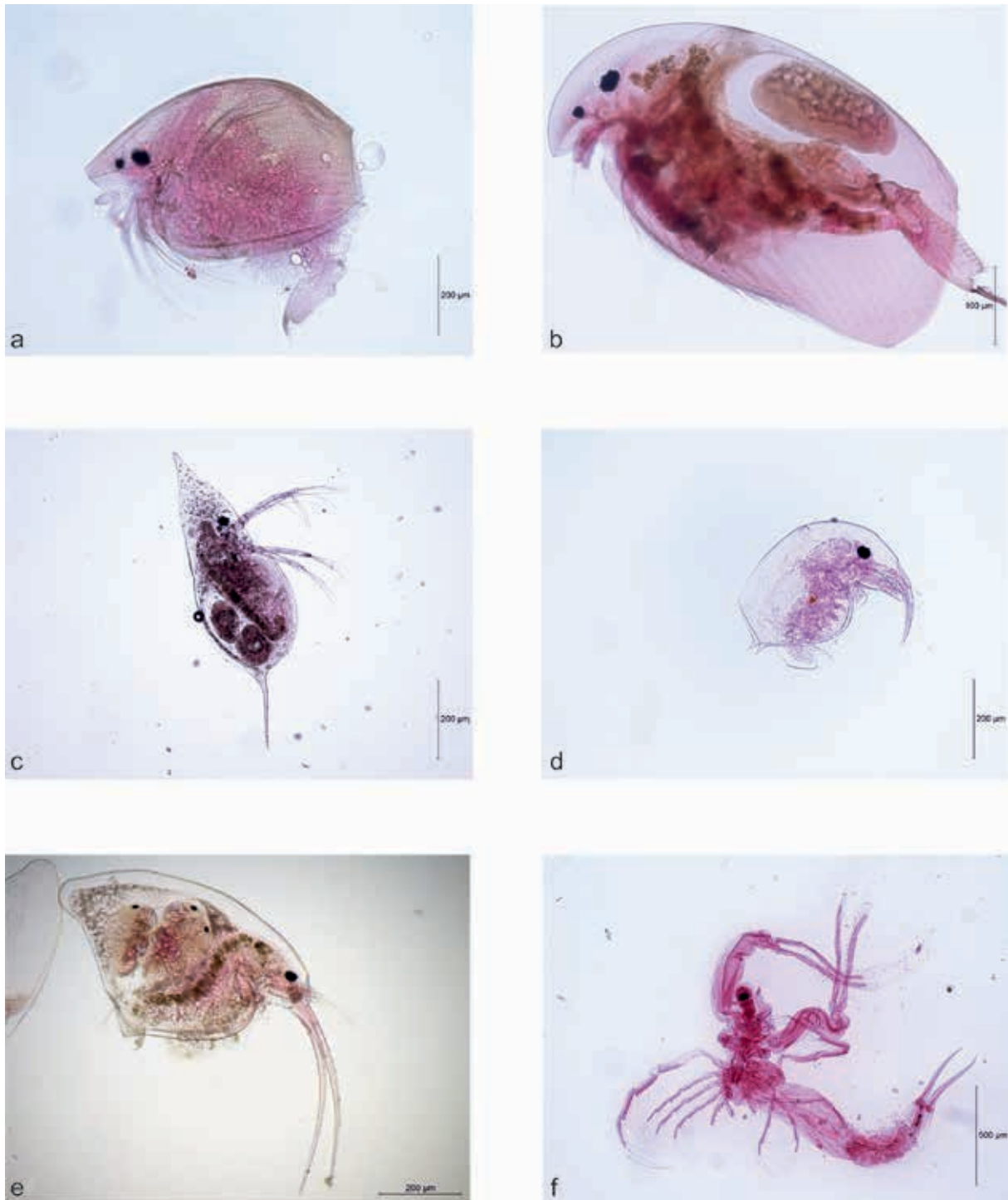
W strefie pelagicznej żyją przedstawiciele rodziny Bosminidae. W osadach zachowują się szczątki kilku gatunków, z których najczęściej są znajdowane: *Bosmina longirostris*, *Bosmina* (E.) *longispina* i *Bosmina* (E.) *coregoni*. *Bosmina* (E.) *longispina* i *Bosmina* (E.) *coregoni* są typowymi gatunkami otwartej wody. *Bosmina* (E.) *longispina* może żyć w wodach o niskim pH i dużej zawartości substancji humusowych. Uważana jest za gatunek wskazujący na niską trofę zbiornika (oligotrofię, mezotrofię). Występuje również w jeziorach górskich i jest gatunkiem powszechnym w jeziorach Europy Północnej. *Bosmina* (E.) *coregoni* preferuje wody bogatsze w substancje pokarmowe, o wyższej trofii (eutrofii). Gatunek *Bosmina longirostris* natomiast może zamieszkiwać zarówno strefę pelagiczną, jak i litoralną. Występuje w zbiornikach różnej wielkości i trofii. Jednak gdy jest gatunkiem dominującym, wskazuje to na wysoką produktywność zbiornika (eutrofie). W tym miejscu trzeba zaznaczyć, iż czasami rozróżnienie między gatunkami z rodziny

Bosminidae może być trudne, gdyż nie zawsze charakterystyczne cechy budowy są wystarczająco wyraźnie wykształcone.

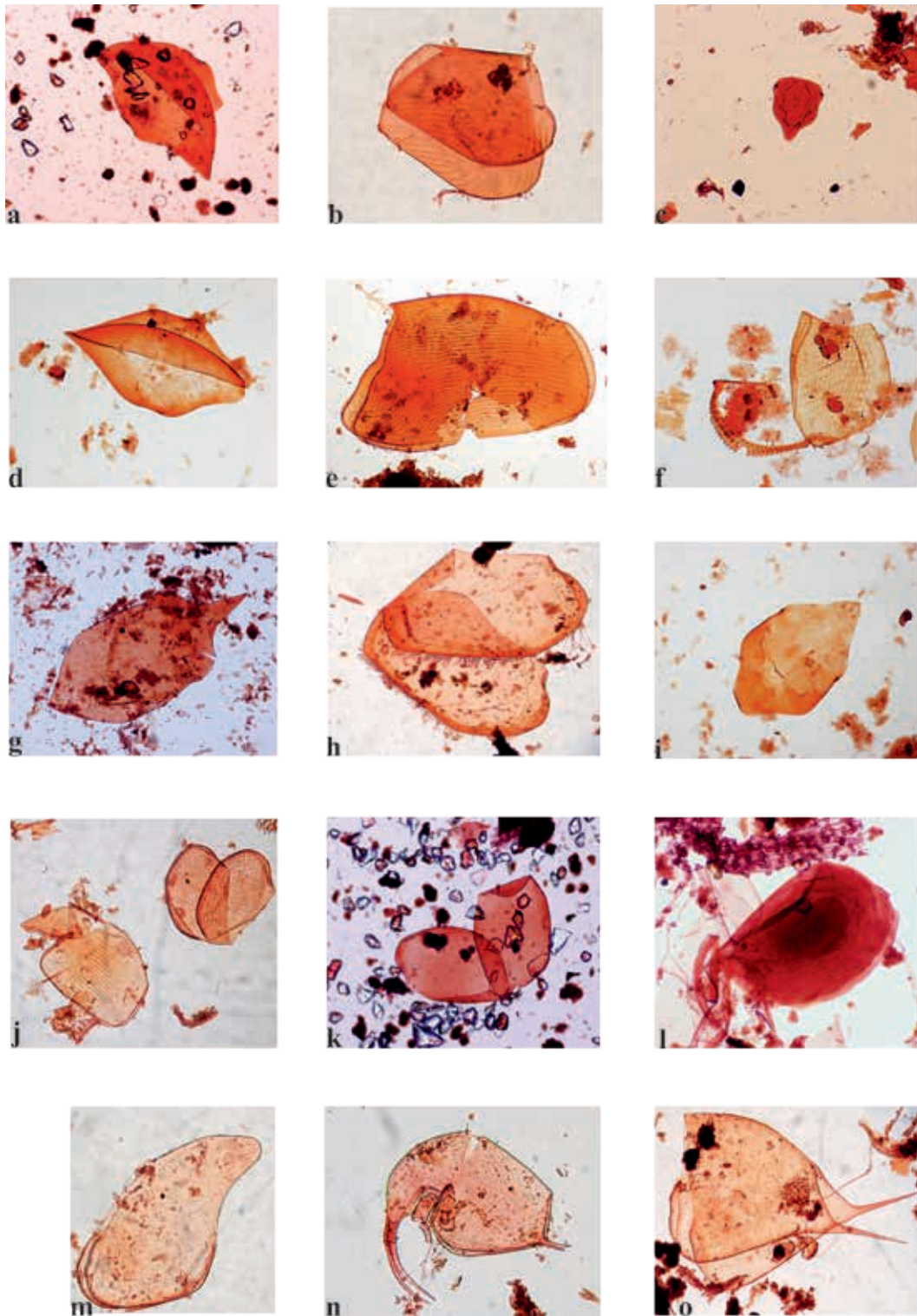
W strefie litoralnej żyje wiele gatunków wioślarek, jednak w osadzie zachowują się szczątki Cladocera należące do rodzin: Chydoridae, Ilyocryptidae, Eurycercidae, Ophryoxidae, Sididae, Holopedidae oraz Macrothricidae. Przedstawiciele tych rodzin wykształcili unikalne cechy morfogenetyczne, przystosowując się do życia wśród roślin lub przy dnie zbiorników. Szczególnie ważna dla badań paleolimnologicznych jest rodzina Chydoridae, ponieważ należy do niej większość wioślarek, których szczątki zachowują się w osadach.

Specjalnym przystosowaniem Chydoridae do życia w dynamicznym i zróżnicowanym środowisku litoralu jest, potężniejsza niż u gatunków żyjących w strefie pelagicznej, budowa tarczki głowowych, puszek tułowiowych i odwłoków (Fryer 1968). Przedstawiciele gatunków litoralnych potrafią poruszać się zarówno wiosłując za pomocą czułków drugiej pary, tak jak gatunki pelagiczne, jak i pełzać po powierzchni dna i roślin lub zagrzebywać się w osadzie z wykorzystaniem odwłoka i odnóży tułowiowych. Gatunki te wykształciły również dodatkowe sposoby zdobywania pokarmu. Oprócz charakterystycznego dla wioślarek planktonowych filtrowania zawiesiny z wody potrafią zeszkrobywać osad z powierzchni roślin, piasku i kamieni, a także żywić się cząstkami detrytus (Fryer 1968; Rybak i Błędzki 2010). Do grupy żyjącej wśród roślin zaliczamy takie gatunki, jak: *Graptoleberis testudinaria*, *Camptocercus rectirostris*, *Alonella exigua*, *Acroperus* spp., *Eurycercus* spp., *Sida cristallina* (Fryer 1968; Flössner 2000). Życie przy dnie preferują m.in.: *Monospilus dispar*, *Leydigia leyidigi* i *Leydigia acantocercoides*, *Pleuroxus uncinatus*, *Pleuroxus trigonellus*, *Ilyocryptus* spp., *Ofryoxus gracilis* (Fryer 1968; Flössner 2000). Niektóre z tych gatunków mogą żyć tylko w dobrze natlenionych wodach, inne zaś znoszą deficyty tlenu. *Monospilus dispar* preferuje środowisko dobrze natlenionych wód. Gatunek ten żywi się, filtrując zawiesinę z wody. Znajdowany był nawet na głębokości 24 m jednak tylko w jeziorach oligotroficznym, gdzie deficyty tlenu nie występują (Duigan i Birks 2000). Warunki beztlenowe natomiast dobrze tolerują gatunki *Leydigia leyidigi* i *Leydigia acantocercoides*. Żyją nawet do głębokości 15 m, często zagrzebane w mule, żywiąc się detrytusem roślinnym, nie filtrując pokarmu z wody.



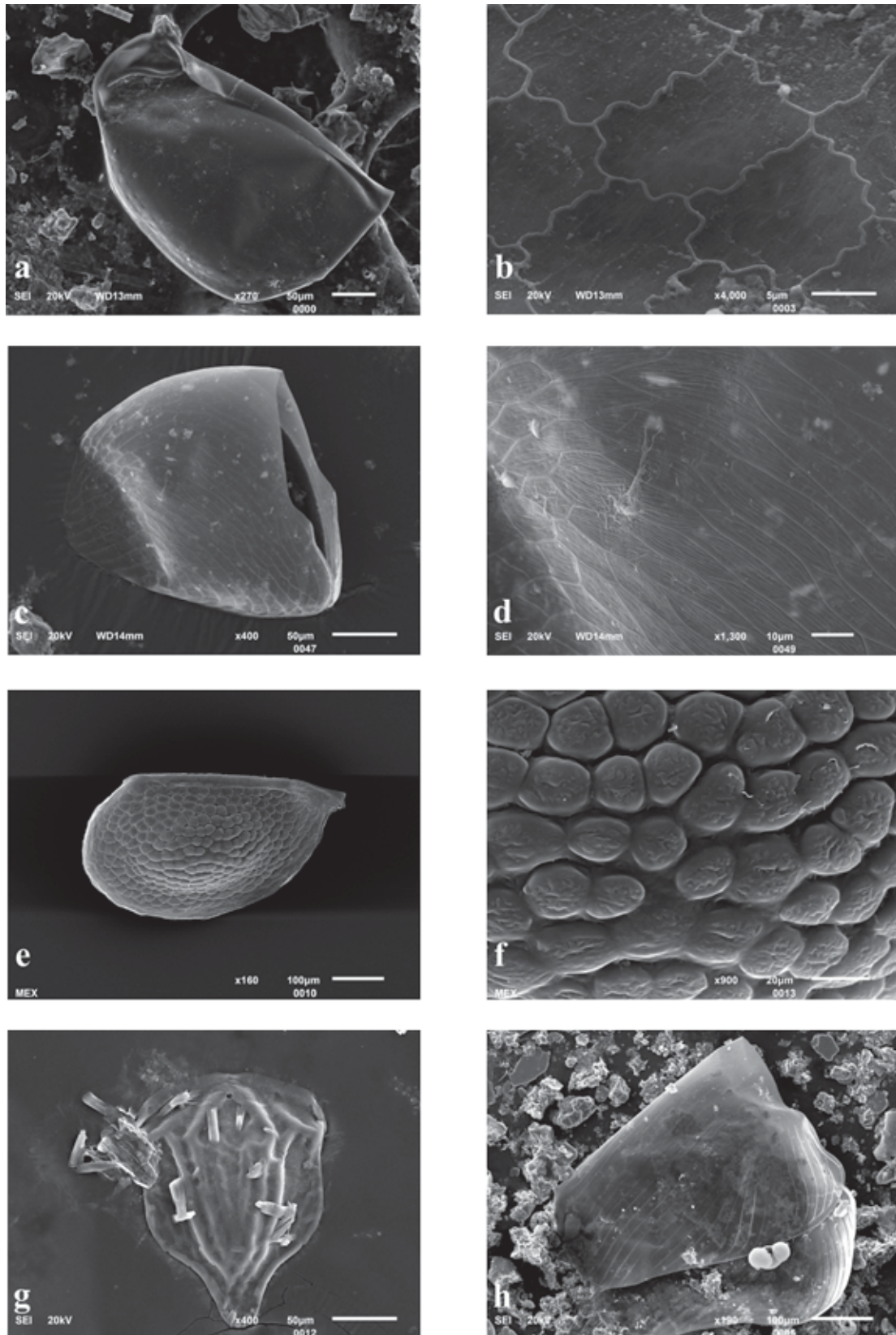


**Ryc. 1.** Zdjęcia wybranych gatunków wioślarek żyjących w jeziorach Polski Północnej: a – *Alonella exigua*, b – *croperus* spp., c – *Daphnia cucullata*, d – *Bosmina longirostris*, e – *Bosmina (E.) thersites*, f – *Leptodora kindti*. Fot. I. Zawiska



**Ryc. 2.** Zdjęcia szczątków wybranych gatunków wioślarek z osadów jezior Polski Północnej: a – *Acroperus harpae* – puszka głowowa, b – *Acroperus harpae* – skorupka tułowiowa, c – *Monospilus dispar* – puszka głowowa, d – *Camptocercus rectirostris* – puszka głowowa, e – *Camptocercus rectirostris* – skorupka tułowiowa, f – *Graptoleberis testudinaria* – skorupka tułowiowa (po prawej stronie, ułożona pionowo) i *Leydigia* spp. – postabdomen, g – *Pleuroxus uncinatus* – puszka głowowa, h – *Pleuroxus uncinatus* – skorupka tułowiowa, i – *Alona affinis*, j – *Alona rectangula* – puszka głowowa połączona ze skorupką tułowiową i *Chydorus sphaericus* – skorupka tułowiowa, k – *Chydorus sphaericus* – skorupka tułowiowa, l – *Leydigia* spp. – efipium, m – *Bosmina* (E.) *thersites* – skorupka tułowiowa, n – *Bosmina longirostris* – puszka głowowa połączona ze skorupką tułowiową, o – *Bosmina* (E.) *longicornis* f. *berlinensis* – skorupka tułowiowa. Fot. I. Zawiska





**Ryc. 3.** Zdjęcia szczątków wybranych gatunków wioślarek wykonane za pomocą mikroskopu skaningowego (SEM): a – *Chydorus cf. sphaericus* – skorupka tułowiowa, b – *Chydorus cf. sphaericus* – struktura powierzchni skorupki tułowiowej, c – *Alonella excisa* – skorupka tułowiowa, d – *Alonella excisa* – struktura powierzchni skorupki tułowiowej, e – *Ceriodaphnia* spp. – efipium, f – *Ceriodaphnia* spp. – struktura powierzchni efipium, g – *Monospilus dispar* – puszka głowowa, h – *Acroperus harpae* – skorupka tułowiowa. Zdjęcia a-g zaczerpnięto z publikacji Zawiska i in. 2016



Taki sposób zdobywania pożywienia spowodowany jest życiem w mętym środowisku, w którym aparaty filtracyjne szybko by się zapychały (Fryer 1968).

Wśród Chydoriadae są również gatunki, które potrafią żyć na podłożu różnego typu, niezależnie od istnienia roślinności wodnej. Do tej grupy zalicza się głównie gatunki: *Alona affinis*, *Alona quadrangularis*, *Alona rectangula*, *Alona guttata*, *Alona costata*, *Alona rustica*, *Alona intermedia*, *Alonopsis elongata*, *Chydorus piger*, *Disparalona rostrata*, *Pseudochydorus globosus*, *Alonella nana* i najbardziej kosmopolityczny ze wszystkich Cladocera *Chydorus* cf. *sphaericus* (Fryer 1968). Zamieszkuje on zarówno stawy, kanały, jak i duże jeziora. Jest odporny na zanieczyszczenia i zasolenie. Dobrze znosi niskie temperatury wody, występuje w zbiornikach o pH od 3,2 do 10. Znajdowany jest w osadach jezior oligotroficznych, bardzo ubogich w składniki pokarmowe, ale także w silnie eutroficznych. Kiedy występuje jako jeden z gatunków dominujących, uważany jest za wskaźnik wysokiej produktywności (eutrofii).

## ZARYS MOŻLIWOŚCI INTERPRETACYJNYCH WYNIKÓW ANALIZY SUBFOSYLNICH WIOŚLAREK

### Subfosylne wioślarki jako wskaźnik zmian klimatu

Analiza subfosylnych wioślarek jest przydatna do rekonstrukcji zmian klimatycznych. Wykorzystywany jest do tego m.in. wskaźnik różnorodności gatunkowej (Hofmann 1987). Wyniki wielu badań wskazują, że niska różnorodność gatunkowa zbiorowisk Cladocera jest charakterystyczna dla okresu schyłku ostatniego zlodowacenia i wzrasta ona wraz z ociepleniem klimatu w Holocen (Hofmann 1983; Korhola i Tikkanen 1991). Jednakże Hann i Warner (1987) uważają, iż wzrost różnorodności gatunkowej na początku Holocenu jest wynikiem zmian limnologicznych (rodzaju osadów, zwiększeniem udziału roślinności wodnej, a nie klimatu).

Podjęto również próby precyzyjnego zmierzenia zależności pomiędzy klimatem i zespołami Cladocera. Lotter i in. (1997) zbadali faunę Cladocera w powierzchniowych osadach 68 małych jezior położonych w Alpach na wysokości od 300 do 2350 m, o różnych warunkach temperaturowych,

głębokości i podłożu. Efektem badań było utworzenie modelu zmian w zespołach Cladocera w zależności od średniej temperatury lata. Został on wykorzystany do odtworzenia temperatur w późnym glacie na podstawie fauny wioślarek zachowanej w osadach szwajcarskiego jeziora Gerzensee. Podobny model został stworzony z osadów powierzchniowych jezior w Finlandii, został on wykorzystany do rekonstrukcji zmian temperatury na obszarze Polski w okresie schyłku ostatniego zlodowacenia (Zawiska i in. 2015).

### Subfosylne wioślarki jako wskaźnik zmian poziomu wody

Wahania poziomu wody z wykorzystaniem wyników analizy subfosylnej fauny Cladocera najczęściej prezentowane są za pomocą wskaźnika P/L (stosunek form planktonowych do litoralnych) zaproponowanego przez Muellera (1964). Od tego czasu wskaźnik ten wykorzystany został z powodzeniem w wielu badaniach (Whiteside 1970; Korhola 1992; Szeroczyńska 1998a; Sarmaja-Korjonen i Alhonen 1999; Zawiska i in. 2019). W celu weryfikacji tego wskaźnika przeprowadzono badania z wykorzystaniem subfosylnej fauny Cladocera i okrzemek. Wyniki uzyskane za pomocą tych dwóch różnych grup organizmów okazały się zgodne (Bradbury i Whiteside 1980; Hyvärinen i Alhonen 1994). Jednakże pojawiło się też wiele argumentów, które kwestionowały przydatność wskaźnika P/L do rekonstrukcji wahań poziomu wody. Wskazywano, że wzrost trofii jeziora może powodować wzrost frekwencji gatunków planktonicznych bez zmiany poziomu wody (Crisman i Whitehead 1978). Powodem wzrostu wskaźnika P/L może być także zmiana w strukturze gatunkowej zbiorowisk planktonowych i wzrost znaczenia Cladocera, których szczątki dobrze zachowują się w osadach (Bosminidae). Również zmiany w łańcuchu pokarmowym mogą powodować zmianę wskaźnika P/L. Wzrost presji ryb powoduje zazwyczaj zmniejszenie się populacji gatunków planktonowych i tym samym wzrost wartości wskaźnika. Jednak w tym wypadku nie znaczy to wcale, iż poziom wody był niższy. Hofmann (1998) zwrócił uwagę, że wielkość strefy litoralnej ma duży wpływ na wartość wskaźnika P/L i zmiana poziomu wody może zostać wychwycona z jego wykorzystaniem tylko wtedy, gdy wpłynie na zmianę powierzchni strefy przybrzeżnej.

### **Subfosylne wioślarki jako wskaźnik zmian żyzności wody**

Wioślarki uważane są za organizmy wrażliwe na zmianę trofii i dlatego są wykorzystywane do rekonstrukcji zmian żyzności jezior (Whiteside 1970; Szeroczyńska 1991; Zawiska 2019; 2020). Jednakże uważa się, że trofia wody wpływa na wioślarki pośrednio, kiedy zmienia ich warunki życia, m.in. warunki tlenowe, występowanie roślinności wodnej (Hofmann 1987). Znane są Cladocera, które rzadko lub wcale nie występują w wodach eutroficznych, a także takie, które dobrze znoszą wysoką trofię (Flössner 2000).

Gatunki z rodziny Bosminidae uważane są za wrażliwe na zmiany żyzności wody. Wraz z jej wzrostem następuje wyparcie gatunku *Bosmina (E.) longispina* przez *Bosmina longirostris* (Hofmann 1987). Jednakże niektórzy badacze uważają, że zmiany w obrębie populacji Bosminidae mogą być również związane z presją ryb. Lotter i in. (1997) natomiast, badając małe jeziora alpejskie w Szwajcarii, znaleźli statystyczną zależność pomiędzy zawartością fosforu (TP) a Cladocera żyjącymi przy dnie. Zależność taką potwierdziły również wyniki badań prowadzonych przez Brodersena w 32 jeziorach duńskich (Brodersen i in. 2011). Zbadał on parametry chemiczne wody oraz skład fauny Cladocera osadów powierzchniowych. Uzyskane dane umożliwiły mu stworzenie modelu zależności wioślarek od fosforu całkowitego (TP).

### **Subfosylne wioślarki jako wskaźnik zmian pH**

Zakwaszenie wód jeziora ma duży wpływ na zespół Cladocera. Powoduje zazwyczaj spadek różnorodności gatunkowej, zanik gatunków wrażliwych na zakwaszenie (*Daphnia longispina*-group) i zwiększenie frekwencji gatunków odpornych na niskie pH (*Alona guttata*, *Alonella exigua*, *Alonella excisa* i *Alonella nana*). Wskaźnikiem zakwaszenia jest również spadek frekwencji gatunku *Bosmina longirostris* przy jednoczesnym wzroście frekwencji gatunku *Bosmina (E.) longispina* (Korhola, Rautio 2001). Wiadomo, że fauna Cladocera reaguje na zmianę wielu czynników środowiskowych oddziałujących na jezioro z zewnątrz oraz będących wynikiem zmian zachodzących w samym jeziorze.

Jednak często problemem jest rozpoznanie, który z czynników środowiskowych wpłynął na zmianę składu czy frekwencji fauny wioślarek. Dlatego bardziej prawdziwą rekonstrukcję zmian środowiska w przeszłości otrzymuje się, jednocześnie wykorzystując wyniki kilku analiz: subfosylnych wioślarek, okrzemek, mięczaków, pyłku, makroskopowych szczątków roślin, wykonanych dla tego samego materiału (por. Rządziejewicz, w tym tomie; Kurzawska, w tym tomie; Kołaczek i in., w tym tomie; Moskal-del Hoyo, w tym tomie).

### **CHARAKTERYSTYKA METODY BADAWCZEJ**

Analiza wioślarek jest stosowana do badań osadów, które akumulowały w zbiornikach wodnych. W sytuacji, gdy zbiornik wodny ciągle funkcjonuje, osady z dna pobiera się za pomocą specjalistycznego sprzętu. Umożliwia on pozyskanie niezaburzonych rdzeni osadów o miąższości do kilkunastu metrów nawet z głębokich jezior. Sondy do pobierania rdzeni montuje się na specjalnych pływających platformach (ryc. 4) lub, jeżeli zimą lód na jeziorach jest wystarczająco gruby, ustawia się je bezpośrednio na nim w wybranym przez siebie miejscu. Wydobycie rdzenia, który może mieć nawet 10-20 m długości, wymaga pracy kilku osób i zajmuje od jednego do kilku dni. Do pobierania powierzchniowej, najmłodszej i najbardziej uwodnionej warstwy osadów wykorzystuje się specjalne sondy produkowane przez polską firmę Limnos, a także wiele firm zagranicznych, np. firmy UVITEC.

Możliwe jest również pobranie osadów ze zbiorników, których misy już wypełniły się osadem, tzw. paleojezior. Górną warstwę takich zbiorników najczęściej stanowią torfy i wtedy pobór rdzeni jest możliwy z wykorzystaniem sondy Instorf (por. Kołaczek i in. w tym tomie).

Na odsłonięciach archeologicznych materiał do analizy powinien być pobierany z oczyszczonej ściany, od warstwy najniższej do najwyższej zdeponowanej. Należy zwrócić uwagę, aby materiał nie został zanieczyszczony osadem pochodzącym z innej warstwy. Ważne jest, żeby dobrze opisać pobraną próbkę (nazwa stanowiska, głębokość od – do, data), warto jest wziąć próbki z dużą rozdzielczością, np. co 1 cm. Zazwyczaj do badań pobiera się więcej materiału i wykonuje w nim szereg analiz mających na



**Ryc. 4.** Zdjęcie platformy z zainstalowaną sondą UVITEC do pobierania długich rdzeni osadów jeziornych umieszczona na Jeziorze Czechowskim. Fot. I. Zawiska

celu określenie różnych parametrów chemicznych próbki, a także składu gatunkowego zachowanych w nich szczątków organizmów (analiza okrzemkowa, malakologiczna, makroszczątków roślinnych).

Z pobranych próbek do analizy składu gatunkowego wioślarek pobiera się 1-2 cm<sup>3</sup> osadu. Następnie w laboratorium osad zostaje przygotowany do analizy tak, aby w efekcie otrzymać roztwór zawierający głównie szczątki wioślarek. Standardowa metoda zaproponowana przez Freya (1968) zakłada, że każda próbka świeżego osadu jest gotowana w 10% roztworze KOH. Świeżą próbkę umieszczamy w zlewce o pojemności 250 ml i zalewamy 100 ml KOH, doprowadzamy do wrzenia i przenosimy na mieszadełko magnetyczne na 20 minut, do każdej próbki dodajemy magnes, który wiruje na dnie zlewki, doprowadzając do rozdrobnienia próbki. Warto pamiętać, że jeżeli w próbce jest dużo piasku, pomijamy ten etap, aby nie zniszczyć szczątków podczas wirowania na mieszadełku. Następnie próbki studzimy, przelewamy na sitko o średnicy oczek 38 µm i zalewamy 10% HCl w celu pozbycia się węglanów. Kolejnym krokiem jest polewanie sita wodą destylowaną po to, aby pozbyć się pozostałości użytych chemikaliów i wypłukać jak najwięcej zanieczyszczeń z próbki. Pozostałości znajdujące się na sicie przenosimy do probówek typu Falcon o pojemności 15 ml i uzupełniamy do objętości 10 ml wodą destylowaną. Tak przygotowana próbka jest

gotowa do przeprowadzenia mikroskopowej analizy składu gatunkowego wioślarek. Przed przystąpieniem do analizy do zawiesziny w probówce dodaje się kroplę safraniny (mieszanka sypkiej safraniny i gliceryny), która zabarwia szczątki na różowo i dzięki temu lepiej widoczne są szczegóły ich budowy. Następnie za pomocą pipety pobiera się 0,1 ml roztworu, rozprawdza na szkiełku podstawowym i przykrywa szkiełkiem nakrywkowym. Tak przygotowany preparat umieszcza się na stoliku mikroskopu biologicznego i ogląda, wykorzystując powiększenie 100×, 200× i 400×. Ogląda się cały preparat i zlicza wszystkie szczątki wioślarek (puszki głowowe, skorupki tułowiowe, postabdomeny, efipia) z podziałem na gatunki. Do identyfikacji szczątków najczęściej wykorzystywany jest atlas współautorstwa profesor Krystyny Szeroczyńskiej (Szeroczyńska, Sarmaja-Korjonen 2007), przydatna do tego jest również praca Flössnera (2000). Dla każdej próbki trzeba policzyć szczątki z 1-4 szkiełek, po to aby uzyskać minimalną wymaganą liczbę 70-100 osobników w próbce (Kurek i in. 2010). Wyżej wymieniona metoda prowadzi do przygotowania preparatów, które są jednorazowe i po analizie wyrzucane. Można też przygotowywać preparaty stałe mogące przetrwać nawet kilka lat, poprzez utrwalenie próbek gliceryną (Szeroczyńska, Sarmaja-Korjonen 2007).

Mając dane o ilości osobników każdego gatunku i znając liczbę przeanalizowanych szkiełek,



liczy się liczbę osobników w znanej objętości próbki (np. 1 cm<sup>3</sup> osadu w 10 ml). Jeżeli zliczano osobniki na jednym szkiełku (0,1 ml roztworu), to liczbę osobników każdego gatunku mnoży się  $\times 100$ , jeżeli z dwóch szkiełek – to  $\times 50$ , z trzech –  $\times 33$ , z czterech –  $\times 25$ . Postępując w ten sposób otrzymuje się absolutną liczbę osobników wioślarek każdego gatunku w 1 cm<sup>3</sup>. Mając dane dotyczące wagi próbki, możemy przeliczyć nasze dane na liczbę osobników w 1 g materiału, a jeżeli wiemy ile lat sedimentacji przypada na 1 cm osadu, można policzyć, ile osobników wioślarek dostawało się do osadu w trakcie trwania 1 roku osobniki/cm<sup>2</sup>/rok (os./cm<sup>2</sup>/r.). Uzyskane absolutne wartości zawsze przelicza się na udziały procentowe, gdyż informacja o wzajemnych zależnościach między gatunkami czy grupami gatunków, określenie gatunków dominujących jest bardzo ważna przy interpretacji końcowych wyników analizy.

### PREZENTACJA WYNIKÓW

Uzyskane wyniki analizy subfosylnych wioślarek najwygodniej przedstawia się z wykorzystaniem programu C2 (Juggins 2007); można również wykorzystywać do tego program POLPAL (Nalepka i Walanus 2003) oraz Tilia (Grimm 2012). Program C2 umożliwia tworzenie diagramów stratygraficznych prezentowanych na skali wieku i głębokości lub tylko głębokości (ryc. 5; ryc. 6). W programie tym można wykonać podstawową obróbkę graficzną diagramów, jednak wersję końcową warto jest udoskonalić, wykorzystując program CorelDraw. Dane do programu C2 przygotowuje się w programie Excel i zapisuje w wersji 97-2003. Pierwsza kolumna zatytułowana powinna być „ID”, a druga „Głębokość” – w obu kolumnach powinna być wpisana głębokość próbek. W kolejnych kolumnach umieszczone są zliczenia czy też udziały procentowe poszczególnych gatunków, w górnym wierszu umieszczamy ich nazwy. Wszystkie diagramy zamieszczone w tym rozdziale powstały według wyżej opisanej metody.

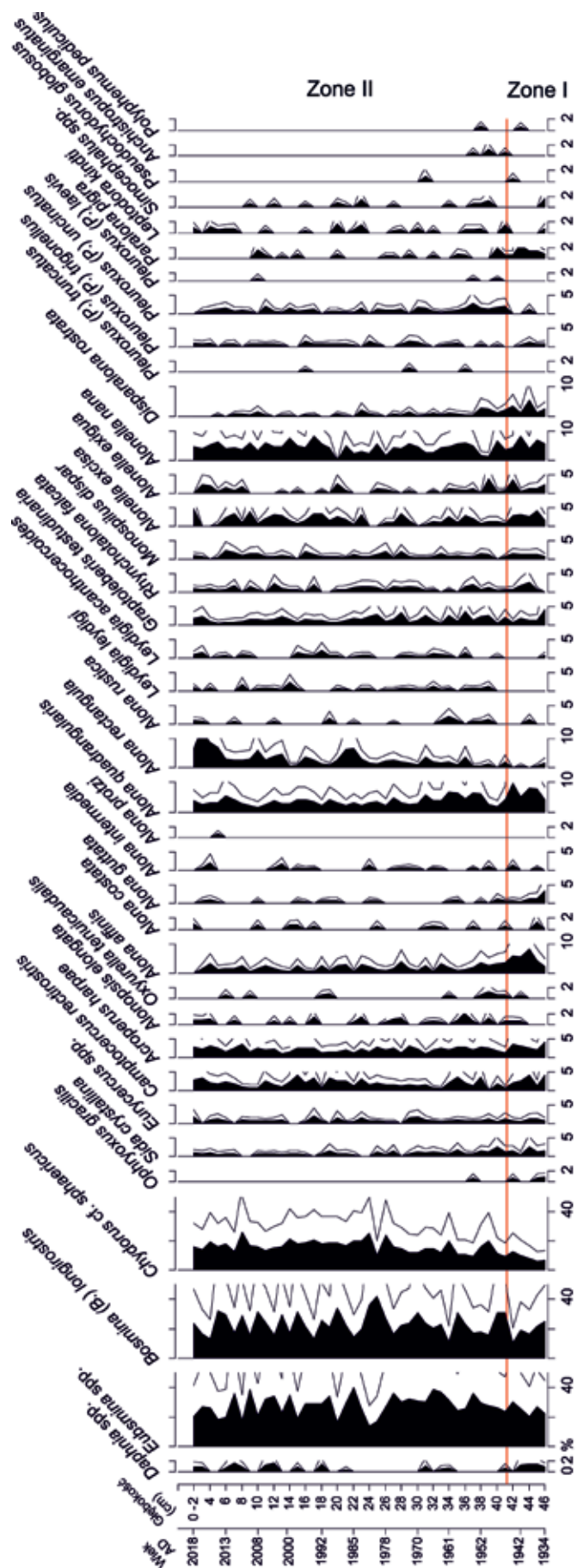
Na rycinie 5 zaprezentowano diagram procentowy wioślarek z jeziora Sekšu na Łotwie (Zawiska i in. 2020). Czarne wypełnienie wskazuje na udział procentowy danego gatunku, a linia zlokalizowana z prawej strony każdej krzywej pokazuje z przewyższeniem zmienność wartości pomiędzy próbkami. Wyniki zaprezentowane zostały w skali głębokości

i skali czasu, jednak nie zawsze ma się do dyspozycji wiarygodny model wiek-głębokość. W takiej sytuacji przedstawia się wyniki tylko na skali głębokości. Kolejny prezentowany diagram tak właśnie został zrobiony (ryc. 6), a czas określony został poprzez wydzielenie okresów Holocenu za pomocą analizy pyłkowej (Zawiska i in. 2019). Wyniki analizy wioślarek zaprezentowane są jako procent udziału każdego gatunku, a dodatkowo zamieszczono krzywą zależność gatunków pelagicznych do litoralnych (P/L). Na ostatnim diagramie widocznym na rycinie 7 zaprezentowana została krzywa frekwencji całkowitej wioślarek wyrażona jako liczba osobników na centymetr na rok – czyli jako opad (flux) (Zawiska i in. 2017). Tak przedstawione wyniki są przydatne do wnioskowania o zmianach produktywności – większa liczba osobników może oznaczać większą trofję zbiornika.

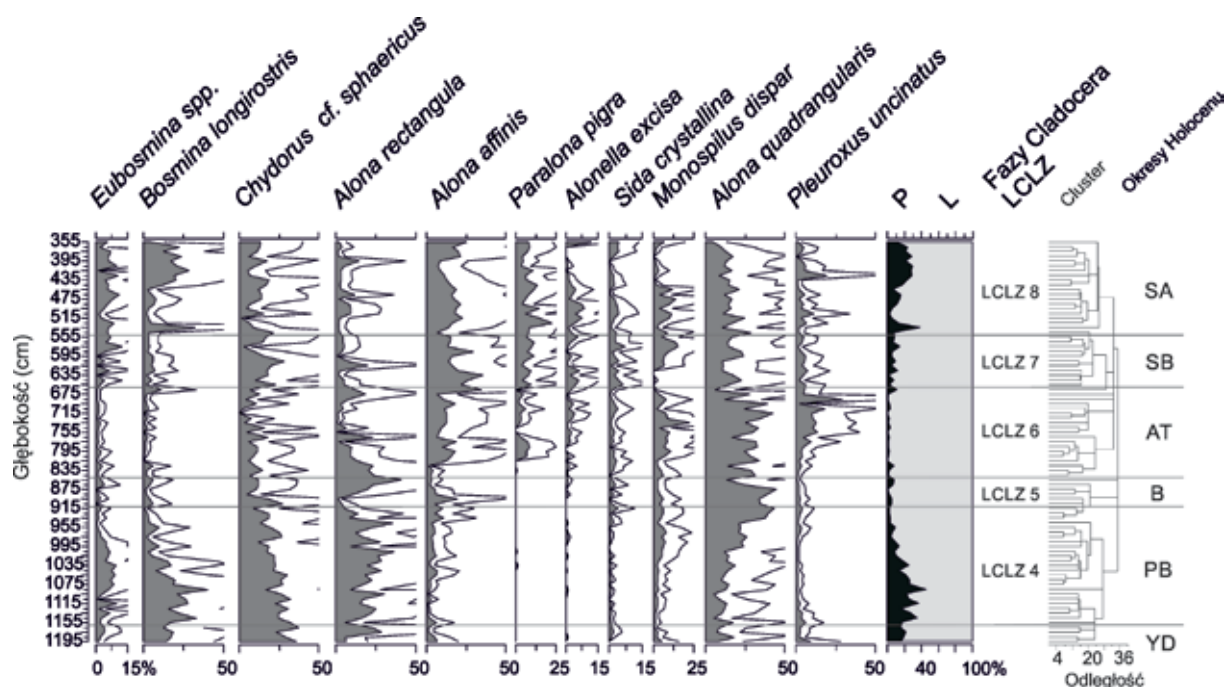
### WYBRANE PRZYKŁADY ZASTOSOWANIA ANALIZY WIOŚLAREK W BADANIACH ARCHEOLOGICZNYCH

W badaniach archeologicznych najbardziej podstawowe zastosowanie analizy wioślarek polega na pomocy w określeniu genezy badanego osadu; jeżeli w pobranym na stanowisku materiale będą obecne szczątki wioślarek, wtedy z pewnością można stwierdzić, że akumulował on w zbiorniku wodnym. Analiza ta jest często wykorzystywana w kompleksowych badaniach archeologicznych do rekonstrukcji zmian środowiska przyrodniczego spowodowanych działalnością człowieka. Dostarcza również cennych dla archeologów informacji o warunkach życia badanej społeczności (Polcyn 1996). Jak już wspomniano wcześniej w tym rozdziale, wioślarki to organizmy szybko reagujące na zmiany środowiska, takie jak temperatura, zakwaszenie, trofia; z ich wykorzystaniem odtworzyć również można zmiany poziomu wody w zbiorniku naturalnych takim jak jezioro (Szeroczyńska 1991; 1998a; 2002; Polcyn 1996), a także w zbiornikach wybudowanych przez człowieka takich jak fosy. Osady pobrane z fosy grodu w Rozprzycy pozwoliły na rekonstrukcję zmian środowiska zachodzących w jej pobliżu w okresie XIII-XIX w. (Kittel i in. 2018).

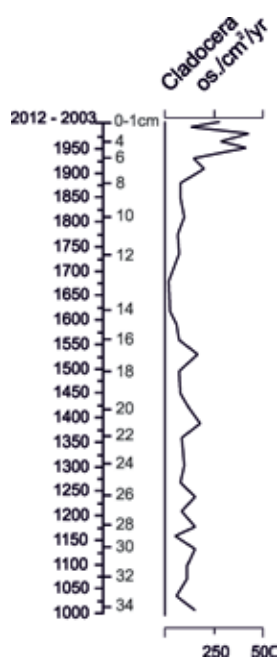
Analiza składu gatunkowego wioślarek z osadów umożliwia ocenę zmiany żyzności wód i w połączeniu z wynikami analizy palinologicznej pozwala



**Ryc. 5.** Diagram udziału procentowego gatunków wioślarek dla osadów jeziora Sekšu (Łotwa) zaczerpnięty z publikacji Zawiska i in. 2020



**Ryc. 6.** Diagram udziału procentowego gatunków wioślarek i wskaźnik P/L dla osadów jeziora Łukie (Polesie Lubelskie) zaczerpnięty z publikacji Zawiska i in. 2019



**Ryc. 7.** Diagram frekwencji całkowitej (suma liczby osobników wszystkich gatunków) w przeliczeniu na rok (flux) dla osadów jeziora Atna (Norwegia) zaczerpnięty z publikacji Zawiska i in. 2017

wnioskować, czy zmiany te były wynikiem działalności człowieka. Wzrost trofii może być efektem dostarczenia do zbiornika znacznej ilości biogenów – ścieków bytowych czy też powstałych w wyniku hodowli zwierząt domowych (Szeroczyńska 1991; 1998b; 2002; Polcyn 1996). Znaczący wpływ działalności człowieka na jezioro został udokumentowany m.in. w badaniach nad osadami jeziora Gopło (Mikulski 1978) czy jeziora Gościąg (Ralska-Jasiewiczowa i in. 1998). Wyraźny wpływ aktywności mezolitycznych społeczności zbieracko-łowickich na środowisko przyrodnicze wykazany został w badaniach nad osadami jeziornych zachowanymi na stanowisku Kopanica. Analiza wioślarek była pomocna w udokumentowaniu okresów wzmożonej aktywności osadniczej, której efektem był wzrost żyzności wód zbiornika (Sobkowiak-Tabaka i in. 2019). Dzięki wykorzystaniu wyników analizy wioślarek możliwa jest też ocena wpływu na życie w jeziorze wybranych form działalności człowieka takich, jak moczenie łądyg konopi czy lnu (Kittel 2014).

Podsumowując, analiza szczątków wioślarek z osadów biogenicznych jest dobrym narzędziem do rekonstrukcji zmian środowiska, a szczególnie wpływu działalności człowieka na środowisko i jest doskonałym uzupełnieniem metod stosowanych w badaniach archeologicznych.



## FINANSOWANIE

Materiały wykorzystane do napisania rozdziału powstały w wyniku realizacji grantu badawczego NCN 2016/23/D/ST10/03071 oraz grantu finansowanego z funduszy norweskich: FSS/2013/IIC/W/0022/U/0043.

## LITERATURA

- Bradbury, J.P., Whiteside, M.C. 1980. Paleolimnology of two lakes in the Kutlan Glacier region, Yukon Territory, Canada. *Quaternary Research* 14: 149–168.
- Brodersen, K.P., Whiteside, M.C., Lindegaard C. 2011. Reconstruction of trophic state in Danish lakes using subfossil chydorid (Cladocera) assemblages. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 55(5): 1093–1103.
- Crisman, T.L., Whitehead, D.R. 1978. Palaeolimnological studies on small New England (U.S.A.) ponds. II Cladoceran community responses to trophic oscillations. *Polish Archives of Hydrobiology* 25: 75–86.
- Duigan, C.A., Birks, H.H. 2000. The late-glacial and early-Holocene palaeoecology of cladoceran microfossil assemblages at Kråkenes, western Norway, with a quantitative reconstruction of temperature changes. *Journal of Paleolimnology* 23: 67–76.
- Flössner, D., 2000. *Die Haplopoda und Cladocera (ohne Bosminidae) Mitteleuropas*. Leiden, 1–425.
- Fryer, G. 1968. Evolution and Adaptive Radiation in the Chydoridae (Crustacea: Cladocera): A Study in Comparative Functional Morphology and Ecology. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, *Biological Sciences* 254(795): 221–382.
- Goslar, T. 1998. Holocene sediments of Lake Gościąg – chronological background, (w:) M. Ralska-Jasiewiczowa, T. Goslar, Madeyska, L. Starkel (red.), *Lake Gościąg, Central Poland*. Kraków.
- Grimm, E.C. TILIA Software; Illinois State Museum, Research and Collection Center: Springfield, IL, USA, 2012.
- Hann, B.J., Warner, B.G. 1987. Late Quaternary Cladocera from coastal British Columbia, Canada: A record of climatic or limnologic change? *Archiv für Hydrobiologie* 110: 161–177.
- Hofmann, W. 1998. Cladocerans and chironomids as indicators of lake level changes in north temperate lakes. *Journal of Paleolimnology* 19: 55–62.
- Hofmann, W. 1987. Cladocera in space and time: analysis of lake sediments. *Hydrobiologia* 145: 315–321.
- Hofmann, W. 1983. Stratigraphy of Cladocera and Chironomidae in a core from a shallow North German lake. *Hydrobiologia* 103: 235–239.
- Hyvärinen, H., Alhonen, P. 1994. Holocene lake-level changes in the Fennoscandian tree-line region, western Finnish Lapland: diatom and cladoceran evidence. *The Holocene* 4: 251–258.
- Juggins, S. 2007. C2 Version 1.5 User guide. Software for ecological and palaeoecological data analysis and visualisation. Newcastle.
- Kittel, P., Sikora, J., Antczak-Orlewska, O., Brooks, S., Elias, S., Krapiec, M., Luoto, T., Borówka, R., Okupny, D., Pawłowski, D., Płóciennik, M., Rządziejewicz, M., Stachowicz-Rybka, R., Wacnik, A. (2018). The palaeoecological development of the Late Medieval moat – Multiproxy research at Rozprza, Central Poland. *Quaternary International* 482: 131–156. 10.1016/j.quaint.2018.03.026.
- Kittel, P., Muzolf, B., Płóciennik, M., Elias, S., Brooks, S.J., Lutyńska, M., Pawłowski, D., Stachowicz-Rybka, R., Wacnik, A., Okupny, D., Głęb, Z., Mueller-Bieniek, A. 2014. A multi-proxy reconstruction from Lutomiersk-Koziówki, Central Poland, in the context of early modern hemp and flax processing. *Journal of Archaeological Science* 50: 318–337.
- Korhola, A. 1992. The Early Holocene hydrosere in a small acid hill-top basin studied using crustacean sedimentary remains. *Journal of Paleolimnology* 7: 1–22.
- Korhola A., Rautio, M. 2001. Cladocera and other branchiopod crustaceans, (w:) J.P. Smol, H.J.B. Birks, W.M. Last (red.) *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments, Volume 4: Zoological Indicators*. Dordrecht, 5–41.
- Korhola, A., Tikkanen, M. 1991. Holocene development and early extreme acidification in a small hilltop lake in southern Finland. *Boreas* 20: 333–356.
- Kurek J., Korosi, J., Jeziorski, A., Smol, J.P. 2010. Establishing reliable minimum count size for cladoceran subfossils sampled from lake sediments. *Journal of Paleolimnology* 44: 603–612. 10.1007/s10933-010-9440-6.
- Lotter, A.F., Birks, H.J.B., Hofmann, W., Marchetto, A. 1997. Modern diatom, cladocera, chironomid, and chrysophyte cyst assemblages as quantitative indicators for the reconstruction of past environmental conditions in the Alps. I. Climate. *Journal of Paleolimnology* 18: 395–420.
- Mikulski, J.S. 1978. Value of some biological indices in case histories of lakes, SIL Proceedings, 1922–2010, 20:2, 992–996, DOI: 10.1080/03680770.1977.11896634
- Mueller, W.P. 1964. The distribution of cladoceran remains in surficial sediments from three northern Indiana Lakes. *Invest. Indiana Lakes & Streams* 1: 1–63.
- Nalepka, D., Walanus A. 2003. Data processing in pollen analysis. *Acta Palaeobotanica* 43(1): 125–134.
- Polcyn, I. 1996. Application of Cladocera analysis in archaeology. *Circaea* 11(2): 41–48.
- Ralska-Jasiewiczowa, M., Goslar, T., Madeyska, T., Starkel, L. (red.), 1998. *Lake Gościąg, Central Poland: A Monographic Study, Part 1*. Kraków, 340.

- Rybak, J.I., Błędzki, L.A. 2010. *Śladowodne skorupiaki planktonowe*. Warszawa.
- Sarmaja-Korjonen, K., Alhonen, P. 1999. Cladoceran and diatom evidence of lake-level fluctuations from a Finnish lake and the effect of aquatic-moss layers on microfossil assemblages. *Journal of Paleolimnology* 22: 277–290.
- Sobkowiak-Tabaka, I., Pawłowski, D., Milecka, K., Kubiak-Martens, L., Kostecki, R., Janczak-Kostecka, B., Goslar, T., Ratajczak-Szczerba, M. 2019. Multi-proxy records of Mesolithic activity in the Lubuskie Lakeland (western Poland). *Vegetation History and Archaeobotany* 29. 10.1007/s00334-019-00752-3.
- Szeroczyńska, K. 2002. Human impact on lakes recorded in the remains of Cladocera (Crustacea). *Quaternary International* 95(6): 165–174.
- Szeroczyńska, K. 1991. Impact of prehistoric settlements on the Cladocera in the sediments of Lake Suszek, Błędowo and Skrzetuszewskie. *Hydrobiologia* 225: 105–140.
- Szeroczyńska, K. 1998a. Wioślarki (Cladocera, Crustacea) jako źródło informacji w badaniach osadów jeziornych. *Studia Geologica Polonica* 112: 9–28.
- Szeroczyńska, K. 1998b. Anthropogenic transformation of nine lakes in Central Poland from Mesolithic to modern times in the light of Cladocera analysis. *Studia Geologica Polonica* 112: 123–165.
- Szeroczyńska, K., Sarmaja-Korjonen, K. 2007. *Atlas of Subfossil Cladocera from Central and Northern Europe*. Świecie.
- Szeroczyńska, K., Zawisza E. 2007. Paleolimnologia – historia rozwoju jezior w Polsce w świetle badań fauny wioślarek. *Studia Limnologica et Telmatologica* 1: 51–60.
- Tobolski, K. 2000. *Przewodnik do oznaczania torfów i osadów jeziornych*. Warszawa.
- Whiteside, M.C. 1970. Danish Chydorid Cladocera: Modern ecology and core studies. *Ecol. Monogr.* 40: 79–118.
- Zawiska, I., Dimante-Deimantovica, I., Luoto, T.P., Rzodkiewicz, M., Saarni, S., Stivrins, N., Tylmann, W., Lanka, A., Robeznieks, M., Jilbert, T. 2020. Long-Term Consequences of Water Pumping on the Ecosystem Functioning of Lake Sekšu, Latvia. *Water* 12: 1459.
- Zawiska, I., Apolinarska, K., Woszczyk, M. 2019. Holocene climate vs. catchment forcing on a shallow, eutrophic lake in eastern Poland. *Boreas* 48: 166–178.
- Zawiska, I., Luoto, T.P., Nevalainen, L., Tylmann, W., Jensen, T.C., Obremska, M., Słowiński, M., Woszczyk, M., Schartau, A.K., Walseng, B. 2017. Climate variability and lake ecosystem responses in western Scandinavia (Norway) during the last Millennium. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 466: 231–239.
- Zawiska, I., Zawisza, E., Wojewódka, M., Sinev, A.Y. 2016. Exploring the world of micro sculptures – subfossil Cladocera remains under the SEM. *Advances in Oceanography and Limnology* 7(2): 177–183.
- Zawiska, I., Słowiński, M., Correa-Metrio, A., Obremska, M., Luoto, T., Nevalainen, L., Woszczyk, M., Milecka, K. 2015. The response of a shallow lake and its catchment to Late Glacial climate changes – A case study from eastern Poland. *Catena* 126(0): 1–10.
- Zawiska, I., Zawisza, E., Wojewódka, M., Sinev, A.Y. 2016. Exploring the world of micro sculptures – subfossil Cladocera remains under the SEM. *Advances in Oceanography and Limnology* 7(2): 177–183.







# Archeoentomologia

Marcin Kadej, Szymon Konwerski, Agata Hałuszko

---

## WPROWADZENIE

Związek archeologii i entomologii został doskonale zobrazowany w pierwszej scenie filmu *Faraon* z 1965 roku w reżyserii Jerzego Kawalerowicza ukazującej skarabeusza, który toczy po piasku pustyni kulkę zwierzęcych odchodów. W *Milczeniu owiec* w reżyserii Jonathana Demme z 1991 roku owad umieszczony w ustach ofiary stanowi istotny element umożliwiający rozwikłanie kryminalnej zagadki i ukazuje złożoną problematykę entomologii sądowej. Podobnych przykładów zapisanych w kulturze popularnej jest dużo więcej. Symboliczne znaczenie owadów to oczywiście tylko jeden z wielu aspektów towarzyszących badaniom archeoentomofauny, a jej zagadnienia i problematyka są znacznie bardziej złożone. Owady (Insecta) stanowiące podstawę wnioskowania w archeoentomologii to najliczniej reprezentowana w środowiskach lądowych gromada zwierząt. Liczebność tych stawonogów oceniana jest na blisko 5,5 miliona gatunków, choć dotychczas opisano dopiero około miliona (Stork 2018). Ta ich liczebna przewaga wiąże się z wieloma funkcjami, które mają istotny wpływ na trwałość ekosystemów. Owady uczestniczą w tak ważnych procesach, jak zapylanie roślin kwiatowych, rozsiewanie nasion, przemiana martwej materii organicznej, spulchnianie gleby, regulowanie populacji innych organizmów etc. Zamieszkują różnorodne

środowiska lądowe i wtórnie przystosowały się do życia w wodzie.

Istotnym elementem metodyki archeologicznych badań terenowych jest zabezpieczanie pozyskiwanych z dawnych nawarstwień prób przeznaczonych do szeroko rozumianych analiz przyrodniczych. Swoistym standardem, z którym spotykamy się najczęściej, są próbki pozyskiwane w celu datowania bezwzględnych sedymentów, wskazania obecności i rozpoznania zalegających mikro- i makroskopowych szczątków roślinnych, oceny składu mineralicznego i genezy gleb oraz rekonstrukcji paleośrodowiska. Choć podczas prac wykopaliskowych nieco rzadziej spotykamy się z próbkami pozyskiwanymi w celu potwierdzenia obecności owadów, nie oznacza to, że w tych kontekstach nie występowały. Wynika to głównie z relatywnie niewielkich rozmiarów owadów oraz fragmentacji ich ciał zabezpieczonych w próbkach. W związku z tym dopiero oko uzbrojone w okular mikroskopu stereoskopowego, zwanego też binokulem (czasem też mikroskopu świetlnego), jest w stanie dostrzec szczegóły morfologii (np. urzeźbienie pokryw) mające często kluczowe znaczenie przy identyfikacji gatunkowej.

Archeoentomologia (ang. *archaeoentomology*) to wąska specjalność na styku dwóch dyscyplin naukowych, jakimi są nauki archeologiczne i biologiczne (patrz ramka na następnej stronie). Jest ona stosunkowo młodą specjalnością, spopularyzowaną



w drugiej połowie XX w. (Coope 1977; 1986; 1990; Osborne 1969; Buckland 1976). Pomimo krótkiego stażu w ostatnich latach rozwija się dynamicznie, o czym świadczą liczne publikacje naukowe (Moret 1998; Panagiotakopulu i Buckland 1991; 2018; Huchet 1996; 2017a; 2017b; Huchet i Greenberg 2010; Carrott i Kenward 2001; Gaudioi in. 2013; Forbes i in. 2014; Panagiotakopulu i in. 2010; 2013; 2018; Giordani i in. 2018; Panagiotakopulu 2019; Pradelli i in. 2019; Fägerström i in. 2020; Henríquez-Valido i in. 2020), a także coraz większa atrakcyjność tego zagadnienia na międzynarodowych konferencjach naukowych (Forbes i in. 2019; Kirgis i in. 2019; Solari i in. 2019). Jednak w rodzimej literaturze termin „archeontomologia” nieczęsto się pojawia, a badania sprowadzają się raczej do incydentalnych działań niż pełnowartościowej, świadomie rozwijanej subdyscypliny naukowej. Odnośnie do Polski można śmiało zaryzykować stwierdzenie, że badania w zakresie archeontomologii są dopiero na etapie początkowym, o czym świadczy niewielka liczba publikacji poświęconych tej dziedzinie (Bunalski i Rączkowski 1998; Gładykowska-Rzeczycka i Parafiniuk 2001; Bunalski 2005; Konwerski 2013; 2017).

### DEFINICJE WYBRANYCH DZIAŁÓW NAUKI ZAJMUJĄCYCH SIĘ BADANIEM SZCZĄTKÓW OWADÓW

Paleontomologia – dział paleozoologii zajmujący się badaniem szczątków wymarłych owadów zdeponowanych w pokładach (warstwach stratygraficznych), na podstawie których odtwarzana jest historia naturalna, procesy ewolucyjne i związki pokrewieństwa pomiędzy taksonami, rekonstruowana jest ich biologia oraz środowisko życia.

Archeontomologia – dział na pograniczu archeologii i entomologii, zajmujący się badaniem szczątków owadów z kontekstów archeologicznych. Jest to specjalistyczna subdyscyplina w obrębie nauk biologicznych, oparta głównie na wiedzy o owadach (entomologia). Aktywność naukowa na tym polu czerpie z informacji na temat taksonomii, morfologii, biologii, ekologii, zoogeografii poszczególnych gatunków owadów oraz ich możliwego wpływu na wnioskowanie o okolicznościach, w jakich organizmy te zostały zidentyfikowane w zabezpieczonym materiale i próbkach w czasie badań

archeologicznych. Analizy próbek z materiałami entomologicznymi służą do rekonstrukcji sposobu życia i stanu zdrowia dawnych populacji (kondycji biologicznej), gospodarki, ewolucji wzorców żywieniowych i wpływu działalności człowieka na przeszłe środowiska.

Archeontomologia funeralna – wąska subdyscyplina w obrębie archeontomologii skupiająca się na badaniu szczątków owadów towarzyszących zwłokom lub ich częściom. W tym kontekście archeologicznym badania owadów pozwalają zdobyć wiedzę na temat środowiska, okoliczności ekologicznych, tafonomii, a niekiedy takich czynników kulturowych, jak praktyki i zwyczaje związane z grzebaniem zwłok ludzkich i zwierzęcych.

Entomologia sądowa – wąska specjalność w obrębie entomologii skupiająca się na badaniu owadów, ich szczątków i śladów aktywności w kontekście postępowań sądowych. W obrębie tej dziedziny wyróżnia się trzy działy: entomologię magazynowo-przemysłową (ang. *stored product entomology*), entomologię miejską (ang. *urban entomology*, czasem nazywaną sanitarno-epidemiologiczną) oraz entomologię medyczno-kryminalistyczną, zwaną też entomoskopią (ang. *medico-legal entomology* lub *medico-criminal entomology*).

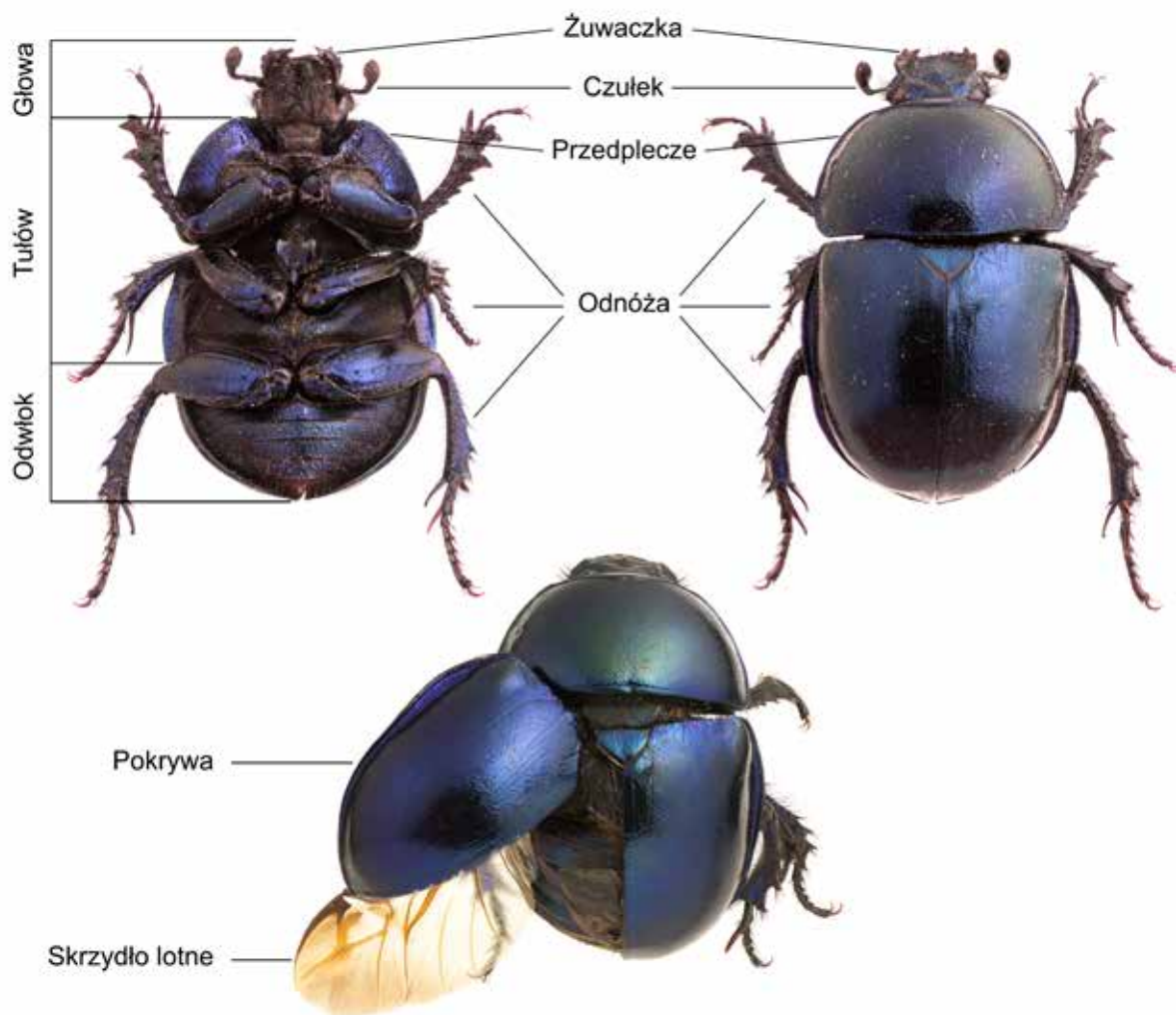
Entomologia sądowa najczęściej kojarzona jest z entomoskopią, której głównym celem jest określenie czasu zgonu na podstawie analizy jakościowej i ilościowej owadów znalezionych na zwłokach, zwłaszcza wtedy, gdy zastosowanie innych metod medyczno-sądowych jest utrudnione. Czasem z jej pomocą można ustalić także okoliczności i przyczynę zgonu.

### CHARAKTERYSTYKA OWADÓW

Obecnie wyróżnia się ok. 35 rzędów owadów (Beutel i in. 2014); wśród nich najliczniej reprezentowane są chrząszcze (Coleoptera) (ryc. 1), muchówki (Diptera) (ryc. 2), błonkówki (Hymenoptera) oraz motyle (Lepidoptera) (Grimaldi, Engel 2005).

Ciało owada zbudowane jest zasadniczo z trzech odcinków: głowy (*caput*), tułowia (*thorax*) i odwłoka (*abdomen*) (ryc. 1-2). Funkcję szkieletu zewnętrznego owadów pełni oskórek, zwany kutikulą, zbudowany z amino-polisacharydów. Na ich głowie obecne są czułki, oczy oraz aparat gębowy; na tułowiu znajdują się dwie pary skrzydeł (czasem przekształcone, nieobecne lub mocno





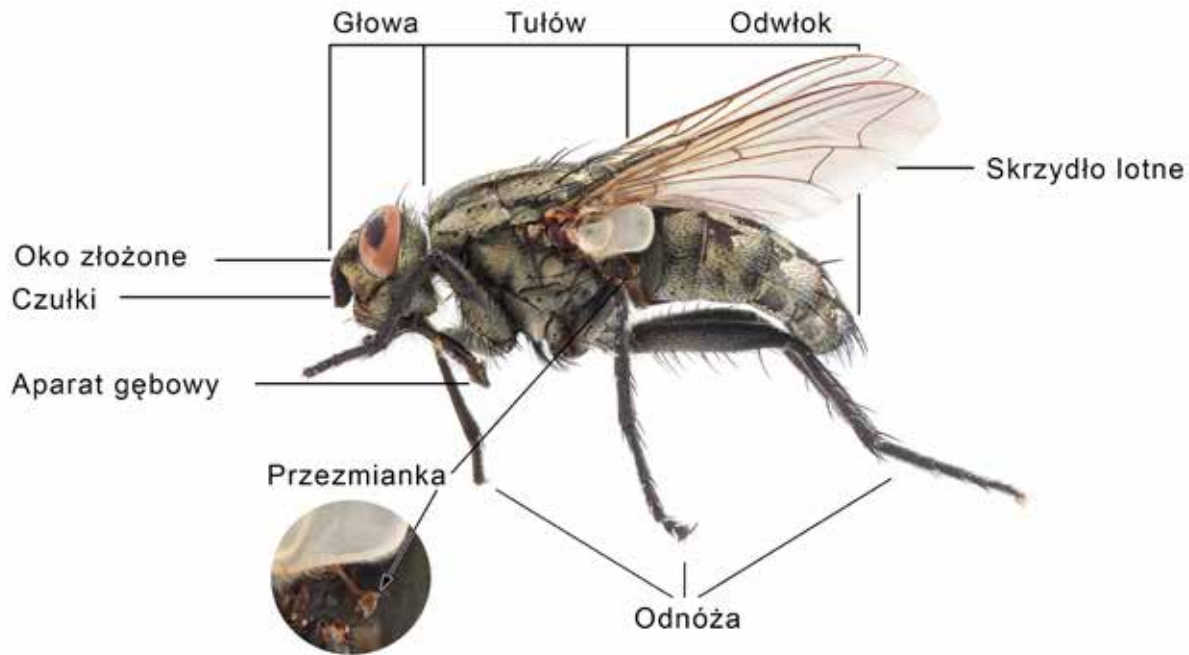
**Ryc. 1.** Ogólna budowa chrząszcza na przykładzie żuka wiosennego *Trypocopris vernalis vernalis*. Fot. M. Kukla, oprac. A. Hałuszko

zredukowane) oraz trzy pary odnóży (ryc. 1-2). Odwłok składa się z 11 segmentów i stanowi tę część owada, która zawiera m.in. część układu pokarmowego, układu oddechowego oraz narządy rozrodcze. Szczegółowe informacje o budowie morfologicznej oraz biologii owadów przedstawiają Grabda (1985) i Szadziwski (2012).

Owadami najczęściej wykazywanymi w próbach entomologicznych, zarówno w odniesieniu do archeoentomologii, jak i entomologii sądowej, są przedstawiciele chrząszczy (Coleoptera) (ryc. 1) i muchówek (Diptera) (ryc. 2). Owady należące do tych rzędów przechodzą cykl rozwojowy zamknięty, w którym pomiędzy postaciami młodocianymi (tj. jaja i larwy) a postacią dorosłą (*imago*) występuje poczwarka (*pupa*). W takim cyklu owady przechodzą przez przeobrażenie zupełne (holometabolia).

O ile w przypadku entomologii sądowej w zabezpieczonym materiale niemal tak samo często możemy spotkać żywe i martwe chrząszcze i muchówki, o tyle w archeoentomologii (w tym funeralnej) zdecydowanie lepiej zostają zachowane szczątki chrząszczy (Coleoptera). Wynika to z faktu, że kutikula Coleoptera jest o wiele bardziej wysycona amino-polisacharydami, przez co jest grubsza, a więc lepiej zabezpieczona przed niekorzystnym wpływem czynników zewnętrznych (np. tlen, woda, temperatura) przyspieszających ich rozkład. W przypadku muchówek (Diptera), z tych samych powodów co u chrząszczy, szczątkami najlepiej zachowanymi w próbkach są osłonki poczwarkowe (*puparia*) i ich fragmenty.

Szczegółowe informacje o budowie morfologicznej oraz biologii chrząszczy przedstawia Wanat (2012), muchówki zaś scharakteryzowali Szadziwski i Giłka (2012).



**Ryc. 2.** Ogólna budowa muchówki na przykładzie ścierwicy *Sarcophaga* sp. (widok z boku). Fot. M. Kukla, oprac. A. Hałuszko

### PODZIAŁ MATERIAŁÓW ARCHEOENTOMOLOGICZNYCH

Większość pozostałości bioarcheologicznych nie jest widoczna nieuzbrojonym w sprząet optyczny okiem i może zostać zidentyfikowana dopiero podczas specjalistycznej flotacji i segregacji. W nielicznych przypadkach szczątki organiczne zachowują się znacznie lepiej i dzięki temu można je dokładniej zabezpieczyć, udokumentować *in situ* i przekazać do dalszych badań specjalistycznych.

Ze względu na rodzaj odkrywanych pozostałości, materiały entomologiczne możemy podzielić na:

- znaleziska bezpośrednie – fragmenty ciał owadów;
- znaleziska pośrednie, w tym:
  - ślady działalności życiowej, np. żerowiska larw w drewnie (ryc. 3);
  - ślady utylitarne wykorzystywania owadów, np. w postaci związków chemicznych;
  - przedstawienia ikonograficzne.

Pierwszą grupę stanowią zachowane szczątki dorosłych owadów i ich części oraz pozostałości po poszczególnych stadiach rozwojowych. W materiale archeologicznym najlepiej zachowują się fragmenty silnie zesklekotyzowane, o zwartej budowie. Najczęściej są to głowy, żuwaczki, przedplecza, pokrywy, półpokrywy i bobówki

muchówek. Struktury członowane (np. odnóży i odwłoki) zwykle rozpadają się na części lub ulegają zniszczeniu (np. czułki, głaszczki i stopy), a stopień zniszczenia zależy głównie od ich wielkości i kształtu (zwykle materiał jest przynajmniej częściowo rozdrobniony i zdeformowany). Stopień rozdrobnienia i deformacji zachowanego materiału wpływa na możliwość jego dalszego opracowywania, gdyż fragmenty pozbawione cech taksonomicznych nie są możliwe do oznaczenia. Deformacja, np. silne spłaszczenie, także może utrudnić oznaczanie (dotyczy to zwłaszcza pokryw chrząszczy). Większość rzędów owadów o przeobrażeniu zupełnym (holometaboliczne) reprezentowana jest w próbach archeologicznych głównie przez osobniki dorosłe (*imagines*). Ciała larw są zwykle słabo zesklekotyzowane i ulegają niemal całkowitemu zniszczeniu; zachowują się jedynie takie struktury, jak puszka głowowa i żuwaczki. Larwy silnie zesklekotyzowane (np. chrząszczy sprężykowatych Elateridae czy czarnuchowatych Tenebrionidae) mają szansę na zachowanie w próbach, jednak zwykle w stanie rozczłonkowanym (poszczególne segmenty). W przypadku muchówek (Diptera) najczęściej zachowują się bobówki, czyli osłonki poczwarkowe, natomiast osobniki dorosłe i larwy

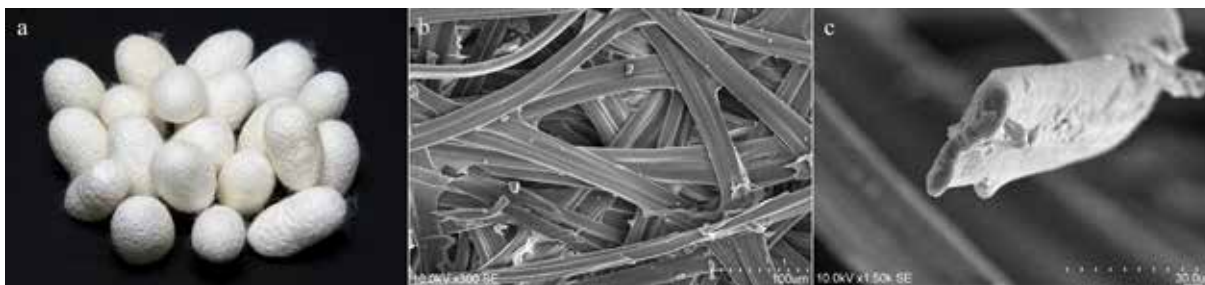


**Ryc. 3.** Belka z konstrukcji średniowiecznej z widocznymi żerowiskami larw kozioroga dębosza *Cerambyx cerdo* (a); samiec *C. cerdo* (b). Fot. S. Konwerski (a), M. Kukła (b)



**Ryc. 4.** Współczesne liście dębu z galasami. Fot. M. Mackiewicz





**Ryc. 5.** Współczesne kokony jedwabnika z gatunku *Bombyx mori* (a) (fot. M. Mackiewicz); obrazowanie powierzchni kokonu wykonane techniką SEM (b); pojedyncze włókno jedwabiu w obrazowaniu SEM (c). Oprac. A. Hałuszko

ulegają zwykle zniszczeniu ze względu na delikatną budowę ciała. Nawet mocne struktury chitynowe w przypadku materiałów archeoentomologicznych ulegają zmianom w stosunku do ich wyglądu u żywego owada. Dotyczy to zwłaszcza barwy (szczególnie gdy jest ona efektem barwników organicznych) oraz struktury mikrorzeźby (co wiąże się z wrażeniem połysku lub matowości powierzchni).

Przetrawianie szczątków archeoentomologicznych zależy od sprzyjających określonych warunków tafonomicznych (Stegmaier 2009; Huchet 2014; Kirillova i in. 2016) lub relatywnie krótkiego czasu zalegania (Vanin i Huchet 2017). Do najczęściej zachowujących się śladów działalności owadów należą znaleziska pośrednie: żerowiska larwalne, kolebki poczwarkowe w drewnie, nagromadzenia odchodów i ślady żerowania na powierzchni roślin oraz w ich wnętrzu (tzw. miny) i wyrośla (galasy; ryc. 4), kolebki poczwarkowe wygrzane przez larwy w twardym materiale (np. kościach w wypadku nekrofilnych *Dermestidae*). Znaleziska te wydzielane są głównie podczas analiz archeobotanicznych (Tomaszewska 2015) bądź obserwowane w trakcie badań osteologicznych (antropologicznych, archeozoologicznych) (Gładykowska-Rzeczycka i Parafiniuk 2001; Hałuszko 2015).

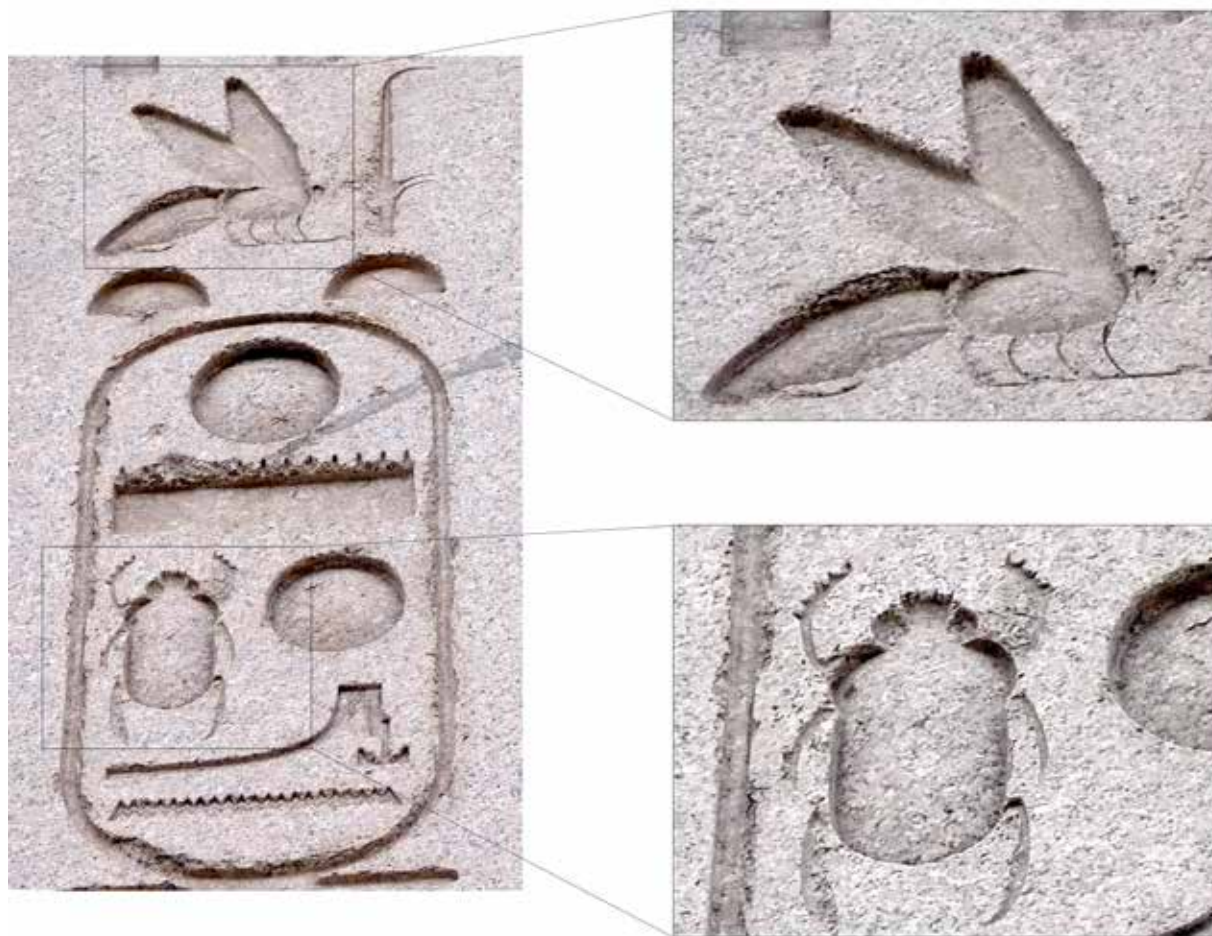
Oddzielną grupę oznak pośredniej obecności owadów stanowią przetrwałe związki chemiczne na/w ściankach naczyń lub zachowanych tekstyliach (Vanden Berghe 2011; Gu i in. 2019), a także identyfikowane włókna pochodzenia zwierzęcego (tu: jedwabiu) (Rast-Eicher 2016: 277-291; ryc. 5). W trakcie badań terenowych należy brać pod uwagę znaleziska mieszane – np. owady (zarówno osobniki dorosłe, jak i larwy) zachowane we wnętrzu żerowisk (Jach i in. 2018). Zupełnie inny

aspekt badawczy dotyczy ikonografii owadów, nierzadko konfrontowanej ze znaleziskami entomofauny, jak np. odnośnie do ektopasożytów w uchu mumii psa (Huchet i in. 2013), sceny strąsania z dębów dzikich jedwabników z gatunku *Pachypasa otus* (Panagiotakopulu i in. 1997) czy figurki z kła dzika, przedstawiającej gąsienicę jedwabnika (SCIO 2020). Do jednych z najbardziej znanych odwzorowań owadów należą hieroglify egipskie, takie jak skarabeusz i pszczoła (ryc. 6).

## KONTEKST ZNALEZISK ARCHEOENTOMOFAUNY

Obecność szczątków archeoentomologicznych w znacznej mierze zależy od kontekstu eksplorowanych obiektów archeologicznych. Wszelkie obiekty gospodarcze bądź mieszkalne, w których przechowywano żywność, sprzyjały pojawianiu się tzw. szkodników spożywczych. Poza typowymi miejscami magazynowania produktów spożywczych do obiektów gospodarczych zaliczyć należy także studnie i jamy śmietnikowe, będące depozytem różnych odpadów, w tym organicznych (w warunkach miejskich spotykane są również często kloaki). Owady wykorzystywano w celach włókienniczych (Good 2002), meblarskich (np. szelak; Sutton 1995), spożywczych (np. miód; Mazar i Panitz-Cohen 2007), farbiarskich (Codreanu-Windauer i Bartel 2002; Hofmann-de Keijzer R. 2016) czy nawet dekoracyjnych, zdobniczych i biżuteryjnych (Moszyński 1939: 908-910; Abłamowicz i Józefowska 2020).

Sprzyjające przetrwaniu szczątków organicznych warunki tafonomiczne obserwowane są



**Ryc. 6.** Hieroglify egipskie przedstawiające pszczołę i skarabeusza (Obelisk Teodozjusza w Stambule, XV w. p.n.e.). Fot. S. Konwerski

w pozyskiwanych próbach palinologicznych (Porch i Kershaw 2010). Wśród zestawu mikro- i makroskopowych szczątków botanicznych równie łatwo powinna zachowywać się towarzysząca danemu ekosystemowi entomofauna (Kirillova i in. 2016). Bez względu na kontekst szczątki archeoentomologiczne najczęściej informują o aspektach środowiskowych i ich przemianach na podstawie sukcesji owadów pod wpływem działalności antropogenicznej (Konwerski 2013). Nawet w ujęciu funeralnym stanowią wyznacznik warunków pośmiertnych, w których przebywały zwłoki, często dostarczając informacji na temat czasu zgonu czy przemieszczania zwłok.

Archeoentomofauna odkrywana w kontekście funeralnym ze względu na zróżnicowane praktyki grzebalne, jak i chronologię badanych obiektów sepulkralnych charakteryzuje się dużą złożonością.

Ponadto specyficzne warunki tanatologiczne towarzyszące zwłokom sprzyjają ekspansji nie tylko entomofauny nekrofilnej, ale również drapieżników, które na nią polują. Postępujący rozkład ciała, a w szczególnych przypadkach jego naturalna mumifikacja, wywołuje sukcesję kolejnych gatunków owadów, żerujących nawet na odzieży zmarłego. Analizując ludzkie szczątki w kontekście archeologicznym, należy mieć na uwadze, że poza entomofauną związaną z różnymi etapami rozkładu ciała na konkretnych partiach szkieletu mogą znajdować się również ektopasożyty (wszy, pluskwy i pchły), bytujące *antemortem* na ciele zmarłego, a oprócz tego także owady współczesne (Kaczorowska i Draber-Mońko 2014: 21-76). Badając materiały archeoentomologiczne z kontekstów funeralnych, możemy zetknąć się również z symbolicznym wykorzystaniem niektórych gatunków owadów (Andrews 1994: 50-58).



**Ryc. 7.** Pojemniki i pęsety przydatne do zabezpieczania prób archeoentomologicznych podczas prac wykopaliskowych. Fot. M. Mackiewicz

### POBIERANIE MATERIAŁÓW ENTOMOLOGICZNYCH PODCZAS PRAC WYKOPALISKOWYCH

Próby archeologiczne, tak jak wcześniej już wspomniano, mogą odznaczać się różnorodną formą, w zależności od rodzaju wypełniska badanych obiektów czy złożoności analizowanych struktur. Większość prób przyrodniczych zabezpieczana jest jako luźna frakcja sedymentu pobieranego z określonej warstwy obiektu. Zaleca się pobieranie ok. 10-20-litrowych prób przyrodniczych (Renfrew i Bahn 2012: 247). W przypadkach, kiedy szczątki organiczne są zauważalne, często poza „luźną próbą” pobiera się i zabezpiecza oddzielnie pojedyncze, większe szczątki owadów, np. w plastikowych probówkach typu Eppendorf. W przypadku entomofauny funeralnej najczęściej widoczne fragmenty owadów zabezpiecza się, wkładając do pojemników o odpowiedniej wielkości (ryc. 7). Czasami oddzielenie ich od zmineralizowanych kości nie jest łatwe, dlatego warto posłużyć się pęsetą, drewnianym patyczkiem

lub szpatułką i podważając je, delikatnie zeszkrobać. Należy pamiętać, że tego typu próby są zwykle wilgotne, więc jeśli mają zostać przekazane do analiz archeoentomologicznych w późniejszym terminie, trzeba je przesuszyć, otwierając wieko pojemnika. Równie ważne jest sporządzenie dokumentacji opisowej i fotograficznej, choć bywa, że podczas badań wykopaliskowych wykonanie zdjęć makro jest utrudnione. Ważną rolę odgrywa tu ustalona strategia próbkowania i ścisła kooperacja między kierownikiem badań a współpracującym w ramach zespołu przyrodnikiem (bioarcheologiem).

Ze względu na bardzo drobne rozmiary większości struktur pozostałych po owadach i ich delikatność pobieranie prób i wydobywanie poszczególnych fragmentów wymaga ogromnej uwagi i ostrożności. Jeśli w próbce (np. glebie lub mierzwie) widoczne są fragmenty owadów, najlepiej przekazać ją w całości entomologowi. Wyselekcjonowanie powinno odbywać się w laboratorium, konieczne z wykorzystaniem binokularu, co zminimalizuje możliwość utraty drobnych fragmentów,



mogących mieć znaczenie dla dalszego wnioskowania. Również w laboratorium należy przeprowadzić dalszą analizę zauważonych w drewnie żerowisk. Nigdy nie należy pukać ani czyścić takiego materiału zaraz po jego wydobyciu, gdyż w substancji wypełniającej korytarze żerowiska mogą się znajdować fragmenty owadów.

Materiały organiczne wewnątrz złożonych w kryptach sarkofagów zachowują się zwykle znacznie lepiej, co powoduje, że jest ich dużo i są niejednorodne. Prace w kryptach są jednak trudne i wieloaspektowe, poza stosowaniem środków ochrony osobistej, zwykle odbywają się przy niedostatecznym oświetleniu, w ograniczonej przestrzeni i niskiej temperaturze. W takich przypadkach pobiera się objętościowo duże luźne próby do worków strunowych, a w dalszej kolejności przekazuje się je do analiz botanicznych i archeoentomologicznych. Należy pamiętać, że w pobranych próbach mogą się również znajdować materiały współczesne. Wraz ze szczątkami owadów dobrą praktyką jest również przekazanie informacji o lokalizacji i kontekście znaleziska. Inwentaryzując próby entomologiczne, na metrykach można zawrzeć informacje o ich szczegółowym usytuowaniu w obiekcie bądź na szkielecie.

### **PRZYGOTOWANIE PREPARATÓW ARCHEOENTOMOLOGICZNYCH DO OZNACZANIA**

Wyodrębnione z próby archeologicznej fragmenty owadów, po ich oczyszczeniu i wysuszeniu, należy odpowiednio spreparować. Wykorzystujemy do tego metody typowe dla tworzenia kolekcji entomologicznej. Jeśli w opracowywanym materiale zachowały się struktury duże (powyżej 1 cm), nigdy nie nabijamy ich bezpośrednio na szpilki entomologiczne. Niezależnie od wielkości wszystkie fragmenty owadów naklejamy za pomocą rozpuszczalnego w wodzie i przezroczystego kleju (obecnie najczęściej na bazie alkoholu poliwinylowego) na odpowiedniej wielkości kartoniki (ryc. 9). Najlepsze są kartoniki o kształcie trójkątnym, gdyż umożliwiają obserwację naklejonej części z każdej strony. Kartoniki te następnie nabijamy na szpilki entomologiczne. Takie przygotowanie preparatów

ułatwia manipulację nimi podczas porównywania pod binokulem i chroni delikatne struktury przed uszkodzeniem. Nie jest wskazane przetrzymywanie fragmentów owadów „luźnem” (np. w próbkach), gdyż każdorazowe ich wyciąganie może spowodować uszkodzenia i w konsekwencji dodatkowo utrudnić lub wręcz uniemożliwić ich dalsze oznaczenie.

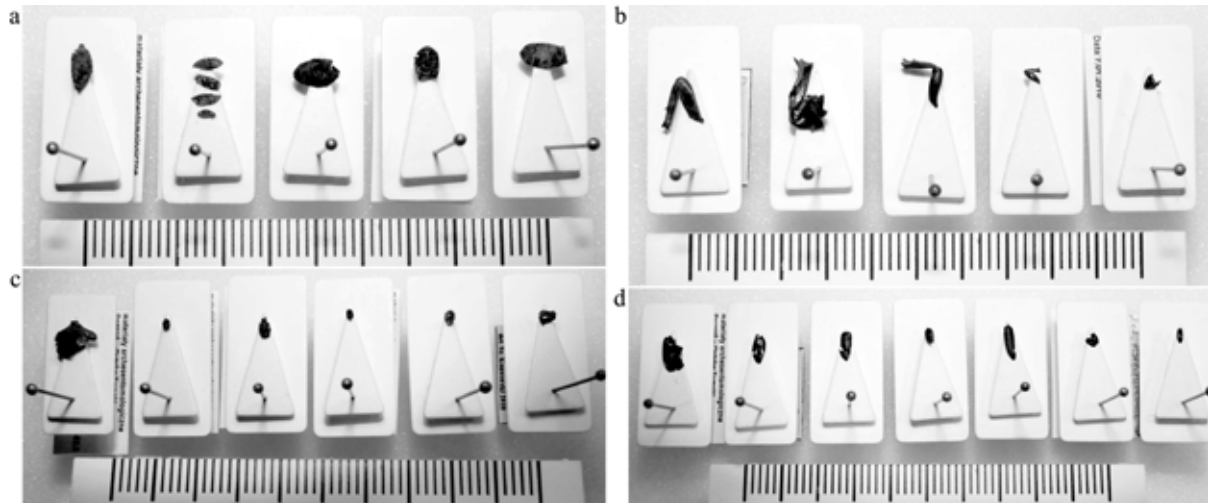
### **PROBLEMY ZWIĄZANE Z OZNACZANIEM MATERIAŁÓW ARCHEOENTOMOLOGICZNYCH**

Ze względu na stan zachowania szczątków owadów w próbach archeologicznych (rozdrobienie, deformacja, częściowa lub całkowita zmiana barwy, zmiana mikrorzeźby powierzchni poszczególnych części ciała), wykorzystanie specjalistycznych kluczy do oznaczania owadów jest bardzo trudne lub niemożliwe. Cechy taksonomiczne obecne na strukturach łatwo ulegających zniszczeniu lub rozdrobnieniu (np. czułki i stopy) lub dotyczące wyłącznie dobrze zachowanych okazów (barwa, mikrorzeźba, obecność szczecin) stają się tutaj nieprzydatne. Bezkrytyczne dopasowywanie takiego materiału do cech kluczowych doprowadza najczęściej do błędnego oznaczenia taksonu.

Należy też pamiętać, że w próbach entomologicznych sprzed setek lub tysięcy lat możemy mieć do czynienia z taksonami niereprezentowanymi obecnie w entomofaunie badanego obszaru (regionu geograficznego, kraju). Większość kluczy specjalistycznych ma charakter regionalny (zwykle w skali kraju) i przy wątpliwościach pojawiających się w trakcie oznaczania należy uwzględnić także taksony z sąsiednich obszarów.

### **ENTOMOLOGICZNY ZBIÓR PORÓWNAWCZY – PODSTAWOWE NARZĘDZIE PRACY**

Do prawidłowego oznaczenia materiałów archeoentomologicznych niezbędna jest entomologiczna kolekcja porównawcza – najbardziej odpowiednie są tu zbiory suchych owadów przechowywanych w specjalnych gablotach entomologicznych (ryc. 8-9) oraz kolekcje żerowisk i innych śladów



**Ryc. 8.** Fragmenty owadów z prób archeologicznych przygotowane do analizy porównawczej (a – fragmenty bobówek; b – odnóża chrząszczy; c – głowy; d – pokrywy chrząszczy). Fot. S. Konwerski

życia owadów. Sposoby preparowania owadów należących do różnych rzędów zostały ustalone w początkach istnienia entomologii jako nauki i stosowane są do dziś z niewielkimi modyfikacjami. Najczęstszym sposobem zabezpieczenia materiału jest nabijanie owadów na szpilki entomologiczne oraz naklejanie ich (klejem rozpuszczalnym w wodzie) na odpowiedniej wielkości kartoniki, które dopiero potem nabija się na szpilki. Zarówno miejsce, w które wbijana jest szpila, wysokość, na której nabity jest kartonik, jak i sposób ułożenia przydatków ciała (nogi, czułki) preparowanego owada są ściśle określone i uwzględniają optymalne zabezpieczenie okazu muzealnego podczas używania go w trakcie oznaczania i badań porównawczych.

W przypadku porównawczych kolekcji entomologicznych niezwykle ważne jest ich zabezpieczenie. Takie zbiory są narażone na wiele czynników niszczących, np. nadmierną wilgotność sprzyjającą rozwojowi grzybów oraz obecność owadów będących szkodnikami muzealnymi (np. chrząszczy skórnikowatych). Kolekcje entomologiczne przetrzymywane w nieodpowiednich warunkach ulegają szybkiemu zniszczeniu i nie nadają się do dalszego opracowywania i wykorzystywania w celach porównawczych. Również światło słoneczne uszkadza okazy, doprowadzając do utraty ich pierwotnego ubarwienia. Aby temu zapobiec, w pomieszczeniach muzealnych powinna być kontrolowana wilgotność i ograniczony dostęp światła, natomiast suche owady powinny

być trzymane w szczelnych gablotach i zamykane w szafach (ryc. 9).

Istnieje wiele powszechnie dostępnych i godnych polecenia anglojęzycznych publikacji i skryptów dotyczących preparowania owadów i zabezpieczania kolekcji entomologicznych (np. Millar i in. 2000; Upton i Mantle 2010). Szkoda, że w krajowej literaturze wciąż nie ma nowoczesnego opracowania poświęconego tej tematyce. Najbardziej wartościowym pozostaje: *Podręcznik do zbierania i konserwowania zwierząt należących do fauny polskiej* pod redakcją Władysława Polińskiego (1923), w którym szczegółowo omówione zostały poszczególne rzędy owadów. Cenne informacje można również znaleźć w wielu zeszytach serii: *Klucze do oznaczania owadów Polski* wydawanej przez Polskie Towarzystwo Entomologiczne.

Mając na uwadze specyfikę prób archeoentomologicznych, można także przygotować zbiór porównawczy, w którym reprezentowane będą jedynie poszczególne części (np. pokrywy, przedplecza, głowy, żuwaczki) owadów, odpowiadające tym, które są najliczniej reprezentowane w materiale archeologicznym. Pozwala to na ich szybsze porównywanie z wykorzystaniem struktur niewidocznych w przypadku całych osobników. Poszczególne części pozyskane z wcześniej oznaczonych owadów też powinny być odpowiednio spreparowane. Zależnie od ich wielkości można je bezpośrednio nabijać na szpilki entomologiczne lub przykleić do odpowiednich (najczęściej trójkątnych) kartoników, co ułatwi manipulację podczas porównywania pod binokulem.



**Ryc. 9.** Zbiór porównawczy – szafy wypełnione gablotami z zabezpieczonym na sucho materiałem entomologicznym.  
Fot. S. Konwerski

### TECHNIKI MIKROSKOPOWE I RENTGENOWSKIE STOSOWANE W ARCHEOENTOMOLOGII

Kluczowe znaczenie przy identyfikacji gatunkowej owadów mają morfologiczne szczegóły budowy chitynowych elementów (np. szczecinki odwłokowe). W związku z tym nieodzownym elementem pracy z materiałami entomologicznymi jest korzystanie z binokularu, mikroskopu świetlnego, a w szczególnych przypadkach również skaningowego mikroskopu elektronowego (ang. *scanning electron microscope*, SEM). O ile w przypadku mikroskopii optycznej wykorzystywane jest światło przechodzące przez zestaw soczewek optycznych, o tyle w mikroskopii skaningowej używa się wiązki elektronów. Dzięki temu możliwe jest rozpoznanie topografii badanych obiektów w skali nano- do mikrometrycznej (ryc. 10).

Innym rodzajem metod coraz częściej stosowanych w entomologii jest obrazowanie oparte na zastosowaniu promieniowania rentgenowskiego, głównie w mikroskali, czyli mikrotomografia lub – w szczególnych przypadkach – mikrotomografia synchrotronowa. Ta ostatnia wykorzystywana jest przede wszystkim przez paleoentomologów do rekonstruowania inkluzji organicznych, w tym owadów znajdujących w bursztynach i kopalach (Johnson i in. 2013; Coty i in. 2014; Jałoszyński i in. 2020). Wynikiem takich badań jest uzyskanie licznych przekrojów (tomogramów) analizowanego obiektu. Tomogramy poddane odpowiedniej obróbce *post processingu* można przekształcić w trójwymiarowy, szczegółowy model obiektu. Tomografia komputerowa może być również stosowana do rekonstrukcji procesów tafonomicznych związanych z aktywnością mikrofauny i flory, zachodzących w odkrywanych strukturach





**Ryc. 10.** Linka larwalna chrząszcza *Anthrenus* sp. (a). Fot. M. Kadej; obrazowanie SEM szczegółów budowy morfologicznej szczecin larwalnych: harpunowate zakończenia szczecin w typie „hastiseta” (b); szczeciny w typie „spiciseta” (c); przyczepy szczecin (d). Oprac. A. Hałuszko

antropogenicznych bądź wybranych zabytkach (Villagran i in. 2019).

Poza technikami mikroskopowymi i rentgenowskimi, w celu detekcji obecności owadów w materiałach archeologicznych wykorzystywane są także metody chemiczne (głównie chromatograficzne). Jedną z nich jest np. wysokosprawna chromatografia cieczowa (ang. *high-performance liquid chromatography*, HPLC) z powodzeniem stosowana do identyfikacji naturalnych barwników używanych do farbowania tkanin, takich jak np. kwas karminowy uzyskiwany z larw różnych gatunków czerwców (Vanden Berghe 2011).

#### POTENCJAŁ INFORMACYJNY BADAŃ ARCHEOENTOMOFAUNY (NA PODSTAWIE WYBRANYCH PRZYKŁADÓW)

Kompleksowe badania cmentarzy XIX/XX-wiecznych z terenu Wrocławia takich, jak Nowy Cmentarz Gminy Ewangelicko-Reformowanej, cmentarz św. Doroty II oraz współczesnego cmentarza w Niebończowach, wykazały, że spośród ogółu przebadanych szkieletów u ok. 3,5% osobników zaobserwowano i zabezpieczono do dalszych analiz fragmenty entomofauny (zob. tab. 1). Należy przy tym zaznaczyć,



**Ryc. 11.** Zachowane szczątki entomofauny funeralnej *in situ* zidentyfikowane na ludzkich szkieletach: liczne bobówki w lewym oczodole (a); bobówki w okolicach podstawy czaszki i łuku jarzmowego (b); prawie niezauważalne fragmenty dorosłych owadów na kości miedniczej (c); liczne zesklebione części dorosłych owadów (d). Fot. A. Hałaszkowski

że podczas analiz pochówków na starszych cmentarzach nie stwierdzono obecności owadów ani śladów ich żerowania. Podczas ekshumacji ludzkich szczątków na cmentarzu parafialnym w „starych” Nieboczowach pozyskano zbiór 26 prób entomologicznych. Wszystkie zabezpieczone próby to owady lub ich części w różnych stadiach rozwojowych. Z podobną sytuacją zetknięto się podczas badań dawnych wrocławskich cmentarzy. Owady bądź ich części pozyskane do analiz w większości przypadków były umiejscowione na/w tych samych częściach ludzkich szkieletów. Najczęściej były przytwierdzone lub całkowicie wypełniały naturalne otwory i zagłębienia anatomiczne kości (ryc. 11). Odnajdywano je na kościach czaszki, a szczególnie w oczodołach, na wyrostkach podniebiennych kości szczękowych (podniebieniu twardym), w otworach podstawy czaszki oraz wewnątrz czaszki. Często znajdowały

się w otworach kości krzyżowej oraz otworach kręgowych kręgow różnych części kręgosłupa, a także na powierzchni krzyżowo-miednicznej kości biodrowej. Znacznie rzadziej obserwowano występowanie entomofauny na kościach kończyn, poza przypadkami, kiedy doszło do naturalnej mumifikacji części tkanek miękkich. Na podstawie zebranych i oznaczonych gatunkowo fragmentów owadów możliwe będzie przeanalizowanie przyczyn zachowania się ich tylko na części szkieletów. Fragmenty zebrane w trakcie ekshumacji szczątków umożliwią również precyzyjniejsze przyjrzenie się obrządkowi grzebalnemu, który na przestrzeni ponad 150 lat mógł ulegać zmianom (por. tab. 1), np. pod kątem dłuższej ekspozycji i wystawiania odsłoniętych zwłok poprzedzających ich pogrzebanie.

Z kolei badania w kryptach (krypta rodu Promnitzów w kościele Wszystkich Świętych w Pszczynie;





**Ryc. 12.** Sarkofag z Mauzoleum rodu Güttlerów w trakcie eksploracji i pobierania prób przyrodniczych (a); zbliżenie na warstwę wypełniska, w której stwierdzono obecność fragmentów owadów, głównie bobówek (b). Fot. A Hałaszk

krypta północna w Bazylice Podwyższenia Krzyża Świętego w Opolu; Mauzoleum rodu Güttlerów w Złotym Stoku), w których najczęściej dochodzi do naturalnej mumifikacji zwłok, dowodzą, że pozostałości entomologiczne towarzyszyły większości szczątków ludzkich. Przykładowo, spośród ośmiu sarkofagów przebadanych w krypcie rodu Promnitzów w Pszczynie w sześciu odnotowano obecność archeoentomofauny. Z kolei podczas prac inwentaryzacyjno-porządkowych w Mauzoleum rodu Güttlerów, pomimo rozwleczenia i przemieszania szczątków ludzkich oraz znacznego zniszczenia wszystkich sarkofagów, w wypełnisku jednego z nich odkryto kilka fragmentów bobówek (ryc. 12). Podobna sytuacja zaistniała podczas ukraińsko-polskich badań archeologicznych byłego zespołu klasztoru oo. karmelitów trzewickich w Boleszowcach (obw. iwanofrankiński, rej. Halicki). Wśród ogromnej liczby ludzkich kości, wtórnie zdeponowanych w krypcie centralnej, odkryto kilka fragmentów kości wyróżniających się odmiennym stanem zachowania. Na ich powierzchni zachowane były naturalnie zmumifikowane fragmenty tkanek miękkich, a ich zabarwienie było znacznie ciemniejsze (ciemnobrązowe) w porównaniu z pozostałymi kośćmi. Dodatkowo podczas szczegółowych analiz antropologicznych zaobserwowano obecność kilkunastu bobówek, które mieściły się wewnątrz naturalnych otworów kości krzyżowej (ryc. 13). Pomiędzy kolejnymi warstwami kości zalegających w krypcie natknięto się na element mocno zniszczonego sarkofagu, w którym mogły zaistnieć warunki sprzyjające naturalnej mumifikacji złożonych w nim zwłok. Na podstawie zebranych danych

oraz kwerendy źródeł historycznych prawdopodobne jest, że odkryte szczątki z dużą dozą ostrożności można wiązać z osobą fundatora kościoła – hetmanem Marcinem Kazanowskim (Furmanek i in. 2015).

Ciekawym przypadkiem pośredniej obecności entomofauny były ślady żerowania na zachowanych fragmentach czaszek ludzkich, odkrytych w zasypisku studni krypty klasztoru Bernardynów w Jaworze (Hałaszk 2015). Zidentyfikowane zmiany osteologiczne miały wyraźny charakter pseudopatologiczny. Zaobserwowane w kościach czaszki zagłębienia miały zróżnicowaną formę i kształt. Część z nich powstała na skutek uszkodzeń mechanicznych bądź działania kwasów humusowych wytrączanych z zalegającej warstwy materii organicznej (ryc. 14a-b). Szczególną uwagę zwróciła grupa zmian charakteryzująca się okrągłym zarysem oraz wyraźną jaśniejszą otoczką (ryc. 14b-c). Występowały one przede wszystkim w naturalnych zagłębieniach kości czaszki, szczególnie na kościach skroniowych. Ich szczegółowe makro- i mikroskopowe analizy umożliwiły ustalenie ich genezy – prawdopodobnie powstały na skutek żerowania owadów (Gładykowska-Rzeczycka i Parafiniuk 2001; Huchet 2014; Hałaszk 2015; ryc. 14d-f).

Wśród zarejestrowanych obecności entomofauny na szczególną uwagę zasługują znaleziska z kontekstów pradziejowych. Jednym z nich są fragmenty owadów w grobie ciała palnym kultury łużyckiej z cmentarzyska w Domasławiu (Ablamowicz i Józefowska 2020). Najprawdopodobniej przetrwały one dzięki sąsiedztwu brązowej zapinki harfowej w wyniku impregnacji związkami chemicznymi,





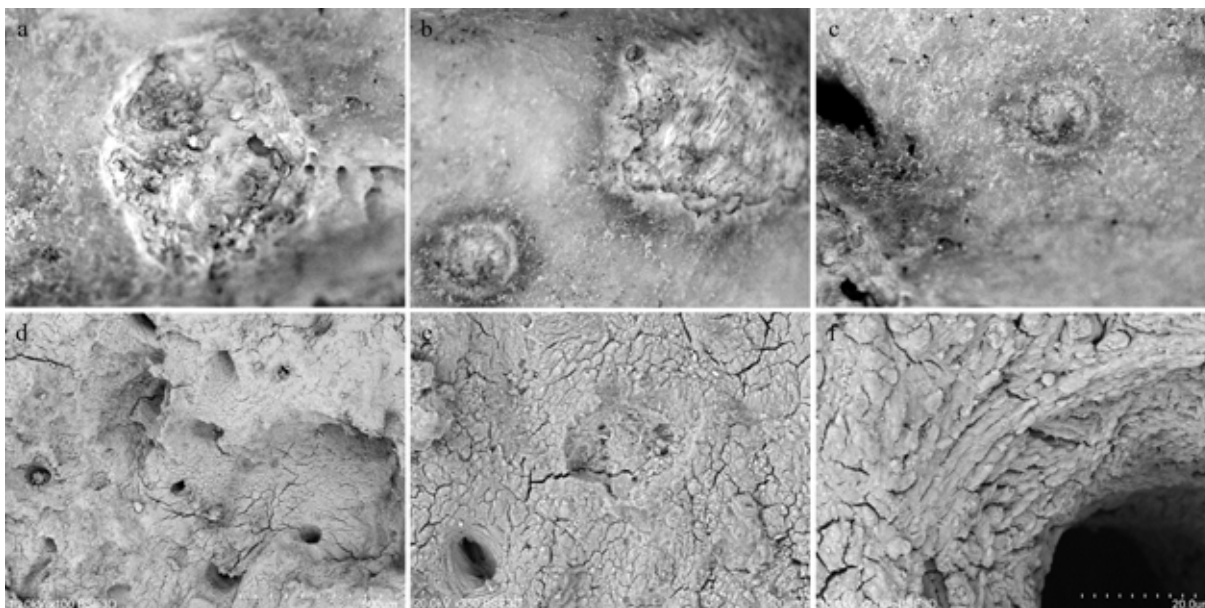
**Ryc. 13.** Kość krzyżowa odkryta w zasypisku krypty (a) z zachowanymi fragmentami bobówek wypełniających kanał krzyżowy (b) i jeden z otworów krzyżowych (c). Fot. A. Hałuszko

wytrąconymi w procesie pasywacji miedzi zawartej w stopie metali. Odkryte fragmenty owadów były nanizane na źdźbło trawy (ryc. 15), dlatego przypuszczalnie pełniły funkcję dekoracyjną bądź biżuteryjną. Analizy entomologiczne rozpoczęto od badań morfologicznych i wyselekcjonowania kilku najlepiej zachowanych fragmentów owadów do obrazowania SEM. Dzięki temu możliwa była znacznie bardziej precyzyjna dokumentacja diagnostycznych części anatomicznych, niezbędna do identyfikacji gatunkowej (ryc. 15).

Wykorzystywanie owadów bądź ich części do celów zdobniczych czy jubilerskich nie było tylko epizodyczne, znane jest np. z czasów wiktoriańskich (lata 1837-1901). W tej epoce owady były używane zarówno do tworzenia wyszukanej biżuterii, jak i aplikacji (ryc. 16). Najczęściej wykorzystywano gatunki sprowadzane z Ameryki Południowej: *Lamprocyphus augustus*, *Polychalca punctatissima* i Azji Południowej: *Sternocera aequisignata*. Większość z nich odznaczała się metalicznym połyskiem i szmaragdowym kolorem. Również Huculi wykorzystywali do wyrobu biżuterii owady o intensywnej zielonej barwie. Naszyjniki tworzone

z nanizanych na nić kilkunastu osobników kruszczyć z gatunków: *Cetonia aurata* i *Protaetia (Potosia) cuprea* (Moszyński 1939: 908-910, 967; ryc. 17). Według opisu etnograficznego, naszyjniki te były noszone przez dziewczęta w charakterze talizmanów mających zapewnić im powodzenie. Mimo że chrząszcze nasączano gorącym woskiem z dodatkiem oleju lnianego, biżuteria ta była nietrwała i miała charakter sezonowy.

Znaleziska archeoentomofauny nie zawsze mogą być jednoznacznie interpretowane, pomimo znanego kontekstu zalegania i precyzyjnych oznaczeń entomologicznych. Taka sytuacja zaistniała w przypadku fragmentów chrząszcza z rodzaju *Geotrupes* odkrytych w jednej z urn kultury łużyckiej na cmentarzysku we Wtórku, pow. ostrowski. Zachowane szczątki owada wydzielono spośród materiałów osteologicznych podczas przeprowadzania rutynowych analiz antropologicznych. Pierwotnie zalegały pod warstwą ozdób z brązu: bransoleta, zawieszka z kółek, naszyjnik, których obecność mogła się przyczynić do ich „konserwacji”. Wizualnie podobne do nich skarabeusze były czczone w starożytnym Egipcie, a analizy różnych przedmiotów importowanych z basenu



**Ryc. 14.** Obraz makroskopowy (a-c) zmian na powierzchni kości czaszki odkrytej w zasypisku studni krypty klasztoru Bernardynów w Jaworze wraz z obrazowaniem SEM (d-f) zaobserwowanych pseudopatologii (za: Hałaszk 2015)



**Ryc. 15.** Fragmenty owadów pełniące funkcję dekoracyjną/biżuteryjną z grobu ciałałpalnego kultury łużyckiej z cmantarzy-ska w Domasławiu (a) oraz obrazowanie SEM zachowanego źdźbła trawy, na które nanizano owady (b); przedplecze owada od strony brzusznej (c); przedplecza owadów na źdźble trawy (d); grzbietowa część przedplecza (e). Fot. i oprac. A. Hałaszk

Morza Śródziemnego potwierdzają kontakty handlowe z tamtymi kulturami, wysnuto więc hipotezę o analogicznym, jubilerskim wykorzystaniu odkrytego chrząszcza, a zarazem nie wykluczono możliwości jego przypadkowego dostania się do urny. Częściowo potwierdzał to przeprowadzony wywiad środowiskowy, zgodnie z którym ponad pół wieku temu w miejscu obecnych pól uprawnych znajdowała się łąka, na której wypasano konie. Takie warunki środowiskowe stanowiły idealne środowisko życia chrząszczy z rodzaju *Geotrupes*. W następstwie tych ustaleń podjęto próbę szczegółowej

identyfikacji wcześniej zarejestrowanych tuneli i korytarzy w obrazie tomograficznym urn wybranych do badań rentgenodiagnostycznych (ryc. 18).

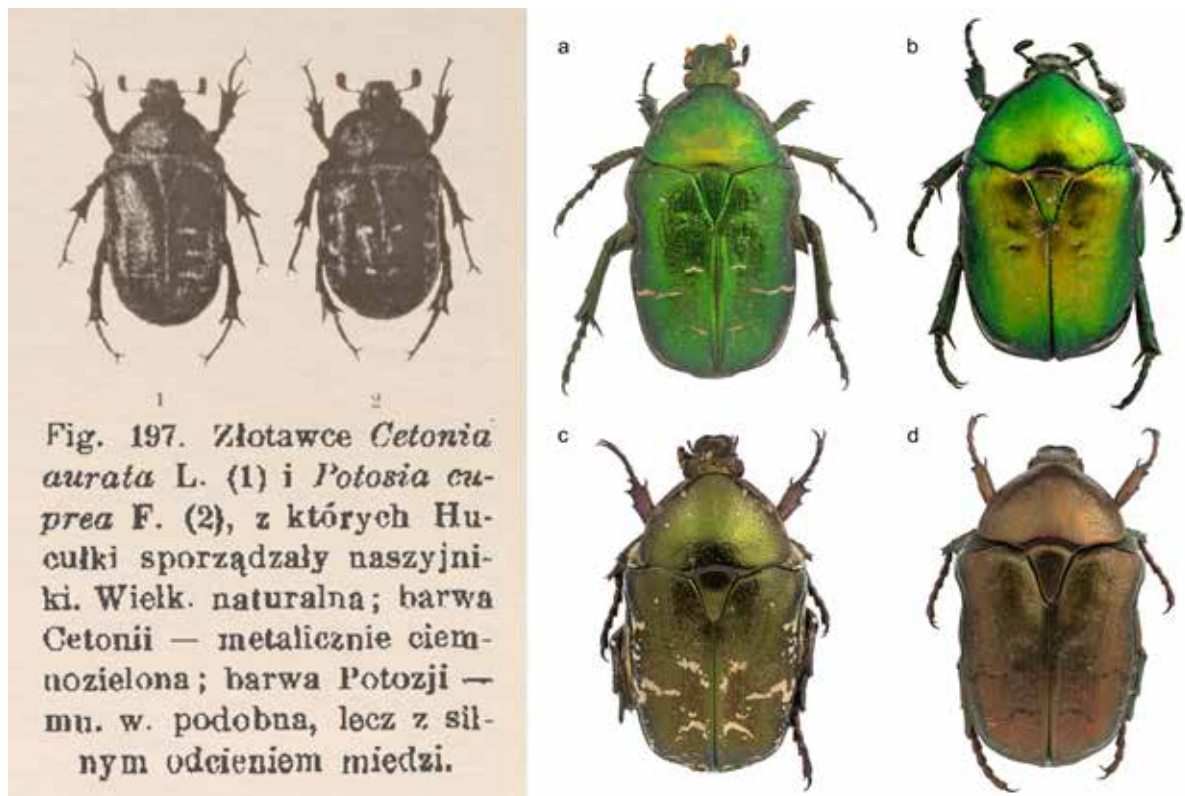
## PODSUMOWANIE

Techniki mikroskopowe stanowią podstawowe narzędzie pracy archeoentomologa i entomologa sądowego, gdyż pozwalają na dokonanie identyfikacji materiałów i przyporządkowanie ich poszczególnym jednostkom taksonomicznym, w tym także



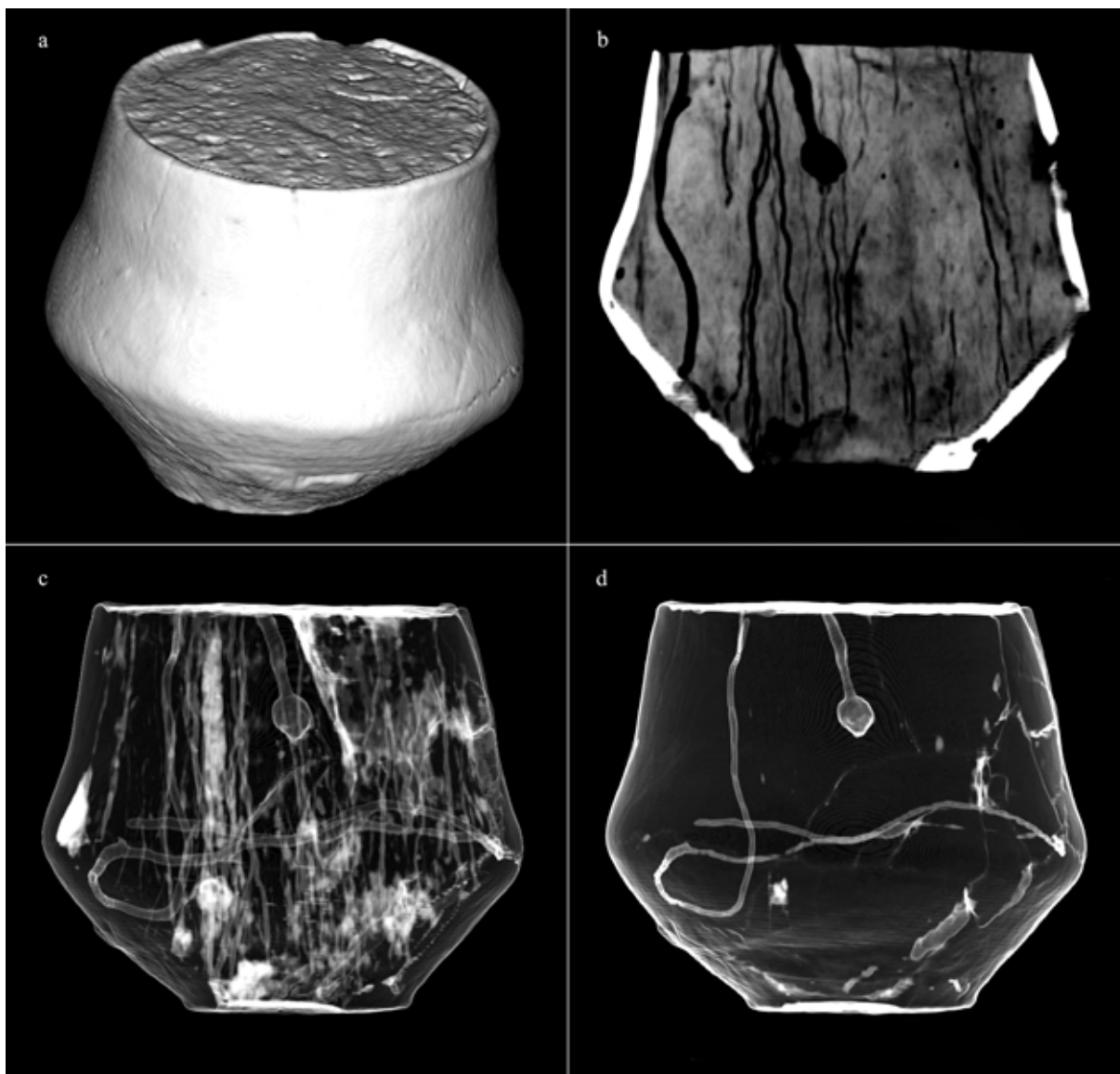


**Ryc. 16.** Suknia z drugiej połowy XIX w. z aplikacjami z pokryw skrzydłowych chrząszczy z gatunku *Sternocera aegesignata* oraz szczegóły haftu (ze zbiorów ©Victoria and Albert Museum, London). Wiktoriańska broszka z chrząszczami z gatunku *Polychalca punctatissima*; współcześnie wykonany plemienny naszyjnik z chrząszcza z rodzaju *Megasoma* pochodzący z Gujany Francuskiej (broszka i naszyjnik ze zbiorów prywatnych A. Hałuszko). Fot. M. Mackiewicz



**Ryc. 17.** Oryginalna rycina ze *Sztuki ludowej Słowian* Kazimierza Moszyńskiego (1939) przedstawiająca gatunki chrząszczy wykorzystywane do tworzenia tradycyjnej biżuterii na Huculszczyźnie; zdjęcia współczesnych owadów: *Cetonia aurata* (a); *Protaetia speciosissima* (b); zmienność morfologiczna pokryw *Netocia metallica* (c-d). Fot. M. Kukla





**Ryc. 18.** Badania CT (tomograficzne) naczynia przystawnego z grobu ciałałpalnego kultury lużyckiej we Wtórku: rekonstrukcja 3D skanowanego naczynia (a); tomogram (b); rekonstrukcja VR naczynia z widocznymi tunelami pochodzenia roślinnego i zwierzęcego (c-d); komora gniazdowa wykonana przez chrząszcza *Geotrupes* sp., bądź komora estywacyjna dżdżownicy oraz korytarz wydrążony przez dżdżownicę (d). Oprac. A. Hałuszko

oznaczenie do poziomu gatunkowego. Obecny poziom zaawansowania techniki pozwala też na tworzenie modułów umożliwiających nie tylko obserwacje detali morfologicznych w powiększeniu (binokular, mikroskop świetlny), ale także na dokumentowanie tych szczegółów za pomocą przytwierdzonych do sprzętu mikroskopowego aparatów fotograficznych (ryc. 10a). Nieocenionym źródłem informacji są detale mikrostruktury utrwalone na zdjęciach przy użyciu mikroskopów skaningowych (ryc. 10b-d, 14-15).

Zróznicowanie preferencji ekologicznych poszczególnych gatunków owadów jest ogromne.

Niektóre gatunki wymagają do swojej egzystencji wyższych temperatur, natomiast inne są wskaźnikami środowisk o chłodniejszym klimacie. Niektóre z nich zaadaptowały się do życia w bliskim sąsiedztwie człowieka i stały się gatunkami synantropijnymi (często o znaczącym negatywnym wpływie na gromadzone w ludzkich obejściach dobra, tzw. szkodniki, np. spichrzak surynameński, wołek zbożowy), jeszcze inne wyspecjalizowały się w wykorzystywaniu ludzi jako podstawowego źródła pokarmu (ektopasożyty takie jak wszy, pluskwy i pchły). Podczas gdy jedne gatunki wykazują

**Tabela 1.** Cmentarze przebadane kompleksowo pod kątem obecności archeoentomofauny nekrofilnej (oprac. A. Hałuszko na podstawie badań własnych)

Lokalizacja, nazwa cmentarza	Chronologia cmentarza	Ogólna liczba analizowanych osobników	Liczba osobników przebadanych pod kątem obecności entomofauny	Liczba osobników z odnotowaną obecnością szczątków owadów	Frekwencja występowania entomofauny
Nieboczowy, cmentarz parafialny w „starych” Nieboczowach	1865-2016 r.	598	598	26	4,35%*
Wrocław, Nowy Cmentarz Gminy Ewangelicko-Reformowanej	1862-1967 r.	2740	626	15	2,40%*
Wrocław, cmentarz św. Doroty II	1861-1967 r.	562	562	22	3,91%*
Ostrów Wielkopolski, cmentarz przy konkatedrze św. St. Biskupa	XV w.-ok. 1782 r.	89	89	0	0,00%
Wrocław, cmentarz św. Bernardyna	XV w.-ok. 1775 r.	738	738	0	0,00%
Łącznie		4727	2613	63	2,13% (3,55%*)

szerokie zasięgi występowania, inne ograniczone są do niewielkich obszarów, dodatkowo charakteryzują się wąskimi wymaganiami ekologicznymi i zakresem tolerancji odnośnie do czynników środowiskowych. Bezkręgowce pozyskane podczas badań archeologicznych pozwalają biologom znajdować odpowiedzi na pytania o pochodzenie i rozwój regionalnych faun, uzasadnić poglądy na temat tempa ewolucji oraz morfologicznej i ekologicznej stałości gatunków, a także zmian klimatycznych (Kenward 2009).

Precyzyjne oznaczenia gatunków owadów i znajomość ich preferencji ekologicznych może się przyczynić do poznania warunków życia i diety ówczesnych społeczności oraz do zrozumienia podłoża metamorfozy paleośrodowiska pod wpływem czynników antropogenicznych lub klimatycznych. Ponadto mogą stanowić źródło informacji na temat importowanych surowców, starożytnego handlu, podejścia do higieny, etiologii wybranych chorób czy losowych zdarzeń, takich jak np. powódź.

Zaniedbywanie badań archeoentomologicznych stanowi zatem swoistą stratę dla archeologów, ale też biologów. Z tego względu już na etapie prac terenowych wymagana jest należyta staranność, odpowiednie zabezpieczanie materiałów bioarcheologicznych, w tym również archeoentomologicznych. Sukces współpracy pomiędzy archeologami i przyrodnikami wynika ze wzajemnego zrozumienia pytań i oczekiwań

badawczych, a postępy we wspólnej pracy nierzadko mogą przynieść reinterpretację danych. Możliwość ścisłej współpracy między specjalistami tych dwóch naukowych dyscyplin polegającej na tworzeniu trwałych zespołów badawczych, które publikowałyby potem wyniki swoich prac, to w Polsce wciąż ogromny i niewystarczająco wykorzystany naukowy potencjał.

## PODZIĘKOWANIA

Szczególne podziękowania składamy Michałowi Kukli (Uniwersytet Wrocławski) za pomoc w przygotowaniu zdjęć owadów (ryc. 1-2, 3a, 17a-d). Maksymowi Mackiewiczowi za pomoc w przygotowaniu zdjęć i uwagi merytoryczne. Panom prof. Bogusławowi Gedidze (Polska Akademia Nauk), Grzegorzowi Gmyrkowi (Usługi Archeologiczne, Kalisz), dr. Mirosławowi Furmankowi (Uniwersytet Wrocławski) oraz Sławomirowi Kulpie (Muzeum w Wodzisławiu Śląskim) za udostępnienie materiałów do badań. Teresie Tarnawskiej dziękujemy za konsultację językową. Panu dr. Wojciechowi Gilowi (Uniwersytet Wrocławski) za pomoc w przygotowaniu obrazowania SEM. Badania CT i obrazowanie SEM przeprowadzono w wyniku realizacji projektu badawczego o nr UMO-2018/29/N/HS3/00887 finansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki.

## LITERATURA

- Ablamowicz, R., Józefowska, A. 2020. Wyroby z surowców pochodzenia zwierzęcego z cmentarzyska z epoki żelaza z Domasławia 10/11/12, gm. Kobierzyce, (w:) B. Gediga, A. Józefowska (red.), *Cmentarzysko wczesnej epoki żelaza w Domasławiu 10/11/12, powiat wrocławski*, tom V: Opracowania specjalistyczne, Wrocław, 227–233.
- Andrews, C. 1994. *Amulets of ancient Egypt*. London.
- Beutel, R.G., Friedrich, F., Ge, S-Q., Yang, X-K. 2014. *Insect morphology and phylogeny*. Berlin-Boston.
- Buckland, P.C. 1976. The use of insect remains in the interpretation of archaeological environments, (w:) D.A. Davidson, M.L. Shackley (red.), *Geoarchaeology. Earth Science and the Past*. Duckworth. London, 369–396.
- Bunalski, M. 2005. Szczątki żuków (Coleoptera: Scarabaeoidea) w materiałach archeoentomologicznych z Wrześnicy na Pomorzu Zachodnim. *Wiadomości Entomologiczne* 24(3): 165–174.
- Bunalski, M., Rączkowski, W. 1998. Materiały archeoentomologiczne ze stanowiska we Wrześnicy (gmina Sławno) i próba ich wykorzystania w archeologii, (w:) M. Dworaczek, P. Krajewski, E. Wilgocki (red.), *XII Sesja Pomoroznawcza. Acta Archaeologica Pomeranica* 1. Szczecin, 195–198.
- Carrott, J., Kenward, H. 2001. Species Associations Among Insect Remains from Urban Archaeological Deposits and their Significance in Reconstructing the Past Human Environment. *Journal of Archaeological Science* 28: 887–905.
- Codreanu-Windauer, S., Bartel, A. 2002. Spindle, Whorl, Pot - a remarkable group of grave goods from Pfakofen, Lkr. Regensburg, Bavaria. *Lucerna* 23: 17–27.
- Coope, G.R. 1977. Quaternary Coleoptera as aids in the interpretation of environmental history, (w:) F.W. Shotton (red.), *British Quaternary Studies: Recent Advances*. Oxford, 55–68.
- Coope, G.R. 1986. Coleoptera analysis, (w:) B.E. Berglund (red.), *Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology*. New York, 703–713.
- Coope, G.R. 1990. The invasion of northern Europe during the Pleistocene by mediterranean species of Coleoptera, (w:) F. di Castri, A.J. Hansen, M. Debussche (red.), *Biological Invasions in Europe and the Mediterranean Basin*. Dordrecht, 203–215.
- Coty, D., Aria, C., Garrouste, R., Wils, P., Legendre, F., Nel, A. 2014. The first ant-termite syninclusion in amber with CT-scan analysis of taphonomy. *PloS one*, 9(8), e104410.
- Fägerström, C., Buckland, P., Lemdahl, G., Karsten, P., Lagerås, P., Manhag, A. 2020. Insects and other invertebrate remains from the coffin of a 17th century bishop in Lund Minster, S Sweden. *Journal of Archaeological Science: Reports* 31: 102299.
- Forbes, V., Dussault, F., Bain, A. 2014. Archaeoentomological Research in the North Atlantic: Past, Present, and Future. *Journal of the North Atlantic* 26: 1–24.
- Forbes, V., Huchet, J.-B., Knecht, R. 2019. The Archaeoentomology of a conflict scene: blow-flies and ectoparasites from pre-contact (16-17th c.a.d.) Yup'ik Nunalleq, Alaska. *The 16th European Association Forensic for Entomology (EAFE) & The 3rd International Conference in Funerary Archaeo-Entomology (ICFAE) meetings, June 5-8, 2019 in Bordeaux, France* (abstract to oral presentation).
- Furmanek, M., Hałaszk, A., Holik, W., Konczewski, P., Kulpa, S., Mackiewicz, M., Melnychuk, O., Tkachuk, T. 2015. Długie dzieje węgórza klasztoru w Bolszowcach (Ukraina). Przegląd najważniejszych wyników badań archeologicznych z lat 2006-2011. *Śląskie Sprawozdania Archeologiczne* 57: 307–323.
- Gaudio, D., Betto, A., Vanin, S., De Guio, A., Galassi, A., Cattaneo, C. 2013. Excavation and Study of Skeletal Remains from a World War I Mass Grave. *International Journal of Osteoarchaeology* 25(5): 585–592.
- Giordani, G., Tuccia, F., Floris, I., Vanin, S. 2018. First record of *Phormia regina* (Meigen, 1826) (Diptera: Calliphoridae) from mummies at the Sant' Antonio Abate Cathedral of Castelsardo, Sardinia, Italy. *PeerJ* DOI: 10.7717/peerj.4176.
- Gładykowska-Rzeczycka, J.J., Parafiniuk, M. 2001. Atypical cranial vault and cervical vertebrae lesions caused by insects. *Journal of Paleopathology* 13: 75–78.
- Good, I. 2002. *The Archaeology of Early Silk. Silk Roads, Other Roads: Proceedings of the 8th Biennial Symposium of the Textile Society of America, September 26-28, 2002*. Northampton.
- Grabda, E. (red.), 1985. *Zoologia, bezkręgowce. Tom 2, część 2*. Warszawa.
- Grimaldi, D., Engel, M.S. 2005. *Evolution of the Insects (Cambridge Evolution Series) 1st Edition*. Cambridge.
- Gu, J., Li, Q., Chen, B., Xu, C., Zheng, H., Zhou, Y., Peng, Z., Hu, Z., Wang, B. 2019. Species identification of *Bombyx mori* and *Antheraea pernyi* silk via immunology and proteomics. *Scientific Reports* 9(1): 1–11.
- Hałaszk, A. 2015. Ludzkie szczątki kostne z zasypiska studni krypty klasztoru bernardynów w Jaworze, (w:) A. Muła (red.), *Średniowieczna studnia klasztoru bernardynów w Jaworze*. Jawor, 145–156.
- Henríquez-Valido, P., Morales, J., Vidal-Matutano, P., Moreno-Benítez, M., Marchante-Ortega, A., Rodríguez-Rodríguez, A., Huchet, J.-B. 2020. Archaeoentomological indicators of long-term food plant storage at the Prehispanic granary of La Fortaleza (Gran Canaria, Spain). *Journal of Archaeological Science* 120: 105179.
- Hofmann-de Keijzer, R. 2016. Dyeing (w:) K. Grömer (red.), *The Art of Prehistoric Textile Making: The development of craft traditions and clothing in Central Europe*. Wien, 140–169.



- Huchet, J.-B. 1996. L'archéontomologie funéraire: Une approche originale dans l'interprétation des sépultures. *Bulletins et mémoires de la Société d'anthropologie de Paris* 8: 289–302.
- Huchet, J.-B. 2014. Insect remains and their traces: relevant fossil witnesses in the reconstruction of past funerary practices. *Anthropologie* 52(3): 329–346.
- Huchet, J.-B. 2017a. Insectes et archéologie. *Les Nouvelles de l'archéologie* 148: 40–44.
- Huchet, J.-B. 2017b. Archéontomologie et archéoparasitologie d'unemomie égyptienne. *Technè* 44: 79–83.
- Huchet, J.B., Callou, C., Lichtenberg, R., Dunand, F. 2013. The dog mummy, the ticks and the louse fly: archaeological report of severe ectoparasitosis in Ancient Egypt. *International Journal of Paleopathology* 3(3): 165–175.
- Huchet, J.-B., Greenberg, B. 2010. Flies, Mochicas and burial practices: a case study from Huaca de la Luna, Peru. *Journal of Archaeological Science* 37: 2846–2856.
- Jach R., Knutelski S., Uchman A., Hercman H., Dohnalik M. 2018. Subfossil markers of climate change during the Roman Warm Period of the late Holocene. *The Science of Nature* 105: 6.
- Jałoszyński, P., Luo, X.Z., Hammel, J.U., Yamamoto, S., Beutel, R.G. 2020. The mid-Cretaceous† *Lepiceratus* Gen. nov. and the Evolution of the Relict Beetle Family Lepiceridae (Insecta: Coleoptera: Myxophaga). *Journal of Systematic Palaeontology*, 1127–1140.
- Johnson, A., Archer, M., Leigh-Shaw, L., Brown, M., O'Donnell, C., Wallman, J. 2013. Non-invasive visualisation and volume estimation of maggot masses using computed tomography scanning. *International journal of legal medicine* 127(1): 185–194.
- Kaczorowska, E., Draber-Mońko, A. 2014. *Wprowadzenie do entomologii sądowej*. Gdańsk, 292.
- Kenward, H. 2009. *Northern Regional Review of Environmental Archaeology: Invertebrates in Archaeology in the North of England*. Northern Regional Review of Environmental Archaeology, Research Department Report Series 12-2009.
- Kirgis, P., Bou, C., Lemaitre, S., Thomas, A., Huchet, J.-B. 2019. Contribution of Archaeoentomology, Archaeoparasitology and 3D reconstruction to the study of Prehispanic human mummies. *The 16th European Association Forensic for Entomology & The 3rd International Conference in Funerary Archaeo-Entomology (ICFAE) meetings, June 5-8, 2019 in Bordeaux, France* (abstract to oral presentation).
- Kirillova, I.V., Argant, J., Lapteva, E.G., Korona, O.M., Van der Plicht, J., Zinovyev, E.V., Kotoy, A.A., Chernova, O.F., Fadeeva, E.O., Baturina, O.A., Kabiloy, M.R., Shidlovskiy, F.K., Zanina, O.G. 2016. The diet and environment of mammoths in North-East Russia reconstructed from the contents of their feces. *Quaternary International* 406: 147–161.
- Klucze do oznaczania owadów Polski. Warszawa-Wrocław (1954-2016).
- Konwerski, S. 2013. Analiza entomologiczna materiałów zebranych w trakcie badań archeologicznych przeprowadzonych na Ostrowie Tumskim w Poznaniu przy ul. Posadzego 5, (w:) H. Kóčki-Krenz (red.), *Poznań we wczesnym średniowieczu, tom VIII*, Poznań.
- Konwerski, S. 2017. IV. 3. Wyniki analizy archeoentomologicznej, (w:) M. Majewski, K. Stań (red.), *Archeologia Stargardu – badania na Rynku Staromiejskim*. Stargard, 239–244.
- Mazar, A., Panitz-Cohen, N. 2007. It is the Land of Honey: Beekeeping at Tel Rehov. *Near Eastern Archaeology* 70(4): 202–219.
- Millar, I.M., Uys, V.M., Urban, R.P. (red.), 2000. *Collecting and preserving insects and arachnids. A manual for entomology and arachnology*. Pretoria, 105.
- Moret, P. 1998. Archeoentomology, insects in help of History. *Revue de Médecine Vétérinaire* 149(11): 995–998.
- Moszyński, K. 1939. *Kultura ludowa Słowian: Kultura duchowa, część II, zesz. II*. Kraków.
- Osborne, J. 1969. An insect fauna of late Bronze Age date from Wilsford, Wiltshire. *Journal of Animal Ecology* 38: 555–566.
- Panagiotakopulu, E. 2019. Fish for grain? Archaeoentomological research and emerging patterns of exchange. *AmS-Skrifter* 27: 93–105.
- Panagiotakopulu, E., Buckland, P.C. 1991. Insect pests of stored products from late Bronze Age Santorini, Greece. *Journal of stored Product Research* 27: 179–184.
- Panagiotakopulu, E., Buckland, P.C. 2018. Early invaders: farmers, the granary weevil and other uninvited guests in the Neolithic. *Biological Invasions* 20: 219–233.
- Panagiotakopulu, E., Buckland, P.C., Day, P.M., Doulas, C., Sarpaki, A., Skidmore, P. 1997. A lepidopterous cocoon from Thera and evidence for silk in the Aegean Bronze Age. *Antiquity* 71(272): 420–429.
- Panagiotakopulu, E., Buckland, P.C., Kemp, B. 2010. Underneath ranefer's Floors – urban environments on the desert edge. *Journal of Archaeological Science* 37: 474–481.
- Panagiotakopulu, E., Buckland, P.C., Wickler, S. 2018. Is there anybody in there? Entomological evidence from a boat burial at Øksnes in Vesterålen, northern Norway. *PLoS ONE* 13(7): e0200545.
- Panagiotakopulu, E., Higham, T., Sarpaki, A., Buckland, P.C., Doulas, C. 2013. Ancient pests: the Season of the Santorini minoan volcanic eruption and a date from insect chitin. *Naturwissenschaften* 100(7): 683–689.
- Poliński, W. (red.), 1923. *Podręcznik do zbierania i konserwowania zwierząt należących do fauny polskiej. Zeszyt 5. Owady*. Warszawa, 160.
- Porch, N., Kershaw, A.P. 2010. Comparative AMS 14C dating of plant macrofossils, beetles and pollen preparations from two late Pleistocene sites in southeastern Australia. *Altered Ecologies: Fire, Climate and Human Influence on Terrestrial Landscapes. Terra Australis* 32: 395–403.

- Pradelli, J., Rossetti, C., Tuccia, F., Giordani, G., Licata, M., Birkhoff, J.M., Verzeletti, A., Vanin, S. 2019. Environmental necrophagous fauna selection in a funerary hypogeal context: The putridarium of the Franciscan monastery of Azzio (northern Italy). *Journal of Archaeological Science: Reports* 24: 683–692.
- Rast-Eicher, A. 2016. *Fibres. Microscopy of Archaeological Textiles and Furs*. Budapest.
- Renfrew, C., Bahn, P. G. 2012. *Archaeology: theories, methods and practice*. 6th ed. London.
- SCIO 2020. *Archaeological findings provide key proof of Chinese civilization origin*, [http://english.scio.gov.cn/in-depth/2020-05/08/content\\_76019389.htm](http://english.scio.gov.cn/in-depth/2020-05/08/content_76019389.htm), dostęp: 08.05.2020.
- Solari, A., Pessis, A.M., Martin, G., Barbosa, F., Da Silva S.F.S.M. 2019. A case study: Termites as natural agents of postdepositional taphonomic alterations in a prehistoric human skeleton from a Middle Holocene archaeological site, Toca do Enoque (Piauí, Brazil). *The 16th European Association Forensic for Entomology (EAFE) & The 3rd International Conference in Funerary Archaeo-Entomology (ICFAE) meetings, 5-8 June, 2019 – Université de Bordeaux (Bordeaux, France)* (abstract to oral presentation).
- Stegmaier, G.E.R.D. 2009. Zur Bedeutung entomologischer Untersuchungen für die interpretation prähistorischer Grabfunde. *Restaurierung und Archäologie* 2: 111–121.
- Stork, N.E. 2018. How Many Species of Insects and Other Terrestrial Arthropods Are There on Earth? *Annual Review of Entomology* 63(1): 31–45.
- Sutton, M.Q. 1995. Archaeological aspects of insect use. *Journal of Archaeological Method and Theory* 2(3): 253–298.
- Szadziewski, R. 2012. Gromada: owady właściwe – Insecta s. str. (owady jawnoszczękie – Ectognatha), (w:) Cz. Błaszak (red.), *Zoologia. 2, Stawonogi. Cz. 2, Tchawkodyszne*. Warszawa, 109–131.
- Szadziewski, R., Gilka, W. 2012. Rząd: muchówki – Diptera, (w:) Cz. Błaszak (red.), *Zoologia. 2, Stawonogi. Cz. 2, Tchawkodyszne*. Warszawa, 390–418.
- Tomaszewska, K. 2015. Szczątki roślinne z badań archeologicznych przy ul. św. Idziego na Ostrowie Tumskim we Wrocławiu, (w:) A. Limisiewicz, A. Pankiewicz (red.), *Kształtowanie się grodu na wrocławskim Ostrowie Tumskim. Badania przy ul. św. Idziego*. Wrocław, 415–419.
- Upton, M.S., Mantle, B.L. 2010. *Methods for collecting, preserving and studying insects and other terrestrial arthropods*. Canberra.
- Vanden Berghe, I. 2011. Dye Analysis of Archaeological Textile Objects, (w:) J. Banck-Burgess, C. Nübold (red.), *Proceedings of The North European Symposium for Archaeological Textiles (NESAT) XI*. Esslingen am Neckar, 57–62.
- Vanin, S., Huchet, J.-B. 2017. Forensic Entomology and Funerary Archaeoentomology, (w:) E.M.J. Schotsmans, N. Márquez-Grant, S.L. Forbes. (red.), *Taphonomy of Human Remains: Forensic Analysis of the Dead and the Depositional Environment: Forensic Analysis of the Dead and the Depositional Environment*, 167–186.
- Villagran, X.S., Strauss, A., Alves, M., Oliveira, R.E. 2019. Virtual micromorphology: The application of micro-CT scanning for the identification of termite mounds in archaeological sediments. *Journal of Archaeological Science: Reports* 24: 785–795.
- Wanat, M. 2012. Rząd: chrząszcze – Coleoptera, (w:) Cz. Błaszak (red.), *Zoologia. 2, Stawonogi. Cz. 2, Tchawkodyszne*. Warszawa, 257–305.







# Archeomalakologia

Aldona Kurzawska

---

## WPROWADZENIE

Musze mięczaków to unikatowe okazy pochodzenia naturalnego i do dzisiaj jedne z najczęściej kolekcjonowanych drobiazgów przywożonych z podróży czy kupowanych w sklepach z pamiątkami. Niezwykła różnorodność ich kształtów i kolorów sprawia, że stanowią atrakcyjne przedmioty przykuwające uwagę. Historia mody na kolekcjonowanie egzotycznych muszli sięga XV i XVI w., kiedy to posiadanie ciekawostek z różnych stron świata było oznaką prestiżu i bogactwa. W dobie wielkich wypraw morskich, odkrycia Ameryki, otwierania faktorii handlowych w Azji i Ameryce oraz dostępu do złóż naturalnych wielu odległych krain, chęć posiadania nowych i egzotycznych produktów była dość powszechna. Muszle gromadzono w prywatnych zbiorach, prezentowano w specjalnie do tego celu przeznaczonych gablotach. Te pierwsze zbiory stały się początkiem wielkich i bogatych kolekcji muszli mięczaków znajdujących się obecnie w muzeach historii naturalnej na całym świecie (Dance 1966).

Historia zbierania muszli mięczaków sięga jednak o wiele dalej w przeszłość. Już Grecy, a później i Rzymianie, zajmowali się kolekcjonowaniem muszli, o czym świadczą źródła pisane (Dance 1966; Samek 1992). Sięgając jeszcze dalej wstecz, dzięki badaniom archeologicznym wiemy, że muszle zbierano od tysięcy lat. Do jednych z najstarszych

znalezisk muszli związanych ze współczesnym człowiekiem należą te odkryte w Misliya Cave na górze Karmel, datowane na okres między 240 000 a 160 000 lat temu (Bar-Yosef Mayer i in. 2020). Podejrzewamy, że muszle kolekcjonowane były przez człowieka najczęściej jako surowiec do produkcji ozdób czy przedmiotów codziennego użytku, symbol niosący ze sobą konkretne treści oraz wartość (np. Bar-Yosef Mayer 2005; d’Errico i in. 2009; Kuhn i Stiner 2007; Stiner 2014; Rigaud i in. 2015). Muszle znajdowane na stanowiskach archeologicznych to również odpadki po konsumpcji (np. Claassen 1998; Hardy 2017) oraz materiał wykorzystany przy produkcji zapraw i materiałów budowlanych (Ceci 1984; Law 2014).

## INFORMACJE MALAKOLOGICZNE

Malakologia to dział zoologii zajmujący się badaniem mięczaków. Mięczaki (Mollusca) to zwierzęta bezkręgowce, których jedną z cech charakterystycznych jest szkielet zewnętrzny (rzadziej wewnętrzny) w postaci muszli. Występują one zarówno w środowisku wodnym, jak i lądowym. Są grupą zwierząt istniejącą od przeszło 550 milionów lat i liczącą ponad 85 000 gatunków (Allen i Payne 2017). W typie mięczaków wyróżniamy gromady: ślimaki (Gastropoda) z muszlą pojedynczą i zazwyczaj

skręconą, małże (Bivalvia) złożone z dwóch połówek muszli, jednotarczowce, inaczej jednopłytkowce (Monoplacophora), chitony (Polyplacophora), głowonogi (Cephalopoda), łódkonogi (Scaphopoda) i tarczkonogi (Caudofoveata). Na stanowiskach archeologicznych znajdowane są najczęściej szczątki ślimaków, małży i łódkonogów.

Muszla jest martwym wytworem gruczołów brzożów płaszcza mięczaka. Spełnia głównie funkcję ochronną dla miękkiego ciała, stanowiąc również jego podporę, szkielet, miejsce przyczepu mięśni. Zbudowana jest z substancji organicznej, konchioliny oraz substancji nieorganicznej, węgla wapnia  $\text{CaCO}_3$ . Na przekroju poprzecznym muszli można wyróżnić trzy zasadnicze warstwy: periostrakum, ostrakum i hipostrakum. Węgiel wapnia może występować w muszli w dwóch odmianach mineralnych (jako kalcyt i aragonit) różniących się strukturą przestrzenną. Wiele muszli zbudowanych jest od wewnątrz z aragonitu (masa perłowa), a od zewnątrz z kalcytu (Leng i Lewis 2016).

Badaniem muszli mięczaków ze stanowisk archeologicznych zajmuje się archeomalakologia. Jest to dziedzina archeologii, która wyodrębniła się z archeozoologii (por. Wilczyński, w tym tomie). W przeciwieństwie do szczątków kostnych, najliczniej reprezentowanych znalezisk zoologicznych, muszle mięczaków należą do najczęściej odnajdywanych szczątków zwierząt bezkręgowych na stanowiskach archeologicznych (pozostałe grupy bezkręgowców obejmują szkarłupnie, głównie jeżowce oraz owady). Są istotnym fragmentem środowiska, w którym w przeszłości żył człowiek. Często są dowodem na zmiany zachodzące na przestrzeni czasu, zarówno w zachowaniu człowieka, jak i warunkach środowiskowych.

## ZARYS HISTORII BADAŃ

Historia badań muszli mięczaków sięga połowy XIX w., kiedy stanowiły one przede wszystkim okazy zbierane przez kolekcjonerów. Pionierskie badania nad duńskimi wzgórzami usypanymi z samych muszli, zwanych *køkkenmøddinger* – śmietnikami kuchennymi (Andersen 2000), zapoczątkowały rozwój archeozoologii (por. Wilczyński, w tym tomie), w tym również archeomalakologii. Późniejszy termin ang. *shell middens* przyjęty dla tego typu znalezisk jasno wskazywał na pokonsumpcyjny charakter

nagromadzenia muszli mięczaków (Andersen 2000; Claassen 1991; Thomas 2015).

Pionierem badań naturalnych akumulacji muszli mięczaków ze stanowisk archeologicznych jest bez wątpienia Alfred S. Kennard (1870-1948), geolog i malakolog, dzięki któremu badania nad mięczakami weszły w Wielkiej Brytanii do stałego programu zagadnień uzupełniających archeologię (Dzięczkowski 1998).

W badaniach materiałów pochodzących ze stanowisk archeologicznych pierwsze publikacje o znaleziskach muszli pojawiły się pod koniec XIX w. Już wtedy zastanawiano się nad ich pochodzeniem i funkcją. Doskonałym tego przykładem jest znalezisko z 1884 r. z pochówku, w którym odkryto medalion wykonany z muszli małża należącego do rodzaju *Spondylus*. Zabytek ten został opisany już w 1898 r. przez E. Waltera w *Die steinzeitlichen Gefäße des Stettiner Museums* (por. Kurzawska i Sobkowiak-Tabaka 2020). W. Friedberg w 1934 r. podjął się analizy znalezisk z grobu w Złotej (Grodzisko I), poprawnie wskazując kopalne pochodzenie odkrytych muszli. Analizy malakologiczne publikowano jednak bardzo rzadko.

Duża część badań malakologicznych związana była ściśle z badaniami geologicznymi osadów czwartorzędowych, bardzo istotnych w archeologii i wykorzystywanych do rekonstrukcji przeszłego środowiska naturalnego. Efektem tych badań były prace cytowane do dzisiaj, w tym najbardziej znane dla Europy Środkowej V. Ložka (1955; 1964) na temat fauny mięczaków z osadów terenów ówczesnej Czechosłowacji, a z terenu Polski S.W. Alexandrowicza (1987) i później S.W. Alexandrowicza i P.W. Alexandrowicza (2011) dotyczące analizy malakologicznej mięczaków czwartorzędowych. Większość badań muszli ze stanowisk archeologicznych z terenu Polski związana była z ich naturalnymi akumulacjami i skupiała się na aspektach środowiskowych (Wiktor 1965; Dzięczkowski 1974; 1993; Piechocki 1971). Rzadko muszle odkrywane w kontekstach archeologicznych trafiały do specjalistów – malakologów, a o obecności tego rodzaju materiałów wspomiano przy okazji raportów, podając w najlepszym wypadku jedynie identyfikację taksonomiczną materiału. Pierwsza polska praca i dotychczas jedyna opisująca badania malakologiczne w archeologii z terenu Polski, prof. A. Dzięczkowskiego, ukazała się w 1998 r. w tomie pt. *Nauki przyrodnicze*



*i fotografia lotnicza w archeologii*. O analizie malakologicznej wspomniano krótko przy okazji opisu badań archeozoologicznych również w przetłumaczonej na język polski książce C. Renfrew i P. Bahna *Archeologia. Teorie, metody, praktyka* (2002). Bardzo ważną pozycją prezentującą podstawy badań znalezisk muszli ze stanowisk archeologicznych jest wydana w 1998 r. praca Ch. Claassen pt. *Shells*. W pracy tej zawarte są podstawy analizy archeomalakologicznej.

Od 2002 r. dzięki organizacji *International Council for Archaeozoology* (ICAZ) zrzeszającej archeozoologów działa grupa naukowa skupiająca specjalistów z dziedziny archeomalakologii (ang. *Archaeomalacology Working Group*, AMWG). Organizacja wspiera i ułatwia wymianę danych i informacji dotyczących muszli mięczaków znajdujących na stanowiskach archeologicznych z całego świata (zob. <https://archaeomalacology.wordpress.com/>), a organizowane konferencje, warsztaty i spotkania są doskonałym forum wymiany doświadczeń, konsultacji i prezentacji najnowszych osiągnięć dziedziny.

## KATEGORIE MATERIAŁÓW MALAKOLOGICZNYCH

Szczątki mięczaków, ze względu na rodzaj oraz lokalizację w warstwach stanowiska archeologicznego, reprezentują naturalne akumulacje albo są rezultatem działalności człowieka (zostały przez człowieka przyniesione). Ponadto odkrywane są one w różnych kontekstach, które mają znaczący wpływ na interpretację znalezisk. Z tych powodów wyróżniamy następujące kategorie znalezisk archeomalakologicznych:

- Zabytki – muszle celowo zbierane, przyniesione na stanowisko przez człowieka i wykorzystane jako surowiec do produkcji ozdób, np. paciorków czy zawieszek, bransolet, aplikacji oraz przedmiotów codziennego użytku, np. pojemników czy narzędzi (np. Balme i in. 2018; Bar-Yosef Mayer 2007; Bar-Yosef Mayer i in. 2017; Bonnardin 2009; Borrello i Micheli 2011; Claassen 1998; Cristiani i in. 2014; Borić i Cristiani 2019; Dimitrijević 2014; d'Errico i in. 2009; Ifantidis i Nikolaidou, 2011; John 2011; Perlès i Vanhaeren 2010; Sakalauskaite i in. 2019; Séfériadès 2009; Stiner 2014; Taborin 1993).

- Muszle jako surowiec – źródło węgla wapnia ze względu na swoje właściwości fizykochemiczne, wykorzystane w innych materiałach, np. jako domieszki do masy ceramicznej, składnik pasty inkrustacyjnej, zapraw czy innych materiałów budowlanych (Bar-Yosef Mayer 2007; Ceci 1984; Kos i in. 2015; Law 2014).
- Śmietniska muszlowe – małe oraz duże nagromadzenia muszli mięczaków na stanowiskach archeologicznych powstałe w wyniku działalności człowieka (Andrus 2011; Bailey i Milner 2008; Ceci 1984; Claassen 1998; Milner i in. 2007).
- Naturalne nagromadzenia muszli – w warstwach kulturowych i naturalnych stanowisk archeologicznych oraz w osadach towarzyszących stanowiskom archeologicznym (Allen 2017; Davies 2008; Sobkowiak-Tabaka i in. 2018; 2021; Kurzawska i Kara 2015).

Muszle odkrywane na stanowiskach archeologicznych są przede wszystkim dowodem działalności człowieka w przeszłości. Dzięki analizom zabytków możemy wnioskować o sposobie ich wykorzystania, modyfikacji i użytych narzędziach czy zastosowanej technologii, a nawet długości użytkowania tych przedmiotów (por. Pyżewicz, w tym tomie). Dzięki informacji, skąd muszle zostały pozyskane, możemy pośrednio badać kontakty czy zależności między społecznościami, nierzadko również prześledzić dawne szlaki handlowe, a w przypadku ozdób podjąć próbę odpowiedzi na pytanie, czy poza ich funkcją dekoracyjną odgrywały jeszcze inną rolę. Szczegółowe badania nad śmietnikami muszlowymi pozwalają stwierdzić, czy mięczaki były w przeszłości konsumowane, w jakim celu muszle zostały nagromadzone, kiedy były zbierane. Badania muszli nagromadzonych w naturalnych warstwach stanowisk archeologicznych czy osadach biogenicznych dawnych zbiorników wodnych służą rekonstrukcji warunków środowiskowych, jakie istniały w okresie sedymentacji osadów w pobliżu badanego stanowiska archeologicznego oraz jego otoczenia. Dodatkowo muszle wykorzystywane są w badaniach procesów formowania stanowisk archeologicznych (depozycyjnych i postdepozycyjnych), w tym mogą wyznaczyć długość formowania się poszczególnych obiektów, ich różniczasowość, wskazać zakłócenia, przemieszanie warstw spowodowane różnymi czynnikami (Davies 2008).



**Ryc. 1.** Fragment sznurów paciorków dyskowatych z muszli małży słodkowodnych, odkrytych w grobie LXIV, Osłonki, stan. 1, Muzeum Archeologiczne i Etnograficzne w Łodzi, nr inw. 1994\_29, skala 1 cm. Fot. M. Jórdeczka

#### **PROCEDURA BADAWCZA: POBIERANIE PRÓB I ANALIZA W LABORATORIUM**

Analizy malakologiczne wykorzystywane są w archeologii wieloaspektowo. Biorąc pod uwagę wymienione kategorie pozostałości muszli na stanowiskach, stosowane metody badawcze różnią się zaczynając od pozyskania materiału, kończąc na analizie laboratoryjnej i dostosowane są ściśle do tych kategorii. Z tego względu zostaną one omówione oddzielnie, a dotyczyć będą przede wszystkim znalezisk ze stanowisk archeologicznych z terenu Polski.

#### **ZABYTKI Z MUSZLI**

##### **Na stanowisku archeologicznym**

Przedmioty wykonane z muszli znajdowane na stanowiskach archeologicznych na terenie Polski to przede wszystkim ozdoby. Odkrywane są w różnych kontekstach archeologicznych: w warstwach kulturowych przemieszane często z innymi materiałami oraz w obiektach o różnym charakterze.

Wszystkie znaleziska i ich położenie w obiekcie, warstwie, trzeba odpowiednio udokumentować, najwięcej jednak uwagi należy poświęcić znaleziskom z pochówków. Dokumentacja rysunkowa, fotograficzna, wykonanie pomiarów i opis położenia ozdób w obiekcie czy pochówku (względem szkieletu) i pozostałych znalezisk są w tym przypadku niezmiernie ważne. Same ozdoby należy delikatnie wydobyć z ziemi, bez oczyszczania pędzelkami czy mycia! Jeśli jest to możliwe, w postaci bryłek z zachowanym układem ozdób (sznur paciorków) (ryc. 1). Tak wydobyte przedmioty należy odpowiednio zabezpieczyć, by w trakcie transportu do laboratorium nie uległy uszkodzeniu. W przypadku odkrycia pojedynczych muszli – zabytków w warstwach czy obiektach archeologicznych również należy udokumentować znaleziska i nieoczyszczone (!) odpowiednio zapakować. Najczęściej materiały pakowane są w woreczki strunowe lub zawijane w folię, a następnie umieszczane w pudełkach, które zabezpieczają je przed zgnieceniem w transporcie. Po konsultacji z osobą, która będzie przeprowadzała analizy, należy je dostarczyć, wraz z dokumentacją, do laboratorium.

## W laboratorium

Muszle pochodzące z wykopalisk różnią się stanem zachowania, co wynika z działania różnorodnych procesów, w tym postdepozycyjnych, ale również ze sposobu ich potraktowania przed dostarczeniem do laboratorium (intensywne mycie, płukanie na sitach itp.). Zanim przystąpimy do jakiegokolwiek działania, należy zabytki dokładnie obejrzeć oraz sprawdzić za pomocą mikroskopu stereoskopowego, czy na zabytkach i w bryłkach ziemi nie znajdują się pozostałości materiałów organicznych, które byłyby istotne dla późniejszych badań. A należy się takich spodziewać. Węglan wapnia, z którego zbudowane są muszle, tworzy podobnie jak w przypadku zabytków metalowych, korzystne środowisko do zachowania różnych rezydów, często w zmineralizowanej formie (pozostałości materiałów organicznych, np. tekstyliów) (Kurzawska i in. w przygotowaniu).

W przypadku materiałów, które uległy znacznemu uszkodzeniu, rozwarstwieniu i rozkładowi chemicznemu, np. pod wpływem działania różnych kwasów, ziemia otaczająca zabytek często warunkuje przetrwanie przedmiotu. Z tego względu nie należy moczyć czy myć pod bieżącą wodą zabytku, jedynie oczyścić go na sucho, najlepiej korzystając z delikatnych pędzelków, pęset i pomocy mikroskopu stereoskopowego, aby zapobiec uszkodzeniom. Również nie należy rozklejać sklejonych ze sobą ozdób (np. paciorków), gdyż w ich wnętrzu mogą znajdować się pozostałości organiczne np. sznurków. Zabytki zachowane w dobrej formie można oczyścić, najlepiej wodą, przemywając na szalce. Większe na specjalistycznych sitach o drobnych oczkach (0,5 mm), mocząc w naczyniu. Nie należy używać szczoteczek. W przypadku trudniejszych osadów dobrym rozwiązaniem jest wykorzystanie myjki ultradźwiękowej. Osad można zabezpieczyć do dalszych analiz, gdy zabytki pochodzą ze szczególnych kontekstów jak znaleziska grobowe, ponieważ tego typu pozostałości często poddawane są bardzo wnikliwej analizie i każda informacja może być ważna. Umyte zabytki pozostawiamy do wysuszenia w temperaturze pokojowej.

## Identyfikacja

Zabytki mogą odzwierciedlać naturalną formę muszli, gdzie jedyną modyfikacją jest np. dziurka służąca



**Ryc. 2.** Mikrofotografia SEM przekroju połówki muszli *Unio crassus* z jamy 53 ze stan. 35 w Kiekrzu. Fot. M. Mrozek-Wysocka

zawieszeniu (np. zawieszki), lub nie, zabytek wtedy w ogóle nie przypomina pierwotnego kształtu muszli (np. paciorki dyskowate, aplikacje z masy perłowej). Na tym etapie przeprowadzamy ocenę mikroskopową zabytku oraz podejmujemy próbę identyfikacji materiału czyli muszli mięczaka. Identyfikacja gatunkowa często pociąga za sobą informację o miejscu pochodzenia. Wśród zabytków na terenie Polski mamy co najmniej kilka możliwości. Możemy mieć do czynienia z muszlami ślimaków lądowych, ślimaków i małży słodkowodnych, mięczaków morskich (najczęściej ślimaków, małży i łódkonogów) – czwartorzędowych, jak i z neogenu. Muszle mogą pochodzić zarówno z lokalnych źródeł, jak również mieć dalekie pochodzenie, z miejsc oddalonych nawet setki i tysiące kilometrów od miejsca ich znalezienia (muszle z Morza Śródziemnego, np. *Spondylus gaederopus*, czy z Morza Czerwonego, np. *Monetaria annulus*). Do identyfikacji muszli mięczaków służą klucze i atlasy (np. Wiktor 2004; Piechocki i Wawrzyniak-Wydrowska 2016; Welter-Schultes 2012; Poppe i Goto 2000). Niezbędna jest również bogata kolekcja muszli mięczaków współczesnych, do której możemy porównywać okazy z wykopalisk. Przedmioty o znacznie zmienionym kształcie odbiegającym od pierwotnej formy muszli stanowią nieraz wyzwanie identyfikacyjne. Pomocne jest w takich przypadkach wykonanie analiz specjalistycznych, które są wsparciem w poprawnej identyfikacji, ale również pomagają stwierdzić jaki wpływ na muszlę miał człowiek (zmiany w strukturze muszli, zmiany ewolucyjne itp.) oraz upływ czasu, działanie procesów postdepozycyjnych. Do tego typu analiz zaliczamy:



- Analiza stanu zachowania muszli – sprawdzenie struktury wewnętrznej muszli (czy doszło do rekrytalizacji - przejścia aragonitu w kalcyt) widoczne w trakcie obrazowania w skaningowym mikroskopie elektronowym (SEM) (ryc. 2).
- Datowanie muszli za pomocą izotopów strontu  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ . Jest ono pomocne w rozróżnieniu często bardzo podobnych do siebie, bo zmienionych postdepozycyjnie, muszli mięczaków morskich z neogenu i czwartorzędowych. Datowanie w tym przypadku prowadzi pośrednio do identyfikacji, wskazuje kierunek poszukiwań zarówno w kwestii rozpoznania gatunku jak i miejsca pochodzenia muszli. Zdecydowanie częściej znajdujemy na terenie Polski muszle morskie kopalne, pochodzące przeważnie z lokalnych złóż geologicznych (najczęściej mioceńskich), niż muszle pozyskane na drodze wymiany i handlu z bardzo odległymi terenami (Shackleton i Elderfield 1990; Kurzawska i in. 2020; Kurzawska i Sobkowiak-Tabaka 2020). A o pomyłkę nietrudno. Metoda ta jest niszcząca, wymaga poświęcenia fragmentu materiału do analizy (> 25 mg).
- Analiza stabilnych izotopów frakcji węglanowej  $\delta^{13}\text{C}$  i  $\delta^{18}\text{O}$  jest pomocna w odróżnieniu muszli morskich od słodkowodnych (np. identyfikacja masy perłowej) (Sakalauskaitė i in. 2019), może wskazać potencjalne źródła pozyskania muszli małży słodkowodnych (Apolinarska i Kurzawska 2020), pomaga w określeniu czasu ich zbioru. Metoda wymaga pobrania niewielkich próbek <100  $\mu\text{g}$ , jest podobnie jak analiza izotopów strontu niszcząca (więcej o tej metodzie Apolinarska, w tym tomie).
- Paleoproteomika muszli – metoda podobna do paleogenomiki (badania starożytnego DNA) (Chyleński, w tym tomie), stosowana w badaniach starożytnych proteomów (zestawu białek występujących w komórce w danym momencie, białkowy odpowiednik genomu). Metoda ta polega na wyekstrahowaniu białek obecnych w badanych zabytkach i porównaniu ich z sekwencją białek pozyskanych z wytypowanych materiałów porównawczych o znanej identyfikacji i pochodzeniu. Jak dotąd metoda ta wykorzystywana była do identyfikacji pochodzenia zabytków wykonanych ze skóry zwierzęcej, kości słoniowej czy kości, gdzie kolagen jest najbardziej rozpowszechnioną cząsteczką białka.

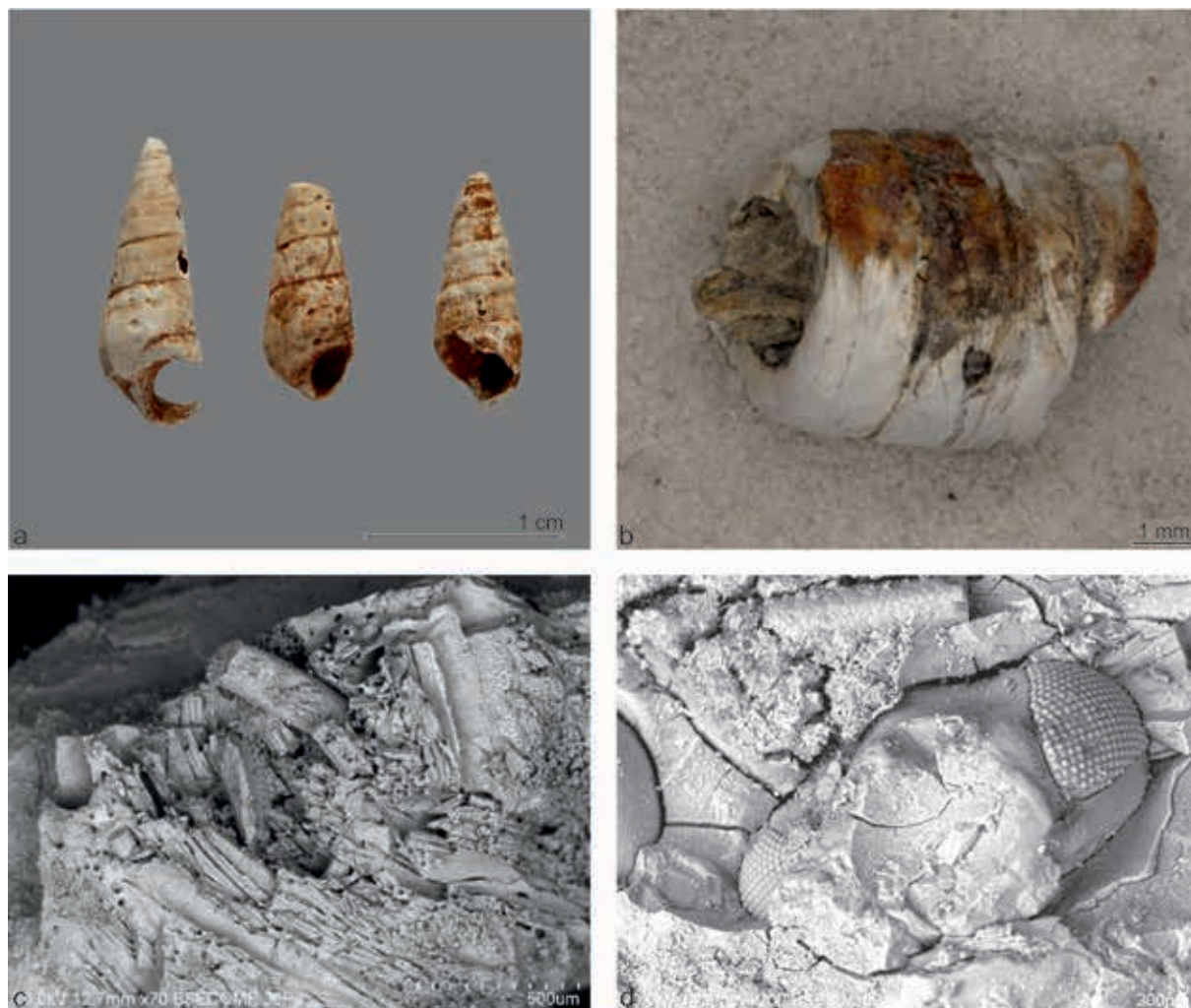
Scharakteryzowanie białek i materiału genetycznego z muszli mięczaków jest dużo trudniejsze z powodu ich znacznie mniejszej zawartości (300 razy mniejszej niż w kości). Ponadto skład białek w muszlach nie jest tak dobrze znany jak w kolagenie, np. kości. Po raz pierwszy metoda ta została zastosowana w 2019 r. do identyfikacji muszli mięczaków, a dokładnie masy perłowej przez Sakalauskaitė i in. (2019; 2020). Metoda wymaga pobrania próbek z zabytków, jest niszcząca.

- Analiza DNA (por. Chyleński, w tym tomie) pozyskanego z muszli wykorzystywana jest do identyfikacji gatunków, śledzenia historii populacji, biogeografii i badania wielu innych zagadnień związanych z pochodzeniem mięczaków czy śledzeniem zmian fenotypowych. Przykładem tego typu badań (bardzo rzadkich w archeologii) jest zastosowanie analizy aDNA z muszli ślimaka *Strombus pugilis* w celu rekonstrukcji wpływu człowieka na biologię ewolucyjną tego gatunku (Sullivan i in. 2021).

Przed przekazaniem materiałów do analiz, które wiąże się z chociaż częściowym, a nawet minimalnym uszkodzeniem materiału, należy zawsze rozważyć wszelkie za i przeciw, tym bardziej jeśli dysponujemy pojedynczym zabytkiem o niewielkich rozmiarach, który może być unikatowy dla badanego obszaru.

### Badanie mikrośladów i pomiary

Następnym krokiem w analizie zabytków jest ich dalsza obserwacja mikroskopowa (mikroskop stereoskopowy, cyfrowy, metalograficzny) przy zastosowaniu różnych powiększeń i dokumentacja (schematyczny rysunek, wykonanie zdjęć) w celu identyfikacji wszystkich mikrośladów powstałych od momentu pozyskania przedmiotu przez człowieka, poprzez modyfikację, użytkowanie i depozycję oraz ślady powstałe postdepozycyjnie. Informacje o tafonomii, wynikające z działania procesów postdepozycyjnych, a możliwe do rozpoznania, mają znaczący wpływ na końcową interpretację. Przy weryfikacji potencjalnych pozostałości materiałów organicznych i nieorganicznych bardzo pomocne jest obrazowanie SEM, które pomaga dojrzeć struktury



**Ryc. 3.** a – mikroślady czerwonego „barwnika” na paciorkach z muszli *Granulolabium bicinctum* (Nieledew, stan. 1, grób 7), (nr inw. 1515/A/ML Muzeum Lubelskie w Lublinie); b – kilka sklejonnych paciorków dyskowatych z muszli *Unio* sp., na powierzchni widoczne ślady zmineralizowanej substancji (pomarańczowe-brązowe), wewnątrz zmineralizowane pozostałości sznurka (prawdopodobnie z surowca roślinnego), na który paciorki były nawleczone (Szarbia, stan. 9, ob. 13\_VIII); c – zmineralizowane włókna wełny – pozostałości sznurka odkryte wewnątrz paciorka z muszli *Unio* sp. (Stryjów, stan. 30, ob. 2\_699), mikrofotografia SEM; d – zmineralizowane fragmenty muchówek (widoczna głowa, oko złożone) odkryte na powierzchni zawieszki z muszli *Glycymeris* (Kichary Nowe, grób 43, zawieszka nr III L1-77), mikrofotografia SEM. Fot. M. Jórdeczka (a), A. Kurzawska (b), M. Mrozek-Wysocka (c, d)

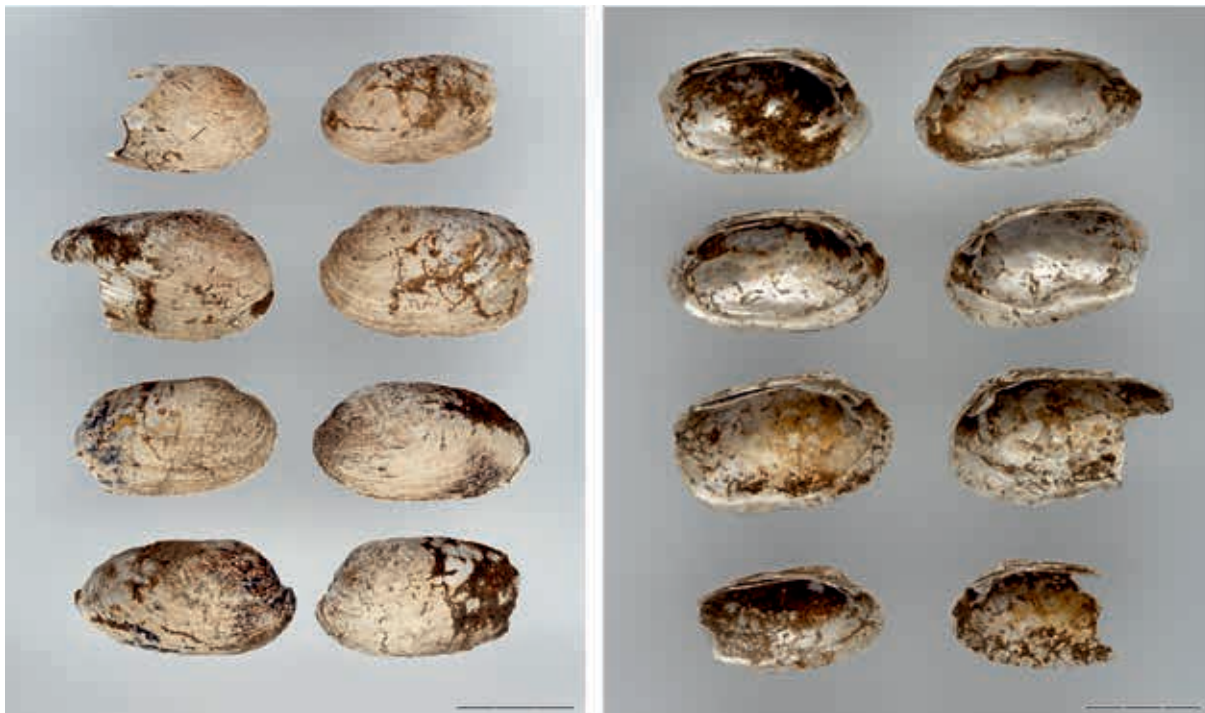
często niewyraźne w świetle odbitym mikroskopu stereoskopowego, a dzięki mikroanalizie EDS zidentyfikować/określić ich skład chemiczny.

Najczęściej występującymi rezydunami na pradziejowych zabytkach z muszli z terenu Polski są:

- ślady czerwonego proszku (często określane jako pigment, barwnik czy ochra, por. Trąbska i in. 2015; Zakościelna 2010) (ryc. 3a);
- czarno-brunatno-pomarańczowe, czasami lekko żółte, błyszczące osady niemalże zespolone z samą muszlą z widoczną strukturą na powierzchni zabytków czy w otworach

paciorków i zawieszek, często z zachowanymi w zmineralizowanej formie fragmentami włókien (ryc. 3b, c), oraz pozostałościami owadów (ryc. 3d) biorących udział w rozkładzie materii organicznej (na ozdobach z pochówków szkieletowych) (Kurzawska i in. w przygotowaniu) (por. Kadej i in., w tym tomie).

Kolejnym krokiem są pomiary, zazwyczaj jest to długość/wysokość muszli, jej grubość, średnica/wielkość otworu, który wykonano w muszli (Claassen 1998). Dane te są zazwyczaj zbiorczo porównywane zarówno z innymi zabytkami



**Ryc. 4.** Muszle małży słodkowodnych z jamy o nr 3/1973 na stan. 3 w Puławach-Włostowicach, skala 3 cm (Kurzawska 2018). Fot. M. Jórdeczka

wykonanymi z tego samego materiału, jak i z danymi aktualistycznymi o wielkości muszli, która w przeszłości w obrębie tego samego gatunku mogła się różnić. Ponadto możemy mieć do czynienia zarówno z muszlą mięczaka osobnika młodego, jak i dorosłego, co dostarcza nam kolejnych informacji. Do pomiarów wykorzystywane są suwmiarka, mikromierz oraz przy mniejszych przedmiotach czy pomiarze detali funkcje pomiarowe w mikroskopach np. cyfrowych. Ostatnio do pomiaru paciorków dyskowatych z muszli bardzo nieznacznie różniących się wymiarami zastosowano cyfrowy projektor pomiarowy (Kurzawska i Sobkowiak-Tabaka 2021), który pozwala na dokonanie pomiarów i porównanie między poszczególnymi obiektami w badanej grupie. Sam pomiar, tak jak w przypadku mikroskopów cyfrowych, jest bezdotykowy, co jest dużą zaletą przy badaniu delikatnych i drobnych zabytków.

### Wyniki analiz

Interpretacja wyników analiz zależy od kontekstu archeologicznego, w którym odkryto zabytki, jego dokumentacji, stanu zachowania pozostałości

oraz często w przypadku materiałów archiwalnych, sposobu ich przechowywania i potraktowania np. środkami do konserwacji. Wyniki analiz powinny zawierać wszelkie dane, które udało nam się zebrać o zabytku, w tym ich biografię opartą na danych z analizy mikrośladów (por. Pyżewicz, w tym tomie). Pełne opracowanie zawiera zawsze szersze wnioskowanie i interpretacje znalezisk w kontekście kulturowym, porównanie z podobnymi znaleziskami z innych stanowisk.

Na stanowiskach archeologicznych na terenie Polski wśród muszli mięczaków wykorzystywanych przez człowieka jako surowiec do produkcji ozdób znajdujemy: muszle kopalnych mięczaków najczęściej lokalnego pochodzenia (zarówno ślimaków, małży, jak i łódkonogów) (np. Kurzawska i in. 2020; Kurzawska w przygotowaniu); muszle słodkowodnych małży z rodziny Unionidae oraz drobnych ślimaków – najczęściej z gatunku *Theodoxus fluviatilis* oraz *Lithoglyphus naticoides* (Apolinarska i Kurzawska 2020; Kurzawska i Sobkowiak-Tabaka w druku) oraz muszli morskich: *Spondylus gaderopus* (Kurzawska i Sobkowiak-Tabaka 2020), Cypraeidae (np. *Monetaria annulus*, *Monetaria moneta*) (Kurzawska 2013a), *Murex* spp., *Pecten jacobaeus*, *Pecten maximus* (Wyrwa 2009).





Ryc. 5. Połówki muszli *Ostrea edulis*, Gdańsk, ul. Toruńska, skala 3 cm (Kurzawska i Rutkowska 2013). Fot. A. Kurzawska

## ŚMIETNISKA MUSZLOWE

### Na stanowisku archeologicznym

Śmietnisko muszlowe to termin stosowany do bardzo wielu typów znalezisk i pozostałości, których cechą wspólną jest duże nagromadzenie muszli mięczaków. Termin ten próbowano ograniczyć do depozytów, które w swoim składzie zawierają ponad 50% muszli mięczaków (Bowdler 1983), do nagromadzeń będących wynikiem działalności człowieka z widocznym znacznym udziałem muszli mięczaków (Waselkov 1987) czy do muszli mięczaków będących pozostałościami po konsumpcji (Claassen 1998). Definicje te dotyczą przede wszystkim stanowisk archeologicznych będących nagromadzeniem muszli mięczaków nad brzegami mórz czy przy ujściach rzek.

„Śmietniska muszlowe” znajdowane na terenie Polski to najczęściej obiekty (tzw. jamy gospodarcze) odkryte na stanowiskach archeologicznych zawierające muszle mięczaków w znacznych

ilościach, składające się z nich niemalże w 100%, lub muszle mięczaków w warstwach stanowiska odkrywanych w skupiskach lub przemieszanych z innymi materiałami często o charakterze pokonsumpcyjnym. Trudność w przypadku mniejszych obiektów czy mięczaków w warstwach kulturowych polega na prawidłowym rozpoznaniu, czy mamy do czynienia z naturalnym nagromadzeniem muszli mięczaków (zawleczone przez zwierzęta), czy dziełem człowieka. Decyduje tu stratygrafia i skład takiego obiektu/nawarstwienia (Bowdler 2006).

Obiekty na stanowiskach pradziejowych z terenu Polski powstałe w wyniku działalności człowieka zawierają najczęściej muszle małży słodkowodnych z rodziny Unionidae (Kurzawska 2016; 2018; Kurzawska i in. 2021; Zabilska 2012) (ryc. 6). Natomiast w warstwach stanowisk nowożytnych, począwszy od XVII w. występują głównie muszle małży morskich – ostryg z gatunku *Ostrea edulis* (ryc. 5) i rzadziej omułków jadalnych – *Mytilus edulis* (Kurzawska i Rutkowska 2013).





**Ryc. 6.** Muszle Unionidae z próby pobranej z odkrytego śmietniska muszlowego (ob. 53) w Kiekrzu na stan 35, w trakcie płukania na sitach. Fot. A. Kurzawska

Trudniejsze w badaniach archeologicznych są obiekty pradziejowe zawierające muszle małży słodkowodnych. Najczęściej ich odkrywanie na stanowisku polega na wstępnym odsłonięciu obiektu, a następnie eksploracji połowy obiektu oraz szczegółowej dokumentacji profilu. Należy pamiętać, że połówki obiektu mogą się różnić zarówno miąższością warstwy muszli, jak i jej położeniem. Inną metodą odkrywania takich depozytów jest eksploracja jamy „dookoła” i odnotowanie jej kształtu i miąższości, a następnie jej badanie od góry z dokumentacją ułożenia muszli w obiekcie (por. obiekty odkryte na stanowisku w Nowym Łowiczu: Cieśliński i Kasprzak 2006; Bogucki i in. 2007). Równie istotna jest szczegółowa dokumentacja – opisanie kształtu, charakteru, stratygrafii obiektu, pełnej dokumentacji wszystkich znalezisk (nie tylko muszli). Bardzo ważne jest odpowiednie pobranie prób, które będą reprezentatywne dla całego obiektu. Niezbędne jest także wcześniejsze zaplanowanie sposobu, w jaki materiały będą badane (jakie pytania badawcze stawiamy), by określić najlepszy sposób ich pobrania. Przetestowaną dobrą metodą dla obiektów zawierających muszle jest

wycięcie odpowiednio reprezentatywnego bloku i zabezpieczenie go do transportu (Kurzawska i in. 2021). Wyciąganie pojedynczych muszli z obiektu jako próbek często prowadzi do ich uszkodzenia, z reguły są bardzo kruche, rozpadające się w rękach, wypełnisko zbite, a ziemia może zawierać dodatkowe szczątki (np. węgle drzewne, pozostałości makroskopowych szczątków roślin, muszle mniejszych gatunków mięczaków, szczątki kostne zwierząt, fragmenty ceramiki), dostarczające nam dalszych informacji o charakterze pozostałości odkrytych w obiekcie. Jeśli osady w obiekcie nie są jednorodne, warto pobrać reprezentatywny profil warstw, dzięki czemu będzie można je porównać na poszczególnych głębokościach. W trakcie eksploracji można również zabezpieczyć mniejsze próbki, np. węgli drzewnych do oznaczenia i datowania, próbki gleby itp. Próby powinny być zważone zaraz po wydobyciu, aby ewentualne różnice w wilgotności prób, mające wpływ na ich wagę, nie miały znaczenia dla ich porównania przy analizie materiałów (Bowdler 2006). Muszle można przekazać do datowania, ale jedynie mięczaków morskich i ślimaków lądowych. Muszle mięczaków słodkowodnych

nie nadają się do datowania metodą  $C^{14}$  z uwagi na efekt rezerwuarowy (szerzej o datowaniu muszli, np. Fernandes i Dreves 2017; Douka 2017).

### W laboratorium

Pojedyncze muszle mięczaków pozyskane ze stanowiska archeologicznego bez wypełniska (otaczającej ziemi), o ile stan zachowania na to pozwala, oczyszcza się na sucho lub przepłukuje na sitach (ryc. 6). Jeśli kontekst znalezisk wskazuje, że otaczająca ziemia może zawierać szczątki innych materiałów, które wzbogaciłyby analizę malakologiczną o dodatkowe dane, należy brudne muszle mięczaków, do których często przyklejony jest osad, przepłukać na sitach o drobnych oczkach (o średnicy przynajmniej 0,5 mm do 0,2 mm). Pozyskaną frakcję z sit należy wysuszyć lub w postaci prób mokrych przełożyć do pojemnika do późniejszej weryfikacji przy użyciu powiększenia mikroskopu stereoskopowego.

Pobrany wycinek warstwy zawierającej muszle mięczaków na początek dokumentujemy, sprawdzając wzajemne ułożenie muszli względem siebie, w tym czy połówki muszli małży są ze sobą połączone. Dokładna dokumentacja znaleziska jest istotna, gdyż bardzo często po wstępnym przepłukaniu materiału na sitach muszle się rozpadają (ryc. 6), co utrudnia ich identyfikację i wykonanie pomiarów. Tak jak opisano wyżej, próbę płuczemy delikatnie na sitach, zachowując drobną frakcję w pojemniku do dalszych analiz. W przypadku dużych prób – wyciętego fragmentu wypełniska – możemy wydzielić z niej mniejszą i przeznaczyć ją do szlamowania na sitach o drobniejszych oczkach do np. analizy makroskopowych szczątków roślin (por. Moskal-del Hoyo, w tym tomie). Oczyszczone muszle pozostawiamy do całkowitego wyschnięcia w temperaturze pokojowej. Na tym etapie wybieramy również kompletne muszle do dalszych analiz, np. izotopowych (por. Apolinarska, w tym tomie).

### Identyfikacja, pomiary, mikroślady

Wysuszony materiał identyfikujemy do poziomu gatunku, rodzaju czy rodziny oraz ustalamy liczbę osobników konkretnego taksonu i ich stosunek procentowy. Szacowanie liczby muszli mięczaków będzie utrudnione w przypadku znacznej

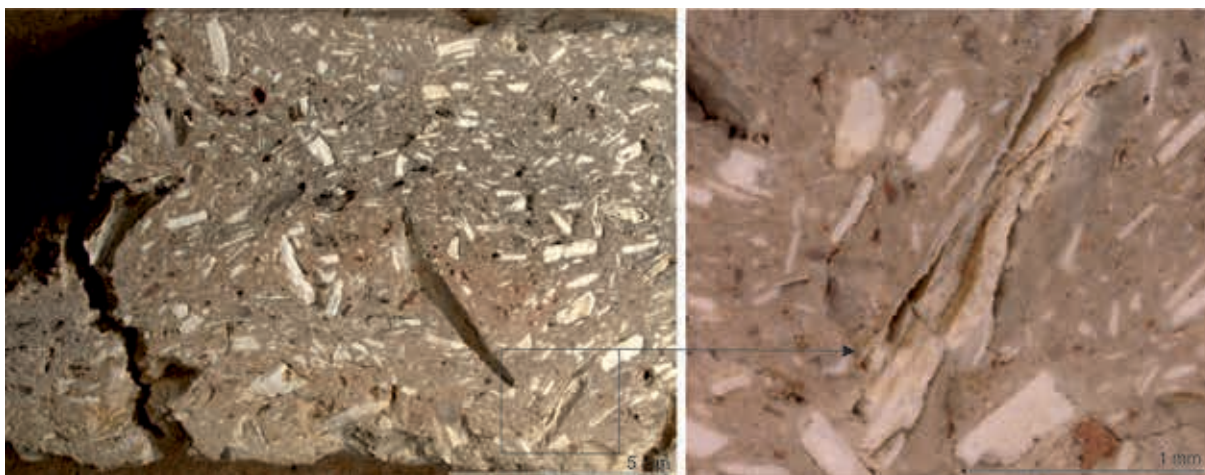
fragmentacji materiału. Wtedy wybieramy dla każdego z taksonów charakterystyczny element występujący pojedynczo u jednego osobnika (ang. *nonrepetitive elements*, NRE), najczęściej jest to wierzchołek muszli, i liczymy tylko te fragmenty dla danego gatunku. W przypadku muszli małży ważne jest rozróżnienie prawej i lewej połówki muszli, które liczymy osobno. Ma to znaczenie przy szacowaniu minimalnej liczby osobników (MNI por. Wilczyński, w tym tomie). Inną metodą jest określenie wagi wszystkich fragmentów danego gatunku. Każda z metod ma wady i zalety i nie tylko w przypadku mięczaków metody określenia liczby szczątków są kwestią dyskusyjną (por. Waselkov 1987; Claassen 1998; 2000; Mason i in. 1998; Glassow 2000).

Pomiarów dokonujemy zazwyczaj jedynie na wybranych, kompletnie zachowanych połówkach i jest to wysokość i szerokość muszli (grubość w przypadku zachowanych dwóch złączonych połówek muszli małży). Wszelkie dane warto zapisywać w arkuszach kalkulacyjnych do późniejszych opracowań statystycznych czy łatwiejszego operowania danymi, których podsumowanie zazwyczaj prezentowane jest w postaci tabeli zbiorczej zidentyfikowanych muszli mięczaków wyrażonych przez minimalną liczbę osobników lub globalną liczbę szczątków, wagę. Na tym etapie odnotowujemy również wszelkie ślady, po których jesteśmy w stanie stwierdzić, jak mięczaki zostały potraktowane. Istotne są tu uszkodzenia muszli występujące często na wielu okazach w tym samym miejscu (krawędź, tylny koniec), o charakterystycznym kształcie, ślady użytych narzędzi (np. zarysowania wewnątrz muszli ostrzyg wynikające ze sposobu ich otwarcia i konsumpcji), ślady obróbki termicznej, zmiana w kolorze, widoczne ciemne smugi, nadpalenie.

### Wyniki analiz

Na wyniki analiz składają się wszelkie dane pozyskane zarówno w trakcie eksploracji obiektu – jamy, jej charakter, budowa, kształt, wielkość, opis wypełniska, oraz zebrane w trakcie analizy materiału – prób w warunkach laboratoryjnych, jak i wyniki badań izotopowych. Dzięki szczegółowym badaniom takich obiektów możliwe jest wnioskowanie na temat charakteru pozostałości muszli mięczaków odkrytych w obiekcie, które często





**Ryc. 7.** Szlif ceramiki z widoczną domieszką muszli – Kopydłowo, stan. 6. Fot. A. Kurzawska

określa się jako jamy gospodarcze czy śmietnikowe wskazujące na pokonsumpcyjny charakter szczątków, „magazyn” muszli lub obiekt użytkowy, np. piec (por. Kurzawska i in. 2021). Małże słodkowodne najczęściej znajdowane jako skupiska w obiektach pradziejowych na terenie Polski mogą mieć bardzo różny charakter. Powszechnie uważa się, że mięczaki słodkowodne zbierano w pobliżu miejsc zamieszkania w celach konsumpcyjnych, na tzw. przednówku, gdy inne źródła pożywienia były na wyczerpaniu (Dzięczkowski 1998). Zebrane dotychczas informacje z różnych badań i analiz wskazują jednak, że w przypadku konsumpcji zbiór małży odbywał się późnym latem/wczesną jesienią (Leng i Lewis 2016; Kurzawska i in. 2021), a same muszle również mogły być wykorzystane:

- jako surowiec do produkcji ozdób (Apolinarska i Kurzawska 2020);
- jako domieszka do gliny w produkcji ceramiki (ryc. 7), składnik past inkrustacyjnych (Kurzawska i in., w przygotowaniu);
- jako źródło węgla wapnia do celów budowlanych, gospodarczych, przydomowych (por. Ceci 1984), co często jest nieuchwytnie archeologicznie.

Pojedyncze muszle znajdowane w warstwach stanowiska archeologicznego przekazane do analiz są materiałem trudniejszym do interpretacji niż ich większe skupiska. Często z samego kontekstu archeologicznego nie wynika, do czego mięczaki czy ich muszle mogły być wykorzystywane, a wnioskowanie oparte jest na analogiach do podobnych znalezisk z tego samego okresu. Ponadto muszle

występujące w warstwach stanowiska archeologicznego zlokalizowanego w pobliżu cieków wodnych mogą być również naturalnymi pozostałościami, np. dowodem na okresowe wylewy rzek czy zawleczone przez żywiące się mięczakami zwierzęta (np. ptactwo).

W przypadku odkrywanych na terenie dzisiejszych miast muszli nowożytnych ostrzeg dużym ułatwieniem jest dostępność źródeł pisanych zawierających informacje o przeszłości miejsca, w którym odkryto te pozostałości, a znaleziska archeologiczne potwierdzają często fakty opisane w zachowanych dokumentach (Kurzawska i Rutkowska 2013).

### NATURALNE NAGROMADZENIA MUSZLI MIĘCZAKÓW

Identyfikacja pozostałości muszli mięczaków ze stanowisk archeologicznych zawsze pociąga za sobą informacje o pochodzeniu danego gatunku, o środowisku naturalnym i klimacie, w których mięczaki żyją i żyły w przeszłości, a obok nich człowiek. Dlatego wszelkie nagromadzenia muszli mięczaków w wypełniskach różnego rodzaju obiektów (jamach, grobach), w warstwach stanowisk archeologicznych czy odkrywane w bezpośrednim sąsiedztwie miejsc bytowania ludzi stanowią cenne źródło informacji w badaniach zmian środowiska naturalnego i klimatu w przeszłości (np. Davies 2008; Classen 1998; Alexandrowicz 1987; Alexandrowicz i Alexandrowicz 2011).



**Ryc. 8.** Pozostałości muszli mięczaków słodkowodnych z jednej z prób z rdzenia osadów biogenicznych, Lubrza, stan. 10, rdzeń LB 13. Fot. A. Kurzawska

Badanie naturalnych akumulacji muszli to przede wszystkim analizy środowiskowe osadów znajdujących się w pobliżu stanowisk archeologicznych. Są to badania prowadzone wspólnie ze specjalistami zajmującymi się analizami: palinologiczną, makroskopowych szczątków roślin, wioślarek, szczątków owadów i ryb itp. Często są to rdzenie osadów biogenicznych z nieistniejących już zbiorników wodnych, w których bardzo dobrze zachowują się pozostałości prądziejowej fauny i flory, na podstawie której możemy wnioskować o przeszłym środowisku naturalnym wokół stanowiska archeologicznego i wpływie człowieka na nie (ryc. 8).

Podobne badania obejmują naturalne akumulacje mięczaków w warstwach stanowiska. Są to przede wszystkim muszle ślimaków lądowych, które przypadkowo znalazły się w wypełniskach obiektów archeologicznych, zawleczone z powierzchni przez zwierzęta (np. gryzonie) i rozrastające się korzenie roślin. Drobne puste muszle

ślimaków lądowych często wpadają w różne szczeliny i zagłębienia, a takich na stanowiskach nie brakuje (Davies 2008). Analizy malakologiczne tego typu pozostałości są prowadzone (Szymanek 2020; Kurzawska 2015; 2019a; 2019b) jednak zawsze do takich znalezisk podchodzimy z dużą ostrożnością, ponieważ nie znając wieku samej muszli (muszle ślimaków lądowych można datować, por. Douka 2017), nie mamy pewności, czy w ogóle związane są z obiektami, czy warstwami kulturowymi, w których je odkryto. Znalezienie współczesnych skorupek mięczaków w warstwach stanowiska czy w wypełniskach obiektów informuje nas przede wszystkim o zaburzeniach stratygraficznych. Muszle ślimaków lądowych wykorzystywane są w badaniach procesów formowania stanowisk archeologicznych (depozycyjnych i postdepozycyjnych) i obiektów, mogą wskazać ich różnoczasowość, zakłócenia i przemieszanie (Davies 2008).





**Ryc. 9.** Paciorki dyskowe z muszli małży słodkowodnych odkrytych w grobie 6, Krusza Zamkowa, stan. 3: a – pojedynczy paciorek; b – rząd paciorków. Fot. M. Jórdeczka

Analizy naturalnych akumulacji muszli mięczaków lądowych i słodkowodnych, co do których jesteśmy pewni, że stanowią pozostałości równoczesne z osadnictwem badanego stanowiska archeologicznego, mogą wskazywać na:

- okresowe wylewy rzek/jezior i podtopienia części stanowiska i zmiany w czasie w tym zakresie (Kurzawska i Kara 2015);
- charakter rowu/fosy otaczającej stanowisko (jej głębokość, obecność w niej wody – permanentna lub okresowa) (Kurzawska 2020);
- występowanie gatunków mięczaków charakterystycznych dla dawnego środowiska zmienionego znacznie przez człowieka, np. lasu, łąki, jeziora, rzeki;
- przeniesienie części ziemi z innego terenu do konstrukcji np. wałów (Kurzawska 2013b);
- odlesienie danego obszaru, zanieczyszczenie środowiska, intensywne rolnictwo (Davies 2008).

### POBÓR PRÓB I PRACE LABORATORYJNE

Analiza malakologiczna tego typu pozostałości, począwszy od pobierania próbek przez preparatykę, po identyfikację w warunkach laboratoryjnych, jest tożsama z analizą malakologiczną osadów czwartorzędowych szczegółowo opisaną

przez S.W. Alexandrowicza i P.W. Alexandrowicza (2011). Polega ona na pobraniu rdzeni osadów (por. Kołaczek i in., w tym tomie; Rzodkiewicz, w tym tomie; Apolinarzka, w tym tomie), kolumny próbek czy pojedynczych próbek ziemi do dalszych badań, gdyż rozmiary muszli większości mięczaków występujących naturalnie często nie przekraczają 1 cm (ryc. 8). Próby ziemi w warunkach laboratoryjnych są dzielone (z rdzeni), ważone (pojedyncze próby) i poddawane dalszej obróbce, takiej jak: suszenie, moczenie z dodatkiem odczynników chemicznych, flotacja na specjalistycznych sitach, w celu odseparowania nieraz bardzo drobnych muszli i ich fragmentów od pozostałych szczątków obecnych w ziemi. Tego typu analiza materiału jest czasochłonna i pracochłonna. Ma na to wpływ liczba próbek, które w przypadku rdzeni, często kilkumetrowej długości, badamy w rozdzielczości co 1-2 cm, co łącznie daje kilkadziesiąt, czasami nawet kilkaset próbek. Szczątki mięczaków są w nich bardzo drobne i licznie występują nieoznaczalne fragmenty muszli. Pozostałości zawsze analizowane są przy użyciu mikroskopu stereoskopowego, a sama identyfikacja taksonów przysparza dodatkowych problemów (np. bardzo trudne w identyfikacji są drobne muszle małży z rodzaju *Pisidium*). Niezbędna w przypadku tego typu badań jest bogata kolekcja porównawcza poprawnie oznaczonych taksonów zarówno współczesnych, jak i okazów zachowanych z wcześniejszych próbek. Należy pamiętać, że subfossylne mięczaki





**Ryc. 10.** a – zawieszka z muszli *Glycymeris* sp., Janki, stan. 11, grób 1/98 (Muzeum w Hrubieszowie, MH/A/2779); b – paciorki z muszli *Lithoglyphus naticoides*, Strzyżów, stan. 26, grób 2. Fot. M. Pankiewicz (a), P. Rutkowska (b)

będą się różniły od współcześnie zebranych muszli, gdyż są pozbawione kolorów, czasami nawet struktur lub reprezentują np. jedynie młode osobniki. Stąd trudność w ich identyfikacji. Metody liczenia okazów i interpretacji środowiskowej oraz prezentacji graficznej wyników opisano szczegółowo w pracy Alexandrowicz i Alexandrowicz (2011). Najlepsze wyniki interpretacji warunków środowiskowych i klimatu na podstawie analizy malakologicznej uzyskujemy w powiązaniu z innymi badaniami specjalistycznymi oraz datowaniem (innych szczątków z prób np. metodą  $C^{14}$ ) (Sobkowiak-Tabaka i in. 2018; Sobkowiak-Tabaka i in. 2021; Allen 2017; Davies 2008; Alexandrowicz 1991; Kurzawska i Kara 2015).

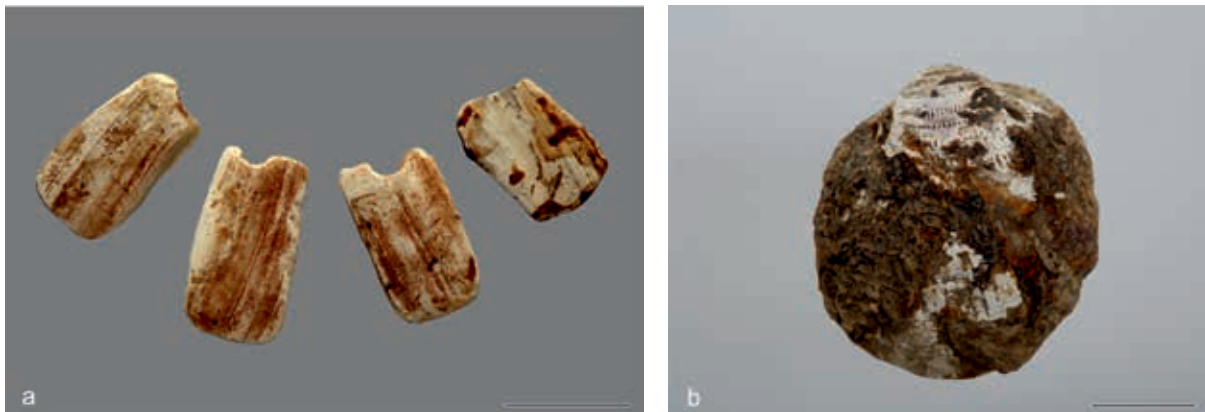
## PRZYKŁADY Z BADAŃ

### Ozdoby z muszli

Najstarsze ozdoby z muszli odkryte na terenie Polski pochodzą ze stanowisk związanych z górnym paleolitem, z Jaskini Obłazowej (Valde-Nowak 2015), Jaskini Maszyckiej (Jakubowski 1993), Jaksic II (Wilczyński i in. 2015) oraz ze stanowiska Kraków-Spadzista (Kurzawska, w druku). Jednak dopiero w neolicie i we wczesnej epoce brązu muszle są wyjątkowo często wykorzystywane do wyrobu ozdób. Wraz z kulturą ceramiki wstęgowej rytej (ok. 5500-5000 p.n.e.) pojawiają się, choć sporadycznie, pierwsze ozdoby (paciorki, zawieszki i medaliony) ze śródziemnomorskiej muszli *Spondylus* (Kurzawska i Sobkowiak-Tabaka 2020). W drugiej

połowie 5 tysiąclecia p.n.e. (ok. 4350 p.n.e.) zaczęto wytwarzać ozdoby z lokalnych muszli małży słodkowodnych (Apolinarska i Kurzawska 2020). Ozdoby te składające się głównie z paciorków dyskowatych odkryto w bardzo dużych ilościach w pochówkach kobiet kultury brzesko-kujawskiej (Czerniak i Pyzel 2013; 2019) (ryc. 1, 9). Pochówki kultury lubelsko-wołyńskiej i złockiej z południa Polski z podobnego czasu również zawierały ozdoby z muszli pozyskiwanych lokalnie, mięczaków słodkowodnych oraz muszli kopalnych z wychodni mioceńskich (okolice Sandomierza) (Kurzawska i in. 2020). Od pierwszej połowy III tysiąclecia p.n.e. ponownie muszle mięczaków wykorzystywane były do produkcji ozdób przez ludność związaną z kulturą ceramiki sznurowej w Polsce (Włodarczak 2006). Ostatnimi społecznościami, które ozdabiały swoich zmarłych paciorkami z lokalnych muszli słodkowodnych i kopalnych, były społeczności związane z kulturą strzyżowską i mierzanowicką z terenu południowej i południowo-wschodniej Polski (Kurzawska i in. 2020).

Wśród ozdób tego czasu najczęściej występującymi są rzędy dyskowatych paciorków wykonanych z muszli małży słodkowodnych z rodziny Unionidae. Paciorki dyskowate wielkości od 5 mm do 16 mm tworzyły takie ozdoby, jak pasy biodrowe (najbardziej znane ozdoby tzw. książniczek z Kruszy Zamkowej) (Apolinarska i Kurzawska 2020), naszyjniki, bransolety (znaleziska z Brześcia Kujawskiego, Osłonek, Stryjowa, Krzyżanowic Dolnych, Kichar Nowych) (Jażdżewski 1938; Grygiel 2008; Budziszewski i in. 2016; Kurzawska i Kowalewska-Marszałek 2010). Popularną ozdobą



**Ryc. 11.** Rezydwa na ozdobach z muszli: a – ślady czerwonego „barwnika” na zawieszkiach z grobu 7, Nielelew, stan. 1 (1515/A/ML, Muzeum Lubelskie w Lublinie); b – ślady zmineralizowanych materiałów organicznych – pozostałości owadów na zawieszce z muszli *Glycymeris* z grobu nr 43, Kichary Nowe – cmentarzysko. Fot. M. Jórdeczka, skala 1 cm (Kurzawska i Kowalewska-Marszałek 2010)



**Ryc. 12.** Paciorki z muszli *Monetaria annulus* ze skarbu ozdób z Podbieli (pow. otwocki). Fot. P. Silska (Kurzawska 2013a)

tego okresu jest również muszla *Glycymeris* sp. pochodząca z Morza Śródziemnego pozyskana zapewne na drodze wymiany i handlu lub jej lokalny odpowiednik z mioceńskich złóż południowej Polski *Glycymeris pilosa deshayesi* (Kurzawska i in. 2020) (ryc. 10a, 11b). Sporadycznie zdarzają się również muszle słodkowodne (ryc. 10b) czy kopalne, z których wykonano paciorki, gatunków pochodzących spoza terenu Polski, co czyni je bardzo ciekawym materiałem do badań na równi ze *Spondylusem*. Dzięki takim znaleziskom możemy poszukiwać

kontaktów społeczności zamieszkujących w przeszłości tereny dzisiejszej Polski z obszarami oddalonymi setki, a nawet tysiące kilometrów.

Badania ozdób prowadzone za pomocą mikroskopu optycznego – stereoskopowego oraz skaninowego mikroskopu elektronowego (SEM) pozwalają na odkrywanie i dokumentowanie tego, co makroskopowo pozostaje niewidoczne. Są to zarówno mikroślady powstałe na skutek modyfikacji muszli oraz w rezultacie ich używania przez człowieka, dzięki którym jesteśmy w stanie określić, w jaki sposób ozdoby były wytworzone i później noszone. Do takich mikropozostałości zaliczamy również wszelkie rezydwa jak ślady w postaci czerwonego proszku (pigmentu/barwnika?) odkryte, np. na ozdobach ze stanowiska Kraków-Spadzista (Kurzawska, w druku), Strzyżów stan. 26 (Kurzawska i Sobkowiak-Tabaka, w druku), Nielelew (Kurzawska, niepublikowana analiza) (ryc. 11a) czy zmineralizowanych na powierzchni muszli pozostałości owadów, np. na ozdobie z muszli *Glycymeris* w jednym z pochówków w Kicharach Nowych (Kurzawska i Kowalewska-Marszałek 2010) (ryc. 3d, 11b).

Muszle pochodzące z tropikalnych mórz trafiały na tereny Polski niezwykle rzadko, jako pojedyncze zabytki – zawieszki/paciorki. Wśród tych sporadycznych znalezisk najczęściej odkrywano były muszle porcelanek tzw. monetek – dwóch gatunków *Monetaria moneta* i *Monetaria annulus*. Ich muszle znajdowane są na ogromnym obszarze wykraczającym poza zasięg ich naturalnego występowania. Odgrywały one rolę środka płatniczego w Chinach w XVI w. p.n.e. oraz w niektórych częściach Afryki



**Ryc. 13.** Muszle małży słodkowodnych w jamie 53, Kiekrz, stan. 35. Fot. M. Andrałojć

od XI w., stąd ich ogromna popularność i szerokie rozprzestrzenienie (Schilder 1952). Porcelanki obu gatunków pojawiły się na obszarze Europy zapewne za pośrednictwem Bliskiego Wschodu. Muszle pozyskiwano wzdłuż wybrzeży całego Indopacyfiku, prawdopodobnie ze wschodnich wybrzeży Morza Czerwonego, Zatoki Adeńskiej, Zatoki Perskiej, wybrzeży Afryki Wschodniej oraz zachodnich wybrzeży Indii. Pod koniec epoki brązu i na początku epoki żelaza *M. annulus* i *M. moneta* były najbardziej licznymi gatunkami porcelanek znajdowanymi na stanowiskach archeologicznych w Europie i na Bliskim Wschodzie (Kovács 2008), stanowiąc przede wszystkim surowiec do produkcji ozdób (Reese 1991). Największy jak dotąd zbiór ozdób z *Monetaria annulus* – porcelanek pochodzących z Indopacyfiku (aż 146 muszli i ich fragmentów) – odkryto na terenie Polski w „skarbie ozdób z Podbieli” (ryc. 12) datowanym na okres halsztacki (Kurzawska 2013a; Narożna-Szamałek 2013).

#### Muszle mięczaków ze śmietnisk muszlowych

Dotychczas niewiele materiałów pochodzących ze śmietnisk muszlowych z terenu Polski zostało opublikowanych jako szczegółowe analizy



**Ryc. 14.** Połówka muszli *Ostrea edulis* z widocznym uszkodzeniem – dziurką, Gdańsk (ul. Toruńska), skala 3 cm (Kurzawska i Rutkowska 2013b). Fot. A. Kurzawska

archeomalakologiczne. Znane są one ze stanowisk od okresu neolitu po epokę żelaza, jednak rzadko były szczegółowo badane i dlatego nadal niewiele wiadomo na temat pozyskiwania i eksploatacji małży przez społeczności pradziejowe. Szczęśliwie pozostałości mięczaków odkrywane





**Ryc. 15.** Muszla *Chondrula tridens* odkryta w jednym z pochówków na stan. 15 w Rogalinie (Kurzańska 2015), skala 1 mm. Fot. A. Kurzańska

na stanowiskach archeologicznych są coraz częściej zbierane w trakcie eksploracji i coraz częściej próby trafiają do specjalistycznych analiz (Bogucki i in. 2007; Wójcik i Szmoniewski 2016; Kurzańska 2012). Najczęściej na stanowiskach pradziejowych mamy do czynienia z obiektami, w których odkryto duże skupiska muszli małży. Przykładem takiego „śmietnika” jest obiekt odkryty w trakcie badań ratowniczych prowadzonych w Kiekrzu na stan. 35 (ryc. 13). Dzięki bardzo dokładnym badaniom i analizom laboratoryjnym możliwe było wnioskowanie o funkcji obiektu, jego chronologii, charakterze depozytu muszli, sezonie zbioru małży i warunków środowiska naturalnego w czasie istnienia na tym terenie osadnictwa z epoki brązu. Badania obejmowały wieloaspektowe analizy znalezisk archeologicznych: ceramiki, kości zwierzęcych, muszli mięczaków, pozostałości węgla drzewnych. Ponadto zbadany został skład izotopowy muszli ( $\delta^{13}\text{C}$  i  $\delta^{18}\text{O}$ ) oraz datowano metodą  $\text{C}^{14}$  fragmenty węgla drzewnych. Wyniki badań wskazały, że mięczaki należące do trzech gatunków z rodzaju *Unio* były celowo zbierane w celu konsumpcji (1500 r. p.n.e.). Zebrano je prawdopodobnie późnym latem z pobliskiego Jeziora Kierskiego. Mięczaki gotowane były prawdopodobnie na parze nad paleniskiem zagłębionym w ziemi, czego pozostałości stanowi odkryty obiekt. Jako opał wykorzystano drewno sosnowe i dębowe pozyskane z najbliższego otoczenia. Po posiłku prawdopodobnie składowano

muszle do dalszego wykorzystania (Kurzańska i in. 2021).

Przykładem konsumpcji mięczaków z epoki nowożytnej są znaleziska ostryg z gatunku *Ostrea edulis* (ostryga europejska/ostryga jadalna) znajdowane w warstwach stanowisk archeologicznych terenu Polski, przeważnie miast, datowanych od XV do XIX w (najwięcej między XVII a XIX w.) (Kurzańska i Rutkowska 2013). Muszle wyrzucone były w bezpośrednim sąsiedztwie siedzib. Sporo znalezisk pochodzi z wypełnisk latryn lub ze starych zasypanych studni, z warstw zalegających w piwnicach i na dziedzińcach kamienic, w fosach, obok budynków lub na placach. Ostrygi są zazwyczaj lekko zniszczone, często połamane na krawędziach i mają ślady użycia ostrego narzędzia wewnątrz, co tylko może świadczyć o ich konsumpcji. Wśród połówek muszli ostryg odkrytych w Gdańsku (ul. Toruńska) na jednej widoczna jest bardzo charakterystyczna prostokątna dziurka (ryc. 14) – dowód zbioru ostryg specjalnymi narzędziami w miejscu, gdzie były hodowane (Dupont 2010). W krajach Europy Zachodniej, skąd je do Polski sprowadzano, a hodowano od czasów rzymskich, były ważnym składnikiem pożywienia, u nas jedynie luksusowym dodatkiem w jadłospisie sprowadzanym jako delikates z zagranicy. Najpierw zapewne na stół królewski Wazów, później na dwory magnatów. Potwierdzają to znaleziska archeologiczne. Muszle ostryg odkryto w trakcie prowadzonych prac wykopaliskowych w siedzibach dworu królewskiego (np. Warszawa – Pałac Saski), duchowieństwa katedralnego (Ostrów Tumski w Poznaniu), magnaterii, szlachty i zamożnego mieszczaństwa (np. zamki w Gołańczy, Opalenicy i Grudziądzu, kamienice na Rynku w Poznaniu) (Kurzańska i Rutkowska 2013).

### Naturalne nagromadzenia muszli mięczaków

Zdarza się całkiem często, że muszle mięczaków żyjących współcześnie w rejonie stanowisk archeologicznych przypadkowo trafiają do obiektów archeologicznych. A dzieje się tak zapewne z powodu ich małych rozmiarów oraz wybieranych siedlisk – mięczaki często żyją w ściółce, chronią się wśród roślinności, w różnego typu szczelinach, pod kawałkami drewna, kamieniami. Choć znajdowane są w obiektach, warstwach kulturowych, nie mają



**Ryc. 16.** Muszle *Calaxis hierosolymarum* z wypełniska grobów odkrytych w Tel Jezreel (Izrael): a – jaja ślimaków oraz muszle młodocianych osobników; b – muszle dojrzałych osobników, skala 1 mm. Fot. A. Kurzawska

z nimi nic wspólnego. Nie zostały celowo zdeponowane przez człowieka, ani nie pochodzą z tego samego czasu co badany obiekt/warstwa. Przykładem tego typu znaleziska mogą być muszle odkryte na stan. nr 15 w Rogalinie, gdzie w jednym z grobów odkryto dwie muszelki ślimaka lądowego z gatunku *Chondrula tridens* (Müller 1774) – wałkówka trójzębna (ryc. 15). Odkryte muszle tego gatunku wyglądają na świeże (dobrze zachowana muszla, widoczny kolor). Nie jest to mięczak jadalny, a krucha muszla wielkości ok. 1 cm z pewnością nie stanowiła potencjalnego surowca do wyrobu np. ozdób. Sam ślimak tego gatunku, preferujący nasłonecznione, otwarte biotopy (w takim środowisku zlokalizowane jest obecnie stanowisko archeologiczne), chowa się najczęściej wśród korzeni roślin, pod kamieniami i w spękaniach ziemi (Wiktor 2004: 132). Muszle ślimaków z pewnością w grobie znalazły się przypadkowo i nie są z odkrytym pochówkiem związane (Kurzawska 2015).

Bardzo ciekawym przykładem naturalnego nagromadzenia muszli ślimaków lądowych w kontekstach archeologicznych są znaleziska z grobów z terenu Bliskiego Wschodu. Odkrywając pochówki szkieletowe, można natknąć się tam na znaczne ilości muszli bardzo drobnych (1-5 mm) ślimaków lądowych gatunku *Cecilioides acicula* czy *Calaxis hierosolymarum* (osobników dorosłych, młodych, a nawet ich jaj) (ryc. 16a i b). Są to ślimaki należące do rodziny Ferussaciidae i żyjące pod ziemią,

a w masowych ilościach występują w grobach, ponieważ żywią się grzybami saprofitycznymi, które występują często na szczątkach kostnych (Bar-Yosef i Heller 1987; Mienis 1992; Mienis i Hadas 2005). Pochówki są dla nich naturalnym środowiskiem życia. Ponieważ są tak drobne, tylko w przypadku pobrania próbek ziemi jesteśmy w stanie w trakcie analizy laboratoryjnej potwierdzić ich obecność. Dotychczas w badanych materiałach te drobne o cienkościennej i przezroczystej muszelce ślimaki pojawiły się w próbach pobranych z wypełnisk grobów ze stanowisk Tel Arbid (Syria) i Tel Jezreel (Izrael) (Kurzawska, niepublikowane analizy).

W pradziejach ludzie bardzo często zakładali swoje osady w pobliżu źródeł wody, w okresie wczesnego średniowiecza na terenach zazwyczaj podmokłych, lekko wyniesionych i trudno dostępnych. Zaletą takiej lokalizacji było zapewnienie mieszkańcom osad bezpieczeństwa, a takie położenie stwarzało naturalnie obronne warunki, utrudniając dostęp osobom z zewnątrz. W przypadku sezonowych powodzi ludzie w różny sposób próbowali poradzić sobie ze zmieniającymi się warunkami środowiska w miejscu zamieszkania. Analizy malakologiczne wykonane dla prób z grodziska w Pszczewie (stan. nr 2), położonego nad Jeziorem Pszczewskim (Kurzawska i Kara 2015) są kolejnym przykładem badań naturalnych akumulacji mięczaków w warstwach stanowiska archeologicznego, które pokazały

zmiany warunków hydrologicznych na przestrzeni czasu. Sekwencję prób do analiz pobrano z profilu wschodniej części ściany północnej wykopu nr I/2010. W próbach zidentyfikowano 40 taksonów należących do mięczaków lądowych i słodkowodnych. Zidentyfikowane muszle mięczaków słodkowodnych w próbach z najstarszych warstw wskazują, że strefa litoralna Jeziora Pszczewskiego była płytką i zarośniętą. Najprawdopodobniej regularne wylewy spowodowane sezonowymi opadami i topnieniem śniegu przyczyniły się do powstania mokradeł, przynajmniej w części półwyspu. Pod koniec VIII do pierwszej połowy X w. obszar ten był zdecydowanie podmokły. Okresowo woda mogła pozostawać w okolicy przez dłuższy czas, tworząc z półwyspu wyspę, na której sytuowane było grodzisko. Niewykluczone, że z tego powodu wybudowano konstrukcje drewniane odkryte w wykopie I/2010, mające na celu zapobieganie powodziom lub stabilizację i wyrównanie gruntu po sezonowych powodziach. Wraz z drewnem wykorzystanym do konstrukcji przyniesiono zapewne małego ślimaka z gatunku *Discus rudatus*, zamieszkującego lasy (obecnie w środowiskach zbliżonych do lasów pierwotnych), który chroni się pod korą, w podłożu pod kawałkami drewna oraz w ściółce (Wiktor 2004). Od drugiej połowy X w. teren stopniowo wysychał. Wskazuje na to stopniowy zanik gatunków słodkowodnych na rzecz charakterystycznych dla siedlisk wilgotnych ślimaków lądowych, które często występują na brzegach różnych zbiorników wodnych.

## PODSUMOWANIE

Archeomalakologia to dziedzina, która wspiera badania archeologiczne poprzez szczegółowe analizy specjalistyczne zabytków wykonanych z muszli, badania szczątków po mięczakach wykorzystywanych jako pożywienie czy naturalne źródło węgla wapnia oraz w analizach przeszłego środowiska naturalnego i klimatu. Współczesna archeomalakologia łączy w sobie również wiele innych badań wykraczających poza standardowe analizy malakologiczne. Zastosowanie nowoczesnych mikroskopów optycznych, cyfrowych i – w dalszej kolejności – skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) z detektorem EDS (ang. *energy dispersive spectroscopy*) w trakcie analiz pozwala na sprawną

identyfikację i dokumentację już nie tylko samych muszli mięczaków, ale mikrośladów i mikropozostałości często niewidocznych w ocenie makroskopowej. Szczegółowe analizy materiałów, jakkolwiek pracochłonne i czasochłonne, każdorazowo dostarczają nowych informacji o badanych zabytkach, próbach i pozwalają na weryfikację materiału oraz przygotowanie prób do dalszych analiz specjalistycznych, izotopowych czy fizykochemicznych. Rezultaty tych kompleksowych badań dostarczają wielu istotnych informacji dotyczących życia człowieka w przeszłości, jego wpływu na środowisko naturalne, wykorzystywaniu naturalnych zasobów w gospodarce (wykorzystanie mięczaków jako pożywienia i muszli jako naturalnego źródła węgla wapnia), życiu społecznym (w komunikacji czy w kontaktach i relacjach między poszczególnymi społecznościami) i zwyczajach czy wierzeniach.

## PODZIĘKOWANIA

Badania i analizy przedstawione w opracowaniu nigdy by nie powstały bez wielu wspaniałych archeologów, dla których ważny był każdy szczegół z odkrywanej na stanowiskach przeszłości człowieka, w tym każda odnajdywana muszelka. Dziękuję im za zaufanie i powierzenie mi wielu ciekawych materiałów do analiz.

Opisane badania ozdób z muszli ze stanowisk archeologicznych terenu Polski z okresu neolitu i wczesnej epoki brązu zostały przeprowadzone w wyniku realizacji projektu badawczego UMO-2015/19/D/HS3/01594 finansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki.

## LITERATURA

- Allen, M.J., Payne, B. 2017 (w:) M.J. Allen (red.), *Molluscs in Archaeology. Methods, approaches and applications*. Studying Scientific Archaeology 3. Oxford-Philadelphia, 1–4.
- Alexandrowicz, S.W. 1987. Analiza malakologiczna w badaniach osadów czwartorzędowych. *Kwartalnik AGH, Geologia* 12(1-2): 3–240.
- Alexandrowicz, S.W. 1991. The malacofauna of the Holocene lacustrine sediments of Dąbki near Darłowo. *Przegląd Archeologiczny* 38: 19–24.
- Alexandrowicz, S.W., Alexandrowicz, P.W. 2011. *Analiza Malakologiczna. Metody badań i interpretacji*. Polska



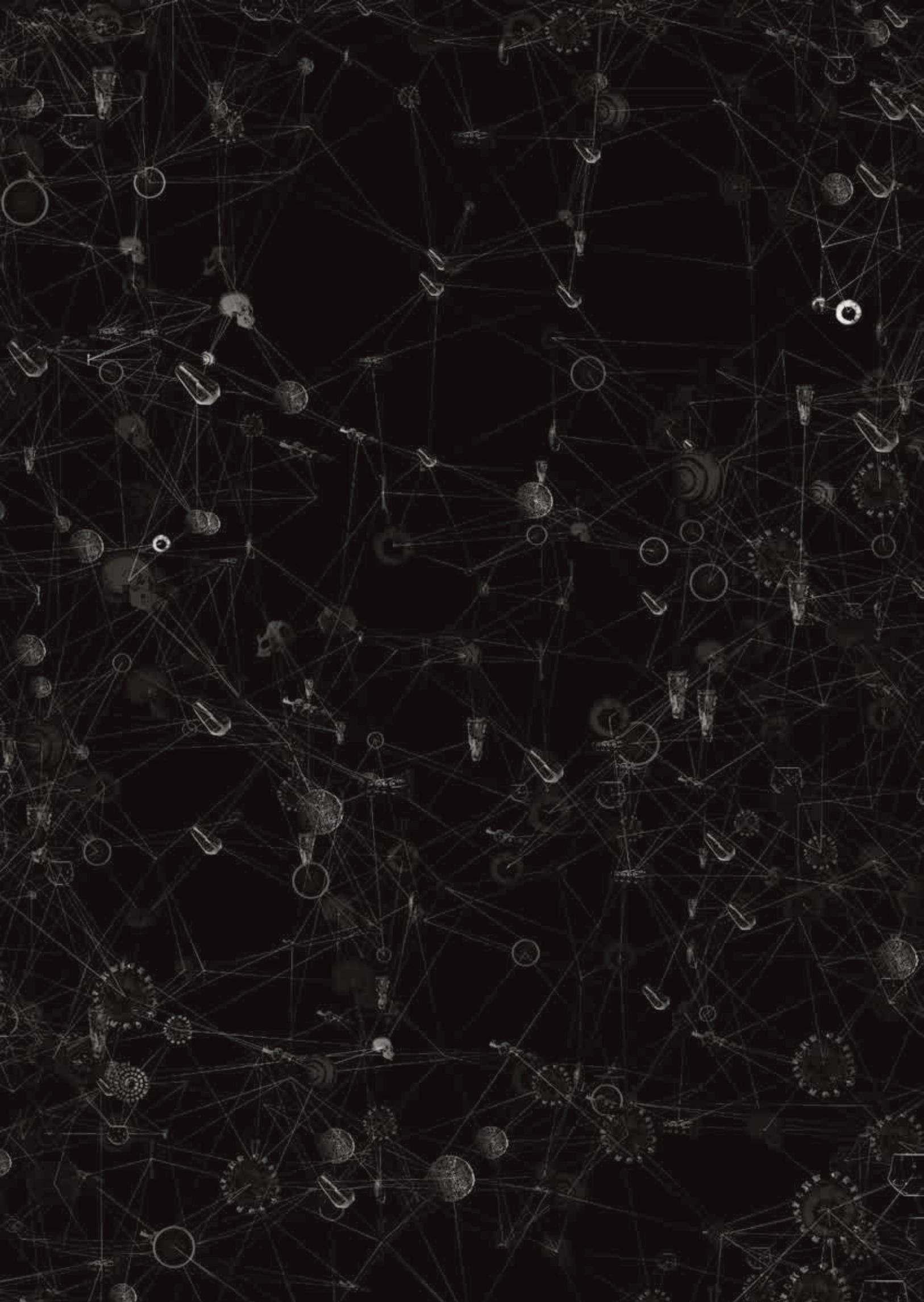
- Akademia Umiejętności, Rozprawy Wydziału Przyrodniczego Tom 3. Kraków.
- Andersen, S.H. 2000. 'Køkkenmøddinger' (shell middens) in Denmark: a survey. *Proceedings of the Prehistoric Society* 66: 361–384.
- Andrus, C.F.T. 2011. Shell Midden Sclerochronology. *Quaternary Science Reviews* 30: 2892–2905.
- Apolinarska, K., Kurawska, A. 2020. Can Stable Isotopes of Carbon and Oxygen be Used to Determine the Origin of Freshwater Shells Used in Neolithic Ornaments from Central Europe? *Archaeological and Anthropological Sciences* 12(1): 1–16. doi: 10.1007/s12520-019-00978-2
- Bailey, G.N., Milner, N. 2008. Molluscan archives from European Prehistory, (w:) A.M. Antczak, R. Cipriani (red.), *Early Human Impact on Megamolluscs*, BAR International Series 1865. Oxford, 111–134.
- Balme, J., O'Connor, S., Langley, M. 2018. Marine shell ornaments in northwestern Australian archaeological sites: different meanings over time and space, (w:) M. Langley, M. Litster, D. Wright, S. May (red.), *The Archaeology of Portable Art: Southeast Asian, Pacific and Australian Perspectives* (1 ed.). London, 258–273.
- Bar-Yosef Mayer, D.E. (red.), 2005. *Archaeomalacology. Molluscs in Former Environments of Human Behaviour*. Oxford.
- Bar-Yosef Mayer, D.E. 2007. Archaeomalacological research in Israel: The current state of research. *Israel Journal of Earth Sciences* 56: 191–206 <https://doi.org/10.1560/IJES.56.2-4.191>
- Bar-Yosef, D.E., Heller, J. 1987. Mollusca from Yiftahel, Lower Galilee, Israel. *Paleorient* 13(1): 131–135.
- Bar-Yosef Mayer, D.E., Bonsall, C., Choyke, A. 2017 (red.), *Not Just for Show: The Archaeology of Beads, Beadwork and Personal Ornaments*. Oxford-Philadelphia.
- Bar-Yosef Mayer, D.E., Groman-Yaroslavski, I., Bar-Yosef, O., HersHKovitz, I., Kampen-Hasday, A., Vandermeersch, B., Zaidner, Y., Weinstein-Evron, M. 2020. On holes and strings: Earliest displays of human adornment in the Middle Palaeolithic. *Plos One* 15(7): e0234924, doi: 10.1371/journal.pone.0234924
- Bogucki, Z., Ożgo, M., Kolmetz, A. 2007. Preliminary analysis of species composition and shell size of freshwater mussels from an archeological site in Nowy Łowicz, Drawsko Pomorskie District (in Polish), (w:) P. Fudziński (red.), *Aktualne problemy kultury łużyckiej na Pomorzu*. Gdańsk.
- Bonnardin, S. 2009. *La parure funéraire au Néolithique ancien dans les Bassins parisiens et rhénans*. Rubané, Hinkelstein et Villeneuve Saint Germain. Société Préhistorique Française, Mémoire XLIX. Paris.
- Borrello, M., Micheli, R. 2011. *Spondylus gaederopus* in prehistoric Italy: jewels from Neolithic and Copper Age Sites, (w:) F. Ifantidis, M. Nikolaidou (red.), *Spondylus in Prehistory. New data and approaches*, BAR Int. Series 2216, Oxford, 25–37.
- Borić, D., Cristiani, E. 2019. Ornamental Traditions in South-eastern Europe. *PaleoAnthropology*, 2019: 208–239. <https://doi.org/10.4207/PA.2019.ART132>
- Bowdler, S. 1983. Sieving seashells: midden analysis in Australian archaeology, (w:) G. E. Connah (red.), *Australian Archaeology: A Guide to Field Techniques*, 5th edn. Canberra, 135–144.
- Bowdler, S. 2006. Mollusks and other shells, (w:) J. Balme, A. Paterson (red.), *Archaeology in Practice A Student Guide to Archaeological Analyses*. Oxford, 316–337.
- Budziszewski, J., Jarosz, P., Libera, J., Szczepanek, A., Włodarczak, P. 2016. Badania wykopaliskowe kurhanów na stanowisku 3 w Białce, pow. krasnostawski, (w:) P. Jarosz, J. Libera, P. Włodarczak (red.), *Schyłek neolitu na Wyżynie Lubelskiej*. Kraków, 359–380.
- Çakırlar, C. (red.), 2011. *Archaeomalacology Revisited: Non-dietary Use of Molluscs in Archaeological Settings*. Oxford.
- Ceci, L. 1984. Shell Midden Deposits as Coastal Resources. *World Archaeology* 16: 62–74.
- Cieśliński, A., Kasprzak, A. 2006. Nowy Łowicz. Badania archeologiczne na Poligonie Drawskim. *Z Otchłani Wieków* 61: 131–138.
- Claassen, C. 1991. Normative thinking and shell-bearing sites. *Archaeological Method and Theory* 3: 249–298.
- Claassen, C. 1998. *Shells*. Cambridge.
- Claassen, C. 2000. Quantifying shell: comments on Mason, Peterson and Tiffany. *American Antiquity* 65: 415–418.
- Cristiani, E., Živaljević, I., Borić, D. 2014. Residue analysis and ornament suspension techniques in prehistory: Cyprinid pharyngeal teeth beads from Late Mesolithic burials at Vlasac (Serbia). *Journal of Archaeological Science* 46: 292–310.
- Czerniak, L., Pyzel, J. 2013. Unusual funerary practices in the Brześć Kujawski culture in the Polish Lowland, (w:) N. Müller-Scheeßel (red.), *'Irreguläre' Bestattungen in der Urgeschichte: Norm, Ritual, Strafe...?* Bonn, 139–150.
- Czerniak, L., Pyzel, J. 2019. The Brześć Kujawski culture. The north-easternmost Early Chalcolithic communities in Europe, (w:) R. Gleser, D. Hofmann (red.), *Contacts, Boundaries & Innovation. Exploring developed Neolithic societies in central Europe and beyond*, Leiden, 59–90.
- Dance, S.P. 1966. *Shell collecting. An Illustrated History*. Berkeley-Los Angeles.
- Davies, P. 2008. *Snails: archaeology and landscape change*. Oxford.
- d'Errico, F., Vanhaeren, M., Barton, N., Bouzouggar, A., Mienis H.K., Richter, D., Hublin, J.-J., McPherron, S.P., Lozouet, P. 2009. Additional evidence on the use of personal ornaments in the Middle Paleolithic of North Africa. *PNAS* 106: 16051–16056 <https://doi.org/10.1073/pnas.0903532106>
- Dimitrijević, V. 2014. The provenance and use of fossil scaphopod shells at the Late Neolithic/Eneolithic site

- Vinča-Belo Brdo, Serbia, (w:) K. Szabó, C. Dupont, V. Dimitrijević, L.G. Gastelum, N. Serrand (red.), *Archaeomalacology: shells in the archaeological record*. BAR International Series, 2666. Oxford, 33–41.
- Douka, K. 2017. Radiocarbon dating of marine and terrestrial shell, (w:) M.J. Allen (red.), *Molluscs in Archaeology. Methods, approaches and applications*. Studying Scientific Archaeology 3. Oxford-Philadelphia, 381–399.
- Dzięczkowski, A. 1974. Subfossylne szczątki mięczaków (Mollusca) i roślin ze stanowiska 1 w Otałężce, pow. Grójec. *Archeologia Polski* 19(2): 379–386.
- Dzięczkowski, A. 1993. Wyniki analizy ilościowej próbek organicznych z wypełniska fosy przy zamku w Sandomierzu z badań w 1973 roku, (w:) S. Tabaczyński (red.), *Sandomierz, badania 1969–1973*. Tom II. Warszawa, 320–323.
- Dzięczkowski, A. 1998. Badania malakologiczne w archeologii, (w:) W. Śmigieński (red.), *Nauki przyrodnicze i fotografia lotnicza w archeologii*. Poznań, 97–110.
- Dupont, C. 2010. A large-scale exploitation of oysters during the Middle Ages at Beauvoir-sur-Mer (France), (w:) E. Alvarez-Fernandez, D.R. Carvajal-Contreras (red.), *Not Only Food. Marine, Terrestrial and Freshwater Molluscs in Archaeological Sites*. Proceedings of the 2nd Meeting of the ICAZ Archaeomalacology Working Group (Santander, February 19–22 2008). *Munibe Suplemento-Gehigarria* 31, 188–198.
- Fernandes, R., Dreves, A. 2017. Bivalves and radiocarbon, (w:) M.J. Allen (red.), *Molluscs in Archaeology. Methods, approaches and applications*. Studying Scientific Archaeology 3. Oxford-Philadelphia, 364–380.
- Friedberg, W. 1934. Coquilles des mollusques dans un tombeau néolithique à Złota près de Sandomierz (Pologne). *Journal de Conchyliologie* 78(2): 91–97.
- Glassow, M.A. 2000. Weighing vs. counting shellfish remains: a comment on Mason, Peterson and Tiffany. *American Antiquity* 65: 407–414.
- Grygiel, R. 2008. *Neolit i początki epoki brązu w rejonie Brześcia Kujawskiego i Osłonek*. Vol 2. Łódź.
- Hardy, K. 2017. Shell middens, (w:) M.J. Allen (red.), *Molluscs in Archaeology. Methods, approaches and applications*. Studying Scientific Archaeology 3. Oxford-Philadelphia, 259–272.
- Ifantidis, F., Nikolaidou, M. 2011, (red.) *Spondylus in Prehistory. New data and approaches. Contributions to archaeology of shell technologies*, BAR International Series, 2216. Oxford.
- Jakubowski, G. 1993. Maszycka cave a Magdalenian site in Southern Poland, (w:) S. K. Kozłowski, E. Sachse-Kozłowska, A. Marshack, T. Madeyska, H. Kierdorf, A. Lasota-Moskalewska, G. Jakubowski, M. Winiarska-Kabacińska, Z. Kapica, A. Wierciński (red.), *Jahrbuch des Römisch-Germanischen Zentralmuseums Mainz*. Vol. 40. Mainz: Römisch-Germanischen Zentralmuseums, 240.
- Jażdżewski, K. 1938. Cmentarzyska kultury wstęgowej i związane z nimi ślady osadnictwa w Brześciu Kujawskim. *Wiadomości Archeologiczne* 15: 1–105.
- John, J. 2011. Status of *Spondylus* artifacts within the LBK grave goods, (w:) F. Ifantidis i M. Nikolaidou (red.), *Spondylus in Prehistory. New data and approaches. Contributions to archaeology of shell technologies*, BAR International Series, 2216. Oxford, 39–45.
- Kos, K., Posilović, H., Durman, A., Ristić, M., Krehula, S. 2015. White Encrustation Produced from Deer Antler Phosphate on Prehistoric Ceramics from Podunavlje. *Archaeometry* 57(4): 636–652.
- Kovács, L. 2008. *Vulvae, eyes, snake heads: archaeological finds of cowrie amulets*. British Archaeological Reports BAR International Series. Michigan.
- Kuhn, S.L., Sitner, M.C. 2007. Paleolithic Ornaments: Implications for Cognition, Demography and Identity. *Diogenes* 54(2): 40–48, <https://doi.org/10.1177/0392192107076870>
- Kurzawska, A. 2012. Analiza malakologiczna, (w:) I. Sobkowiak-Tabaka (red.), *Materiały do wczesnych pradziejów Zachodniej Wielkopolski. Osadnictwo pradziejowe, średniowieczne i nowożytnie w Lutolu Mokrym*. Ratownicze Badania Archeologiczne IAE PAN. Tom IV. Poznań, 369–379.
- Kurzawska, A. 2013a. Muszle porcelanek w skarbie ozdób z Podbieli (pow. otwocki). *Fontes Archaeologici Posnanienses. Annales Musei Archaeologici Posnaniensis* 49: 213–221.
- Kurzawska, A. 2013b. Analiza malakologiczna, (w:) H. Kóćka-Krenz (red.), *Poznań we wczesnym średniowieczu*, T. VIII. Poznań, 331–336.
- Kurzawska, A. 2015. Badania malakologiczne w archeologii, (w:) A. Hyrczała i B. Bartecki (red.), *Wojownik i księżniczka. Archeologia – Medycyna Sądowa – Sztuka*. Hrubieszów, 104–109.
- Kurzawska, A. 2016. Muszle mięczaków, (w:) M. Szmyt (red.), *Osadnictwo społeczności neolitycznych na stanowisku 2 w Janowicach, woj. kujawsko-pomorskie*. Poznań, 357–360.
- Kurzawska, A. 2018. Muszle mięczaków ze stanowiska 3 w Puławach-Włostowicach, (w:) B. Niezabitowska-Wiśniewska (red.), *Puławy – Włostowice. Wielokulturowe stanowisko z Zachodniej Lubelszczyzny*. Lublin, 396–406.
- Kurzawska, A. 2019a. Rozdział 12: Muszle ślimaków, (w:) P. Włodarczak (red.), *Wilczyce, stanowisko 10. Norma i precedens w rytuale pogrzebowym małopolskiej kultury ceramiki sznurowej, Ocalone Dziedzictwo Archeologiczne* 9. Kraków.
- Kurzawska, A. 2019b. Szczątki malakologiczne ze stanowiska 1 w Dąbrówce, (w:) M. Szmyt, P. Pawlak (red.), *Dwa grody nad Wirynką. Dąbrówka stanowiska 1 i 2, woj. wielkopolskie*. Poznań, 638–642.
- Kurzawska, A., Kowalewska-Marszałek, H. 2010. Shell ornaments from the Early Bronze Age burial at Kichary Nowe, Poland, (w:) C. Bakels, K. Fennema, W. Out,

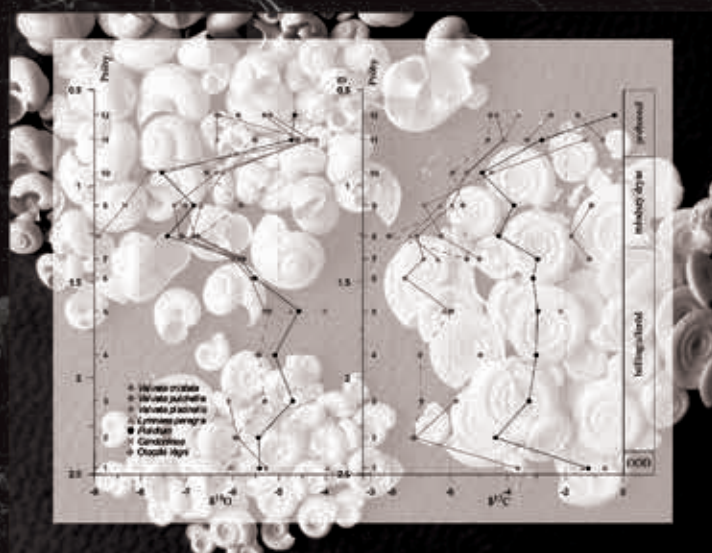
- C. Vermeeren (red.), *Of Plants and Snails, a collection of papers presented to Wim Kuijper in gratitude for forty years of teaching and identifying*. Leiden, 155–165.
- Kurzwaska, A., Kara, M. 2015. The contribution of mollusc shells to the reconstruction of environment at the Early Medieval stronghold of Pszczew (Poland). *Quaternary International* 390: 126–132.
- Kurzwaska, A., Rutkowska, G. 2013. *Ostrea edulis* w świetle polskich źródeł archeozoologicznych i pisanych do XIX wieku. *Kwartalnik Historii Kultury Materialnej* 61(1): 43–62.
- Kurzwaska, A., Sobkowiak-Tabaka, I. 2020. *Spondylus* shells at prehistoric sites in Poland. *Sprawozdania Archeologiczne* 72(2): 41–66.
- Kurzwaska, A., Sobkowiak-Tabaka, I. 2021. Archaeology under a microscope: research at the ArchaeoMicroLab of the Faculty of Archaeology Adam Mickiewicz University in Poznań, (w:) D. Żurkiewicz (red.), *Skarby czasu, badania Wydziału Archeologii UAM*. Poznań, 474–484.
- Kurzwaska, A., Sobkowiak-Tabaka, I. 2022 (w druku). *Lithoglyphus naticoides* – a small but significant shell of the “Danubian” communities, (w:) M. Dębiec, J. Górski, J. Müller, A. Pelisiak, P. Włodarczak, T. Saile (red.), *Ab agricolis ad heroes. Studia archaeologica Slavomiro Kadrow vitae anno sexagesimo quinto oblate*, Regensburg.
- Kurzwaska, A., Sobkowiak-Tabaka, I., Jakubowski, G. 2020. Miocene shells in Late Neolithic and Early Bronze Age burials in Poland. *Geoarchaeology* 35: 952–973.
- Kurzwaska, A., Apolinarzka, K., Silska, P., Sobkowiak-Tabaka, I., Rennwanz, J. 2021. Garbage, Storage or a Mussel Oven? A Case Study of a Shell Midden from Western Poland. *Environmental Archaeology* (published online), <https://doi.org/10.1080/14614103.2021.1963161>
- Law, M. 2014. Mollusc Shells from Archaeological Building Materials, (w:) K. Szabó, C. Dupont, V. Dimitrijević, L.G. Gastéum, N. Serrand (red.), *Archeomalakology: Shells in the Archaeological Record*. BAR International Series 2666. Oxford, 245–248.
- Leng, M.J., Lewis, J.P. 2016. Oxygen isotopes in Molluscan shell: Applications in environmental archaeology. *Environmental Archaeology* 21: 295–306.
- Ložek, V. 1955. Měkkyši československého kvarteru. *Rozpravy Ustředního Ústavu Geologického* 17: 1–510.
- Ložek, V. 1964. Quartärmollusken der Tschechoslovakei. *Rozpravy Ustředního Ústavu Geologického* 31: 1–374.
- Mason, R.D., Peterson, M.L., Tiffany, J.A. 1998. Weighing vs. Counting: Measurement Reliability and the California School of Midden Analysis. *American Antiquity* 63: 303–324.
- Mienis, H.K. 1992. Landsnails in a human skull from Khirbet Amarit, Israel. *The Papustyla* 6(4): 46.
- Mienis, H.K., Hadas, G. 2005. Archaeomalacological finds in the vicinity of ‘En Gedi 4. Molluscs in an oven dating to the 1<sup>st</sup> century CE. *Triton* 11: 31.
- Milner, N., Craig O.E., Bailey G.N. 2007. *Shell Middens in Atlantic Europe*. Oxford.
- Narożna-Szamałek, U. 2013. Skarb ozdób z Podbieli, pow. otwocki. *Fontes Archaeologici Posnanienses* 49: 193–212.
- Piechocki, A. 1971. Szczątki mięczaków z cmentarzyska kultury pucharów lejkowatych na stanowisku I w Sarnowie, pow. Włocławek, z grobowca 8. *Prace i Materiały Muzeum Archeologicznego i Etnograficznego w Łodzi, Seria Archeologiczna* 18: 131–138.
- Piechocki, A., Wawrzyniak-Wydrowska, B. 2016. *Guide to freshwater and marine mollusca of Poland*. Poznań.
- Perlès, C., Vanhaeren, M. 2010. Black Cyclope neritea Marine Shell Ornaments in the Upper Palaeolithic and Mesolithic of Franchthi Cave, Greece: Arguments for Intentional Heat Treatment. *Journal of Field Archaeology* 35(3): 298–309, doi.10.1179/009346910X12707321358874
- Poppe, G.T., Goto, Y. 2000. *European Seashells*. Vol. I, II. Hackenheim.
- Reese, D.S. 1991. The trade of Indo-Pacific shells into the Mediterranean basin and Europe. *Oxford Journal of Archaeology* 10(2): 159–195.
- Renfrew, C., Bahn, P. 2002. *Archeologia. Teorie, metody, praktyka*. Warszawa.
- Rigaud, S., d’Errico, F., Vanhaeren, M. 2015. Ornaments Reveal Resistance of North European Cultures to the Spread of Farming. *PLoS One*, e0121166, doi.org/10.1371/journal.pone.0121166
- Sakalauskaite, J., Andersen, S.H., Biagi, P., Borrello, M.A., Cocquerz, T., Colonese, A.C., Bello, F.D., Girod, A., Heumüller, M., Koon, H., Mandili, G., Medana, C., Penkman, K.E.H., Plasseraud, L., Schlichtherle, H., Taylor, S., Tokarski, C., Thomas, J., Wilson, J., Marin, F., Demarchi, B. 2019. ‘Palaeoshellomics’ reveals the use of freshwater mother-of-pearl in prehistory. *eLife* 2019(8): e45644, <https://doi.org/10.7554/eLife.45644.001>
- Sakalauskaite, J., Marin, F., Pergolizzi, B., Demarchi, B. 2020. Shell palaeoproteomics: First application of peptide mass fingerprinting for the rapid identification of mollusc shells in archaeology. *Journal of Proteomics* 227: 103920, doi.org/10.1016/j.jprot.2020.103920
- Samek, A. 1992. *Musze morskie. Mały przewodnik kolekcjonera*. Muzeum Przyrodnicze Instytutu Systematyki i Ewolucji Zwierząt PAN, Kraków.
- Schilder, M. 1952. *Die Kaurischnecke*. Neue Brehm-Bücherei 46: 1–48. Leipzig.
- Séferiadès, M.L. 2009. *Spondylus* and long-distance trade in Prehistoric Europe, (w:) D.W. Antony, J.Y. Chi (red.), *The Lost World of Old Europe: The Danube Valley, 5000–3500 BC*. Princeton, New York, 178–191.



- Shackleton, J., Elderfield, H. 1990. Strontium isotope dating of the source of Neolithic European Spondylus shell artefacts. *Antiquity* 64: 312–315.
- Sobkowiak-Tabaka, I., Kubiak-Martens, L., Okuniewska-Nowaczyk, I., Ratajczak-Szczerba, M., Kurzawska, A., Kufel-Diakowska, B. 2018. Reconstruction of the Late Glacial and Early Holocene landscape and human presence in Lubrza, Western Poland, on the basis of multidisciplinary analyses. *Environmental Archaeology* 23(2): 1–14.
- Sobkowiak-Tabaka, I., Milecka, K., Kubiak-Martens, L., Pawłowski, D., Kurzawska, A., Janczak-Kostecka, B., Kostecki, R., Hildebrandt-Radke, I., Apolinarska, K., Goslar, T. 2021. Persistent place at Lubrza – a small paradise of hunter-gatherers? Multi-disciplinary studies of Late Palaeolithic environment and human activity in the Łagów Lake District (Western Poland). *Vegetation History and Archaeobotany*, <https://doi.org/10.1007/s00334-021-00863-w> published online 02 December 2021.
- Stiner, M.C. 2014. Finding a common band-width: Causes of convergence and diversity in Paleolithic beads. *Biological Theory* 9: 51–64. [Special issue entitled Signs, Symbols and the Archaeological Record, (red.) K. Sterelny i P. Hiscock].
- Sullivan A.P., Marciniak, S., O'Dea, A., Wake, T.A., Perry, G.H. 2020. Modern, archaeological, and paleontological DNA analysis of a human-harvested marine gastropod (*Strombus pugilis*) from Caribbean Panama. *Molecular Ecology Resources* 21(5): 1517–1528, doi.org/10.1111/1755-0998.13361
- Sullivan, A.P., Marciniak, S., O'Dea, A., Wake, T.A., Perry, G.H. 2021. Modern, archaeological, and paleontological DNA analysis of a human-harvested marine gastropod (*Strombus pugilis*) from Caribbean Panama. *Molecular Ecology Resources*. First published: 17 February 2021 <https://doi.org/10.1111/1755-0998.13361>
- Szymanek, M. 2020. Analiza malakologiczna, (w:) W. Brzeziński (red.), *Kopalnie krzemienia na stanowisku „Za garncarzami” w Ożarowie*. Warszawa, 217–219.
- Taborin, Y. 1993. *La parure en coquillage au Paléolithique*, XXIXe suppl. à Gallia Préhistoire. Paris.
- Thomas, K.D. 2015. Molluscs emergent, Part I: themes and trends in the scientific investigation of mollusc shells as resources for archaeological research. *Journal of Archaeological Science* 56: 133–140.
- Trąbska, J., Gawel, A., Trybalska, B. 2015. Preliminary research on red ferruginous artefacts from the Kraków Spadzista Site, (w:) P. Wojtal, J. Wilczyński, G. Haynes (red.), *A Gravettian Site in Southern Poland: Kraków Spadzista*. Kraków, 83–92.
- Valde-Nowak, P. 2015. Worked Conus shells as Pavlovian fingerprint: Obłazowa Cave, Southern Poland. *Quaternary International* 359–360: 153–156, <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.09.060>
- Waselkov, G.A. 1987. Shellfish gathering and shell midden archaeology. *Advances in Archaeological Method and Theory* 10: 93–210.
- Welter-Schultes, F. 2012. *European non-marine molluscs. A guide for species identification*. Gottingen.
- Wiktor, A. 1965. Fauna ślimaków, (w:) K. Kowalski, J.K. Kozłowski, M. Kryszowska, A. Wiktor, *Badania osadów schroniska w Puchaczkiej Skale w Prądniku Czajowskim, pow. Olkusz*. *Folia Quaternaria* 20: 28–37.
- Wiktor, A. 2004. *Ślimaki lądowe Polski*. Olsztyn.
- Wilczyński, J., Wojtal, P., Łanczont, M., Mroczek, P., Sobieraj, D., Fedorowicz, S. 2015. Loess, flints and bones: Multidisciplinary research at Jaksice II Gravettian site (southern Poland). *Quaternary International* 359–360: 114–130, <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.04.002>
- Włodarczak, P. 2006. *Kultura ceramiki sznurowej na Wyżynie Małopolskiej*. Kraków.
- Wójcik, I., Szmoniewski, B.Sz. 2016. Śmietnisko muszlowe kultury trzcinieckiej w Koszycach, pow. Proszowicki. *Materiały Archeologiczne* 41: 169–181.
- Wyrwa, A. 2009. *Święty Jakub Apostoł. Malakologiczne i historyczne ślady peregrynacji z ziem polskich do Santiago de Compostela*. Lednica-Poznań.
- Zabilska, M. 2012. Depozyty ze szczątkami mięczaków na stanowiskach kultury łużyckiej z Polski. Charakterystyka i próba określenia ich genezy. *Acta Universitatis Nicolai Copernici* 32: 253–289.
- Zakościelna, A. 2010. *Studium obrządku pogrzebowego kultury lubelsko-wołyńskiej*. Lublin.









# Izotopy stabilne węgla ( $\delta^{13}\text{C}$ ) i tlenu ( $\delta^{18}\text{O}$ ) w archeomalakologii

Karina Apolinarska

## WSTĘP

Małże (gromada Bivalvia) i ślimaki (gromada Gastropoda) są najpowszechniej występującymi obecnie na Ziemi przedstawicielami mięczaków (typ Mollusca). Zamieszkują szerokie spektrum środowisk wodnych, a ślimaki występują również w środowisku lądowym. Skład gatunkowy subfosylanych zespołów mięczaków pochodzących z naturalnie nagromadzonych osadów może stanowić cenne archiwum wiedzy o środowisku współczesnych im ludzi (Kurzawska, w tym tomie). Muszle mięczaków znajdowane na stanowiskach archeologicznych stanowią również źródło informacji o życiu człowieka w przeszłości, jego zwyczajach czy preferencjach żywieniowych (Kurzawska, w tym tomie).

Uzupełnieniem analizy malakologicznej w badaniach archeologicznych jest analiza izotopowa węglanowych muszli mięczaków. Opiera się ona na określeniu proporcji pomiędzy ciężkimi i lekkimi izotopami węgla  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ( $\delta^{13}\text{C}$ ) i tlenu  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  ( $\delta^{18}\text{O}$ ) w aragonicie bądź kalcycie budującym muszlę. Proporcje te są zmienne i zależą od wielu czynników środowiskowych, które szczegółowo zostały scharakteryzowane poniżej. Wykorzystanie analizy izotopowej muszli mięczaków słodkowodnych w badaniach archeologicznych jest wieloaspektowe. Analizy izotopowe muszli w profilach osadów są jednym ze wskaźników

warunków środowiskowych oraz ich zmienności w czasie (Apolinarska i Hammarlund 2009; Szymanek 2016), co stanowi tło środowiskowe dla badań warunków życia dawnych ludzi. Wartości izotopów węgla i tlenu zapisane w kolejnych przyrostach muszli dostarczają informacji o sezonowej zmienności warunków środowiskowych (Schöne i Fiebig 2009; Schöll-Barna i in. 2012), a także są wykorzystywane w celu ustalenia czasu zbioru muszli (Mannino i in. 2003). Na podstawie składu izotopowego muszli można również określić przybliżone źródło ich pochodzenia (Apolinarska i Kurzawska 2020).

## HISTORIA BADAŃ

Pierwsze analizy składu izotopowego biogenicznych węglanów przeprowadzone zostały we wczesnych latach 50. ubiegłego stulecia (Urey i in. 1951; Epstein i in. 1953; Epstein i Lowenstam 1953). Od samego początku badania te skupiały się głównie na organizmach morskich. Zagadnienie zawartości izotopów tlenu i węgla w muszlach słodkowodnych mięczaków oraz jego implikacje paleośrodowiskowe i paleoklimatyczne podejmowali m.in. Clayton i Degens (1959), Keith i Weber (1964), Stuiver (1970), Fritz i Poplawski (1974), Abell (1982). Od początku lat 90. XX w. nastąpił

zdecydowany wzrost zainteresowania składem izotopowym muszli mięczaków słodkowodnych jako źródłem informacji paleośrodowiskowych i paleoklimatycznych. Muszle słodkowodnych małży były badane m.in. przez Böttger i in. (1998), Hammarlund i in. (1999); Zanchetta i in. (1999); von Grafenstein i in. (2000), Schöne i in. (2004). Analizy składu izotopowego muszli słodkowodnych ślimaków, z których większość zamieszkuje głównie obszary o klimacie umiarkowanym, przeprowadzali m.in. Hammarlund i Buchardt (1996), Böttger i in. (1998), Yu (2000), Jones i in. (2002), Hammarlund i in. (2003), Baroni i in. (2006), Apolinarska i Hammarlund (2009), Szymanek (2014). Ponadto badania obejmowały również analizy związku składu izotopowego skorupki współczesnych mięczaków ze składem izotopowym wody w celu sprawdzenia, na ile wiernie skład izotopowy muszli poszczególnych gatunków mięczaków rejestruje warunki środowiskowe podczas wzrostu muszli (von Grafenstein i in. 1999; Wurster i Patterson 2001; Kaandorp i in. 2003; Shanahan i in. 2005; Verdegaal i in. 2005; Apolinarska i in. 2016; Apolinarska i Pełechaty 2017).

### CZYNNIKI KONTROLUJĄCE SKŁAD IZOTOPOWY MUSZLI MIĘCZAKÓW SŁODKOWODNYCH

Poprawna interpretacja wartości  $\delta^{13}\text{C}$  i  $\delta^{18}\text{O}$  zapisanych w muszlach mięczaków wymaga dobrej znajomości czynników kontrolujących skład izotopowy muszli. Węgiel wbudowany w strukturę mineralną muszli pochodzi z rozpuszczonego w wodzie nieorganicznego węgla (ang. *dissolved inorganic carbon*, DIC) oraz z pożywienia (McConnaughey i Gillikin 2008). W przypadku taksonów wodnych udział węgla pochodzącego z pożywienia jest ograniczony i stanowi około 10% (McConnaughey 1989). Atomy tlenu wbudowywane w muszlę pochodzą z wody, jednakże  $\delta^{18}\text{O}$  muszli kontrolowane jest również przez temperaturę wody (Leng i Marshall 2004). Kiedy muszla wytrącana jest w izotopowej równowadze z wodą, jej  $\delta^{18}\text{O}$  obniża się o 0,24‰ na każdy stopień Celsjusza wzrostu temperatury wody (Craig 1965). Zatem skład izotopowy muszli mięczaków słodkowodnych jest odzwierciedleniem składu izotopowego DIC, wody oraz temperatury wody w zbiorniku, w którym mięczak żył.

W mniejszym stopniu zależy on od składu izotopowego pożywienia. Ponieważ mięczaki tworzą swoje muszle poprzez akrecję, tj. dodając kolejne przyrosty do krawędzi muszli, proporcja izotopów obu pierwiastków zapisana w kolejnych przyrostach muszli zmienia się w odpowiedzi na zmiany warunków środowiskowych oraz zmiany źródła pożywienia (preferencji żywieniowych w czasie życia mięczaka). Owa zmienność właśnie jest cennym źródłem informacji w badaniach paleośrodowiskowych.

Na wartości izotopowe muszli wpływ ma również wiele czynników związanych z biologią i ekologią mięczaków. Jednym z nich jest habitat, tj. mikrośrodowisko, w którym mięczak żyje (Leng i Marshall 2004). Muszle powstające w dobrze natlenionej, przypowierzchniowej warstwie wody, np. tworzone przez organizmy żyjące na roślinach wodnych, wykazują inne wartości izotopów tlenu i węgla niż muszle tworzone przez gatunki zamieszkujące dno zbiornika, a w szczególności te zagrzebujące się w osadzie jak małże z rodzaju *Pisidium* (Hammarlund i in. 2003; Apolinarska i in. 2016). Ponadto istotny jest również okres w trakcie roku, podczas którego mięczak buduje muszlę (Leng i Marshall 2004). Uzależniony jest on od gatunku oraz od czynników środowiskowych, głównie klimatu. Wartości  $\delta^{18}\text{O}$  i  $\delta^{13}\text{C}$  otrzymane podczas analizy całych muszli mięczaków pozwalają na uzyskanie uśrednionych danych obejmujących okres wzrostu danego osobnika, z naciśnięciem na czas najbardziej intensywnego wzrostu. Nie są to wartości średnie roczne (Apolinarska i Pełechaty 2017).

Na skład izotopowy muszli mogą mieć wpływ czynniki fizjologiczne, tzw. *vital effects*, kontrolowane przez mięczaka, w wyniku których skład izotopowy muszli jest odmienny od wartości spodziewanych, wynikających z wytrącania w izotopowej równowadze z warunkami środowiskowymi. Frakcjonowanie izotopów związane z *vital effects* jest zazwyczaj stałe dla gatunku i niezależne od temperatury (von Grafenstein i in. 1999; Apolinarska i Pełechaty 2017). Podkreślić należy, że na podstawie badań aktualistycznych określono, że większość mięczaków słodkowodnych wytrąca swoje muszle w izotopowej równowadze z wodą, a zatem  $\delta^{18}\text{O}$  muszli odzwierciedla  $\delta^{18}\text{O}$  i temperaturę wody (Ricken i in. 2003; Dettman i in. 1999; Goewert i in. 2007; Apolinarska i Pełechaty 2017).

Wartości  $\delta^{13}\text{C}$  muszli modyfikowane są zazwyczaj przez skład izotopów węgla w pożywieniu mięczaków (McConnaughey i Gillikin 2008; Apolinarśka i Pełchaty 2017). Pomimo że udział węgla pochodzącego z pożywienia jest nieznaczny, szacowany na około 10% (McConnaughey 1989), może on znacząco wpłynąć na wartości  $\delta^{13}\text{C}$  muszli. W przypadku gatunków ślimaków słodkowodnych oraz małża *Dreissena polymorpha* obniżenie wartości  $\delta^{13}\text{C}$  muszli w wyniku wbudowywania w jej strukturę węgla pochodzenia metabolicznego zostało określone jako charakterystyczne i stałe dla poszczególnych gatunków (Shanahan i in. 2005; Apolinarśka i in. 2016; Apolinarśka i Pełchaty 2017).

Nie bez znaczenia jest również skład mineralny muszli. W warunkach izotopowej równowagi z DIC i wodą kalcyt i aragonit, dwie mineralne odmiany  $\text{CaCO}_3$ , wykazują odmienne wartości  $\delta^{13}\text{C}$  i  $\delta^{18}\text{O}$ .  $\delta^{13}\text{C}$  i  $\delta^{18}\text{O}$  aragonitu jest odpowiednio o 1,7‰ i 0,6‰ wyższe względem wartości uzyskanych dla kalcytu (Tarutani i in. 1969; Romanek i in. 1992). Różnice te należy uwzględnić, porównując skład izotopowy dwóch muszli, z których jedna składa się z aragonitu, a druga z kalcytu lub porównując skład izotopowy muszli mięczaków (zwykle aragonitowych) ze składem izotopowym innych węglanów (w klimacie umiarkowanym zwykle kalcytowych) wytrącanych w środowisku słodkowodnym (Tarutani i in. 1969; Abell i Williams 1989; Leng i in. 1999; Jones i in. 2002; Apolinarśka i in. 2016).

Analizie izotopowej mogą być poddane zarówno całe muszle, jak i kolejne akrecyjnie dodawane do muszli przyrosty. Analiza izotopowa całych muszli stosowana jest głównie w przypadku gatunków o małych rozmiarach, wynoszących kilka lub kilkanaście milimetrów. Uzyskany w ten sposób sygnał izotopowy odzwierciedla cały okres wzrostu muszli. W klimacie umiarkowanym obejmuje on głównie wiosnę, lato oraz wczesną jesień. Analizując skład izotopowy muszli w profilu osadów, uzyskujemy zmienność warunków środowiskowych w czasie. Analiza izotopowa w przyrostach muszli pozwala poznać zmiany składu izotopowego w trakcie wzrostu mięczaka. Stosowana jest przede wszystkim w przypadku muszli dużych, głównie małży należących do rodziny Unionidae (Schöne i in. 2004; Ricken i in. 2003), ale muszle większych ślimaków również były analizowane w ten sposób (Leng i in. 1999; Taft i in. 2014).

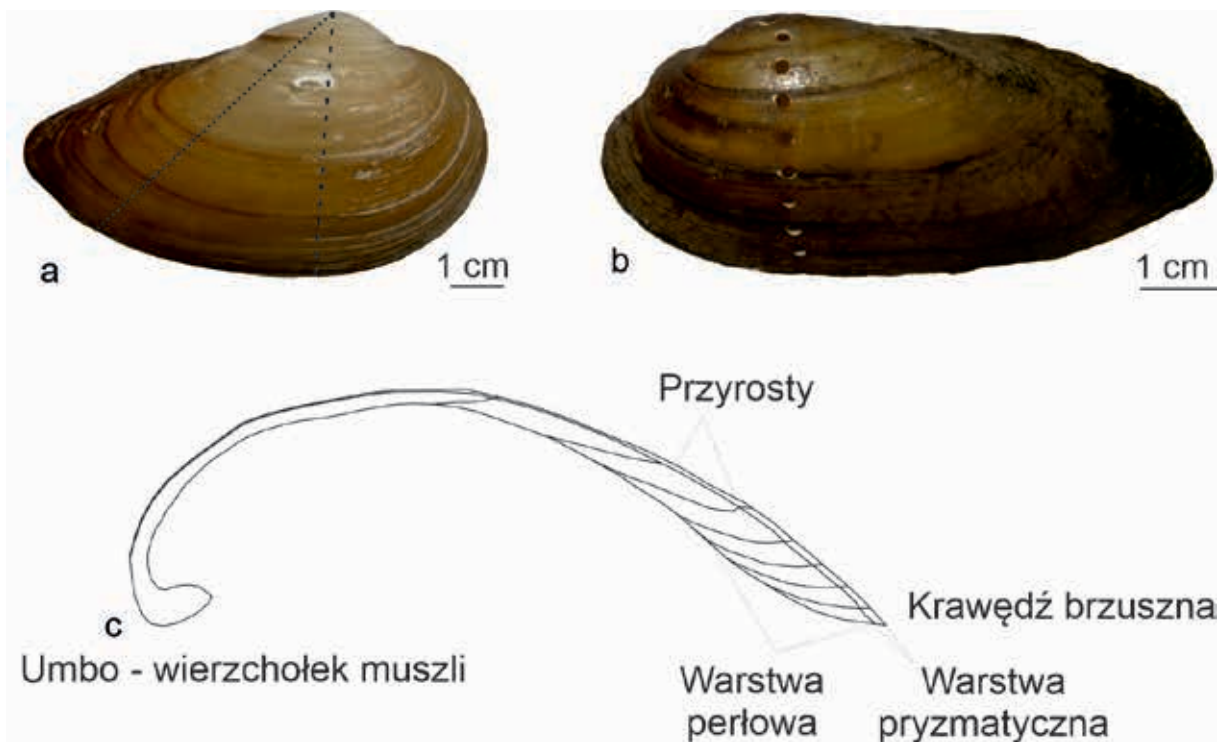
## CHARAKTERYSTYKA METODY BADAWCZEJ

Do analizy izotopowej bardzo często używane są muszle mięczaków pochodzące z próbek, które uprzednio poddane były analizie malakologicznej, dlatego też sposób pozyskania muszli mięczaków do analizy izotopowej jest zbliżony z metodologią pobierania próbek do analizy zespołów mięczaków (Kurzawska, w tym tomie). W zależności od typu badanego osadu czy też charakteru stanowiska osad, z którego pochodzą muszle, może być pobierany za pomocą ręcznego świdra umożliwiającego uzyskanie niezaburzonej sekwencji osadów o miąższości 0,5 do 1 metra lub z odsłoneń lub wkopów, gdzie próbki osadu wraz muszlami pobierane są bezpośrednio ze ściany (Szymanek 2016; Pietruczuk i Wojciechowski 2020). Nierzadko pobierane są również całe bloki osadów (Apolinarśka i in. 2015; Kurzawska i in. 2021). W laboratorium rdzenie bądź bloki osadów najczęściej, choć nie zawsze, dzielone są na mniejsze próbki, zwykle o miąższości 1-5 cm. Następnie osad przemywany jest na sitach (o średnicy oczek: 1 mm, 0,5 mm i 0,2 mm) pod strumieniem bieżącej wody. Z tak powstałego rezydium muszle wybierane są ręcznie, w przypadku okazów o niewielkich rozmiarach – pod binokulem.

Muszle przeznaczone do analizy izotopowej powinny zostać bardzo dokładnie oczyszczone z osadu, ponieważ może on wpłynąć na uzyskane wyniki. Muszle należy dokładnie umyć, np. za pomocą pędzelka lub miękkiej szczoteczki, pod strumieniem bieżącej wody, a w razie konieczności pod binokulem. Jeżeli zachowała się zewnętrzna organiczna warstwa (periostracum), również powinna zostać usunięta. W tym celu muszle umieszczamy w 10% roztworze  $\text{H}_2\text{O}_2$  na 24 godziny lub dłużej, jeżeli jest to konieczne. Następnie każdą muszlę kilkakrotnie przepłukujemy wodą destylowaną i suszymy w temperaturze pokojowej. Tak przygotowane muszle nie wymagają szczególnych warunków przechowywania. Można je umieścić w foliowych woreczkach, papierowych kopertkach lub plastikowych bądź szklanych pojemniczkach.

Przed przystąpieniem do analizy izotopowej sprawdzeniu powinien zostać poddany stan zachowania muszli. W pierwszej kolejności podczas wybierania okazów do analiz izotopowych wykluczone powinny być te, na których widoczne są ślady





**Ryc. 1.** Sposoby opróbowania muszli małży na potrzeby analizy izotopowej: a – Muszla *Unio tumidus* (fot. K. Apolinarska) z zaznaczonymi przykładowymi liniami wzdłuż których pobrane mogą być próby z warstwy pryzmatycznej lub muszla może zostać przecięta (porównaj ryc. 1c); b – Muszla *Unio pictorum* (fot. K. Apolinarska) opróbowana na potrzeby analizy izotopowej (Apolinarska i Kurzawska 2020); c – Przekrój przez muszę *Unio* sp. (przygotowane na podstawie Versteegh i in. 2009).

rozpuszczania. Muszle słodkowodnych mięczaków zbudowane są zazwyczaj z termodynamicznie niestabilnego aragonitu (Folk 1965; Jones i in. 2002). W trakcie procesów diagenetycznych minerał ten może zostać przekształcony w kalcyt, co prowadzi do ustalenia nowej równowagi izotopowej, zazwyczaj z wodami gruntowymi (Abell i Williams 1989). W celu sprawdzenia, czy zachowana została pierwotna aragonitowa mineralogia muszli, wybrane okazy poddajemy analizie XRD (ang. *X-ray diffraction*). Procesy diagenetyczne mogą również doprowadzić do rekrytalizacji muszli kalcytowych. W takim wypadku muszle można barwić roztworem Feigla (Kato i in. 2003), przeprowadzić analizę katodoluminescencyjną (Schöll-Barna i in. 2012) lub sprawdzić ich strukturę wewnętrzną przy zastosowaniu mikroskopii skaningowej (SEM). Muszle, które nie zostały zmienione przez procesy diagenetyczne, cechuje charakterystyczna wewnętrzna mikrostruktura (Falniowski 1990).

W przypadku analizy izotopowej całych muszli pojedyncze muszle bądź próbki złożone z większej liczby muszli należy bardzo dokładnie utrzyć w moździerzu agatowym, tak aby uzyskać homogeniczny

pył węglanowy. Analiza składu izotopowego kolejnych przyrostów muszli może być wykonana dwójako. Próbkę mogą zostać pobrane z zewnętrznej powierzchni muszli (Bar-Yosef Mayer i in. 2012) lub w przekroju (Çakirlar i Şeşen 2013) (ryc. 1). W obu przypadkach próbki pobiera się najczęściej wzdłuż linii maksymalnego wzrostu, od wierzchołka muszli do jej krawędzi (Mannino i in. 2011; Prendergast i Stevens 2013). Próbkę pobierane są za pomocą małej wiertarki ręcznej lub z zastosowaniem urządzenia sterowanego komputerowo, które zapewnia dużą precyzję pracy. Masa  $\text{CaCO}_3$  potrzebna do analizy jest nieznaczna i wynosi zazwyczaj  $<100 \mu\text{g}$  (Leng i Lewis 2016). Sproszkowane muszle umieszczamy w małych szczelnych pojemniczkach, np. Eppendorf o pojemności 0,5-1,5 ml, i przekazujemy do laboratorium izotopowego.

Wynikiem analizy izotopowej jest informacja o stosunku izotopu cięższego do lżejszego,  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  i  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ , w próbce, przedstawiona jako delta ( $\delta$ ), odpowiednio  $\delta^{13}\text{C}$  i  $\delta^{18}\text{O}$ . Wartości obliczane są za pomocą wzoru:

$$\delta = (R_{\text{próbki}}/R_{\text{standardu}} - 1) \cdot 1000,$$

gdzie R to zmierzony stosunek  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  lub  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  w próbce oraz w standardzie. W przypadku analiz izotopowych węglanów stosowany jest międzynarodowy standard V-PDB, którego wartość wynosi 0‰ (Hoefs 2015). Uzyskane wartości izotopowe są dodatnie, kiedy stosunek izotopów w badanej próbce jest wyższy względem ich stosunku w standardzie, lub ujemne, kiedy stosunek izotopów w badanej próbce jest niższy względem stosunku  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  w standardzie.

## WYKORZYSTANIE ANALIZY IZOTOPOWEJ MUSZLI SŁODKOWODNYCH MIĘCZAKÓW W BADANIACH ARCHEOLOGICZNYCH

### Izotopy jako tło środowiskowe

Z uwagi na duże znaczenie warunków środowiskowych oraz ich zmienności na życie człowieka badania archeologiczne bardzo często obejmują analizy naturalnych archiwów dawnego klimatu, w tym osadów jeziornych i torfowiskowych, w których zachowane są muszle mięczaków (Sobkowiak-Tabaka i in. 2018). Przydatność składu izotopowego muszli mięczaków w badaniach paleośrodowiskowych została wielokrotnie wykazana (Apolinarska i Hammarlund 2009; Szymanek i in. 2016).

### Czynniki wpływające na zmienność składu izotopowego wód słodkich w czasie

Jak wspomniano we wstępie, skład izotopowy muszli mięczaków jest odzwierciedleniem składu izotopowego DIC ( $\delta^{13}\text{C}$ ) oraz składu izotopowego wody ( $\delta^{18}\text{O}$ ) i temperatury wody. Każda z tych wartości uzależniona jest od czynników zewnętrznych.

Zmienność składu izotopowego DIC wynika ze zmian wartości  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  w wodach zasilających oraz ze zmian produktywności (Leng i Marshall 2004).  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  w wodach gruntowych i powierzchniowych zmienia się w reakcji na przekształcenia szaty roślinnej, przyjmując niższe (bardziej ujemne) wartości w warunkach, gdy jest ona dobrze rozwinięta (Hammarlund i in. 1997). Z kolei wyższe (zwykle mniej ujemne) wartości  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  w wodach dopływających do jeziora związane są z rozpuszczaniem skał węglanowych przez wody gruntowe (Leng i Marshall 2004). Zjawisko to miało

szczególne znaczenie w okresach chłodnych z niestabilnymi glebami oraz krótko po ustąpieniu lądolodu, kiedy osady nie były jeszcze związane roślinnością, znajdował się w nich natomiast materiał węglanowy, który przez rozpuszczanie lub w formie detrytycznej (rozdrobnionej) dostarczany był do zbiornika (Hammarlund i Buchardt 1996; Apolinarska i in. 2012). Ponadto, intensywny rozwój organizmów fotosyntetyzujących w jeziorze przyczynia się do wzrostu wartości  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  w wyniku preferencyjnego wiązania izotopowo lekkiego węgla w komórkach pierwotnych producentów (McConnaughey 1989).

Zmienność składu izotopów tlenu w wodach słodkich uzależniona jest od  $\delta^{18}\text{O}$  wód zasilających. Zwykle jest to głównie skład izotopowy opadów, zmieniający się wraz ze zmianami składu izotopowego źródła pary wodnej obecnej w atmosferze (głównie oceany, których skład izotopowy uzależniony jest od stopnia rozprzestrzenienia lądolodów na Ziemi) oraz ze zmianami temperatury powietrza (Cohen 2003). Dansgaard (1964) określił związek  $\delta^{18}\text{O}_{\text{opadów}}$  i temperatury jako  $\sim 0,2$  do  $\sim 0,7\text{‰}$  na  $1^\circ\text{C}$  dla całego globu i zauważył, że stopień frakcjonowania wzrasta wraz z szerokością geograficzną. W Polsce  $\delta^{18}\text{O}_{\text{opadów}}$  zmienia się o  $+0,64 \pm 0,05\text{‰}$  na  $1^\circ\text{C}$  wzrostu temperatury powietrza (Duliński i in. 2001). W przypadku jezior i rzek zasilanych przez wody z topniejących lodowców bardzo istotne znaczenie ma czasowo zmienny stopień topnienia tychże (Ricken i in. 2003). Wzrost udziału tego źródła w bilansie wodnym, do którego dochodzi latem, wpływa na obniżenie wartości  $\delta^{18}\text{O}_{\text{wody}}$ . Podobnie jak w przypadku  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$   $\delta^{18}\text{O}$  wód spływających do jeziora może być zmienione przez rozpuszczanie skał węglanowych obecnych w zlewni. W takim wypadku wody zasilające są wzbogacone w  $^{18}\text{O}$  względem swojego pierwotnego składu, tj.  $\delta^{18}\text{O}$  przyjmuje wyższe (mniej ujemne) wartości. Wynika to z faktu, iż  $\delta^{18}\text{O}$  węglanów morskich wynosi  $\sim 0\text{‰}$  (Hoefs 2015) z kolei  $\delta^{18}\text{O}_{\text{opadów}}$  na obszarze Europy przyjmuje wartości pomiędzy  $-15\text{‰}$  a  $-5\text{‰}$ , natomiast na terenie Polski wynosi od  $-10\text{‰}$  do  $-9\text{‰}$  (Bowen i Wilkinson 2002). Analogicznie do wpływu na wartości  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  zjawisko to miało szczególne znaczenie w okresach chłodnych z niestabilnymi glebami oraz krótko po deglacjacji (Hammarlund i Buchardt 1996; Apolinarska i in. 2012).

Duże znaczenie dla wartości izotopów węgla i tlenu ma czas retencji wody w jeziorze.

W zbiornikach zamkniętych, charakteryzujących się długim czasem wymiany wody, wartości  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  i  $\delta^{18}\text{O}_{\text{wody}}$  wzrastają na skutek kumulującego się z czasem wiązania  $^{12}\text{C}$  przez autotrofy i wymiany  $\text{CO}_2$  pomiędzy atmosferą a wodą oraz ewaporacyjnego wzbogacenia wód w  $^{18}\text{O}$  (Apolinarska i in. 2021).

Podsumowując, zapis izotopów stabilnych węgla i tlenu w muszlach mięczaków pobranych z kolejnych warstw w profilu osadów może dostarczyć informacji o: (1) nasileniu denudacji chemicznej; (2) wkroczeniu roślinności na obszar zlewni jeziora; (3) zmianach produktywności, tj. o stopniu nasilenia produktywności w zbiorniku, która może wynikać, np. ze zmian trofii; (4) zmianach temperatury wody wynikających ze zmian klimatycznych; (5) zmianach składu izotopowego opadów; (6) zmianach proporcji pomiędzy źródłami wody; (7) zmianach w czasie retencji wody w zbiorniku.

### **Próbki złożone z jednej czy z wielu muszli?**

Analizując muszle mięczaków pobrane z warstwy osadów o genezie naturalnej (np. jeziornych), należy pamiętać, że warstwa ta obejmuje wiele lat depozycji. Liczba ta zależy jest od miąższości próbki, tempa depozycji osadów oraz późniejszej kompaktacji osadów. Próbka osadów jeziornych o miąższości 1 cm może odpowiadać kilku, kilkunastu lub kilkudziesięciu latom depozycji, w trakcie których warunki środowiskowe, w tym klimatyczne, ulegały zmianom. W takim wypadku skład izotopowy pojedynczej muszli (która powstawała podczas jednego roku, jak w przypadku większości ślimaków słodkowodnych (Piechocki i Wawrzyniak-Wydrowska 2016), nie będzie reprezentatywny dla badanej próbki (Escobar i in. 2010). Badania przeprowadzone przez Apolinarską i in. (2015) wykazały, że dla próbki o miąższości 1 cm liczba muszli dająca wiarygodne średnie wartości izotopów wynosi  $>10$  (ryc. 2). Jest to liczba zmienna i może się różnić pomiędzy stanowiskami. Niejednokrotnie zdarza się, że liczebność muszli w poszczególnych próbach jest mniejsza. W takim wypadku zalecane jest poddanie analizie największej możliwej liczby muszli.

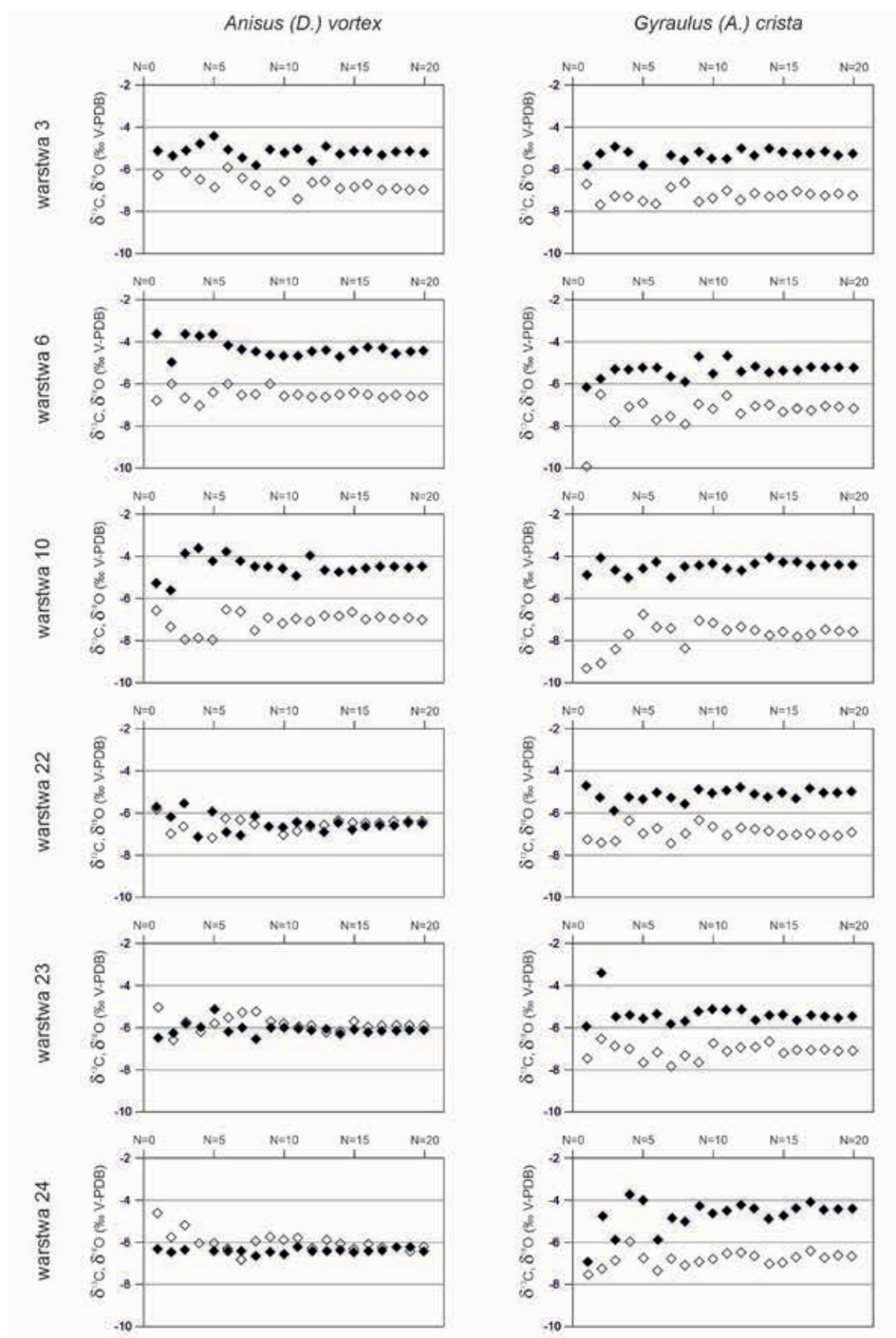
### **Próbki jedno- czy wielogatunkowe?**

Skład izotopowy muszli mięczaków kontrolowany jest przez wiele czynników, w tym te bezpośrednio związane z gatunkiem wytrącającym muszlę, jak liczba miesięcy/lat oraz okres w trakcie roku, kiedy muszla jest tworzona, habitat – zwykle na roślinności lub na dnie, na lub w osadzie, czy preferencje odnośnie do pokarmu (McConnaughey i Gillikin 2008). Badania muszli kopalnych i współczesnych (Shanahan i in. 2005; Apolinarska i in. 2016; Apolinarska i Pełechaty 2017), w których analizy izotopowe przeprowadzono dla wielu taksonów mięczaków słodkowodnych, pokazały, że o ile skład izotopów tlenu w muszlach jest zbliżony dla różnych gatunków, to izotopy węgla różnią się znacznie, nawet o kilka promili (ryc. 3). Muszle ślimaków płucodysznych charakteryzują niższe wartości izotopów węgla względem gatunków przodoskrzelnych (Apolinarska i Pełechaty 2017). Co ważne, różnice te są stałe, tj. frakcjonowanie izotopowe jest zależne od gatunku (Apolinarska i Pełechaty 2017). Biorąc pod uwagę powyższe wyniki, analiza izotopowa muszli w profilu osadów powinna być przeprowadzana dla jednego gatunku. Jednakże w odpowiedzi na zmienność warunków środowiskowych w czasie, skład gatunkowy mięczaków w osadach również ulega zmianom. W takim wypadku analizy izotopowe przeprowadzamy dla więcej niż jednego gatunku, z tym jednakże założeniem, że część analiz robimy „na zakładkę”, tak aby rozpoznać ewentualne różnice w składzie izotopowym pomiędzy analizowanymi gatunkami oraz aby potwierdzić ich niezmienność w czasie.

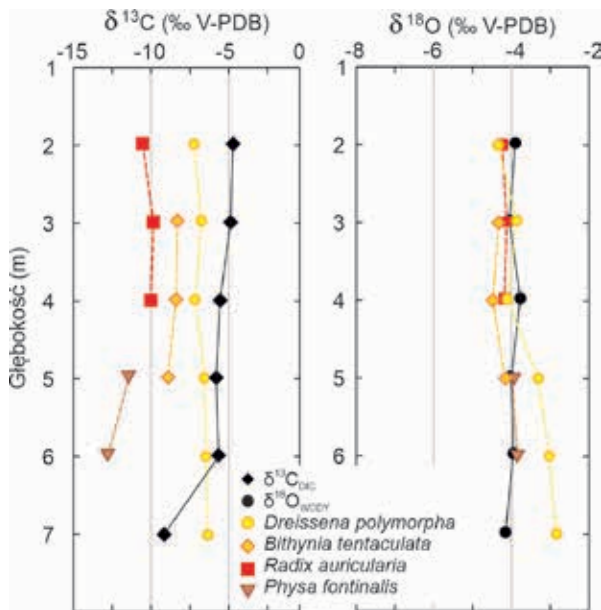
### **Izotopy jako źródło informacji o pochodzeniu muszli oraz artefaktów wykonanych z muszli**

Analiza izotopowa może być wykorzystana do odtworzenia źródła pochodzenia muszli (Sakalauskaitė i in. 2019) zarówno tych, które zebrane zostały w celach konsumpcyjnych, jak i tych, które posłużyły do wykonania artefaktów, w tym ozdób złożonych z paciorków (Apolinarska i Kurzawska 2020). Na podstawie składu izotopowego zwykle łatwo jest odróżnić muszle morskie i słodkowodne (Clayton





**Ryc. 2.** Średnie wartości  $\delta^{13}\text{C}$  i  $\delta^{18}\text{O}$  losowo wybranych muszli *Anisus vortex* i *Gyraulus crista* (oś pionowa) z sześciu warstw osadów, każda o miąższości 1 cm. Oś pozioma przedstawia liczbę muszli, których wartości zostały uśrednione. Romby pełne –  $\delta^{13}\text{C}$ ; romby bez wypełnienia  $\delta^{18}\text{O}$ . Źródło: Apolinarska i in. 2015, *Journal of Paleolimnology* 54: 305-323; oryginalny rysunek; <https://link.springer.com/article/10.1007/s10933-015-9854-2>



**Ryc. 3.** Wartości stabilnych izotopów węgla i tlenu w rozpuszczonym nieorganicznym węglu (DIC), w wodzie, muszlach mięczaków, węglanowych inkrustacjach i materii organicznej makrofitów. Wyraźnie widoczne są różnice w wartościach izotopów stabilnych węgla w muszlach poszczególnych gatunków mięczaków. Wartości izotopowe tlenu są zbliżone u badanych gatunków mięczaków. Źródło: Apolinarska i in. 2016, *Hydrobiologia* 768: 1-17; oryginalny rysunek; <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10750-015-2524-6>

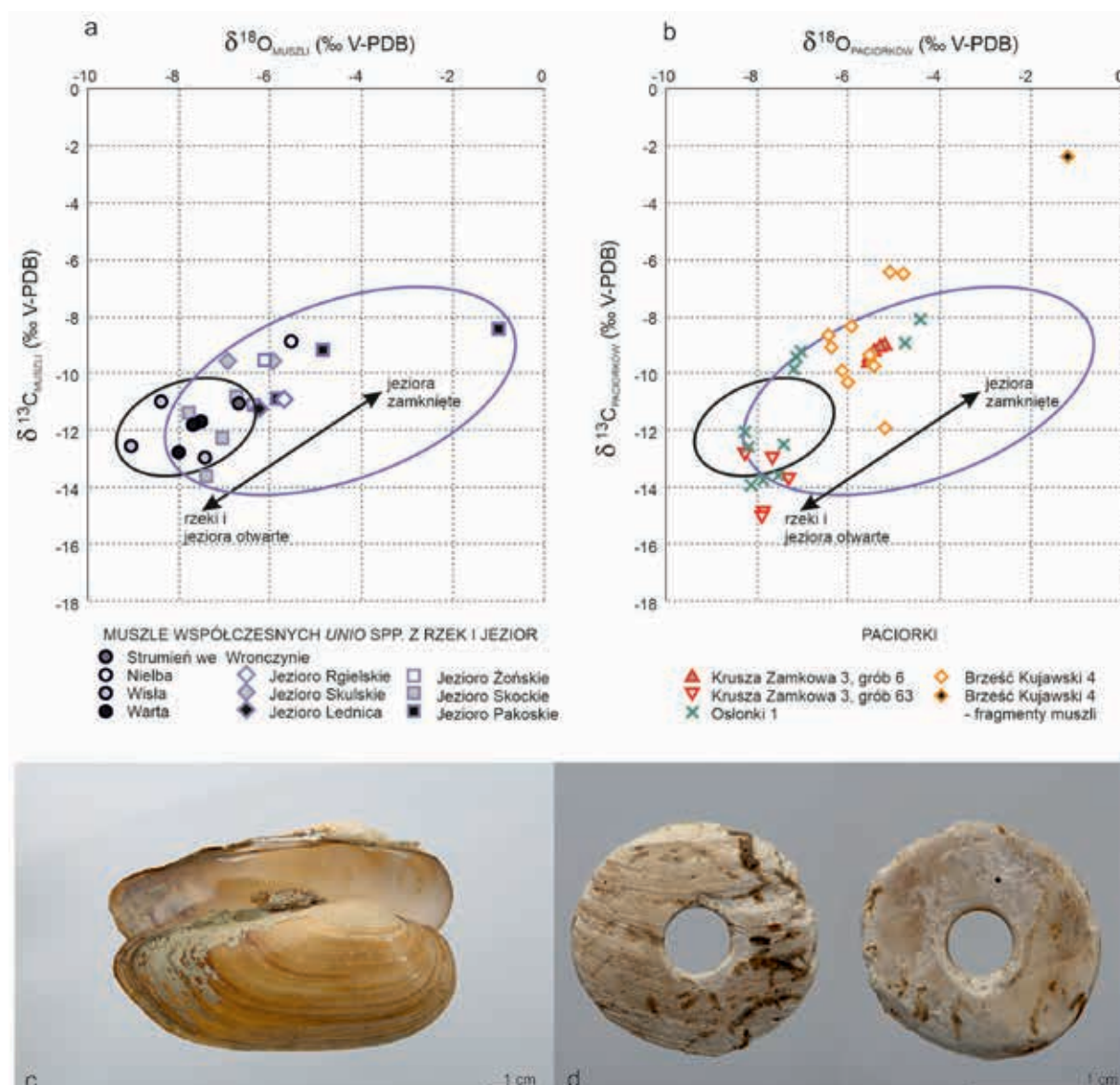
i Degens 1959; Sakalauskaite i in 2019). Muszle mięczaków słodkowodnych są zubożone w cięższe izotopy węgla i tlenu, co wynika z różnic w składzie izotopowym pomiędzy wodami morskimi i oceanicznymi a wodami rzek i jezior (Hoefs 2015). W przypadku środowiska słodkowodnego pochodzenie muszli można określić, opierając się na różnicach w składzie izotopowym rzek oraz przepływowych i zamkniętych jezior (Leng i Marshall 2004).

Wartości wyjściowe  $\delta^{18}\text{O}$  w wymienionych środowiskach są wypadkową składu izotopów stabilnych tlenu wód zasilających, tj.  $\delta^{18}\text{O}$  opadów, wód powierzchniowych oraz podziemnych (Leng i Marshall 2004). Podobnie jest w przypadku wartości izotopów węgla w DIC, które zależą od wartości  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  dostarczanego z wodami powierzchniowymi i gruntowymi. To co odróżnia te dwa środowiska i ma znaczący wpływ na skład izotopowy wody i DIC to tempo wymiany wody. W klimacie wilgotnym  $\delta^{18}\text{O}_{\text{wody}}$  i  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  w rzekach jest zbliżone do wartości w wodach zasilających. W jeziorach wartości wyjściowe  $\delta^{18}\text{O}$  wód zasilających oraz

$\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  w dopływach są modyfikowane przez ewaporację, wymianę  $\text{CO}_2$  pomiędzy wodą a atmosferą oraz przez organizmy fotosyntetyzujące (Leng i Marshall 2004). Pierwszy z tych procesów prowadzi do wzbogacenia wody w  $^{18}\text{O}$ , drugi i trzeci do wzbogacenia DIC w  $^{13}\text{C}$ . Stopień wzbogacenia w cięższe izotopy obu pierwiastków wzrasta wraz z wydłużaniem się czasu retencji wody w jeziorze (Leng i Marshall 2004). Jeziora zamknięte są silnie wzbogacone w  $^{13}\text{C}$  i  $^{18}\text{O}$ , np. Jezioro Kierskie (Apolinarska i in. 2021), podczas gdy jeziora z aktywnym przepływem wody charakteryzują się niższymi wartościami  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  i  $\delta^{18}\text{O}_{\text{wody}}$ . Izotopowo lżejsze są rzeki w klimacie umiarkowanym wilgotnym, w których wzbogacenie DIC i wody, odpowiednio, w  $^{13}\text{C}$  i  $^{18}\text{O}$ , jest nieznaczne z uwagi na aktywny przepływ wody. Jeziora i rzeki, w przypadku których wpływ ewaporacji jest nieznaczny, powinny odzwierciedlać skład izotopowy lokalnych opadów. Skład izotopowy wód stojących i płynących może odbiegać od spodziewanego na danym obszarze również w przypadku, gdy źródła rzeki lub dopływów są odległe, a na  $\delta^{18}\text{O}$  ich wód wpływ ma efekt kontynentalizmu i/lub wysokości nad poziomem morza (Dansgaard 1964).  $\delta^{18}\text{O}$  wód rzecznych lub jeziornych może przyjmować wartości znacznie niższe od  $\delta^{18}\text{O}$  lokalnych opadów i wód gruntowych w przypadku wspomnianego już wcześniej zasilania wodami z lodowców górskich. Przykładowo, skład izotopowy wód w rzece Ren jest silnie uzależniony od sezonowo zmiennej dostawy wód z lodowców alpejskich (Ricken i in. 2003). Izotopowo lekkie (zubożone w  $^{18}\text{O}$ ) wody rzeczne oraz muszle żyjących w nich Unionidae obserwowane są latem (Ricken i in. 2003; Verdegaal i in. 2005).

Używając wartości  $\delta^{13}\text{C}$  i  $\delta^{18}\text{O}$  do określenia pochodzenia muszli ze stanowiska archeologicznego, jej skład izotopowy porównujemy ze składem izotopowym muszli współczesnych pobranych z rzek i jezior zlokalizowanych na obszarze wokół stanowiska archeologicznego lub ze składem wód powierzchniowych (ryc. 4). O ile nie można w ten sposób wskazać konkretnego jeziora lub konkretnej rzeki, z której pochodzi muszla, to możliwe jest określenie typu zbiornika, z którego pochodzi (Apolinarska i Kurzawska 2020).

Konieczne jest jednak wzięcie pod uwagę pewnych ograniczeń opisanej powyżej metody. Zebranie porównawczego materiału muszlowego z tego samego jeziora/jezior, z którego zostały zebrane muszle



**Ryc. 4.** Wartości stabilnych izotopów węgla i tlenu w muszlach współczesnych małży z rodzaju *Unio* zebranych w jeziorach i rzekach centralno-zachodniej Polski (a) oraz w paciorkach wykonanych z muszli pochodzących ze stanowisk Brześć Kujawski, Osłonki i Krusza Zamkowa (b). Źródło: Apolinarska i Kurzawska 2020, *Archaeological and Anthropological Sciences* 12: 15; oryginalny rysunek; <https://link.springer.com/article/10.1007/s12520-019-00978-2>; reprodukcja za zgodą Springer Nature, numer licencji 5107650030837. *Unio pictorum* (c). Paciorek z muszli *Unio* sp., Krusza Zamkowa, st. 3, grób nr 6, widok z dwóch stron (d). Fot. M. Jórdeczka

w przeszłości, mogłoby się wydawać gwarancją bezproblemowego i jednoznacznego porównania wartości izotopowych w muszlach. Jednakże zarówno wartości  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC'}}$  jak i wartości  $\delta^{18}\text{O}_{\text{wody}}$  i temperatura wody wpływające na wartości izotopów C i O w muszlach nie są stałe. W zależności od zróżnicowania i zmienności warunków środowiskowych w czasie mogą się one zmieniać nawet o kilka promili w trakcie setek lub tysięcy lat. Zwykle jednak zmiana wartości  $\delta^{13}\text{C}$  i  $\delta^{18}\text{O}$  w węglanach (muszlach mięczaków,

pancerzykach małżoraczków czy mule węglanowym) powstających w środowisku słodkowodnym nie przekracza 1-2‰ w trakcie trwania holocenu (Piotrowska i Hałas 2009; Apolinarska i in. 2012).

Musze mięczaków żyjących w jeziorach zamkniętych lub tych o znacznie ograniczonym przepływie wody charakteryzują się trendem do wzbogacenia w  $^{13}\text{C}$  oraz  $^{18}\text{O}$  wraz z upływem czasu (rozumianym jako setki lub tysiące lat). Kiedy jezioro wypłyca się na skutek stopniowego wypełniania



osadami, skład izotopowy jego wód w większym stopniu zmienia się w wyniku ewaporacji (wzrost wartości  $\delta^{18}\text{O}$ ) oraz przez preferencyjne wiązanie cząsteczek  $^{12}\text{CO}_2$  przez organizmy fotosyntetyzujące, w tym makrofity, które w płytkim jeziorze pokrywają proporcjonalnie większą powierzchnię dna w porównaniu z jeziorami głębokimi. W efekcie, muszle mięczaków również zostają wzbogaczone w  $^{13}\text{C}$  i  $^{18}\text{O}$ .

Porównanie wartości  $\delta^{13}\text{C}$  współczesnych muszli z zapisem  $\delta^{13}\text{C}$  w muszlach starszych niż datowane na początek rewolucji przemysłowej, tj. przed XIX w., wymaga uwzględnienia wpływu spalania paliw kopalnych (zubożonych w  $^{13}\text{C}$ ) na spadek wartości  $\delta^{13}\text{C}$   $\text{CO}_2$  atmosferycznego (ang. *the Suess effect*, Keeling 1979). Równoległe do stopniowo wzrastającej emisji węgla z paliw kopalnych postępowało coraz bardziej intensywne odlesianie znacznych obszarów lądów, co spowodowało dalszą emisję  $\text{CO}_2$  zubożonego w  $^{13}\text{C}$  do atmosfery. Łącznie pomiędzy początkiem ery przemysłowej a czasami obecnymi zaobserwowano obniżenie wartości  $\delta^{13}\text{C}$   $\text{CO}_2$  atmosferycznego o około 2‰ (-6,5‰ około 200 lat temu i około -8,5‰ współcześnie, Rubino i in. 2013). Ponieważ  $\text{CO}_2$  jest aktywnie wymieniany pomiędzy atmosferą a wodą, wartości  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  ulegają obniżeniu (Verburg 2007).

Możliwa jest również sytuacja, w której jeziora będące źródłem pozyskania mięczaków czy ich muszli odkrywanych na stanowiskach archeologicznych zniknęły już z krajobrazu na skutek wypełnienia osadami. Jest to zjawisko powszechne na obszarach objętych zasięgiem występowania lądolodów czwartorzędowych (Choiński 2000). W takim wypadku zebranie adekwatnego współczesnego materiału porównawczego jest niemożliwe. Sytuacja taka nie wyklucza zastosowania składu izotopowego muszli do określenia ich pochodzenia, ponieważ rzeki i jeziora na danym obszarze charakteryzują się pewnymi zakresami wartości  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  i  $\delta^{18}\text{O}_{\text{wody}}$ . Ponadto możemy posiłkować się materiałem zgromadzonym z rzek i jezior nieco bardziej oddalonych od stanowiska archeologicznego (Apolinarska i Kurzawska 2020).

Na koniec warto zauważyć, że różnice w wartościach  $\delta^{13}\text{C}$  i  $\delta^{18}\text{O}$  pomiędzy współczesnymi jeziorami występującymi w nieznaczej odległości od siebie mogą być większe niż zmiany wartości  $\delta^{13}\text{C}$  i  $\delta^{18}\text{O}$  w czasie, np. w trakcie trwania holocenu, co

jest dobrze znane z badań osadów jeziornych oraz współczesnych jezior z obszaru Polski (Piotrowska i Hałas 2009; Pronin i in. 2018; Zawiska i in. 2019).

Pomimo wymienionych powyżej czynników w istotny sposób zmieniających skład izotopowy DIC i skład izotopowy wody w rzekach i jeziorach, określenie źródła pochodzenia muszli słodkowodnych na podstawie wartości  $\delta^{13}\text{C}$  i  $\delta^{18}\text{O}$  jest możliwe. Apolinarska i Kurzawska (2020) wskazały potencjalne źródła pochodzenia muszli Unionidae użytych do produkcji paciorków przez neolitycznych mieszkańców Kujaw (ryc. 4 i 5). Przede wszystkim określiły, że wartości izotopów tlenu i węgla w paciorkach zawierają się w granicach wartości  $\delta^{13}\text{C}$  i  $\delta^{18}\text{O}$  współczesnych muszli *Unio* spp. zebranych z obszaru centralnej Polski, a zatem potwierdziły lokalne źródło pochodzenia muszli. Na podstawie składu izotopowego wyróżnione zostały dwie grupy paciorków – wykonane z muszli małży zebranych w rzekach i jeziorach. Paciorki pochodzące z różnych stanowisk różniły się od siebie składem izotopowym, co pozwala wnioskować o innym w każdym przypadku, i najprawdopodobniej lokalnym, źródle ich pochodzenia. Apolinarska i Kurzawska (2020) wykazały ponadto, że źródło muszli do produkcji paciorków na danym stanowisku mogło ulec zmianie w czasie, co było wyraźnie widoczne na stanowisku Krusza Zamkowa w postaci dwóch zbiorów wartości izotopowych bez części wspólnej (ryc. 4c).

### Izotopy jako źródło informacji o sezonowej zmienności warunków środowiskowych

Cechą budowy szkieletów mięczaków szczególnie przydatną w badaniach paleośrodowiskowych i archeologicznych jest akrecyjne dodawanie nowych przyrostów do krawędzi muszli. Tę cechę muszli wykorzystuje sklerochronologia, która poprzez szczegółowe badania kolejnych przyrostów, w tym ich szerokości, składu chemicznego i izotopowego pozwala na uzyskanie zapisu o wysokiej rozdzielczości (Schöne i Fiebig 2009; Schöne i Gillikin 2013). Zmiany wartości  $\delta^{13}\text{C}$  i  $\delta^{18}\text{O}$  w przyrostach muszli (Kaandorp i in. 2003; Bar-Yosef Mayer i in. 2012; Schöll-Barna i in. 2012) odzwierciedlają sezonowe zróżnicowanie wartości  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  i  $\delta^{18}\text{O}_{\text{wody}}$  w zbiorniku, w którym mięczak żyje. Na wartości izotopów węgla w DIC wpływają zmiany produktywności w trakcie roku, a wartości  $\delta^{18}\text{O}_{\text{wody}}$  są kontrolowane przez zmienny skład

izotopowy opadów i ewaporacyjną utratę  $^{18}\text{O}$ , głównie podczas lata (Verdegaal i in. 2005; Apolinarska i in. 2021). Ponadto  $\delta^{18}\text{O}$  muszli obniża się o 0,25‰ na każdy stopień Celsjusza wzrostu temperatury wody (Craig 1965; Kim i O'Neil 1997). Metoda ta ma zastosowanie szczególnie w przypadku gatunków dużych małży i ślimaków, w muszlach, których kolejne przyrosty są łatwe do wyróżnienia, a czas życia mięczaka niejednokrotnie obejmuje kilka lat (Leng i in. 1999; Schöne i in. 2004; Taft i in. 2014).

Wysoka rozdzielczość analiz izotopowych, którą można uzyskać, analizując kolejne przyrosty muszli, umożliwia szereg zastosowań zarówno w badaniach paleośrodowiskowych, jak i archeologicznych. Sekwencyjne analizy wartości izotopów węgla i tlenu na zewnętrznej powierzchni muszli *Unio* spp. wzdłuż linii jej maksymalnego wzrostu pozwoliły uzyskać informacje o sezonowych zmianach klimatu (temperaturze i opadach) na stanowiskach archeologicznych (Andrus 2011; Bar-Yosef Mayer i in. 2012; Leng i Lewis 2016). Analogiczne analizy muszli *Anodontites trapesialis* (Kaandorp i in. 2003) pochodzących z jezior zlokalizowanych na równi zalewowej pokazały, że skład izotopowy muszli wiernie odzwierciedla sezonowe wezbrania rzeki Amazonki. Możliwa jest zatem rekonstrukcja zmian siły wezbrań w odpowiedzi na zmiany ilości opadów. Stopień topnienia lodowców alpejskich jest jednym z najważniejszych czynników kontrolujących skład muszli małży żyjących w rzekach przez nie zasilanych, np. w Renie (Ricken i in. 2003). Zatem zmiany klimatyczne powodujące zmiany temperatury lata, a w odpowiedzi natężenie topnienia lodowców, będą odzwierciedlone w składzie izotopowym mięczaków.

### Analizy punktowe nie tylko w przypadku muszli

Przeprowadzenie punktowych analiz izotopowych może mieć również zastosowanie w przypadku badań artefaktów, ponieważ pozwala na niemal bezinwazyjne pobieranie próbek (pozostałością po analizie są jedynie niewielkie otwory) i zachowanie całego przedmiotu, np. paciorka, co może mieć duże znaczenie z uwagi na jego unikatowość. Przeprowadzając analizy punktowe, należy pamiętać, że tak jak skład izotopowy muszli ulega zmianom sezonowym, tak też artefakty z nich wykonane będą się tą zmiennością charakteryzowały. W wyniku pojedynczej

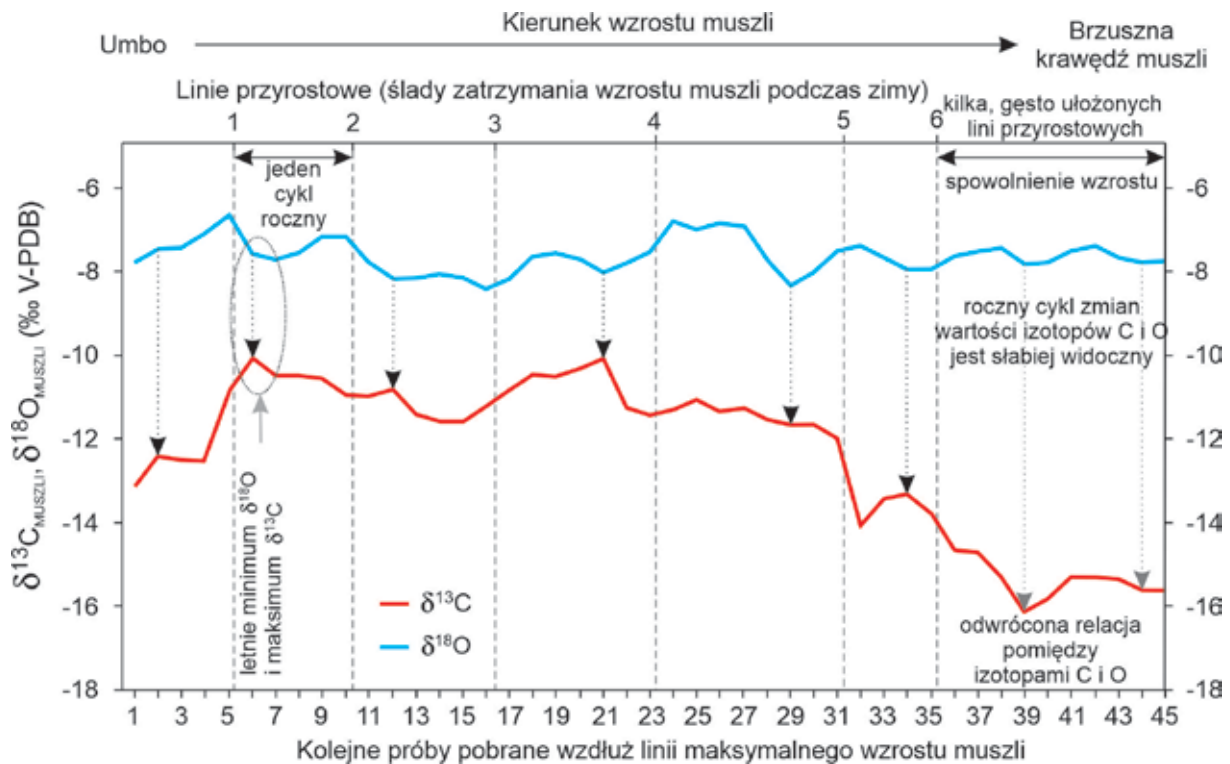


**Ryc. 5.** Przykład grobu, w którym odkryto paciorki dyskowe z muszli *Unio* spp. Krusza Zamkowa st. 3, grób nr 6. Fot. J. Bednarczyk

punktowej analizy uzyskamy wartości  $\delta^{13}\text{C}$  i  $\delta^{18}\text{O}$  z bliżej nieokreślonego momentu w roku. Podobnie jak w przypadku punktowych analiz muszli konieczne jest wykonanie sekwencji analiz, tak aby rozpoznać zmienność wartości izotopów węgla i tlenu.

### Izotopy jako źródło informacji o momencie zbioru muszli

Wartości  $\delta^{13}\text{C}$  i  $\delta^{18}\text{O}$  w muszlach mięczaków pochodzących ze stanowisk archeologicznych pozwalają również określić czas zbioru muszli (Maninno i in. 2003; Maninno i in. 2011, Andrus 2011; Burchell i in. 2013; Prendergast i Schöne 2017). W tym celu należy zbadać skład izotopowy muszli w najmłodszych przyrostach, stosując punktowe analizy opisane powyżej. Istotne jest, aby analiza objęła co najmniej dwa ostatnie lata wzrostu mięczaka. Pozwoli to zorientować się w zmienności wartości  $\delta^{18}\text{O}$  muszli tworzonej w poszczególnych



**Ryc. 6.** Wartości  $\delta^{13}\text{C}$  i  $\delta^{18}\text{O}$  zmierzone w zewnętrznej, pryzmatycznej warstwie muszli *Unio crassus*, od wierzchołka do brzusznej krawędzi muszli, wzdłuż linii maksymalnego wzrostu. Źródło: Kurzawska i in. 2021

porach roku i umożliwi wskazanie czasu, kiedy ostatnie przyrosty zostały dodane do krawędzi muszli. W przypadku muszli mięczaków słodkowodnych żyjących w klimacie umiarkowanym przyrosty odkładane w sezonie letnim charakteryzują się najwyższymi wartościami  $\delta^{13}\text{C}$  oraz najniższymi wartościami  $\delta^{18}\text{O}$ , z kolei najbardziej zubożone o  $^{13}\text{C}$  oraz najbardziej wzbogacone w  $^{18}\text{O}$  przyrosty powstają wiosną oraz jesienią (Schöll-Barna i in. 2012; Kurzawska i in. 2021) (ryc. 6). Ta prawidłowość często nie jest zachowana w najmłodszych przyrostach dorosłych muszli, które charakteryzują się korelacją wartości  $\delta^{13}\text{C}$  i  $\delta^{18}\text{O}$  (Verdegaal i in. 2005; Kurzawska i in. 2021). Zmianie tej towarzyszy stopniowy spadek wartości  $\delta^{13}\text{C}$ , który został wielokrotnie wykazany w muszlach małży należących do Unionidae (Dettman i in. 1999; Kaandorp i in. 2003; Geist i in. 2005; Goewert i in. 2007; Schöll-Barna i in. 2012). Jest on związany ze stopniowym wzrostem znaczenia węgla pochodzącego z pożywienia do budowy muszli (Verdegaal i in. 2005; McConnaughey i Gillikin 2008).

Analiza izotopowa kolejnych przyrostów muszli *U. crassus* ze stanowiska archeologicznego Kiekrz 35 (ryc. 6) pozwoliła określić, że mięczak

został zebrany późnym latem (Kurzawska i in. 2021). Taka interpretacja jest zgodna z obserwacjami Aldridge'a (1999), który określił, że mięso Unionidae jest niesmaczne w trakcie okresu rozrodczego, a zatem mogło stanowić źródło pożywienia późnym latem lub jesienią. Zaleca się, aby analizie izotopowej poddać kilka muszli, tak aby zweryfikować powtarzalność wyników (Mannino i in. 2003).

## PODSUMOWANIE

Ponieważ skład izotopowy muszli mięczaków kontrolowany jest głównie przez czynniki środowiskowe, wartości izotopów tlenu i węgla zapisane w muszlach pochodzących ze stanowisk archeologicznych mogą stanowić cenne źródło informacji o klimacie i warunkach środowiskowych w przeszłości. To naturalne archiwum izotopowe może być źródłem informacji zarówno o długofalowych zmianach klimatycznych, jak i sezonowej zmienności warunków pogodowych, z których obie miały wpływ na funkcjonowanie człowieka w przeszłości. W przeciwieństwie do muszli



mięczaków morskich, które stanowiły przedmiot licznych analiz izotopowych, muszle mięczaków słodkowodnych doczekały się nielicznych badań składu izotopów stabilnych tlenu i węgla w opracowaniach archeologicznych. Przedstawione powyżej możliwości zastosowania wartości  $\delta^{13}\text{C}$  i  $\delta^{18}\text{O}$  w muszlach małży i ślimaków pochodzących ze zbiorników śródlądowych zachęcają do uzupełnienia tej luki.

## LITERATURA

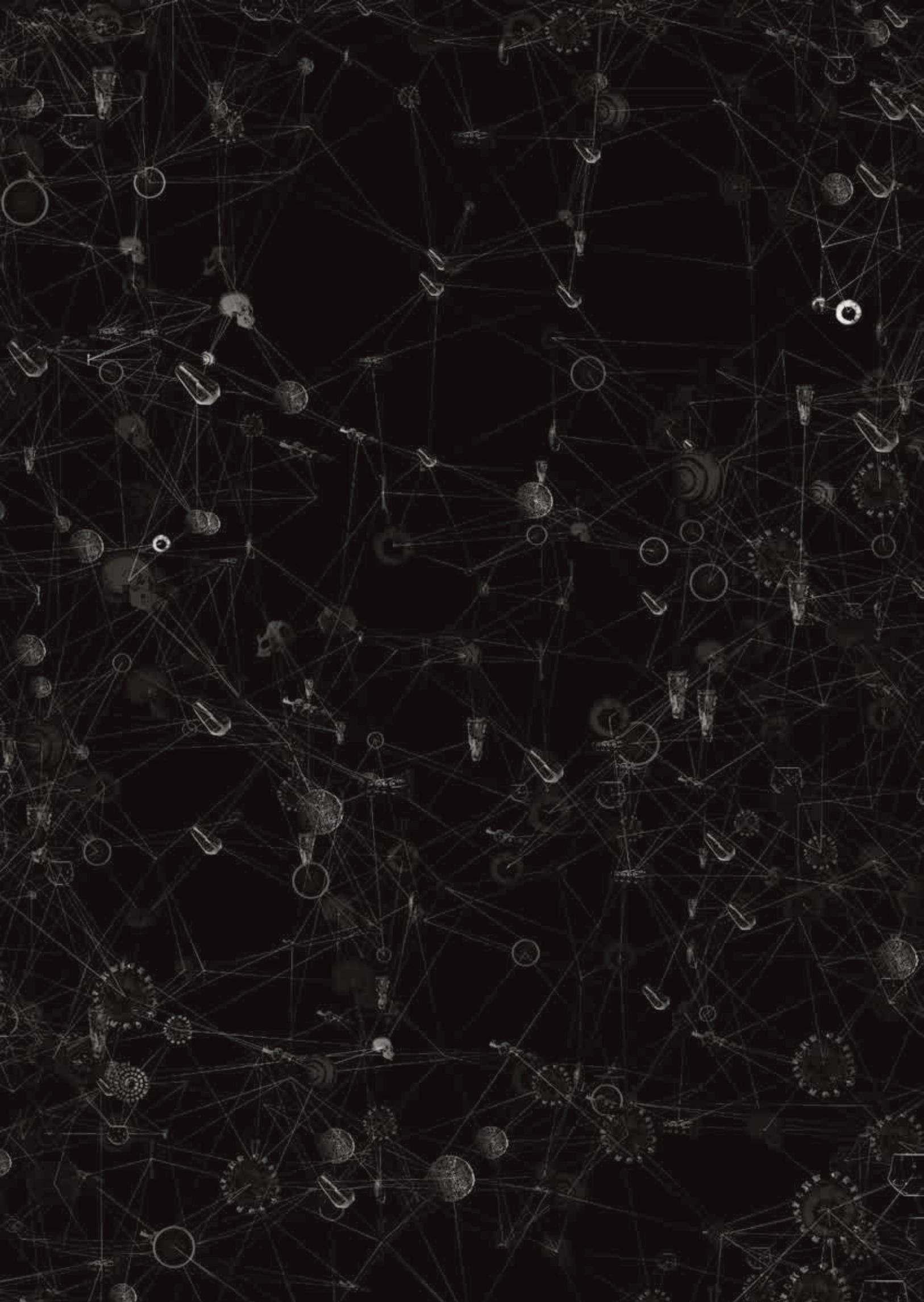
- Abell, P.I. 1982. Palaeoclimates at Lake Turkana, Kenya, from oxygen isotope ratios of gastropod shells. *Nature* 297: 321–323.
- Abell, P.I., Williams, M.A.J. 1989. Oxygen and carbon isotope ratios in gastropod shells as indicators of paleoenvironments in the afar region of Ethiopia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 74: 265–278.
- Aldridge, D.C. 1999. The Morphology, Growth and Reproduction of Unionidae (Bivalvia) in a Fenland Waterway. *Journal of Molluscan Studies* 65, 47–60.
- Andrus, C.F.T. 2011. Shell midden sclerochronology. *Quaternary Science Reviews* 30: 2892–2905.
- Apolinarska, K., Hammarlund, D. 2009. Multi-component stable isotope records from Late Weichselian and early Holocene lake sediments at Imiołki, Poland: palaeoclimatic and methodological implications. *Journal of Quaternary Science* 24: 948–959.
- Apolinarska, K., Kurawska, A. 2020. Can stable isotopes of carbon and oxygen be used to determine the origin of freshwater shells used in Neolithic ornaments from Central Europe? *Archaeological and Anthropological Sciences* 12: 15.
- Apolinarska, K., Pelechaty, M. 2017. Inter- and intra-specific variability in  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  values of freshwater gastropod shells from Lake Lednica, western Poland. *Acta Geologica Polonica* 67: 441–458.
- Apolinarska, K., Pelechaty, M., Kossler, A. 2015. Within-sample variability of  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  values of freshwater gastropod shells and the optimum number of shells to measure per sediment layer in the Paddenluch palaeolacustrine sequence, Germany. *Journal of Paleolimnology* 54: 305–323.
- Apolinarska, K., Pelechaty, M., Pronin, E. 2016. Discrepancies between the stable isotope compositions of water, macrophyte carbonates and organics, and mollusc shells in the littoral zone of a charophyte-dominated lake (Lake Lednica, Poland). *Hydrobiologia* 768: 1–17.
- Apolinarska, K., Pleskot, K., Pelechata, A., Migdalek, M., Pelechaty, M. 2021. Seasonal deposition of authigenic calcite out of isotopic equilibrium with DIC and water, and implications for paleolimnological studies. *Journal of Paleolimnology* 66: 41–53.
- Apolinarska, K., Woszczyk, M., Obremska, M. 2012. Late Weichselian and Holocene palaeoenvironmental changes in northern Poland based on the Lake Skrzynka record. *Boreas* 41: 292–307.
- Baroni, C., Zanchetta, G., Fallick, A.E., Longinelli, A. 2006. Mollusca stable isotope record of a core from Lake Frassino, northern Italy: hydrological and climatic changes during the last 14 ka. *The Holocene* 16: 827–837.
- Bar-Yosef Mayer, D.E., Leng, M.J., Aldridge, D.C., Arrowsmith, C., Gümüş, B.A., Sloane, H.J. 2012. Modern and early-middle Holocene shells of the freshwater mollusc *Unio*, from Çatalhöyük in the Konya Basin, Turkey: preliminary palaeoclimatic implications from molluscan isotope data. *Journal of Archaeological Science* 39: 76–83.
- Bowen, G.J., Wilkinson, B. 2002. Spatial distribution of  $\delta^{18}\text{O}$  in meteoric precipitation. *Geology* 30(4): 315–318.
- Böttger, T., Hiller, A., Junge, F.W., Litt, T., Mania, D., Scheele, N. 1998. Late Glacial stable isotope record, radiocarbon stratigraphy, pollen and mollusc analyses from the Geisental area, Central Germany. *Boreas* 27: 88–100.
- Burchell, M., Cannon, A., Hallmann, N., Schwarcz, H.P., Schöne, B.R. 2013. Inter-site variability in the season of shellfish collection on the central coast of British Columbia. *Journal of Archaeological Science* 40: 626–636.
- Çakırlar, C., Şeşen, R. 2013. Reading between the lines:  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  isotopes of *Unio elongatulus* shell increments as proxies for local palaeoenvironments in mid-Holocene northern Syria. *Archaeological and Anthropological Sciences* 5: 85–94.
- Clayton, R.N., Degens, E.T. 1959. Use of carbon isotope analyses of carbonates for differentiating fresh-water and marine sediments. *American Association of Petroleum Geologists Bulletins* 43: 890.
- Choiński, A. 2000. *Jeziora kuli ziemskiej*. Warszawa.
- Cohen, A.S. 2003. *Paleolimnology. The history and evolution of lake systems*. New York.
- Craig, H. 1965. The measurement of oxygen isotope temperatures, (w:) E. Tongiorgi (red.), *Stable isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures*. Spoleto, 161–182.
- Dansgaard, W. 1964. Stable isotopes in precipitation. *Tellus* 16: 436–468.
- Dettman, D.L., Reische, A.K., Lohmann, K.C. 1999. Controls on the stable isotope composition of seasonal growth bands in aragonitic fresh-water bivalves (unionidae). *Geochimica et Cosmochimica Acta* 63: 1049–1057.
- Duliński, M., Florkowski, T., Grabczak, J., Różański, K. 2001. 25 lat systematycznych pomiarów składu izotopowego opadów na terenie Polski. *Przegląd Geologiczny* 49: 250–256.

- Epstein, S., Buchsbaum, R., Lowenstam, H.A., Urey, H.C. 1953. Revised carbonate-water isotope temperature scale. *GSA Bulletin* 64: 1315–1326.
- Epstein, S., Lowenstam, H.A. 1953. Temperature-Shell-Growth Relations of Recent and Interglacial Pleistocene Shoal-Water Biota from Bermuda. *The Journal of Geology* 61: 424–438.
- Escobar, J., Curtis, J., Brenner, M., Hodell, D., Holmes, J. 2010. Isotope measurements of single ostracod valves and gastropod shells for climate reconstruction: evaluation of within-sample variability and determination of optimum sample size. *Journal of Paleolimnology* 43: 921–938.
- Falniowski, A. 1990. Anatomical characters and SEM structure of radula and shell in the species-level taxonomy of freshwater prosobranchs (Mollusca: Gastropoda: Prosobranchia): a comparative usefulness study. *Folia Malacologica* 4: 53–142.
- Folk, R.L., Pray, L.C., Murray, R.C., 1965. *Some Aspects of Recrystallization in Ancient Limestones I, Dolomitization and Limestone Diagenesis*. Tulsa.
- Fritz, P., Poplawski, S. 1974.  $^{18}\text{O}$  and  $^{13}\text{C}$  in the shells of freshwater molluscs and their environments. *Earth and Planetary Science Letters* 24: 91–98.
- Geist, J., Auerswald, K., Boom, A., 2005. Stable carbon isotopes in freshwater mussel shells: Environmental record or marker for metabolic activity? *Geochimica et Cosmochimica Acta* 69: 3545–3554.
- Goewert, A., Surge, D., Carpenter, S.J., Downing, J. 2007. Oxygen and carbon isotope ratios of *Lampsilis cardium* (Unionidae) from two streams in agricultural watersheds of Iowa, USA. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 252: 637–648.
- Hammarlund, D., Aravena, R., Barnekow, L., Buchardt, B., Posner, G. 1997. Multi-component carbon isotope evidence of early Holocene environmental change and carbon-flow pathways from a hard-water lake in northern Sweden. *Journal of Paleolimnology* 18: 219–233.
- Hammarlund, D., Björck, S., Buchardt, B., Israelson, C., Thomssen, C.T. 2003. Rapid hydrological changes during the Holocene revealed by stable isotope records of lacustrine carbonates from Lake Igelsjön, southern Sweden. *Quaternary Science Reviews* 22: 353–370.
- Hammarlund, D., Buchardt, B. 1996. Composite stable isotope records from a Late Weichselian lacustrine sequence at Graenge, Lolland, Denmark: Evidence of Allerød and Younger Dryas environments. *Boreas* 25: 8–22.
- Hammarlund, D., Edwards, T.W.D., Björck, S., Buchardt, B., Wohlfarth, B. 1999. Climate and environment during the Younger Dryas (GS-1) as reflected by composite stable isotope records of lacustrine carbonates at Torreberga, southern Sweden. *Journal of Quaternary Science* 14: 17–28.
- Hoefs, J.H. 2015. *Stable isotope geochemistry*, 7 ed. Switzerland.
- Jones, M.D., Leng, M.J., Eastwood, W.J., Keen, D.H., Turney, C.S.M. 2002. Interpreting stable-isotope records from freshwater snail-shell carbonate: a Holocene case study from Lake Gölhisar, Turkey. *The Holocene* 12: 629–634.
- Kaandorp, R.J.G., Vonhof, H.B., Del Busto, C., Wesselingh, F.P., Ganssen, G.M., Marmól, A.E., Romero Pittman, L., van Hinte, J.E. 2003. Seasonal stable isotope variations of the modern Amazonian freshwater bivalve *Anodontites trapesialis*. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 194: 339–354.
- Kato, K., Wada, H., Fujioka, K. 2003. The application of chemical staining to separate calcite and aragonite minerals for micro-scale isotopic analyses. *Geochemical Journal* 37: 291–297.
- Keeling, C.D. 1979. The Suess effect:  $^{13}\text{C}$ - $^{14}\text{C}$  interrelations. *Environment International* 2: 229–300.
- Keith, M.L., Weber, J.N. 1964. Carbon and oxygen isotopic composition of selected limestones and fossils. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 28: 1787–1816.
- Kim, S.-T., O'Neil, J.R. 1997. Equilibrium and nonequilibrium oxygen isotope effects in synthetic carbonates. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61: 3461–3475.
- Kurzawska, A., Apolinarska, K., Silska, P., Sobkowiak-Tabaka, I., Rennwanz, J. 2021. Garbage, Storage or a Mussel Oven? a Case Study of a Shell Midden from Western Poland. *Environmental Archaeology*: 1–17 (published online: 11 Aug 2021).
- Leng, M.J., Lamb, A.L., Lamb, H.F., Telford, R.J. 1999. Palaeoclimatic implications of isotopic data from modern and early Holocene shells of the freshwater snail *Melanooides tuberculata*, from lakes in the Ethiopian Rift Valley. *Journal of Paleolimnology* 21: 97–106.
- Leng, M.J., Lewis, J.P. 2016. Oxygen isotopes in Molluscan shell: Applications in environmental archaeology. *Environmental Archaeology* 21: 295–306.
- Leng, M.J., Marshall, J.D. 2004. Palaeoclimate interpretation of stable isotope data from lake sediment archives. *Quaternary Science Reviews* 23: 811–831.
- Mannino, M.A., Spiro, B.F., Thomas, K.D. 2003. Sampling shells for seasonality: oxygen isotope analysis on shell carbonates of the inter-tidal gastropod *Monodonta lineata* (da Costa) from populations across its modern range and from a Mesolithic site in southern Britain. *Journal of Archaeological Science* 30: 667–679.
- Mannino, M.A., Thomas, K.D., Leng, M.J., Di Salvo, R., Richards, M.P. 2011. Stuck to the shore? Investigating prehistoric hunter-gatherer subsistence, mobility and territoriality in a Mediterranean coastal landscape through isotope analyses on marine mollusc shell carbonates and human bone collagen. *Quaternary International* 244: 88–104.
- McConnaughey, T. 1989.  $^{13}\text{C}$  and  $^{18}\text{O}$  isotopic disequilibrium in biological carbonates: I. Patterns. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 53: 151–162.

- McConnaughey, T., Gillikin, D. 2008. Carbon isotopes in mollusk shell carbonates. *Geo-Marine Letters* 28: 287–299.
- Prendergast, A.L., Schöne, B.R. 2017. Oxygen isotopes from limpet shells: Implications for palaeothermometry and seasonal shellfish foraging studies in the Mediterranean. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 484: 33–47.
- Pendergast A., Stevens R.E. 2013. Molluscs (Isotopes): analyses in environmental archaeology, (w:) C. Smith (red.), *Encyclopedia of Global Archaeology*. New York.
- Piet, V. 2007. The need to correct for the Suess effect in the application of  $\delta^{13}\text{C}$  in sediment of autotrophic Lake Tanganyika, as a productivity proxy in the Anthropocene. *Journal of Paleolimnology* 37: 591–602.
- Pietruczuk, J., Wojciechowski, A. 2020. Human- and climate-induced changes of mollusc assemblages of millpond deposits in the valley of Jarosławianka Stream (Poland). *Folia Malacologica* 28: 311–325.
- Piotrowska, N., Hałas, S. 2009. Zmiany składu izotopowego węgla i tlenu w jeziorze Wigry jako źródło informacji paleoklimatycznych., in: Rutkowski, J., Krzysztowiak, L. (red.), *Lake Wigry History of the lake in the light of geological and palaeoecological studies*. Suwałki, 157–166.
- Pronin, E., Pelechaty, M., Apolinarska, K., Pukacz, A. 2018. Oxygen stable isotope composition of carbonate encrustations of two modern, widely distributed, morphologically different charophyte species. *Hydrobiologia* 809: 41–52.
- Ricken, W., Steuber, T., Freitag, H., Hirschfeld, M., Niedenzu, B. 2003. Recent and historical discharge of a large European river system – oxygen isotopic composition of river water and skeletal aragonite of Unionidae in the Rhine. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 193: 73–86.
- Romanek, C.S., Grossman, E.L., Morse, J.W. 1992. Carbon isotope fractionation in synthetic aragonite and calcite: Effects of temperature and precipitation rate. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 56: 419–430.
- Rubino M., Etheridge D.M., Jenk T.M., Blunier T., Francey R.J., Trudinger C.M., Allison C.E., Battle M.O., Langenfelds R.L., Steele L.P., Curran M., Bender M., White J.W.C. 2013. A revised 1000 year atmospheric  $\delta^{13}\text{C}$ - $\text{CO}_2$  record from Law Dome and South Pole, Antarctica. *Journal of geophysical research. Atmospheres* 118: 8482–8499.
- Sakalauskaite, J., Andersen, S.H., Biagi, P., Borrello, M.A., Cocqueruz, T., Colonese, A.C., Dal Bello, F., Girod, A., Heu-müller, M., Koon, H., Mandili, G., Medana, C., Penkman, K.E., Plasseraud, L., Schlichtherle, H., Taylor, S., Tokarski, C., Thomas, J., Wilson, J., Marin, F., Demarchi, B. 2019. 'Palaeoshellomics' reveals the use of freshwater mother-of-pearl in prehistory. *Elife* 8.
- Schöll-Barna, G., Demény, A., Serlegi, G., Fábíán, S., Süme-gi, P., Fórizs, I., Bajnóczi, B. 2012. Climatic variability in the Late Copper Age: stable isotope fluctuation of prehistoric *Unio pictorum* (Unionidae) shells from Lake Balaton (Hungary). *Journal of Paleolimnology* 47: 87–100.
- Schöne, B.R., Dunca, E., Mutvei, H., Norlund, U. 2004. A 217-year record of summer air temperature reconstructed from freshwater pearl mussels (*M. margaritifera*, Sweden). *Quaternary Science Reviews* 23: 1803–1816.
- Schöne, B.R., Fiebig, J. 2009. Seasonality in the North Sea during the Allerød and Late Medieval Climate Optimum using bivalve sclerochronology. *International Journal of Earth Sciences* 98: 83–98.
- Schöne, B.R., Gillikin, D.P. 2013. Unraveling environmental histories from skeletal diaries – Advances in sclerochronology. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 373: 1–5.
- Shanahan, T.M., Pigati, J.S., Dettman, D.L., Quade, J. 2005. Isotopic variability in the aragonite shells of freshwater gastropods living in springs with nearly constant temperature and isotopic composition. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 69: 3949–3966.
- Sobkowiak-Tabaka, I., Kubiak-Martens, L., Okuniewska-Nowaczyk, I., Ratajczak-Szczerba, M., Kurzawska, A., Kufel-Diakowska, B. 2018. Reconstruction of the Late Glacial and Early Holocene landscape and human presence in Lubrza, Western Poland, on the basis of multidisciplinary analyses. *Environmental Archaeology* 23: 123–136.
- Stuiver, M. 1970. Oxygen and carbon isotope ratios of freshwater carbonates as climatic indicators. *Journal of Geophysical Research* (1896–1977) 75: 5247–5257.
- Szymanek, M. 2014. Environmental changes of the Mazovian (Holsteinian/~MIS 11) palaeolake near Szymanowo (eastern Poland) in the light of malacological analysis. *Acta Geologica Polonica* 64: 249–260.
- Szymanek, M. 2016. Stable isotope composition of the Holsteinian (MIS 11) freshwater snail *Valvata piscinalis* (O.F. Müller, 1774) from eastern Poland and its palaeoenvironmental implications. *Journal of Quaternary Science* 31: 622–630.
- Szymanek, M., Bińka, K., Nitychoruk, J. 2016. Stable  $^{18}\text{O}$  and  $^{13}\text{C}$  isotope records of *Viviparus diluvianus* (Kunth, 1865) shells from Holsteinian (MIS 11) lakes of eastern Poland as palaeoenvironmental and palaeoclimatic proxies. *Boreas* 45: 109–121.
- Taft, L., Mischke, S., Wiechert, U., Leipe, C., Rajabov, I., Riedel, F. 2014. Sclerochronological oxygen and carbon isotope ratios in *Radix* (Gastropoda) shells indicate changes of glacial meltwater flux and temperature since 4,200 cal yr BP at Lake Karakul, eastern Pamirs (Tajikistan). *Journal of Paleolimnology* 52: 27–41.
- Tarutani, T., Clayton, R.N., Mayeda, T.K. 1969. The effect of polymorphism and magnesium substitution on oxygen isotope fractionation between calcium carbonate and water. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 33: 987–996.
- Urey, H.C., Lowenstam, H.A., Epstein, S., Mckinney, C.R. 1951. Measurement of paleotemperatures and temperatures



- of the Upper Cretaceous of England, Denmark, and the Southeastern United States. *GSA Bulletin* 62: 399–416.
- Verburg, P. 2007. The need to correct for the Suess effect in the application of  $\delta^{13}\text{C}$  in sediment of autotrophic Lake Tanganyika, as a productivity proxy in the Anthropocene. *Journal of Paleolimnology* 37: 591–602.
- Verdegaal, S., Troelstra, S.R., Beets, C.J., Vonhof, H.B. 2005. Stable isotopic records in unionid shells as a palaeoenvironmental tool. *Netherlands Journal of Geosciences* 84: 403–408.
- Versteegh, E.A.A., Troelstra, S.R., Vonhof, H.B.B. Kroon, D. 2009. Oxygen isotope composition of bivalve seasonal growth increments and ambient water in the Rivers Rhine and Meuse. *Palaos* 24: 497–504.
- von Grafenstein, U., Eicher, U., Erlenkeuser, H., Ruch, P., Schwander, J., Ammann, B. 2000. Isotope signature of the Younger Dryas and two minor oscillations at Gerzensee (Switzerland): palaeoclimatic and palaeolimnologic interpretation based on bulk and biogenic carbonates. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 159: 215–229.
- von Grafenstein, U., Erlenkeuser, H., Trimborn, P. 1999. Oxygen and carbon isotopes in modern fresh-water ostracod valves: assessing vital offsets and autecological effects of interest for palaeoclimate studies. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 148: 133–152.
- Wurster, C., Patterson, W. 2001. Seasonal variation in stable oxygen and carbon isotope values recovered from modern lacustrine freshwater mollusks: paleoclimatological implications for sub-weekly temperature records. *Journal of Paleolimnology* 26: 205–218.
- Yu, Z., 2000. Ecosystem response to Lateglacial and early Holocene climate oscillations in the Great Lakes region of North America. *Quaternary Science Reviews* 19: 1723–1747.
- Zanchetta, G., Bonadonna, F.P., Leone, G., 1999. A 37-meter Record of Paleoclimatological Events from Stable Isotope Data on Continental Molluscs in Valle di Castiglione, Near Rome, Italy. *Quaternary Research* 52: 293–299.
- Zawiska, I., Apolinarska, K., Woszczyk, M., 2019. Holocene climate vs. catchment forcing on a shallow, eutrophic lake in eastern Poland. *Boreas* 48: 166–178.









# Archeozoologia

Jarosław Wilczyński

---

## WPROWADZENIE

Archeozoologia jest nauką łączącą w sobie elementy dwóch dyscyplin: archeologii, zaliczanej do dziedzin nauk humanistycznych oraz zoologii, zaliczanej do nauk biologicznych i będącej częścią nauk ścisłych oraz przyrodniczych (w świetle obowiązującego rozporządzenia ówczesnego Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z 2018 r.). Jej celem, w największym skrócie, jest rekonstrukcja szeroko rozumianych wzorców egzystencji dawnych społeczności ludzkich, zarówno tych łowiecko-zbierackich, jak i tych posługujących się gospodarką wytwórczą (Klein i Cruz-Urbe 1984; Olsen i Shipman 1988; Benecke 1994; Marciniak 1996; Reitz i Wing 1999; Lasota-Moskalewska 2008). Nazwa tej dyscypliny naukowej powstała z połączenia dwóch słów *archeo-* i *zoologia* i w sposób klarowny już na wstępie identyfikuje zarówno sam przedmiot badań – szczątki zwierzęce, jak i kontekst, z którego on pochodzi – stanowiska archeologiczne. Jej istotą jest dokładny opis odkrywanych szczątków zwierzęcych obejmujący przede wszystkim określenie ich przynależności gatunkowej, składu anatomicznego, struktury wiekowej oraz morfotypu, czyli budowy morfologicznej, i umieszczenie ich w odpowiednim kontekście. Pozwala to zrekonstruować proces tworzenia się danego nagromadzenia szczątków kostnych, a także

określić znaczenie i rolę zwierząt w gospodarce dawnych społeczności ludzkich. Na etapie opisu materiału osteologicznego istotną częścią analizy jest także opisanie wszelkich śladów działania czynników biotycznych, do których zaliczamy przede wszystkim działanie człowieka i zwierząt, oraz abiotycznych, tj. działanie czynników fizykochemicznych. W ramach omawianej dyscypliny istotnym zagadnieniem są badania nad udomowieniem zwierząt dzikich (Clutton-Brock 1987; Lasota-Moskalewska 2005), obecnie mocno wspierane przez analizę antycznego DNA.

W tym miejscu należałoby poruszyć kwestię istnienia dwóch terminów określających badania nad szczątkami zwierzęcymi ze stanowisk archeologicznych, tj. archeozoologii oraz zooarcheologii. Zagadnienie to zostało obszernie omówione przez L. Bartosiewicza w artykule zatytułowanym: *Archaeozoology or zooarchaeology?: a problem from the last century* (2001). Pierwszy termin wywodzi się z nurtu badań silnie związanych z naukami humanistycznymi i używany jest najczęściej w kręgu badaczy europejskich, w szczególności z obszaru szeroko pojętej Europy Środkowej. Skupia się on w głównej mierze na opisie zwierzęcych szczątków kostnych w kontekście archeologicznym, kładąc silny nacisk na te cechy zwierzęce, które są istotne z punktu widzenia człowieka. Drugi termin wykorzystywany jest głównie przez badaczy związanych

ze środowiskiem ogólnie określanym mianem anglosaskiego, mających silne związki z naukami ścisłymi, którzy włączają do metodologii swych badań szereg zagadnień tafonomicznych, czyli związanych z szeroko rozumianymi procesami postdepozycyjnymi mającymi bezpośredni wpływ na zachowywanie się materiału zwierzęcego. W tym kontekście najważniejsze jest opisanie wszelkich zaobserwowanych zmian występujących na powierzchniach kości.

Wraz z rozwojem tej dyscypliny nauki oraz poszerzaniem jej aparatu analitycznego archeozoologia coraz bardziej odchodzi od „suchego” opisu materiału kopalnego, polegającego na określaniu liczby szczątków poszczególnych gatunków, którą w prosty sposób identyfikowano z liczbą pogłowia reprezentowanego na stanowisku, na rzecz pogłębionej interpretacji mającej na celu określenie przyczyn, które doprowadziły do powstania danego nagromadzenia szczątków zwierzęcych, obejmujących zarówno kulturowe, jak i przyrodnicze aspekty tego zagadnienia. Odpowiada to ujęciu A. Marciniaka (1999), który rozpatruje analizę materiałów faunistycznych na dwóch poziomach: humanistycznym, czyli wykorzystującym teorie społeczne i antropologiczne do kulturowej interpretacji materiału, oraz przyrodniczym, mającym za zadanie wyjaśnić zagadnienia związane z ekologią oraz procesami formowania się depozytu kostnego. W takim ujęciu archeozoologia, podobnie jak zooarcheologia, pozostaje ostatecznie interdyscyplinarna i nie można jej zaszufladkować ani w kręgu wyłącznie nauk ścisłych, ani też humanistycznych (Albarella 2017).

Badania archeozoologiczne skoncentrowane na opisie szczątków zwierzęcych na poziomie interpretacji wyników czerpią, w dużej mierze, z badań eksperymentalnych mających na celu wyjaśnienie przyczyn powstawania konkretnych śladów obserwowanych na materiale osteologicznym, jak również aktualistycznych badań etnograficznych i czysto tafonomicznych. Na podstawie tych badań możliwe jest przedstawienie przypuszczalnych przyczyn powstania danego nagromadzenia szczątków kostnych czy tempa jego formowania się, a dzięki analizie źródeł archeologicznych możliwe jest ułożenie go we właściwym kontekście. Końcowym wynikiem analizy archeozoologicznej jest uzyskanie szeregu informacji będących podstawą do rekonstrukcji zachowań dawnych społeczności ludzkich i pozwalają poznać i zrozumieć ich organizację społeczną, ekonomiczną, dietę czy religię.

## PRZEDMIOT BADAŃ

Przedmiotem badań archeozoologii są szczątki zwierzęce odkrywane na stanowiskach archeologicznych (ryc. 1), przy czym w kręgu zainteresowań specjalistów tej dyscypliny pozostają nie tylko najliczniej reprezentowane szczątki kostne ssaków, lecz również szczątki pozostałych grup kręgowców, tj. ryb, płazów, gadów i ptaków, a także mięczaków (por. Kurzawska, w tym tomie), a nawet skorupiaków (np. raków) (Marciniak 1996; Lasota-Moskalewska 1997; 2008). Zaznaczyć przy tym należy, że przedmiotem zainteresowania tej dyscypliny naukowej są nie tylko same szczątki zwierzęce, lecz również wytwory rąk ludzkich (m.in. narzędzia i ozdoby), do produkcji których wykorzystano surowiec zwierzęcy, głównie kości, zęby lub poroże. Ponieważ niezwykle bogactwo świata przyrodniczego ma swe bezpośrednie odbicie w różnorodności materiałów zoologicznych odkrywanych w trakcie badań wykopaliskowych, nie jest możliwe, aby pojedynczy badacz był w stanie, w sposób satysfakcjonujący, opanować anatomię różnych gromad zwierząt, od ryb, poprzez ptaki, aż do ssaków (nie wspominając o płazach i gadach, również odkrywanych na stanowiskach jaskiniowych czy funeralnych). To powoduje sytuację, kiedy w opracowaniach materiałów zwierzęcych pochodzących z pojedynczego stanowiska uczestniczy kilku archeozoologów lub zoologów.

Dodatkowo archeozoologowie badają szczątki zwierząt obecnie już wymarłych (np. mamut, nosorożec włochaty i niedźwiedź jaskiniowy) lub już niewystępujących na terytorium Polski (np. renifer, wół pizmowy i rosomak).

## SPECYFIKA BADAŃ ARCHEOZOLOGICZNYCH

O specyfice omawianej dyscypliny decyduje sam przedmiot badań, jakim są szczątki zwierzęce, które w określonych warunkach ulegają znacznemu rozproszeniu lub całkowitemu zniszczeniu. Dzieje się tak z powodu ich dużej wrażliwości na działanie warunków środowiskowych, także i za sprawą samego człowieka, co w sposób znaczący odróżnia materiał osteologiczny od typowych wyrobów ludzkich będących przedmiotem badań archeologa, tj. wyrobów ceramicznych czy kamiennych. Dlatego trzeba

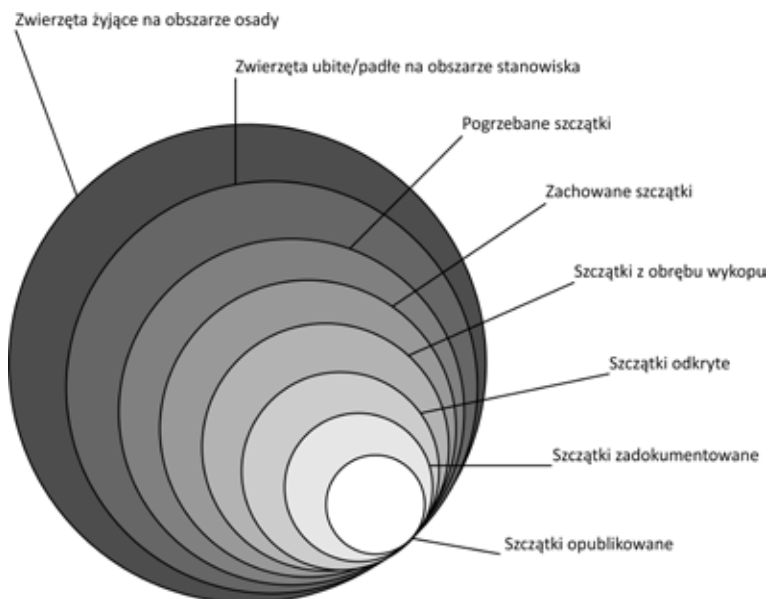


**Ryc. 1.** Standardowa próba szczątków zwierzęcych z wypełniska obiektu prehistorycznego. Fot. J. Wilczyński

mieć na uwadze, że szczątki zwierzęce odkrywane na danym stanowisku nie odpowiadają faktycznej liczbie zwierząt trzymanyh tu w przeszłości. Z tego też powodu należy bardzo ostrożnie podchodzić do wszelkich prób rekonstrukcji pierwotnej wielkości pogłowia zwierząt hodowanych na danej osadzie, sporządzanych na podstawie analizy zachowanego materiału osteologicznego. Podejmując taką próbę, trzeba wziąć pod uwagę szereg czynników, które są odpowiedzialne za powstanie danego nagromadzenia kości. Są to przede wszystkim: wiek oraz funkcja, jaką stanowisko pełniło w przeszłości (schronisko jaskiniowe, osada otwarta i tell), czas trwania oraz intensywność procesów osadniczych (krótkotrwałe schronisko łowieckie, miasto średniowieczne) czy sposób formowania i przeobrażania się wraz z upływem czasu samego stanowiska. Wpływ na rodzaj materiału osteologicznego pozyskanego na drodze badań wykopaliskowych mają także

czynniki bardziej dyskretne, jak np. organizacja społeczna, struktura prowadzonej hodowli, miejsce uboju zwierząt, obecność na stanowisku psów czy sposób porządkowania stanowiska. Niezwykle ważny jest również kontekst, w jakim kości zwierzęce zostały odkryte, który w silny sposób determinuje rodzaj oraz ilość zachowujących się szczątków. Informacja ta odnosi się nie tylko do rodzaju obiektu, w którym odkryty został dany zespół faunistyczny (studnia, jama, warstwa kulturowa), ale także jego położenia w obrębie badanego stanowiska, gdzie wpływ na charakter samych obiektów oraz na to, co odkrywa się w ich obrębie, jest bezpośrednio związany z organizacją przestrzenną funkcjonującego stanowiska. Innych materiałów bowiem dostarczy obszar średniowiecznego rynku, a inny uzyskany zostanie z terenu klasztoru czy jatek miejskich. Wpływ na zachowany materiał osteologiczny będzie miało również oddziaływanie





**Ryc. 2.** Diagram ukazujący utratę informacji z poziomu żywej populacji a opublikowanymi danymi (za Bogucki 2008 z modyfikacją)

środowiska naturalnego (kwasowość gleby, dostęp drapieżników do resztek pokonsumpcyjnych) czy wreszcie zastosowana metodyka badań wykopaliskowych oraz sposób przechowywania zbiorów (celowa segregacja zebranego materiału – wybieranie tylko dużych kości, zastosowanie w trakcie badań wykopaliskowych sit do płukania sedymentów).

Sytuację tę w sposób najbardziej dobitny obrazuje rycina 2, ukazująca stopień utraty informacji, jaką obserwujemy pomiędzy rzeczywistą liczbą zwierząt żyjących na obszarze stanowiska a danymi, które zostają ostatecznie publikowane. Ta nietrwałość materiałów źródłowych, na których opierają się badania archeozoologiczne, powoduje konieczność wydatkowania dużej ilości czasu i energii na poznanie procesów (zarówno kulturowych, jak i tafonomicznych), jakie doprowadziły do powstania danego nagromadzenia szczątków zwierzęcych, bez czego nie jest możliwe poznanie relacji zachodzących pomiędzy człowiekiem a światem zwierzęcym czy roli, jaką poszczególne gatunki zwierząt odgrywały w badanych społecznościach pradziejowych.

## ZARYS HISTORII BADAŃ

Historia badań archeozoologicznych ma stosunkowo długą tradycję liczącą ponad 170 lat. Zapoczątkowały ją badania olbrzymich nagromadzeń muszli mięczaków morskich odkrywanych na

obszarze Danii w połowie XIX w. (Forchhammer i in. 1851-56). W swojej pracy Forchhammer wraz ze współpracownikami po raz pierwszy dokonał dokładnego rozróżnienia pomiędzy paleontologicznymi a archeologicznymi nagromadzeniami szczątków zwierzęcych, co stało się punktem wyjścia do powstania nowej dyscypliny nauki – archeozoologii. Wraz z jej rozwojem znacznemu poszerzeniu ulegał zarówno zakres stosowanej metodyki, jak i sama terminologia, przy czym, jak wspomniano wyżej, doszło do wyodrębnienia się dwóch pokrewnych dyscyplin naukowych określanych mianem archeozoologii i zooarcheologii, mających ten sam przedmiot badań, ale rozkładających nieco odmiennie akcenty jeśli chodzi o metodologię czy zakres zainteresowań badawczych.

W Polsce percepcja badań archeozoologicznych przez środowisko archeologów nastąpiła późno i to pomimo pojawienia się pierwszych opracowań jeszcze pod koniec XIX i w 1. poł. XX w. (G. Ossowski, E. Lubicz-Niezabitowski). Niemniej w naukowej literaturze polskiej opracowania szczątków zwierzęcych już od dawna towarzyszyły publikacjom materiałów archeologicznych, a same badania archeozoologiczne prowadzone były w kilku ośrodkach w Polsce. Przede wszystkim należy wymienić tutaj ośrodki weterynaryjne, zajmujące się analizami szczątków zwierzęcych, tj.: ośrodek poznański z kierownikiem prof. Marianem Sobocińskim, wrocławski z kierownikiem prof. Piotrem Wyrostem, warszawski, któremu przewodził prof. Kazimierz

Krysiak oraz szczeciński z kierownikiem prof. Marianem Kubasiewiczem. Nie możemy zapominać również o prof. M. Sobocińskim, badaczu związanym z różnymi ośrodkami naukowymi we Lwowie, Wrocławiu oraz Poznaniu. Jeszcze w 2. poł. XX w. doszło do znaczących zmian w tej strukturze, czemu sprzyjało powstanie kilku ośrodków zajmujących się tą tematyką badań działających w obrębie uczelni wyższych i instytutów naukowych PAN. Mam tutaj na myśli powstanie ośrodka warszawskiego z wieloletnią liderką tych badań w Polsce, prof. Alicją Lasotą-Moskalewską, a po przejściu Pani Profesor na emeryturę, kontynuujące te badania dr hab. J. Piątkowską-Malecką i dr Annę Gręzak. Kolejnym ważnym ośrodkiem prowadzącym badania archeozoologiczne jest Toruń. Kierujący tą jednostką prof. Daniel Makowiecki, pracujący wcześniej w Instytucie Archeologii i Etnologii PAN w Poznaniu, jest niekwestionowanym autorytetem, jeśli chodzi o szczątki ryb. Badania archeozoologiczne prowadzone są również w ośrodku krakowskim. Początkowo skupiały się one na materiałach plejstocenijskich (w tym gatunkach już wymarłych jak mamut czy nosorożec włochaty), a obecnie, wraz z powiększaniem się kolekcji osteologicznej, obejmują różnowiekowe materiały holocenijskie, nie pomijając zespołów nowożytnych. Wśród badaczy z tego ośrodka wymienić należy prof. Henryka Kubiaka, dr. hab. Piotra Wojtala czy autora niniejszego tekstu. Badania archeologiczne w Krakowie przez wiele lat prowadziła również zatrudniona w Instytucie Archeologii i Etnologii PAN Danuta Makowicz-Polisztot. Do grona badaczy archeozoologów należą również dr Renata Abłamowicz z Muzeum Śląskiego, dr. hab. Aleksander Chrószcz z Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu oraz dr hab. Marta Osypińska związana do niedawna z Instytutem Archeologii i Etnologii PAN, a obecnie zatrudniona na Uniwersytecie Wrocławskim. Wyodrębnienie archeozoologii jako osobnej dyscypliny naukowej nie byłoby możliwe bez prac teoretycznych, próbujących opisać sam przedmiot badań oraz stworzyć adekwatną metodykę. Pierwsze prace dotyczące teorii archeozoologii w języku polskim zaczęły się pojawiać w połowie lat 90. Należy tutaj wymienić publikacje prof. Arkadiusza Marciniaka z ośrodka poznańskiego oraz wspomnianej już prof. Alicji Lasoty-Moskalewskiej (Marciniak 1996; 1999; 2005; Lasota-Moskalewska 1997; 2008).

## WYKORZYSTANIE W ARCHEOLOGII

Należy podkreślić, że studia nad zmianami w gospodarce hodowlanej człowieka należą do tych zagadnień prehistorii, które mają kluczowe znaczenia dla poznania dawnych społeczności ludzkich, szczególnie w kontekście rozwoju kulturowego. Informacje pozyskane na drodze badań archeozoologicznych mają również istotne znaczenie w procesie rekonstrukcji dawnych modeli gospodarczych, w tym roli, jaką poszczególne gatunki zwierząt odgrywały w wytwórstwie, jako źródło surowca, w transporcie, rolnictwie, handlu i kulturze symbolicznej czy znaczenia łowiectwa. Tym samym archeozoologia stanowi nieocenione źródło informacji o minionych społecznościach.

## CZYM SIĘ ZAJMUJE ARCHEOZOOLOGIA? NA JAKIE PYTANIA BADAWCZE ODPOWIADA?

Archeozoologia, chociaż jest samodzielną dyscypliną naukową, traktowana jest także jako nauka pomocnicza archeologii. W takim ujęciu ma za zadanie poznanie roli zwierząt w rozwoju społeczności ludzkich, a także wpływu człowieka na kształtowanie się cech osobniczych zwierząt hodowlanych na przestrzeni dziejów. W ostatnim czasie coraz większy nacisk w badaniach archeozoologicznych kładzie się na lepsze poznanie procesów odpowiedzialnych za powstanie nagromadzeń szczątków zwierzęcych, dzieląc to pole zainteresowań z tafonomią i zbliżając się nieco do zooarcheologii.

Swymi badaniami archeozoologia obejmuje cały okres rozwoju kultury ludzkiej, od grup łowiecko-zbierackich żyjących w okresie starszej i środkowej epoki kamienia, poprzez społeczności pierwszych rolników i pasterzy (młodsza epoka kamienia), aż do czasów współczesnych. W przypadku stanowisk plejstocenijskich badania archeozoologiczne skupiają się na określeniu strategii łowieckich stosowanych przez grupy łowiecko-zbierackie, a także próbach wykluczenia lub potwierdzenia udziału człowieka w procesie akumulacji szczątków zwierzęcych na danym stanowisku (co odnotowuje się głównie w przypadku stanowisk jaskiniowych). Badania materiałów młodszych, obejmujących czasy rozwoju gospodarki wytwórczej, skupiają się na próbach

rekonstrukcji stosowanego modelu gospodarki hodowlanej, roli łowiectwa czy sposobie wykorzystywania poszczególnych gatunków zwierząt hodowlanych i dzikich. Dodatkowo badania archeozoologiczne są pomocne przy określeniu funkcji, jaką dane stanowisko lub jego część pełniło w przeszłości, stając się cennym narzędziem przy wyznaczaniu stref aktywności ludzkiej czy określaniu organizacji przestrzennej stanowisk.

### **METODOLOGIA BADAŃ ARCHEOZOOLOGICZNYCH**

Aby wyniki badań archeozoologicznych dostarczały wiarygodnych i miarodajnych rezultatów, niezbędne jest zachowanie przez archeologa z góry ustalonych procedur. Przede wszystkim konieczne jest zastosowanie odpowiedniego sposobu eksploracji nawarstwień, dostosowanego do rodzaju stanowiska i występujących na nim sedymentów. Oczywiście wykorzystywane do tego celu narzędzia również powinny być dobrane pod takim kątem, aby w jak największym stopniu ograniczyć destrukcję szczątków. Drugim niezwykle ważnym warunkiem, którego spełnienie gwarantuje uzyskanie miarodajnych wyników analizy archeozoologicznej, jest zbieranie wszystkich odkrytych szczątków kostnych. Niedopuszczalna jest wstępna selekcja materiału przeznaczonego do zainwentaryzowania i finalnie opracowania, a polegająca na wybieraniu tylko określonych szczątków zwierzęcych (np. kości określonych rozmiarów) lub zbieranie materiałów występujących tylko w określonych obiektach lub w obrębie wydzielonych jednostek stratygraficznych. Najlepszym rozwiązaniem jest przepłukiwanie sedymentu przy użyciu sit o różnej średnicy oczek. Zabiegowi temu powinno się poddawać cały sedyment pochodzący z wypełnisk obiektów oraz warstw kulturowych, dzięki czemu do minimum ogranicza się możliwość przeoczenia drobnych szczątków zwierzęcych (łusek i ości ryb, zębów gryzoni i muszli), a także szczątków roślinnych (m.in. ziarniaków, pestek, fragmentów drewna; por. Moskal-del Hoyo, w tym tomie), drobnych fragmentów ceramiki, polepy czy wyrobów metalowych. Jednak ze względu na jej czasochłonność, w praktyce metodykę taką stosuje się obecnie przede wszystkim na stanowiskach plejstocenijskich, głównie w obiektach jaskiniowych. Rozwiązaniem

pośrednim jest zastosowanie sit do przesiewania materiału na sucho.

W trakcie ręcznej eksploracji nawarstwień niekiedy dochodzi do wtórnej fragmentacji materiału kostnego, często w wyniku złego stanu zachowania szczątków kostnych. W takim przypadku należy pamiętać o tym, aby wtórnie pofragmentowane szczątki zostały zbierane razem, co na etapie opisu materiału przyspieszy jego opracowanie. Samo dokumentowanie szczątków zwierzęcych zależy od przyjętej strategii eksploracji nawarstwień (zbieranie materiału w obrębie warstw mechanicznych lub namierzanie trójwymiarowe każdej kości). Inaczej wygląda eksploracja grobów lub innych obiektów zachowujących pierwotny, intencjonalny układ szczątków zwierzęcych. W takim przypadku odkryty szkielet czy też jego fragmenty odsłania się w całości na eksplorowanej powierzchni, po czym przystępuje do jego dokumentacji (rysunkowej i fotograficznej). Powinna być ona przeprowadzona w taki sposób, aby uchwycić jego relacje z towarzyszącymi mu obiektami w obrębie oryginalnego układu przestrzennego, np. jamy grobowej czy budynku. Dopiero po tak przeprowadzonej dokumentacji można przystąpić do wydobywania odsłoniętych szczątków kostnych, rejestrując sukcesywnie za pomocą odpowiednich urządzeń położenie każdej kości lub ich skupień. Powyższe zasady są analogiczne do tych, jakie stosuje się do innych materiałów archeologicznych: ceramiki czy wyrobów kamiennych. Jest to o tyle ważne, że często w obrębie pomijanych przez archeologów materiałów kostnych znajdują się ozdoby czy narzędzia, do produkcji których wykorzystano właśnie zwierzęce kości, zęby lub poroże.

Zwierzęce szczątki kostne, po wydobywaniu z sedymentu i zainwentaryzowaniu, przed dalszą analizą powinny być umyte. Często wskazane jest, aby materiał kostny bezpośrednio po jego wydobywaniu początkowo przesechł i dopiero później był myty. Aby na tym etapie do minimum ograniczyć dalszą destrukcję szczątków kostnych, niedopuszczalne jest wstępne oskrobywanie kości szpachelkami czy innymi metalowymi przedmiotami, a także używanie do mycia zbyt twardych szczoteczek. Ważne, aby suszenie materiału kostnego odbywało się w zacienionym pomieszczeniu, w którym utrzymuje się stała pokojowa temperatura. Powinno się unikać wystawiania umytego materiału na działanie promieni słonecznych czy umieszczania go



w pomieszczeniach o wysokiej temperaturze. W takiej sytuacji dochodzi do gwałtownego, nierównomiernego odparowania wody z umytej kości, co powoduje jej wtórne niszczenie. Szkodliwe jest również niewłaściwe przechowywanie szczątków zwierzęcych: albo w pomieszczeniach zbyt suchych, albo zbyt wilgotnych. Ważne jest, aby przed złożeniem szczątków kostnych do magazynu zostały one właściwie osuszone, tak aby zapobiec rozwojowi grzybów. Szczątki kostne mogą być przechowywane w transparentnych plastikowych workach strunowych, które w tym przypadku wydają się niezwykle praktyczne. W wyjątkowych przypadkach należy stosować również plastikowe pudełka membranowe, unieruchamiające przechowywany przedmiot, a jednocześnie umożliwiające jego obserwację.

Ponieważ materiał zwierzęcy na stanowiskach archeologicznych możemy uznać za materiał masowy, na pierwszym etapie jego opisu oceniamy stan zachowania kości oraz dokonujemy ich identyfikacji taksonomicznej i anatomicznej na podstawie obserwacji makroskopowych. Dopiero w przypadku wykrycia na kości bardziej dyskretnych śladów, w postaci np. nacięć, badacz sięga po instrumenty optyczne. Obecnie w badaniach archeozoologicznych podczas interpretacji śladów występujących na szczątkach zwierzęcych powszechnie wykorzystywane są lupy binokularowe czy stereoskopowe mikroskopy optyczne. Są one używane m.in. w celu określenia typu narzędzia, przy użyciu którego dane ślady powstały (np. rozróżnienie śladów powstałych przy użyciu narzędzi kamiennych i metalowych). Bardziej zaawansowane technologie, nie wyłączając np. użycia skaningowego mikroskopu elektronowego czy tomografii komputerowej, wykorzystywane są przy badaniach wszelkich mikrośladów czy zmian zachodzących wewnątrz kości. Niezwykle istotną częścią działalności archeozologa jest także identyfikacja różnorodnych wtórnych uszkodzeń widocznych na kościach, a powstałych w trakcie eksploracji.

Generalnie proces opisu szczątków zwierzęcych skupia się na kilku aspektach:

- określeniu przynależności taksonomicznej oraz anatomicznej opisywanych szczątków zwierzęcych, wraz z określeniem wieku osobniczego, morfotypu zwierzęcia czy obecności zmian patologicznych;
- opisie stanu zachowania badanego materiału z uwzględnieniem jego fragmentacji;

- opisie śladów działalności ludzkiej oraz zwierzęcej, ze szczególnym uwzględnieniem lokalizacji śladów obserwowanych na danym elemencie szkieletu.

Na końcu wszystkie zebrane dane poddawane są obróbce statystycznej oraz interpretacji w oparciu o kontekst, z którego pochodzą.

W toku przeprowadzonej analizy kości, które uległy wtórnej fragmentacji (np. podczas eksploracji czy mycia), składa się w anatomiczną całość, która jest opisywana jako pojedynczy element. Zapobiega to sztucznemu zawyżeniu frekwencji tych partii szkieletu, które są szczególnie narażone na fragmentację (np. czaszka), dzięki czemu wyniki przedstawionej analizy są bardziej wiarygodne i miarodajne. Za niemethodyczne możemy uznać zliczanie drobnych fragmentów pierwotnie należących do pojedynczego elementu anatomicznego, który uległ destrukcji w wyniku działalności różnorodnych procesów postdepozycyjnych lub w trakcie jego wydobywania z sedymentu.

Identyfikację taksonomiczną oraz anatomiczną przeprowadza się przy użyciu dostępnego materiału porównawczego, na podstawie opublikowanych kluczy identyfikacyjnych (np. Schmid 1972; Pales i Garcia 1981a; 1981b) oraz indywidualnych doświadczeń badacza. Szczególnie istotna dla tego etapu analizy materiałów osteologicznych jest dostępność bogatej kolekcji porównawczej, która powinna zawierać nie tylko jak największą liczbę gatunków, lecz również jak największą liczbę osobników poszczególnych taksonów, wliczając osobniki w różnym wieku, różnej płci czy morfotypu, co w sposób znaczący ułatwia poprawną identyfikację badanego materiału. Część szczątków kostnych ze względu na znaczną fragmentację i brak cech diagnostycznych zostaje ogólnie przyporządkowana do kategorii wielkościowych zwierząt, tj. ssaków dużych (wielkości bydła/konia), średnich (wielkości świni-kozy/owcy) oraz małych (wielkości lisa/zajaca). Fragmenty kości bez widocznych cech morfologicznych lub nierozwinięte kości bardzo młodych zwierząt zostają najczęściej klasyfikowane jako nieokreślone. Jeżeli jest to możliwe, badacz opisujący materiał zoologiczny powinien starać się określić wiek poszczególnych osobników. Ocenę tę wykonuje się m.in. na podstawie kolejności wyrzynania się zębów mlecznych i stałych oraz stopnia ich starcia, w mniejszym stopniu bierze się pod uwagę kolejność przyrastania nasad do trzonów kości długich

oraz płaskich. Ocena wieku jest pomocna przy ustalaniu liczby osobników obecnej na stanowisku, ale przede wszystkim na jej podstawie możliwe jest tworzenie tzw. profili śmiertelności poszczególnych gatunków, służących do oceny przeżywalności danej populacji. Ich analiza ma na celu poznanie strategii łowieckich społeczności łowiecko-zbierackich (np. wybijanie całych stad czy zabijanie tylko wybranych grup wiekowych, np. osobników młodych) lub sposobów zarządzania żywym inwentarzem przez społeczności rolnicze i pasterskie (np. mięsny lub mleczny profil gospodarki zwierzęcej) (Stiner 1990; 1994; Discamps i Costamagno 2015). Z kolei w celu określenia typu budowy zwierzęcia (morfotypu) i oszacowania jego wielkości wykonuje się szereg pomiarów osteometrycznych, postępując zgodnie ze standardami opisanymi w literaturze (np. von den Driesch 1976), przy czym mierzy się tylko kości dorosłych osobników z przyrośniętymi powierzchniami stawowymi, całe lub fragmenty okazów z zachowaną mierzalną częścią. Do obliczenia wysokości w kłębie wykorzystane są powszechnie informacje zawarte w literaturze archeozoologicznej (np. Calkin 1970; Lasota-Moskalewska 1980; Meadow 1999). Istotną, chociaż często trudną do przeprowadzenia, jest także próba określenia płci odkrywanych osobników.

Przy opisie materiałów osteologicznych ważne jest również zwrócenie uwagi na wszelkie zmiany patologiczne powstałe w trakcie życia danego osobnika, mogące świadczyć np. o urazach fizycznych (np. złamaniach), przebytych chorobach czy złych warunkach hodowli. Powstanie tego typu zmian może również być związane z określonym sposobem traktowania niektórych zwierząt hodowlanych, np. patologiczne zmiany w szkielecie bydła powstałe w wyniku ich wykorzystania w transporcie (Bartosiewicz i in. 1997; De Cupere i in. 2000; Groot 2005; Johannsen 2005) czy ślady wskazujące na wykorzystanie koni jako zwierząt jucznych, co ma akurat niebagatelne znaczenie przy próbach ustalenia momentu udomowienia tego gatunku (Levine 1999; Levine i in. 2000; Oates 2003).

Ocenę stanu zachowania szczątków wykonuje się przede wszystkim w celu określenia stopnia zniszczenia materiału osteologicznego. Wskutek oddziaływania m.in. słońca, zmian temperatury, wilgotności oraz kwasowości składniki organiczne i nieorganiczne ulegają rozdzieleniu, efektem czego jest wietrzenie (fizyczne, chemiczne) i stopniowy

rozpad szczątków na drobne fragmenty. Szczątki takie są następnie narażone na działanie różnych czynników o podłożu zarówno antropogenicznym, jak i naturalnym, które dodatkowo osłabiają strukturę kości i przyczyniają się do jej rozpadu. W rezultacie tego procesu często dochodzi do zniszczenia większości szczątków kostnych, obecnych pierwotnie na stanowisku. Dlatego tak ważna dla badań archeozoologicznych jest ocena stanu zachowania materiału, jego właściwe określenie pozwala bowiem oszacować, w jakim stopniu uzyskany materiał osteologiczny poddany został czynnikom niszczącym, mającym duży wpływ na ostateczną jego ilość oraz jakość. Dodatkowo znaczne uszkodzenie szczątków kostnych często utrudnia lub nawet uniemożliwia odkrycie śladów, które potencjalnie mogły się znajdować na ich powierzchni. W opracowaniach materiałów plejstocenijskich badacze często posługują się sześciostopniową skalą wietrzenia określoną przez A.K. Behrensmeyer (1978), ale na potrzeby własnych badań i ze względu na specyfikę materiału każdy badacz może stworzyć własną ich charakterystykę. Kolejnym zagadnieniem dotyczącym stanu zachowania szczątków zwierzęcych, jest udział kości oraz zębów, jakie udało się oznaczyć do gatunku, w porównaniu z liczbą fragmentów nieokreślonych, który w pewnym stopniu jest zależny od stopnia ich zwiędnięcia. Wysoki udział szczątków nieokreślonych lub takich, które można przypisać jedynie do określonej wielkości zwierzęcia, świadczy o złym stanie zachowania materiału. Należy jednak pamiętać, że wynik ten jest również zależny od stopnia fragmentacji wynikającej zarówno z szybkości działania procesów postdepozycyjnych (szybkie pogrzebanie kości w osadzie chroni je przed dalszą fragmentacją), jak również działań, jakim tusze zwierzęce (a tym samym szczątki kostne) były poddawane przez człowieka (np. rozbijanie, rąbanie i palenie). Na etapie oceny stanu zachowania kości przeprowadzany jest również opis charakteru złamań oraz proporcji zachowanych szczątków, co dodatkowo pozwala ocenić wpływ czynników postdepozycyjnych na opisywany materiał.

W badaniach archeozoologicznych powszechnie wykorzystuje się określone współczynniki, za pomocą których możliwe jest obiektywne opisanie badanego zespołu szczątków zwierzęcych. Podstawowym współczynnikiem szeroko stosowanym w archeozoologii jest tzw. globalna liczba szczątków (ang. *number of identified specimens*, NISP). Odnosi się

ona generalnie do liczby szczątków stwierdzonych na stanowisku, najczęściej w odniesieniu do poszczególnych gatunków. Wyliczenie tego współczynnika jest niezwykle proste i szybkie, a polega na zliczeniu kości oraz zębów należących do danego taksonu. Niestety wartości obliczone na podstawie tego współczynnika mogą ulec zafałszowaniu w wyniku znacznej fragmentacji kości (a więc ze względu na stan zachowania materiałów), obecności na stanowisku całych szkieletów lub ich większych partii, a nawet ze względu na różnicę w budowie anatomicznej poszczególnych gatunków (np. liczba kości w szkielecie konia oraz psa jest różna). Tym samym NISP uwypukla znaczenie w badanym zespole tych gatunków, które były konsumowane lub przetwarzane bezpośrednio na stanowisku, w przeciwieństwie np. do zwierząt, które były ubijane poza obszarem osady.

Drugim, współczynnikiem stosowanym w archeozoologii jest minimalna liczba osobników (ang. *minimum number of individuals*, MNI). Współczynnik ten jest liczony dla globalnej liczby szczątków danego gatunku i wyraża minimalną liczbę osobników, jaką można stwierdzić w opisywanym materiale. W praktyce wyliczenie tego współczynnika sprowadza się do zliczenia najczęściej występujących w danym zespole jednoimiennych kości danego gatunku (np. lewej kości piętowej lub górnego lewego kła). Dla czytelnika, zwłaszcza nieobeznanego z metodyką archeozoologii, przede wszystkim uderzająca jest bardzo niska wartość tego współczynnika, rzadko przekraczająca liczbę 30-50 osobników. Należy jednak zdawać sobie sprawę z tego, że współczynnik ten nie wskazuje dokładnej liczby osobników rzeczywiście obecnych na stanowisku, a jest tylko obiektywną próbą oszacowania tej wielkości oraz uchwycenia pewnych proporcji istniejących pomiędzy różnymi gatunkami reprezentowanymi na danym stanowisku lub pomiędzy różnymi stanowiskami. Zdarzają się czasem próby „urealnienia” uzyskanego wyniku, polegające, np. na liczeniu tego współczynnika w rozbiciu na poszczególne obiekty zawierające szczątki zwierzęce. Rozwiązanie to nie wydaje się poprawne z kilku powodów. Po pierwsze, szczątki kostne pojedynczego osobnika mogą zostać pogrzebane w kilku obiektach, czemu sprzyjał sam proces uboju oraz konsumpcji zwierzęcia, jak również działanie procesów bezpośrednio następujących po tej czynności – np. rozwlekanie na obszarze stanowiska resztek tusz zwierzęcych przez

psy czy świnie. Po drugie, same procesy postdepozycyjne zachodzące na stanowisku oraz specyfika powstawania zasypisk obiektów wziemnych powoduje, że szczątki zwierzęce pojedynczego osobnika były deponowane w różnych obiektach. Wyjątek stanowią oczywiście wszelkie obiekty, w których dokonano intencjonalnego pogrzebania całych zwierząt lub ich części, np. w postaci ofiar zakładzinowych, darów grobowych czy intencjonalnych pochówków zwierzęcych.

Są różne metody obliczania współczynnika MNI. Najprostsza, jak już wyżej wspomniano, polega na zliczeniu najliczniej występujących na danym stanowisku jednoimiennych kości danego gatunku. Bardziej zaawansowana i czasochłonna metoda polega na przyporządkowaniu do określonej grupy wiekowej (np. osobnik młodociany, dojrzały) każdej kości oraz zęba. Na tej podstawie możliwe jest dużo dokładniejsze określenie tego współczynnika, gdzie pod uwagę jest brana nie tylko liczba poszczególnych elementów szkieletu danego gatunku, lecz również ich przynależność do różnych grup wiekowych. Jednakże jakkolwiek procedurą będziemy się posługiwać przy liczeniu MNI, ważne jest, aby porównując ze sobą poszczególne zespoły szczątków, używać jednakowej metodyki. Pomimo tego, że wyliczenie współczynnika MNI może wydawać się nieco skomplikowane, w praktyce nie jest trudne, zwłaszcza w erze powszechnej komputeryzacji, kiedy wszystkie dane przechowywane są w postaci cyfrowej.

Oprócz dwóch wyżej wymienionych współczynników, które są najprostsze w stosowaniu oraz powszechnie wykorzystywane, w dzisiejszej archeozoologii używa się dodatkowo kilku innych parametrów. Są to m.in. minimalna liczba elementów (ang. *minimum number of skeletal elements*, MNE) czy też minimalna liczba „jednostek zwierzęcych” (ang. *minimum number of animal units*, MAU), dzięki której archeozoologowie próbują oszacować m.in. znaczenie i rolę poszczególnych gatunków na podstawie nadreprezentacji na stanowisku wybranych części tusz zwierzęcych.

Ponieważ przedmiotem badań archeozoologicznych są szczątki zwierzęce odkryte na stanowiskach archeologicznych, bardzo istotnym elementem tych badań jest opis wszelkich widocznych na szczątkach śladów powstałych w wyniku działalności człowieka. Są to przede wszystkim ślady cięcia, rąbania, przepalenia czy rozbijania kości, których



identyfikacja wykonywana jest na podstawie kryteriów ustalonych przez wielu autorów (Klein i Cruz-Uribe 1984; Grant 1987; Bennet 1999; Maltby 2007; Fernández-Jalvo i Andrews 2016). Często też na podstawie badań aktualistycznych możliwe jest rozróżnienie śladów powstałych w trakcie różnych faz obróbki tuszy: skórowania, dzielenia tuszy oraz filetowania (Binford 1981; Olsen i Shipman 1988; Nilssen 2000). W celu identyfikacji spalonych szczątków kostnych często wykorzystuje się prace Buikstra i Swegle'a (1989) oraz Lymana (1994). Interpretacja śladów opalenia pozwala na stwierdzenie, czy obserwowane ślady powstały np. w trakcie obróbki termicznej mięsa (pieczenie), czy np. w wyniku wykorzystywania kości jako opału (Stiner i in. 1995).

Dla końcowej interpretacji wyników badań archeozoologicznych istotne znaczenie ma również obecność na danym stanowisku drapieżników (czy to będzie hiena jaskiniowa na stanowisku jaskiniowym, czy psy na osadzie neolitycznej), manifestująca się występowaniem na szczątkach zwierzęcych śladów gryzienia oraz trawienia (Haynes 1980; Lyman 1994). Chodzi tu zwłaszcza o silne niszczenie i rozdrabnianie materiału kostnego przez żerujące drapieżniki, a przede wszystkim pożeranie całych zwierząt (w szczególności osobników młodocianych czy ptaków). W wyniku tego działania część zespołu osteologicznego ulega bezpowrotnemu zniszczeniu, a tym samym nie jest rejestrowana w toku prowadzonej analizy archeozoologicznej, co w sposób znaczący wpływa na ostateczny wynik badań.

Podczas opisu szczątków zwierzęcych archeozoolog powinien również uwzględnić wszelkie narzędzia lub ozdoby, do produkcji których wykorzystano surowiec organiczny (kość/poroże/zęby). Celem szczegółowego opisu tego typu wyrobów w pierwszej kolejności powinna być taksonomiczna oraz anatomiczna identyfikacja kości wykorzystanych do produkcji danego przedmiotu, w drugim etapie należy opisać wszelkie modyfikacje, jakim została ona poddana w procesie produkcji oraz użytkowania danego artefaktu. W ten sposób uzyskujemy pełen zasób informacji powiązanych zarówno z badaniami archeozoologicznymi, jak i archeologicznymi koncentrującymi się na opisie technologii wykonania oraz typologii wyrobów ludzkich.

Obserwowany w ostatnich latach gwałtowny rozwój w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych stworzył nowe perspektywy również dla

archeozoologii. W orbicie zainteresowania archeozoologów znalazły się badania DNA i badania izotopowe, które dostarczają danych odnośnie do diety oraz kierunków migracji zwierząt w pradziejach. Są również źródłem informacji o zmianach klimatycznych zachodzących w przeszłości. Studia te obejmują zarówno gatunki dzikie, będące obiektem polowań, (w tym również gatunki wymarłe), jak i gatunki hodowane przez człowieka.

### **BADANIA KOPALNEGO (ANTYCZNEGO) DNA (aDNA)**

Współcześnie coraz większe zainteresowanie zyskuje możliwość prowadzenia badań antycznego DNA zwierząt kopalnych (por. M. Chyleński, w tym tomie). Przekłada się to na zwiększoną popularność oraz dostępność tego typu badań, czemu sprzyja systematyczne obniżanie kosztów takich analiz oraz powstawanie nowych ośrodków, zarówno naukowych, jak i komercyjnych, zajmujących się tego typu usługami. Badania te polegają w głównej mierze na izolacji materiału DNA z kopalnej próbki (najczęściej kości lub zęba), jego amplifikacji, czyli sztucznym namnażaniu, oraz sekwencjonowaniu badanych fragmentów, tj. odczytywaniu sekwencji par nukleotydowych w uzyskanych cząsteczkach DNA za pomocą zautomatyzowanych sekwencjatorów. Uzyskane wyniki służą m.in. do oceny zmienności i wzajemnych zależności uzyskanych haplotypów (wariantów tego samego allelu, czyli różnych form tego samego genu, które są przekazywane razem) oraz określenia przynależności badanych osobników do odpowiednich haplogrup (tj. grup podobnych ze względu na wspólne pochodzenie haplotypów), pozwalających ocenić stopień pokrewieństwa poszczególnych osobników. Celem badań genetycznych może być także poznanie całego genomu, tj. całej informacji genetycznej dla danego organizmu. Stosuje się do tego tyw. sekwencjonowanie nowej generacji (ang. *next generation sequencing*, NGS). Uzyskane kopalne genomy można porównywać ze współczesnymi organizmami i dzięki temu badać ewolucję czy też historię danej grupy organizmów.

Badania paleogenetyczne antycznego DNA zwierząt kopalnych pozwalają m.in. badać zmienność genetyczną i stopień pokrewieństwa poszczególnych osobników w obrębie zarówno

pojedynczego gatunku, jak i pomiędzy różnymi gatunkami: i tymi wymarłymi, i tymi żyjącymi współcześnie. Zastosowanie badań aDNA pozwala również określić, z pewną dozą prawdopodobieństwa, czas pojawienia się poszczególnych linii ewolucyjnych w obrębie badanych gatunków. Obecnie prowadzone badania aDNA skupiają się w dużej mierze na mitochondrialnym DNA, którego jest najwięcej w komórkach, dzięki czemu jest ono najlepiej zachowane w materiale kopalnym. Ponieważ mitochondrialne DNA przekazywane jest jedynie w linii matczynej, badania tego typu DNA daje nam wyłącznie informacje o tej linii rozwojowej. Jednakże ze względu na coraz powszechniejsze i tańsze użycie w badaniach metod NGS i dostępności całych genomów bądź ich fragmentów możliwe jest poznanie innych cech organizmu, które są kodowane w jądrowym DNA (np. płeć) lub są kodowane wielogenowo, tak jak np. umaszczenie koni czy bydła. Dlatego też badania tego typu mogą mieć niebagatelne znaczenie, np. dla lepszego poznania obrzędów sepulkralnych społeczeństw pradziejowych. Na podstawie tych badań możliwe jest również tworzenie hipotez badawczych dotyczących wymierania i migracji poszczególnych gatunków zwierząt, zarówno dziko żyjących, jak i hodowlanych.

Niestety, pomimo niezwykłych możliwości, jakie oferują nam obecnie badania aDNA, ich zastosowanie napotyka na znaczące ograniczenia, wynikające głównie ze znacznej degradacji materiału genetycznego zawartego w kopalnych szczątkach. Do tej pory metodę tę udało się zastosować dla szczątków datowanych na ponad 700 tysięcy lat (Orlando i in. 2013)! Jednak aby było to możliwe, poddana takiemu badaniu kość musiała przebywać w ściśle określonych, bardzo sprzyjających zachowaniu materiału DNA warunkach sedymentacyjnych, jakie tworzą się w głębokich jaskiniach krasowych lub w wiecznej zmarzlinie. Ponieważ zwierzęce szczątki kostne zawierające materiał genetyczny odnajdywane są najczęściej w warunkach, które nie sprzyjają jego zachowaniu, tak ważne jest, aby podczas badań terenowych archeolodzy przestrzegali odpowiednich procedur. W szczególności zasady te dotyczą przechowywania materiału kopalnego tuż po jego wydobyciu z warstwy, w której zalegał przez ostatnie kilkaset czy też kilkanaście tysięcy lat. Szczególnie szkodliwe dla materiału genetycznego są wszelkie wahania temperatury (a w szczególności jej wzrost!) oraz wilgotności. Stąd też korzystne

jest jak najszybsze zapakowanie wydobytych i nieumytych kości przeznaczonych do dalszych badań aDNA do szczelnego pojemnika i umieszczenie ich w zamrażalniku. Również szczątki kostne pochodzące ze starszych badań winny być przechowywane raczej w chłodnych i umiarkowanie wilgotnych pomieszczeniach, co pozwoli ograniczyć dalszą degradację zachowanego w nich jeszcze materiału genetycznego.

W badaniach szczątków zwierzęcych w ostatnim czasie coraz częściej wykorzystywana jest jedna z metod tzw. ZooMS (ang. *zooarchaeology by mass spectroscopy*). Wykorzystuje ona trwałość i powolną ewolucję kolagenu jako molekularnego „kodu kreskowego” do identyfikacji kości. Do tego celu używa peptydowych „odcisków palców” powiązanych z wysokoprzepustową spektrometrią masową. Kolagen typu I jest izolowany ze szczątków zwierzęcych, następnie trawiony na peptydy, które są mierzone w spektrometrze masowym. Widmo spektralne dla badanej próbki jest następnie porównywane do biblioteki referencyjnej, a badane kości identyfikuje się na podstawie różnic w masie peptydów, które powstają w wyniku różnic sekwencji aminokwasowych między gatunkami (Buckley i in. 2009; van Doorn i in. 2011). W porównaniu ze standardową analizą aDNA stosowaną w paleogenetyce jest ona znacznie szybsza i tańsza, niestety w porównaniu z tą pierwszą nie jest tak precyzyjna – służy bowiem jedynie do identyfikacji do grupy zwierząt, rzadziej do konkretnego gatunku, nie jest natomiast wykorzystywana do badań paleogenetycznych, czyli np. do określenia pokrewieństwa między osobnikami. Metoda ta sprawdza się zwłaszcza w przypadku materiałów masowych, np. drobnych fragmentów kości niepoddających się standardowej identyfikacji taksonomicznej (np. Richter i in. 2011) lub w przypadku narzędzi kościanych i rogowych mocno zmodyfikowanych przez człowieka, co uniemożliwia identyfikację gatunku zwierzęcia, którego szczątki kostne posłużyły do wykonania danego artefaktu.

Badania antycznego DNA zwierząt są powszechnie stosowane w Polsce, a nawet zyskują w ostatnim czasie na popularności. Szczególnie ważne w tym świetle jest powstanie w Polsce ośrodków, które rozwijają badania nad kopalnym DNA zwierzęcym (np. Baca i in. 2012; 2014; 2017; 2019; Doan i in. 2021; Niedziałkowska 2017; Popović i in. 2015). Szczególnie aktywny w tym zakresie jest ośrodek

warszawski, który zajmuje się badaniami głównie kopalnej fauny plejstocenijskiej, a krąg jego zainteresowań obejmując szeroki wachlarz gatunków, od jesiota, różne gatunki gryzoni aż po niedźwiedzie.

## BADANIA IZOTOPOWE

We współczesnych badaniach szczątków zwierzęcych wyjątkowo cenne okazują się analizy izotopowe. Wyniki uzyskane w trakcie tych badań dostarczają wielu informacji ważnych dla poznania panujących w przeszłości warunków środowiskowych (por. Apolinarśka, w tym tomie), ekologii, diety czy mobilności badanych zwierząt (Pellegrini i in. 2008; Britton i in. 2011; Julien i in. 2012). W badaniach izotopowych najczęściej wykonuje się pomiary izotopów tlenu ( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ), węgla ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ ), azotu ( $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ) oraz strontu ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ). Pierwiastki te są pobierane przez organizm żywy wraz z pożywieniem oraz wodą i podlegają akumulacji w szkieletcie zwierzęcym, a skład izotopowy danych pierwiastków w tkance jest odzwierciedleniem warunków siedliskowych danego osobnika i składu jego diety (Pederzani i Britton 2018). W tego typu analizach szczególnie ważna jest obserwacja okresowych wahań stężeń poszczególnych pierwiastków i ich izotopów, zachodzących w wyniku np. zmian temperatury otoczenia czy zróżnicowania pomiędzy siedliskami, jakie zajmowało zwierzę. Do analiz tych wykorzystuje się zarówno kości, jak i zęby zwierzęce, przy czym te drugie są chętniej wykorzystywane. Dzieje się tak dlatego, ponieważ ząb pokryty jest z wierzchu szkliwem, czyli najtwardszym materiałem, jaki może wytworzyć organizm zwierzęcy. Szkliwo lepiej opiera się wpływowi czynników oddziałujących na organizm po jego śmierci (łac. *post mortem*) niż kość czy zębina (np. Hinz i Kohn 2010). Do czynników takich należy np. oddziaływanie roztworów krążących w środowisku pogrzebania, powodujących rozpuszczanie mineralnego składnika tkanki szkieletowej. Tym samym szkliwo zębowe, samo będące nośnikiem informacji o zmianach stężeń niektórych izotopów (np. strontu), chroni utrwalaony w zębie zapis izotopowy przed wtórną akumulacją pierwiastków z otoczenia, co w przypadku szczątków często liczących kilka lub kilkanaście tysięcy lat jest szczególnie ważne. Ponadto w miarę wzrostu zęba, obejmującego często kilkuletnią nieprzerwaną historię życia danego

osobnika, w szkliwo wbudowywane są pierwiastki będące odzwierciedleniem zmian w diecie, sezonowej zmienności klimatu czy miejsca jego bytowania. A ponieważ u ssaków wraz z dorastaniem osobniczym dochodzi do wymiany zębów mlecznych na stałe, wartość poszczególnych zębów dla tych badań jest różna. Dlatego w przypadku badań prowadzonych nad większością gatunków ssaków najczęściej wykorzystywane są ostatnie zęby przedtrzonowe oraz trzonowe, zawierające najpełniejszy zapis obejmujący kilka lat życia osobnika (a w przypadku mamuta nawet kilkanaście). Ponieważ poszczególne zęby wyrzynają się w różnej kolejności, a co za tym idzie w różnym wieku, możliwe jest wykonanie tego typu analiz dla kilku zębów równocześnie, dzięki czemu możliwe jest obserwowanie zmian zawartości danego pierwiastka w dłuższym okresie. Oczywiście takie badania wykonuje się tylko i wyłącznie dla szeregu zębów pojedynczego osobnika, czyli najczęściej zębów pochodzących z pojedynczej zuchwy lub szczęki.

W badaniach zmian klimatu powszechnie wykorzystuje się izotopy tlenu. Proporcje izotopowe tlenu w szkliwie zębów dużych ssaków ściśle odzwierciedlają zawartość izotopów w spożywanej wodzie opadowej. A ponieważ w pobieranej wodzie opadowej zawartość izotopów tego pierwiastka w środowiskach kontynentalnych jest determinowana m.in. przez temperaturę powietrza przy powierzchni ziemi, na podstawie badania stężeń izotopów tlenu możliwe jest określenie średniej temperatury panującej w okresie życia danego osobnika. Pamiętać jednak należy, aby podczas interpretacji uzyskanych wyników uwzględnić również wpływ, jaki na uzyskane pomiary miała sezonowa zmienność temperatury opadów, oraz wpływ, jaki na skład izotopowy wody opadowej wywierają procesy związane z parowaniem wody, silnie powiązane ze stopniem wilgotności. W takim ujęciu proporcje izotopów tlenu w szkliwie zębów można wykorzystać jako wskaźniki przeszłych zmian klimatycznych i środowiskowych (np. Pryor i in. 2013) (por. Apolinarśka, w tym tomie).

Celem poznania pale diety wymarłych organizmów obecnie bada się stężenie izotopów węgla oraz azotu. Badania wartości  $\delta^{13}\text{C}$  zawartego w kolagenie służą do określenia rodzaju pokarmu (rośliny) trawionego przez roślinożerców. Dzieje się tak, gdyż wartość izotopu węgla zawartego w danej roślinie różni się od sposobu jego wiązania na drodze dwóch odmiennych szlaków fotosyntezy. Na tej





**Ryc. 3.** Górny ząb trzonowy mamuta (*Mammuthus primigenius*) przygotowany do analizy składu izotopowego przy użyciu ablacji laserowej. Fot. N. Kowalik. Ze zbiorów Instytutu Nauk Geologicznych PAN, Ośrodka Badawczego w Krakowie

podstawie wyróżniono dwa typy roślin zwanych typem  $C_3$  i  $C_4$ . Do roślin  $C_3$  zaliczamy większość gatunków strefy klimatu umiarkowanego, które rosną szybciej wraz ze wzrostem wilgotności. Z kolei rośliny  $C_4$  rosną proporcjonalnie, gdy warunki klimatyczne stają się bardziej suche i cieplejsze, a dodatkowo cechują się większą wydajnością fotosyntezy i szybszą produkcją biomasy. Większość roślin typu  $C_4$  występuje w klimacie gorącym, gdzie energia słoneczna nie jest czynnikiem limitującym i należą do nich np. proso oraz kukurydza. A dzięki temu, że zęby i kości roślinożerców rejestrują wartości  $\delta^{13}C$  spożywanego pokarmu roślinnego różniące się w zależności od ich pochodzenia od roślin  $C_3$  i  $C_4$ , możliwa jest identyfikacja rodzaju pokarmu, jakie dane zwierzę przyjmowało, a pośrednio również

możliwe jest określenie typu środowiska, w którym ono żyło (Bocherens i Drucker 2013).

W badaniach paleodiety szeroko wykorzystywany jest także azot, który również pobierany jest wraz z pożywieniem i, podobnie jak węgiel, uzyskiwany jest z kolagenu zawartego w szczątkach zwierzęcych. Dzięki temu, że sygnatura izotopu azotu danego osobnika zależy od sygnatury izotopowej u podstawy sieci pokarmowej, do której on należał, i od pozycji gatunku w sieci pokarmowej (tj. troficznej; roślinożerca lub drapieżnik), na podstawie badań stężenia poszczególnych izotopów N i C w kościach oraz zębach zwierzęcych możliwe jest dokonanie rekonstrukcji drzewa troficznego poszczególnych organizmów, a więc ich diety. Z jednej strony pozwala to zrekonstruować łańcuch troficzny

tych zwierząt (czym odżywiły się poszczególne organizmy), z drugiej zaś mamy możliwość poznania zmian, jakie zachodziły w diecie badanych organizmów wraz z upływem czasu. Na podstawie badań izotopowych możliwe było m.in. określenie diety zwierząt wchodzących w skład fauny zamieszkującej stepo-tundrę na obszarze południowych Moraw w okresie trwania tzw. kultury pawłowskiej około 30 tysięcy lat temu (Bocherens i in. 2015) czy też na późnoneolitycznym stanowisku z Bawarii (Bösl i in. 2006).

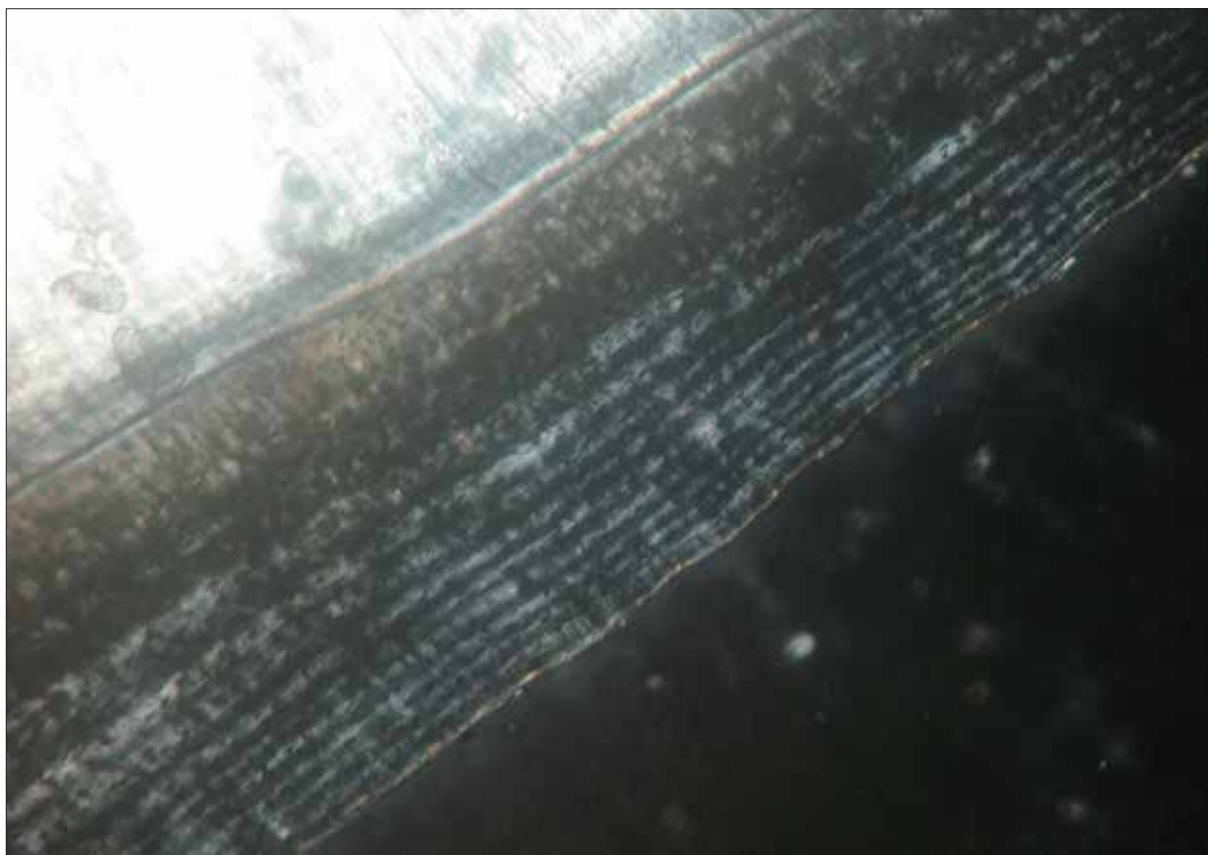
Do badań migracji wykorzystywane są izotopy strontu. Dzieje się tak, ponieważ skład izotopowy tego pierwiastka w poszczególnych regionach jest zależny od ich budowy geologicznej. Stront jest uwalniany do wód na drodze procesu wietrzenia minerałów i skał np. przez ich rozpuszczanie, stając się dostępny dla roślin i zwierząt (Montgomery 2010). Następnie pierwiastek ten jest pobierany wraz z wodą oraz pokarmem i sukcesywnie, w czasie życia danego osobnika, wbudowywany w cienkie warstwy szkliwa zębowego. Różnice w składzie izotopowym Sr w tkance mogą wykazać na migrację zwierzęcia między poszczególnymi regionami różniącymi się lokalną sygnaturą izotopową strontu (np. północne przedpole Karpat oraz obszar Kotliny Karpackiej). Jednak aby badania te przyniosły zadowalające efekty, konieczne jest dokładne poznanie lokalnych sygnatur Sr danego obszaru, najlepiej uzyskanych z różnych źródeł, tj. próbek wody, gleby, roślin oraz lokalnej fauny, niestety zaawansowanie tych badań, szczególnie dla obszaru Polski, jest na dalece niezadowalającym etapie.

Ponieważ migracje są zazwyczaj wymuszane przez liczne, zwykle ściśle ze sobą powiązane czynniki, takie jak dostępność żywności, zmiany środowiskowe i klimatyczne czy migracje ludności hodującej dane zwierzę, rekonstrukcja wzorców migracji dostarcza istotnych informacji na temat paleobiologii, ewolucji paleoklimatu i zmian klimatycznych, jak również mobilności grup ludzkich. Do badań tych najczęściej wykorzystuje się zęby stałe (ryc. 3). Analizę składu izotopowego Sr przeprowadza się z zastosowaniem spektrometrii masowej, wykonując pomiar serii próbek tkanki zębowej po uprzednim ich rozpuszczeniu i oczyszczeniu (metoda konwencjonalna) lub bezpośrednio w warstwach odsłoniętego szkliwa z użyciem ablacji laserowej (pomiar *in situ*) (Kowalik i in. 2020; Price i in. 2015; Pryor i in. 2020a).

## BADANIA WIEKU ORAZ SEZONU ŚMIERCI

W badaniach archeozoologicznych istotnych informacji z punktu widzenia archeologii dostarczają badania wieku oraz sezonu śmierci zwierząt. Z jednej strony dają one odpowiedź na temat sezonu, w jakim występowało osadnictwo na danym stanowisku, co ma szczególnie istotne znaczenie dla badań stanowisk z okresu epoki kamienia, zwłaszcza jej starszego odcinka. Z drugiej mogą one dostarczyć informacji odnoszących się do sposobu wykorzystania zwierząt hodowlanych, w szczególności zarządzania stadem, pozwalając określić pory roku, w których szczególnie chętnie dokonywano uboju poszczególnych gatunków. Jak już wcześniej wspomniano, wiek zwierząt reprezentowanych na stanowisku najczęściej jest określany na podstawie wyrastania poszczególnych zębów, zużycia powierzchni zgryzu, a także stopnia zrośnięcia nasad kości długich i płaskich. Jednak o wiele dokładniejszą metodą określania wieku oraz dodatkowo sezonu śmierci zwierząt jest badanie przyrostu cementu zębowego. Tkanka ta rośnie przez cały okres życia organizmu i, co ważne, tempo tego wzrostu różni się w zależności od pory roku (Burke i Castinat 1995; Stutz 2002). Każdego roku powstają dwa rodzaje warstw: węższa budowana jest w okresie chłodnym, np. w okresie zimowym, a szersza powstaje w okresie ciepłym, np. wiosną i latem, kiedy występuje bogactwo pożywienia (Moffitt 2003). Co szczególnie ważne, metoda ta może być stosowana z powodzeniem zarówno w stosunku do przeżuwaczy, czyli zwierząt, które w wyniku następstwa pór roku odżywiają się odmiennym rodzajem paszy, jak również drapieżników, które przez cały rok zasadniczo bazują na pokarmie mięsnym (ryc. 4).

Do tej pory w Polsce metoda ta była rzadko wykorzystywana (Krajcarz i Krajcarz 2014; Pryor i in. 2020b) i wydaje się niedoceniana. A szkoda, albowiem możliwości interpretacyjne wynikające z jej zastosowania powinny być dla archeologii niezwykle interesujące. Jedynym mankamentem jest jej destrukcyjny charakter, ponieważ w przeciwieństwie do metody polegającej na określeniu wieku na podstawie obserwacji makroskopowych, metoda ta wymaga odpowiedniego przygotowania zębów wybranych do analizy (rozcięcia zęba i wycięcia cienkiej płytki, na której dokonuje się obserwacji przyrostów) oraz użycia specjalistycznego sprzętu (mikroskopu z filtrem polaryzacyjnym).



**Ryc. 4.** Przekrój kła foki szarej (*Halichoerus grypus*) z widocznymi warstwami przyrostów zimowych oraz letnich. Fot. S. Pospuła. Ze zbiorów Instytutu Systematyki i Ewolucji Zwierząt PAN w Krakowie

## PODSUMOWANIE

Przedstawiony tutaj skrótowy obraz badań archeozoologicznych miał na celu przybliżenie czytelnikowi specyfiki tej dyscypliny nauki, skoncentrowanej na badaniu zwierzęcych szczątków kostnych, które nie zawsze budzą należyte zainteresowanie samych archeologów. Niniejszy tekst oczywiście nie wyczerpuje całego zagadnienia, ale zwraca uwagę, jak ważne i potrzebne jest prowadzenie tego typu badań, jeśli chcemy w jak najpełniejszym zakresie poznać i zrozumieć naszą przeszłość. Archeozoologia dostarcza wielu istotnych informacji dotyczących strategii łowieckich stosowanych w przeszłości, sposobów zarządzania stadami zwierząt hodowlanych czy funkcji oraz organizacji przestrzennej badanych stanowisk. Dodatkowo, o czym należy pamiętać, badania te są punktem wyjścia do przeprowadzenia dalszych analiz (m.in. antycznego DNA i badań izotopowych), niezwykle istotnych dla poznania mobilności dawnych grup ludzkich, ich wzajemnych relacji i kontaktów.

Oczywiście sama archeozoologia, pomimo wypracowania już właściwych sobie procedur badawczych, podobnie jak i cała nauka podlega ciągłym zmianom. Jest to widoczne m.in. w zwiększeniu roli badań tafonomicznych włączanych coraz częściej w zakres analizy zespołów kostnych czy w korzystaniu z możliwości szybko rozwijających się w ostatnim czasie badań molekularnych czy izotopowych.

## LITERATURA

- Albarella, U. 2017. Zooarchaeology in the twenty-first century: where we come from, where we are now, and where we are going, (w:). U. Albarella, M. Rizzetto, H. Russ, K. Vickers, S. Viner-Daniels (red.), *The Oxford Handbook of Zooarchaeology*. Oxford, 3–21.
- Baca, M., Mackiewicz, P., Stankovic, A., Popović, D., Stefaniak, K., Czarnogórska, K., Nadachowski, A., Gąsiorowski, M., Hercman, H., Weglenski, P. 2014. Ancient DNA and dating of cave bear remains from

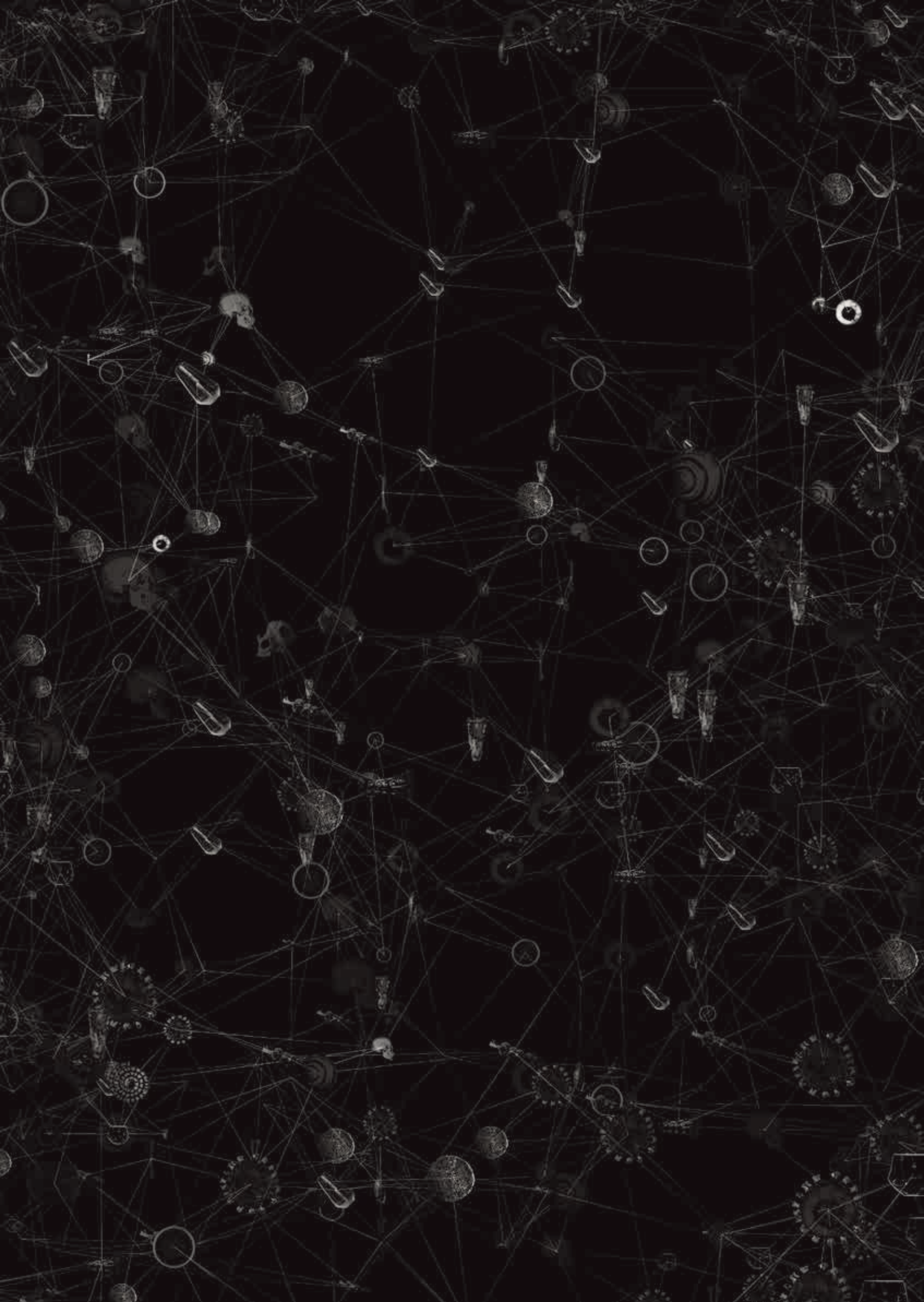


- Niedźwiedzia Cave suggest early appearance of *Ursus ingressus* in Sudetes. *Quaternary International* 339–340: 217–223.
- Baca, M., Nadachowski, A., Lipecki, G., Mackiewicz, P., Marciszak, A., Popovic, D., Socha, P., Stefaniak, K., Wojtal, P. 2017. Impact of climatic changes in the Late Pleistocene on migrations and extinctions of mammals in Europe: four case studies. *Geological Quarterly* 61(2): 291–304.
- Baca, M., Popović, D., Lemanik, A., Horáček, I., Nadachowski, A. 2019. Highly divergent lineage of narrow-headed vole from the Late Pleistocene Europe. *Scientific Reports* 9: 17799, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53937-1>.
- Baca, M., Stankovic, A., Stefaniak, K., Marciszak, A., Hofreiter, M., Nadachowski, A., Węgleński, P., Mackiewicz, P. 2012. Genetic analysis of cave bear specimens from Niedźwiedzia Cave, Sudetes, Poland. *Palaeontologia Electronica*. 15.2.21A, 16p.
- Bartosiewicz, L. 2001. Archaeozoology or zooarchaeology?: a problem from the last century. *Archaeologia Polona* 39: 75–86.
- Bartosiewicz, L., Van Neer, W., Lentacker, A. 1997. Draught Cattle: Their Osteological Identification and History. *Annales Sciences Zoologiques* 281.
- Behrensmeyer, A.K. 1978. Taphonomic and ecologic information from bone weathering. *Paleobiology* 4(2): 150–162, doi:10.1017/S0094837300005820.
- Benecke, N. 1994. *Der Mensch und seine Haustiere. Die Geschichte einer jahrtausendealten Beziehung*. Stuttgart.
- Bennet, J.L., 1999. Thermal alteration of buried bone. *Journal of Archaeological Science* 26: 1–8.
- Binford, L.R. 1981. *Bones: ancient men and modern myths*. New York.
- Bocherens, H., Drucker, D. 2013. Stable isotopes in terrestrial teeth and bones, (w:) S. Elias (red.), *Encyclopedia of Quaternary Science*, 2nd ed., Amsterdam, 304–314.
- Bocherens, H., Drucker, D., Germonpre, M., Lazničková-Galetova, M., Naito, Y.I., Wissing, Ch., Brůžek, J., Oliva, M. 2015. Reconstruction of the Gravettian food-web at Předmostí I using multi-isotopic tracking ( $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ ,  $^{34}\text{S}$ ) of bone collagen. *Quaternary International* 359–360: 211–228.
- Bocherens, H., Drucker, D.G., Madelaine, S. 2014. Evidence for a  $^{15}\text{N}$  positive excursion in terrestrial foodwebs at the Middle to Upper Palaeolithic transition in South-western France: implications for early modern human palaeodiet and palaeoenvironment. *Journal of Human Evolution* 69: 31–43.
- Bogucki, P. 2008. Animal Exploitation by the Brześć Kujawski Group in the Brześć Kujawski and Oślonki Region, (w:) R. Grygiel (red.), *Neolit i Początki Epoki Brązu w Rejonie Brześcia Kujawskiego and Oślonki* (The Neolithic and Early Bronze Age in the Brześć Kujawski and Oślonki Region) vol. II/3. Łódź, 1581–1704.
- Bösl, C., Grupe, G., Peters, J. 2006. A Late Neolithic vertebrate foodweb based on stable isotope analyses. *International Journal of Osteoarchaeology* 16: 296–315.
- Britton, K., Grimes, V., Niven, L., Steele, T.E., Mcpherron, S., Soressi, M., Kelly, T.E., Jaubert, J., Hublin, J.-J. and Richards, M.P. 2011. Strontium isotope evidence for migration in late Pleistocene Rangifer: Implications for Neanderthal hunting strategies at the Middle Palaeolithic site of Jonzac, France. *Journal of Human Evolution* 61(2): 176–185.
- Buckley, M., Collins, M., Thomas-Oates, J., Wilson, J.C., 2009. Species identification by analysis of bone collagen using matrix-assisted laser desorption/ionisation time-of-flight mass spectrometry. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 23: 3843–3854, <https://doi.org/10.1002/rcm.4316>.
- Buikstra, J.E., Swegle, M. 1989. Bone modification due to burning: experimental evidence. *Journal of Archaeological Science* 22: 479–493.
- Burke, A.M., Castinat, J. 1995. Histological observations of cement growth in horse teeth and their applications to archaeology. *Journal of Archaeological Science* 22: 479–493.
- Calkin, V.I. 1970. *Drevnejše domašnje životnye vostočnoj Evropy*. Moskwa.
- Clutton-Brock, J. 1987. *A natural history of domesticated animals*. London.
- De Cupere, B., Lentacker, A., Van Neer, W., Waelkens, M. and Verslype, L. 2000. Osteological evidence for the draught exploitation of cattle: first applications of a new methodology. *International Journal of Osteoarchaeology* 10: 254–267.
- Discamps, E., Costamagno, S. 2015. Improving mortality profile analysis in zooarchaeology: a revised zoning for ternary diagrams. *Journal of Archaeological Science* 58: 62–76.
- Doan, K., Niedziałkowska, M., Stefaniak, K., i in. 2021. Phylogenetics and phylogeography of red deer mtDNA lineages during the last 50 000 years in Eurasia. *Zoological Journal of the Linnean Society* 20: 1–26, <https://doi.org/10.1093/zoolinnean/zlab025>.
- Driesch, A. von den. 1976. *A guide to the measurement of animal bones from archaeological sites*. Peabody Museum Bulletin 1, Harvard.
- Fernández-Jalvo, Y., Andrews, P. 2016. *Atlas of taphonomic identifications*. New York.
- Forchhammer, G., Steenstrup, J., Worsaae, J. 1851–56. *Undersøgelser I geologisk-antikvarensik retning*. København.
- Grant, A. 1987. Some observations of butchery in England from the Iron Age to medieval period. *Anthrozoologica Special* 1: 53–59.
- Groot, M. 2005. Palaeopathological evidence for draught cattle on a Roman site in the Netherlands, (w:) J. Davies, M. Fabis, I. Mainland, M. Richards, R. Thomas (red.),

- Health and Diet in Past Animal Populations*. Oxford, 52–57.
- Haynes, G. 1980. Evidence of carnivore gnawing on Pleistocene and Recent mammalian bones. *Paleobiology* 6(3): 341–351.
- Hinz, E.A., Kohn, M.J. 2010. The effect of tissue structure and soil chemistry on trace element uptake in fossils. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 74(11): 3213–3231.
- Johannsen, N.N. 2005. Palaeopathology and Neolithic cattle traction: methodological issues and archaeological perspectives, (w:) J. Davies, M. Fabisz, I. Mainland, M. Richards, R. Thomas (red.), *Health and Diet in Past Animal Populations*. Oxford, 39–51.
- Julien, M.-A., Bocherens, H., Burke, A., Drucker, D.G., Patou-Mathis, M., Krotova, O., Péan, S. 2012. Were European steppe bison migratory?  $^{18}\text{O}$ ,  $^{13}\text{C}$  and  $\text{Sr}$  intra-tooth isotopic variations applied to a palaeoethological reconstruction. *Quaternary International* 271: 106–119.
- Klein, R.G., Cruz-Urbe, K. 1984. *The Analysis of Animal Bones from Archaeological Sites*. Chicago.
- Kowalik, N., Anczkiewicz, R., Wilczyński J., Wojtal P., Müller W., Bondioli L., Gasparik M. 2020. Tracing human mobility in central Europe during the Upper Paleolithic using sub-seasonally resolved  $\text{Sr}$  isotope record in ornaments. *Scientific Reports* 10: 10386, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67017-2>.
- Krajcarz, M.T., Krajcarz, M. 2014. Summers and winters at Wilczyce. Seasonal changes of Paleolithic settlement and environment on the basis of seasonality and isotope analyses of animal teeth. (w:) R. Schild (red.), *Wilczyce. A late Magdalenian winter hunting camp in southern Poland*. Warszawa, 137–148.
- Krajcarz, M., Krajcarz, M.T., Baca, M., Baumann, Ch., Van Neer, V., Popović, D., Sudoł-Procyk, M., Wach, B., Wilczyński, J., Wojenka, M., Bocherens, H. 2020. Ancestors of domestic cats in Neolithic Central Europe – isotopic evidence of a synanthropic diet. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *PNAS* 117(30): 17710–17719, doi: 10.1073/pnas.1918884117.
- Lasota-Moskalewska, A. 1980. Morphotic changes of domestic cattle skeleton from the Neolithic Age to the beginning of the Iron Age. *Wiadomości Archeologiczne* 45(2): 119–163.
- Lasota-Moskalewska, A. 1997. *Podstawy archeozoologii. Szczątki ssaków*. Warszawa.
- Lasota-Moskalewska, A. 2005. *Zwierzęta udomowione w dziejach ludzkości*. Warszawa.
- Lasota-Moskalewska, A. 2008. *Podstawy archeozoologii, Szczątki ssaków*. Warszawa.
- Levine, M.A. 1999. The Origins of Horse Husbandry on the Eurasian Steppe, (w:) M. Levine, Y. Rassamakin, A. Kislenko, N. Tatarintseva (red.), *Late Prehistoric Exploitation of the Eurasian Steppe*. Cambridge, 5–58.
- Levine, M.A., Bailey, G.N., Whitwell, K.E., Jeffcott, L.B. 2000. Palaeopathology and horse domestication. (w:) G. Bailey, R. Charles, N. Winder (red.), *Human Ecodynamics and Environmental Archaeology*. Oxford, 123–133.
- Lyman, R.L. 1994. *Vertebrae Taphonomy*, Cambridge.
- Maltby, M. 2007. Chop and change: Specialist cattle carcass processing in Roman Britain, in Croxford, (in:) N. Ray, R. Roth (red.), *TRAC 2006: Proceedings of the 16th Annual Theoretical Roman Archaeology Conference*. Oxford, 59–76.
- Marciniak, A. 1996. *Archeologia i jej źródła: materiały faunistyczne w praktyce badawczej Archeologii*. Warszawa-Poznań.
- Marciniak, A. 1999. Niedoceniany potencjał poznawczy zwierzęcych szczątków kostnych. Perspektywa archeologiczna, (w:) P. Wyrst, N. Pospieszny, B. Gediga (red.), *Szczątki zwierzęce jako źródło badań nad różnicowaniem poziomów życia materialnego i kulturowego ludzi w różnych okresach dziejowych*. Wrocław, 19–32.
- Marciniak, A. 2005. *Placing animals in the Neolithic: Social zooarchaeology of prehistoric farming*, London.
- Meadow, R.H. 1999. The use of size index scaling techniques for research on archaeozoological collections from the Middle East, (w:) C. Becker, H. Manhart, J. Peters, J. Schiebler (red.), *Historia Animalium ex Ossibus, Beiträge zur Paläoanatomie, Archäologie, Ägyptologie, Ethnologie und Geschichte der Tiermedizin*, Rahden, 285–300.
- Moffitt, S.A., 2003. Appendix II Cementum annuli seasonality analysis of *Odocoileus hemionus* teeth from ten sites on the Big Sur Coast. (w:) T.L. Jones (red.), *Prehistoric Human Ecology of the Big Sur Coast, California*. Contributions of the University of California Archaeological Research Facility no. 61. Berkeley, 277–283.
- Montgomery, J. 2010. Passports from the past: Investigating human dispersals using strontium isotope analysis of tooth enamel. *Annals of Human Biology* 37(3): 325–346, doi:10.3109/03014461003649297.
- Niedziałkowska, M. 2017. Phylogeography of European moose (*Alces alces*) based on contemporary mtDNA data and archaeological records. *Mammalian Biology* 84: 35–43, doi: 10.1016/j.mambio.2017.01.004.
- Nilssen, P.J. 2000. *An actualistic butchery study in South Africa and its implications for reconstructing hominid strategies of carcass acquisition and butchery in the Upper Pleistocene and Plio-Pleistocene*. Cape Town.
- Oates, J. 2003. A note on the early evidence for horse and the riding of equids in Western Asia. (w:) M. Levine, C. Renfrew, K. Boyle (red.), *Prehistoric Steppe Adaptation and the Horse*. Cambridge, 115–125.
- Olsen, S.L., Shipman, P. 1988. Surface modification on bone: trampling vs butchery. *Journal of Archaeological Science* 15(5): 535–553.
- Orlando, L., Ginolhac, A., Zhang, G., i in. 2013. Recalibrating *Equus* evolution using the genome sequence of

- an early Middle Pleistocene horse. *Nature* 499: 74–78, doi:10.1038/nature12323.
- Pales, L., Garcia, M.A. 1981a. *Atlas ostéologique pour servir à l'identification des mammifères du Quaternaire, II. Les membres Herbivores - Tête- Rachis- Ceintures scapulaire et pelvienne*. Paris, 177 pl.
- Pales, L., Garcia, M.A. 1981b. *Atlas ostéologique pour servir à l'identification des mammifères du Quaternaire, II. Les membres Carnivores, Homme- Tête- Rachis-Ceintures scapulaire et pelvienne*. Paris, 76 pl.
- Pederzani, S., Britton, K. 2018. Oxygen isotopes in bioarchaeology: Principles and applications, challenges and opportunities. *Earth Science Reviews* 188: 77–107.
- Pellegrini, M., Donahue, R.E., Chenery, C., Evans, J., Lee-Thorp, J., Montgomery, J., Mussi, M. 2008. Faunal migration in late-glacial central Italy: implications for human resource exploitation. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 22 (11): 1714–1726.
- Popović, D., Baca, M., Panagiotopoulou, H. 2015. Complete mitochondrial genomes of Atlantic sturgeon, *Acipenser oxyrinchus oxyrinchus*, Gulf sturgeon, *A. o. desotoi* and European sturgeon *A. sturio* (Acipenseriformes: Acipenseridae) obtained through next generation sequencing. *Mitochondrial DNA*, doi:10.3109/19401736.2015.1038799.
- Price, T. D., Meiggs, D., Weber, M.-J., Pike-Tay, A. 2015. The migration of Late Pleistocene reindeer: isotopic evidence from northern Europe. *Archaeological and Anthropological Sciences* 9: 1–24, doi:10.1007/s12520-015-0290-z.
- Pryor, A. J. E., Insoll, T., Evis, L. 2020a. Laser ablation strontium isotope analysis of human remains from Harlaa and Sofi, eastern Ethiopia, and the implications for Islamisation and mobility. *STAR: Science & Technology of Archaeological Research* 6(1): 113–136, doi:10.1080/20548923.2020.1843266.
- Pryor, A.J.E., O'Connell, Wojtal, P., Krzemińska, A., Stevens, R.E. 2013. Investigating climate at the Upper Palaeolithic site of Kraków Spadzista Street (B), Poland, using oxygen isotopes. *Quaternary International* 294: 108–119.
- Pryor, A., Pospuła, S., Nesnidalova, T., Kowalik, N., Wojtal, P., Wilczyński, J. 2020b. Mobility and season of death of the Arctic foxes killed by Gravettian hunters at Kraków Spadzista, Poland, *Journal of Archaeological Science: Reports* 33. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2020.102520>.
- Reitz, E.J., Wing, E.S. 1999. *Zooarchaeology*. Cambridge.
- Richter, K.K., Wilson, J., Jones, A.K.G., Buckley, M., van Doorn, N., Collins, M.J., 2011. Fish 'n chips: ZooMS peptide mass fingerprinting in a 96 well plate format to identify fish bone fragments. *Journal of Archaeological Science* 38(7): 1502–1510. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2011.02.014>.
- Schmid, E. 1972. *Atlas of Animal Bones. For Prehistorians, Archaeologists and Quaternary Geologists*. Amsterdam–London–New York.
- Stiner, M.C., 1990. The use of mortality patterns in archaeological studies of hominid predatory adaptations. *Journal of Anthropological Archaeology* 9: 305–351.
- Stiner, M.C. 1994. *Honor among Thieves: A Zoo-archaeological Study of Neandertal Ecology*. Princeton.
- Stiner, M.C., Kuhn, S.L., Weiner, S., Bar-Yosef, O. 1995. Differential Burning, Recrystallization, and Fragmentation of Archaeological Bone. *Journal of Archaeological Science* 22: 223–237.
- Stutz, A.J. 2002. *Pursuing past seasons: a re-evaluation of cementum increment analysis in Paleolithic archaeology*. The University of Michigan, PhD thesis.
- van Doorn, N.L., Hollund, H., Collins, M.J. 2011. A novel and non-destructive approach for ZooMS analysis: ammonium bicarbonate buffer extraction. *Archaeological and Anthropological Sciences* 3: 281–289. <https://doi.org/10.1007/s12520-011-0067-y>.









# Antropologia fizyczna

Dorota Lorkiewcz-Muszyńska, Julia Sobol, Wojciech Kociemba,  
Anna Hyrchała, Mariusz Glapiński

---

## WSTĘP

Antropologia (z języka greckiego *anthropos* 'człowiek', *lógos* 'nauka') to dyscyplina naukowa, która zajmuje się holistycznym opisem człowieka, zarówno jako gatunku biologicznego, jak i twórcy kultury (Malinowski i Strzałko 1985; Słownik języka polskiego PWN). Zakres zainteresowań badawczych antropologii jest szeroki i ma charakter interdyscyplinarny. Zajmuje się ona badaniem zmienności biologicznej człowieka w czasie i przestrzeni w zależności od środowiska biogeograficznego, społeczno-kulturowego i warunków społeczno-ekonomicznych (Malinowski i Strzałko 1985; Malinowski 1999).

W zależności od przyjętych kryteriów antropologię można podzielić na różne rodzaje.

Za Malinowskim (1999) wyróżnia się cztery podstawowe rodzaje antropologii:

- Antropologia filogenetyczna – która zajmuje się rozwojem rodowym – pochodzeniem człowieka jako gatunku (etapami i czynnikami antropogenezy).
- Antropologia populacyjna – badająca zróżnicowanie wewnątrzgatunkowe człowieka.
- Antropologia ontogenetyczna – badająca problemy rozwoju osobniczego człowieka.

- Antropologia stosowana w innych dziedzinach wiedzy oraz praktyki, np. antropologia sądowa\*, antropologia kliniczna, ergonomiczna i sportowa, które wykorzystują przede wszystkim metody antropometryczne w celu identyfikacji osobniczej, obserwacji postępowania terapeutycznego, badań grup sportowców czy diagnozowania w celu ergonomicznej optymalizacji środowiska pracy (Malinowski i Wolański 1988; Malinowski i Bożiłow 1997).

Według innych kryteriów stosuje się podział antropologii na:

- Antropologię fizyczną – zajmującą się badaniem zmienności cech anatomicznych, fizjologicznych człowieka w czasie i przestrzeni. Naukami pomocniczymi antropologii fizycznej są anatomia opisowa i porównawcza, fizjologia, odontologia, patologia, radiologia, medycyna sądowa, genetyka, matematyka i inne.
- Antropologię kulturową – zajmującą się kulturą duchową i materialną, jej ewolucją i zróżnicowaniem w czasie i przestrzeni. W jej skład wchodzi m.in. archeologia, językoznawstwo, religioznawstwo.
- Antropologię społeczną – zajmującą się ewolucją i analizą porównawczą struktur i instytucji społecznych różnych grup ludzkich.



- Antropologię stosowaną w innych dziedzinach wiedzy oraz praktyki, np. antropologia sądowa\*.

Antropologia historyczna jest dziedziną antropologii fizycznej, zajmującą się opisywaniem i wyjaśnieniem przebiegu procesów ewolucji biokulturowej człowieka na podstawie materiałów kostnych grup pradziejowych (Piontek 1996).

Bioarcheologia jest dziedziną nauki stanowiącą dział archeologii środowiskowej, zajmującej się badaniem pozostałości organicznych, ludzkich, zwierzęcych oraz roślinnych.

Odontologia to specjalistyczna dziedzina stomatologii zajmująca się zagadnieniami dotyczącymi narządu żucia, budowy, rozwoju i patologii zębów.

Układ szkieletowy człowieka stanowi twardą konstrukcję anatomiczną ciała, a każdy z elementów szkieletu jest wysoce wyspecjalizowaną odmianą tkanki łącznej, która pełni funkcje podporowe oraz stanowi magazyn soli mineralnych uczestniczący aktywnie w podtrzymaniu homeostazy mineralnej w organizmie. Jak wiele informacji można wyczytać z kości? To zależy od wielu różnych i złożonych czynników. Przede wszystkim od stanu zachowania szczątków kostnych, a więc od tego, jakie elementy się zachowały i w jakim stopniu, ale również od doświadczenia badacza oraz umiejętności doboru metod analitycznych.

Kompleksowe badania identyfikacyjne wychodzące poza zakres podstawowych badań antropologicznych umożliwiających ustalenie profilu biologicznego w przypadku badań materiałów archeologicznych odgrywają niezwykle ważną rolę. Coraz częściej w antropologii sięga się po nowoczesne metody obrazowania medycznego i mikroskopowego. Dynamiczny rozwój techniki pozwala na wykorzystanie coraz to nowocześniejszych metod w badaniach materiałów kostnych. Analizy materiału szkieletowego z wykorzystaniem obrazowania medycznego, jak tomografia komputerowa CT, tomografia stożkowa CBCT, radiografia cyfrowa DR

(Kociemba 2015; Kulczyk i in. 2015), czy za pomocą nowoczesnych technik mikroskopowych (mikroskopia optyczna, stereoskopowa, mikroskopia elektronowa, mikroskopia skaningowa) od wielu już lat mają coraz większe zastosowanie w badaniach z zakresu antropologii, antropologii sądowej (Jones 2012), ale także z zakresu antropologii historycznej, odontologii czy bioarcheologii. Badania tego typu umożliwiają uzyskanie danych, których nie można dostrzec, np. zdjęcia wykonane przy użyciu mikroskopów w celu zobrazowania mikrośladów lub zmian patologicznych zachodzących w obrębie tkanek i komórek organizmu, ustalenie pochodzenia gatunkowego czy np. oceny mikrostruktury kości pod kątem kondycji szkieletu lub zmian związanych z wiekiem (Jones 2012; Streeter 2012; Sobol i in. 2015). Zastosowanie różnych metod badawczych w znacznym stopniu poszerza badania makroskopowe.

W pierwszym etapie postępowania identyfikacyjnego niezbędne jest ustalenie profilu biologicznego na podstawie cech szkieletu. Do najważniejszych badań w tym procesie należą: ustalenie pochodzenia gatunkowego kości, płci, szacowanie wieku biologicznego, długości i masy ciała. Istotne są również obserwowane cechy związane z badaniem uzębienia, anomaliami rozwojowymi, zmianami chorobowymi, w tym zapalnymi czy układowymi, zmianami pourazowymi widocznymi na kościach, wpływ aktywności fizycznej na geometrię kości i ukształtowanie kości w miejscach przyczepów mięśni, celowe zniekształcenia, ślady ingerencji chirurgicznej, zmiany degeneracyjne o charakterze zwyrodnieniowym (Ubelaker 1989; Ruff i in. 1991; Lorkiewicz-Muszyńska 2015; Kulczyk i in. 2015). W kolejnym etapie można przeprowadzić zaawansowane czynności identyfikacyjne (np. rekonstrukcję wyglądu twarzy), które wymagają zastosowania innych badań dodatkowych z zakresu technik obrazowania medycznego lub skanowania 3D (Lorkiewicz-Muszyńska 2020) czy badań genetycznych.

W interdyscyplinarnych badaniach materiałów szkieletowych analizy można prowadzić na wielu poziomach, poczynawszy od makroskopowego, poprzez mikroskopowy do molekularnego. W badaniach antropologicznych szczątków kostnych znaczny udział stanowią metody makroskopowe, które polegają na analizie materiałów kostnych bez zastosowania powiększeń lub w powiększeniach nie większych niż 30-krotne. Należy jednak zwrócić

\* Antropologia sądowa jest działem antropologii zajmującym się m.in. identyfikacją zwłok i szczątków ludzkich, rekonstrukcją przyżyciowego wyglądu twarzy na podstawie czaszki, identyfikacją osób na podstawie zapisów z monitoringu (m.in. nagrania z kamer przemysłowych), analizą materiału zdjęciowego i filmowego mogącego prezentować treści pornograficzne w celu oceny wieku osób pod kątem udziału osób małoletnich (Thannhauser i in. 2019; Thannhauser i Lorkiewicz-Muszyńska 2019: 200-203, 204-213, 218-219; Lorkiewicz-Muszyńska i Sobol 2021; Lorkiewicz-Muszyńska i Thannhauser 2021).

uwagę, iż w badaniach materiałów szkieletowych ze stanowisk archeologicznych antropolodzy często pracują ze szczątkami, gdzie kości zachowane są niekompletnie, a wręcz fragmentarycznie, do badań antropologicznych dostępne są jedynie pojedyncze mało diagnostyczne elementy kostne bądź ich fragmenty. Wiąże się to ze znacznym ograniczeniem analiz, brakiem możliwości wykorzystania klasycznych metod makroskopowych, a także często skutkuje trudnościami w pobraniu materiałów do badań genetycznych i dużą degradacją DNA (por. Chyleński, w tym tomie). Jeśli w danym przypadku możliwe jest przeprowadzenie badań genetycznych, ważne jest przed ich wykonaniem ustalenie przynależności gatunkowej, co wyklucza przypadkową analizę szczątków zwierzęcych zamiast ludzkich. W tym przypadku analizy mikroskopowe mogą mieć szczególne znaczenie.

W antropologii do badania mikrostruktur stosuje się dwa podejścia analityczne. Jednym z nich, nazywanym histomorfologią, jest jakościowa analiza morfologii i organizacji mikrostruktury. Drugim, nazywanym histomorfometrią, jest ilościowe badanie organizacji i struktury mikroskopowej tkanki polegające na wykonywaniu pomiarów i określaniu liczby struktur budujących tkanki określenie liczby elementów na jednostkę powierzchni (Stout 1988). Metody te stosowane są podczas badań szczątków kostnych w celu uzyskania istotnych informacji m.in o pochodzeniu gatunkowym kości, wieku, kondycji czy zmianach patologicznych, mechanizmie urazów.

Analiza histologiczna, stereoskopowa czy badania tomografii komputerowej wymagają specjalistycznego sprzętu, a niektóre metody dodatkowego przygotowania tkanek do analizy oraz do powiększania struktur, dzięki czemu stają się one widoczne.

Jednym z problemów, z jakimi często borykają się antropolodzy w przypadku kostnych materiałów historycznych, jest stan ich zachowania. Pomimo że materiał kostny jest materiałem trwałym, to jednak przez dziesiątki, setki, tysiące lat spoczywania w ziemi oddziałują na niego niekorzystne czynniki. Zmienne warunki atmosferyczne, jak temperatura, wilgotność, ale także typ gleby, ekspansja roślin, zwierzęta i wreszcie człowiek, mogą oddziaływać na kości w sposób destrukcyjny, co powoduje nieodwracalne zmiany i idące za nimi nieodwracalne straty. Nierzadko materiał kostny zachowany jest fragmentarycznie, brakuje

wielu elementów diagnostycznych pozwalających na przeprowadzenie kompleksowych analiz, opisów, pomiarów, co w znacznym stopniu ogranicza możliwości badań antropologicznych, opisu właściwości morfologicznych osobnika, a w efekcie ogranicza szacowanie cech i w rezultacie rekonstrukcja profilu biologicznego jest niepełna. W tym przypadku prowadzenia prac badawczych w zespole interdyscyplinarnym z wykorzystaniem badań mikroskopowych i obrazowania medycznego nabiera jeszcze większego znaczenia. Ograniczenia możliwości prowadzonych badań, wynikające z właściwości układu kostnego oraz szczątkowego stanu jego zachowania, mogą być w znacznym stopniu zmienione poprzez wprowadzenie do badań innych dyscyplin nauki i specjalistycznych metod obrazowania.

## **RYS HISTORYCZNY I ZNACZENIE BADAŃ MIKROSKOPOWYCH W ANTROPOLOGII FIZYCZNEJ**

W badaniach antropologicznych materiałów szkieletowych ważne jest ustalenie przynależności gatunkowej oraz cech grupowych jeszcze przed rozpoczęciem dalszych badań specjalistycznych. Jednym z podstawowych zadań realizowanych przez antropologa jest ustalenie przynależności gatunkowej szczątków oraz szacunkowe ustalenie wieku biologicznego człowieka na podstawie szkieletu. W przypadku gdy są one zachowane fragmentarycznie i nie jest możliwe wykorzystanie klasycznych metod makroskopowych, badania mikroosteometryczne mogą odegrać szczególnie ważną rolę.

Pionierem tych badań był Y. M. Gladyshev, który w 1965 r. porównał szlify kostne kości ludzkich ze zwierzęcymi. Badaniom poddane zostały szlify kości długich osób obu płci w różnym wieku, od 6 miesięcy do 86 lat, oraz szlify kostne wykonane z kości udowych takich zwierząt jak świnka morska, szczur, królik, mała owca i niedźwiedź. Badania wykazały, że tylko dla kości zbitych ludzkich charakterystyczna jest przebudowa większości osteonów wtórnych oraz wielokrotna (co najmniej czterokrotna) przebudowa części z tych osteonów. Badania prowadzone na materiałach kostnych różnych gatunków zwierząt przez innych autorów wykazały, iż zespół cech, takich jak obecność pierwotnych zatok tuż przy kanale kości długiej, rozmieszczenie osteonów

pierwotnych w kształcie sieci, rozmieszczenie pierwotnych i wtórnych osteonów równolegle do powierzchni i prostopadle do długiej osi kości, nie są typowe dla człowieka, ale dla ssaków innych gatunków (Johnson i in. 1988; Kuryszek i Zarzycki 2000). Wyniki badań miały dużą wartość poznawczą dotyczącą zmienności międzygatunkowej, co przyczyniło się do łatwiejszej identyfikacji i możliwości odróżniania szczątków ludzkich od zwierzęcych.

Morales i in. (2012) przeprowadzili badania różnych parametrów histomorfometrycznych w celu odróżnienia kości ludzkich od kości zwierzęcych i następnie skonstruowali funkcje dyskryminacyjne służące klasyfikacji międzygatunkowej. Badacze wykorzystali fragmenty ludzkich kości piszczelowych oraz kości bydłych, świń, kur, kotów i psów i wykonali preparaty histologiczne, które obserwowali pod mikroskopem z 40-krotnym powiększeniem, analizując parametry częstości kanału Haversa w milimetrach kwadratowych, średnice kanału Haversa i średnice systemu Haversa. Następnie dla każdego gatunku skonstruowano funkcje dyskryminacyjne i określono odsetek przypadków dobrze zdiagnozowanych. Stwierdzono istotne różnice w analizowanych parametrach, a funkcje dyskryminacyjne pozwoliły poprawnie zaklasyfikować 88,5% przypadków. Autorzy stwierdzili, iż obserwacja cech histomorfologicznych i parametrów histomorfometrycznych pozwala na odróżnienie ludzkich szczątków szkieletowych od innych zwierzęcych, ale różnicowanie międzygatunkowe szczątków zwierzęcych wymaga bardziej złożonej analizy.

Powyżej przedstawione metody mikroskopowe można wykorzystać również do ustalenia przynależności gatunkowej kości przepalonych, z grobów ciałopalnych. Nadal czytelne są mikroskopowo wspomniane cechy odróżniające kość ludzką od kości zwierzęcych.

W celu identyfikacji niewielkich obiektów kostnych stosuje się zarówno mikroskop optyczny, jak i elektronowy mikroskop skaningowy (SEM) dający dużo większe powiększenia (por. Gunia i in., w tym tomie).

W ciągu ostatniego dziesięciolecia rozwoju mikroskopii elektronowej stała się podstawowym narzędziem w badaniach różnych obiektów materialnych, w tym materiałów kostnych, zębów, na poziomie nano- i subnanometrycznym (Łosińska 2013; Shah i in. 2019). Pierwsze artykuły

dotyczące wykorzystania mikroskopu skaningowego (SEM) w badaniach zębów i kości, wskazujące na rolę mikroskopu skaningowego (SEM) w biologii i medycynie, zostały opublikowane w latach 60. XX w. (Steward i Boyde 1962; Boyde i Jones 1968; Boyde i Hobdell 1968; Boyde i Woods 1969). Pół wieku po opublikowanych artykułach z badań Boyde'a i współpracowników skaningowy mikroskop elektronowy (SEM) odgrywa ważną rolę w ocenie mikrostruktury kości i zębów, badaniu ich stanu i zmian patologicznych zarówno w medycynie, jak również jest wykorzystywany w paleoarcheologii, antropologii fizycznej i sądowej (Shah i in. 2019). Kluczową zaletą skaningowego mikroskopu elektronowego w badaniach materiałów szkieletowych jest bardzo wysoka rozdzielczość przestrzenna w połączeniu z dużą głębią ostrości i szerokim polem widzenia zarówno w badaniach powierzchni, jak i przekrojów próbek pobranych z materiałów szkieletowych.

Stereoskopia to kolejna dominująca technika obrazowania pozwalająca na generowanie wizualizacji 3D i zapewniająca percepcję głębi (Novitskaya i in. 2011). Z wykorzystaniem mikroskopu stereoskopowego i współpracującej z mikroskopem jednostki komputerowej, korzystając ze specjalistycznego oprogramowania (np. Olympus Stream), można prowadzić analizy makroskopowe i pomiary zębów, cech ich zużycia, zmian chorobowych i anomalii rozwojowych, jak również badać wybrane elementy kostne: zarówno ich powierzchnie, jak i przekroje (Lorkiewicz-Muszyńska 2015; Przysańska i in. 2017). Na podstawie prowadzonych obserwacji budowy zewnętrznej oraz badania mikrostruktury zębów można uzyskać więcej informacji zarówno o fizjologii uzębienia (morfologia, kształt, wielkość i warunki zgryzowe), jak i o miejscowych i uogólnionych stanach chorobowych (Przysańska i in. 2016). Powszechnie obserwowane podczas badań materiałów szkieletowych populacji pradziejowych starcie zębów niesie informacje dotyczące diety i rodzaju wykonywanej pracy (Lorkiewicz 2011), a hipoplazja szkliwa znana jest jako nieswoisty wskaźnik stresu rozwojowego i jest uważana za jeden z najbardziej niezawodnych czynników badań antropologicznych (Krenz-Niedbała i Piontek 1996; Temple 2010; Tomczyk i in. 2012). Jej analiza jest przydatna w rekonstrukcji stanu zdrowia związanego ze statusem społeczno-ekonomicznym grupy (Tomczyk i in. 2012).



W analizach materiałów kostnych zarówno współczesnych, jak i ze stanowisk archeologicznych specjalistyczne badania z wykorzystaniem mikroskopu stereoskopowego i elektronowego mikroskopu skaningowego (SEM) odgrywają szczególnie rolę w przypadku ujawnionych zmian chorobowych, uszkodzeń mechanicznych wskazujących na działanie różnych czynników. Umożliwiają dogłębną analizę cech uszkodzeń, dokonanie pomiarów pozwalających niejednokrotnie na identyfikację narzędzia czy ustalenie mechanizmu uszkodzeń – czy powstały za życia, czy pośmiertnie (np. urazy, ślady zębów zwierząt, ślady zębów ludzkich wskazujących na kanibalizm) (Bello i in. 2017). Badania stereoskopowe powierzchni kości mogą także odegrać ważną rolę w przypadku ujawniania pośmiertnych zdobień wykonanych na kościach, co pozwala na szersze poznanie kultury funeralnej populacji pradziejowych (Lorkiewicz-Muszyńska i in. 2017).

Wyniki klasycznych badań materiałów szkieletowych poszerzone o specjalistyczne badania mikroskopowe pozwalają wyciągać wnioski zarówno o biologicznych i ekologicznych, jak również kulturowych, aspektach życia ludzi w przeszłości (Seiler i in. 2013; Lanfranco i Eggers 2012; Lorkiewicz-Muszyńska i in. 2017).

### **RYS HISTORYCZNY I ZNACZENIE METOD OBRAZOWANIA MEDYCZNEGO W ANTROPOLOGII FIZYCZNEJ**

Interesujące efekty daje zestawienie badań antropologicznych z możliwościami nowoczesnej medycyny i obrazowania medycznego (Kociemba 2015; Kulczyk i in. 2015; Przysańska i in. 2016; Przysańska i in. 2017). Odkrycie promieniowania X przez Wilhelma Roentgena przyniosło rewolucję w sposobie medycznego spojrzenia na ciało człowieka. Po raz pierwszy w dziejach ludzkości, żeby zobaczyć, co się kryje pod skórą, nie trzeba było jej rozcinać. Pierwsze znane szeroko zdjęcie dłoni żony wynalazcy, Berthy, wykonano w listopadzie 1895 r., czas naświetlania ręki wyniósł wtedy około 15 minut. W krótkim czasie po swoim odkryciu Roentgen otrzymał liczne gratulacje i tytuły naukowe, a wagę jego odkrycia doceniła komisja przyznająca Nagrodę Nobla – Wilhelm Konrad Roentgen otrzymał ją w 1901 r.

Z biegiem lat udoskonalano aparaty wytwarzające promienie X, ale także pojawiły się pierwsze doniesienia o szkodliwym wpływie promieniowania rentgenowskiego na żywe tkanki, zwłaszcza często napromieniowywaną skórę rąk i twarzy oraz błony śluzowe. Od tego momentu datuje się rozwój radiologii lekarskiej, pierwsze zdjęcie w Polsce zostało wykonane już w 1896 roku, pozwalając na rozpoznanie zwichnięcia w stawie łokciowym. Dalszy rozwój to lata 1900–1920, gdzie udoskonalano części składowe aparatury do wytwarzania promieni X, poszukiwano materiałów promienioczułych i środków kontrastowych. Równocześnie do 1930 roku rozwijano techniki badań rentgenowskich, krystalizowała się diagnostyka narządowa, doskonalono metody badania przewodu pokarmowego, układu moczowego, dróg żółciowych, płuc itp. W latach powojennych rozwijały się szybko poszczególne działy rentgenodiagnostyki, do momentu stworzenia podwalin teoretycznych powstania tomografii komputerowej.

Tomografia komputerowa (CT) stanowiła przełom w badaniach zamkniętych struktur anatomicznych. Ta nieinwazyjna metoda badawcza pozwala odwzorować strukturę wewnętrzną badanego obiektu na podstawie zarejestrowanych pod różnym kątem projekcji obiektu, co umożliwia analizę obrazów przekrojowych (2D) i przestrzennych (3D). Dzięki temu można prowadzić badania zamkniętych przestrzeni czaszki, m.in. zatok przynosowych czy jamy czaszki człowieka bez konieczności chirurgicznego usuwania kości (Kociemba 2015; Lorkiewicz-Muszyńska i in. 2020).

Pierwszy skaner powstał w 1968 r., zbudował go Godfrey Hounsfield w firmie Electric and Musical Industries – bardziej znanej fanom muzyki jako EMI. Ciekawostką jest, że EMI wydawało pierwsze płyty grupy The Beatles, a sukces finansowy albumu „Abbey Road” pozwolił na finansowanie badań i budowę pierwszego tomografu komputerowego. Aparat ten miał pierwotnie służyć wyłącznie badaniom głowy, rozdzielczość obrazu wynosiła 80 × 80 pikseli, a czas naświetlania konieczny do uzyskania dwóch sąsiednich warstw obrazu wynosił około 4 minuty. Rozwój tej techniki obrazowania pozwala obecnie na badanie całego ciała w kilkanaście sekund.

Dzisiejsze tomografy komputerowe bardzo dobrze i bardzo szybko pokazują struktury kostne i tkanki miękkie, a zastosowanie środków kontrastowych pozwala pokazać przepływ krwi w naczyniach

oraz dynamiczne kontrastowanie się tkanek. Możemy wykonać doskonale diagnostycznie rekonstrukcje trójwymiarowe struktur kostnych i naczyń, nie tracąc jakości i dokładności obrazowania. Główną zaletą wykorzystania tomografii komputerowej w archeologii jest brak konieczności otwierania zamkniętych przestrzeni – przykładowo, można „zajrzeć” do zamkniętej amfory czy skrzyni, „podejrzeć”, co zawiera mumia, czy wreszcie ocenić części szkieletu człowieka pod kątem ich wieku, ewentualnych uszkodzeń, przebytych chorób czy urazów. Ocena kości człowieka jest możliwa po kilkuset, a nawet kilku tysiącach lat, tomografia komputerowa pozwala pokazać jamy szpikowe, wnętrze kości i wirtualnie „otworzyć” zamknięte przestrzenie kostne, zwłaszcza jamę czaszki człowieka czy zatok przynosowych. Dokładność skanowania umożliwia odwzorowanie badanych kości w modelach trójwymiarowych z zachowaniem najdrobniejszych szczegółów (Kociemba 2015; Kulczyk 2015; Przysańska i in. 2016).

Duża dynamika rozwoju technik obrazowania pozwala na uzyskiwanie coraz to wyższej rozdzielczości w badaniach materiałów szkieletowych. Mikrotomografia (micro-CT) jest nieinwazyjną metodą obrazowania o wysokiej rozdzielczości, która umożliwia uzyskanie rozdzielczości przestrzennej do 1  $\mu\text{m}$  (Stock i in. 2003). Rentgenowska mikrotomografia komputerowa opiera się na takich samych założeniach jak klasyczna tomografia komputerowa, jednak o znacznie większej rozdzielczości obrazu. Metoda mikrotomografii rentgenowskiej (micro-CT) umożliwia wizualizację właściwości zewnętrznych i wewnętrznych badanych obiektów, w tym materiałów kostnych. Metoda ta jest stosowana zarówno do analizy i wizualizacji jakościowej, jak i do pozyskiwania danych ilościowych.

Metody obrazowania medycznego mają także zastosowania w badaniach układu stomatognatycznego. Rozwój badań obrazowych w stomatologii datuje się od końca XIX w. 12 stycznia 1896 r. w Brunszwiku doktor Otto Walkoff wykonał zdjęcie rentgenowskie szczęki, przy czym był on tego dnia zarówno operatorem aparatu, jak i pacjentem. Przełomem w rozwoju diagnostyki twarzoczaszki było wprowadzenie w latach 70. ubiegłego wieku zdjęć pantomograficznych. Ten sposób obrazowania pozostaje do dzisiaj najważniejszym badaniem przeglądowym, które jest wykonywane w każdej sytuacji, gdy potrzebne jest wstępna, początkowa ocena stanu tkanek pacjenta. Stosowanie tej techniki

obrazowania w archeologii jest bardzo ograniczone (Kulczyk i in. 2015). Najnowszym sposobem obrazowania twarzoczaszki jest wolumetryczna tomografia komputerowa, nazywana też tomografią komputerową z promieniem stożkowym (CBCT), przeznaczona do obrazowania stanu tkanek twardych. Podczas badania wykonywana jest duża liczba dwuwymiarowych zdjęć rentgenowskich czaszki w różnych projekcjach, które następnie, dzięki złożonemu algorytmowi komputerowemu, są rekonstruowane do trzech wymiarów. Badanie to jest bardzo zbliżone do klasycznej (medycznej) tomografii komputerowej (Kulczyk i in. 2015).

Współczesne tomografy komputerowe pozwalają na uzyskanie obrazów z wysoką rozdzielczością. Minimalna możliwa do uzyskania podczas skanowania klasycznym tomografem (CT) grubość pojedynczej warstwy to 0,5 mm (obrazy skanowane są co 0,5 mm), a tomografem stożkowym (CBCT) to 0,076 mm, co przekłada się na jakość otrzymanych obrazów o najwyższej wartości diagnostycznej.

## BADANIA MIKROSKOPOWE W ANTROPOLOGII

Badania mikroskopowe w antropologii to 1) mikromorfometria (badania mikromorfologiczne i mikromorfometryczne) na podstawie przygotowanych preparatów histologicznych z materiałów kostnych oraz 2) analiza i obserwacje fragmentów lub całych kości (np. tatuaże na kościach czy nacięcia, zęby, ślady).

### Mikromorfometria

Badania mikroskopowe odgrywają ważną rolę w procesie określania pochodzenia gatunkowego czy szacowania wieku kostnego. Wzrost kości następuje dzięki współistnieniu procesów osteogenezy i osteoresorpcji, które skutkują modelowaniem kształtu i rozmiarów kości. Proces modelowania przebiega w sposób ciągły przez całe życie we wszystkich strefach kości (Dziedzic-Gocińska 1995). Zasadniczo procesy te zachodzą w okresie wzrostu i rozwoju organizmu, jednak modelowanie kości zachodzi także pod wpływem oddziaływania sił mechanicznych, jakie występują w czasie aktywności fizycznej (Eriksen 1986). Należy zwrócić uwagę, że sposób przebudowy i jej intensywność

są uwarunkowane genetycznie, a duży wpływ na utrzymanie homeostazy tkanki kostnej ma oddziaływanie hormonów oraz witamin. Kość w dojrzałym organizmie nie jest tą samą tkanką, która występowała w okresie młodzieńczym, a jednak modelowanie występuje również u osób dorosłych, jako odpowiedź tkanki kostnej na działające bodźce, np. zwiększone obciążenia, do których odpowiednio dostosowuje się struktura kości.

W wyniku zachodzących procesów resorpcyjnych, a następnie po syntezie nowej tkanki w tkance kostnej dochodzi do zmian strukturalnych. Powstają nowe osteony w miejscu dotychczasowych struktur i widoczne są w obrazie mikroskopowym osteony nienaruszone procesem resorpcji jak pozostałości tych, które wspomnianemu procesowi uległy. W wyniku przebiegającego procesu przebudowy dochodzi także do zmian ilościowych, które to zmiany są podstawą badań histometrycznych w ocenie wieku szkieletowego (Stout 1988).

Najbardziej przydatnym materiałem badawczym pod względem mikromorfometrycznym jest tkanka zbita trzonów kości długich, co oczywiście jest związane z najdłuższym czasem zachowania tej części kości w warunkach biologicznej degradacji. Uwzględniając występowanie zmian struktury tkanki kostnej pod wpływem chorób i zaburzeń metabolicznych, podczas opracowania metody ustalenia wieku do badań należy wykorzystać wyłącznie te kości, na których nie stwierdzono żadnych zmian patologicznych. Podczas opracowania metodyki badawczej ważne jest uwzględnienie także obszaru, z którego jest pobierana próbka kości zbitej, co związane jest z odmienną dynamiką zmian zachodzących z wiekiem w różnych kościach oraz częściach tej samej kości. Podczas zabezpieczania próbek do badań należy wyeliminować te fragmenty, które obejmują miejsca przyczepów mięśniowych czy zmian pourazowych. Ahlqvist i Damsten (1969) zauważyli, że pobranie próbki obejmujące np. fragment w bezpośrednim sąsiedztwie kresy chropawej może prowadzić do błędnych wyników z powodu włączenia do analizy zmian nie związanych z wiekiem, a powstałych w wyniku reakcji kości na czynniki mechaniczne w miejscu przyczepu mięśniowego. Najlepszym miejscem pobrania kości jest zabezpieczenie najbardziej oddalonego od cinka od okolicy przyczepu mięśni i ścięgien, którym jest trzon kości, jego badanie mikroskopowe bowiem zasadniczo zmniejsza ryzyko niewłaściwej

interpretacji wyników badań spowodowanych wpływem czynnika mechanicznego na mikrostrukturę kości. Istotne znaczenie ma również wymiar analizowanej powierzchni. Jak wynika z piśmiennictwa, rozmiar analizowanej powierzchni szlifu powinien zależeć od tego, jaką kość pobrano do badania oraz od lokalizacji pobranego fragmentu.

Procedura przygotowywania preparatów mikroskopowych z istoty kostnej zbitej, bez względu na wybraną metodę, sprowadza się do kilku podobnych etapów. Różnice w przygotowaniu preparatów dotyczą szczegółów związanych z wykorzystanymi narzędziami i odczynnikami.

Po oczyszczeniu kości za pomocą np. piły sekcyjnej pobiera się poprzeczny wycinek w kształcie pierścienia o grubości około 5 mm. Pobrany wycinek odtłuszcza się z wykorzystaniem roztworu alkoholu etylowego ( $C_2H_5OH$ ) lub detergentu. Po wypłukaniu i wysuszeniu każdy z pobranych fragmentów zostaje zatopiony w substancji utwardzającej i przyklejany szkłem wodnym – roztworem wodnym krzemianu sodu ( $Na_2SiO_3$ ) – do szklanego podłoża. Wykorzystanie szkła wodnego pozwala na bardzo mocne przymocowanie próbki kości do szklanego podłoża podczas szlifowania. W kolejnym etapie materiał szlifuje się ręcznie lub z wykorzystaniem szlifierek mechanicznych do uzyskania grubości preparatu około 80–110  $\mu m$  (Ubelaker 1989; Sobol i in. 2015). Możliwość bardzo łatwego usunięcia szkła wodnego po ukończeniu procedury szlifowania jest decydująca podczas wyboru surowca dla zatapiania i przyklejania. Po uzyskaniu odpowiedniej grubości 80–110  $\mu m$  preparat odkleja się za pomocą wody od szklanego podłoża, ponownie odtłuszcza w roztworze alkoholu etylowego ( $C_2H_5OH$ ), a następnie prześwietla, stosując ksylen. W dalszej kolejności materiał zostaje przyklejony do szkiełka podstawowego za pomocą balsamu kanadyjskiego i przykryty szkiełkiem nakrywkowym. Procedura przygotowania preparatu szlifu kostnego jest pracochłonna i zajmuje około 7–8 dni.

W celu ustalenia wieku szczątków analizie poddaje się takie cechy mikroosteometryczne, jak:

- liczba osteonów i ich średnia średnica,
- powierzchnia zajmowana przez osteony,
- powierzchnia zajmowana przez fragmenty (pozostałości) po przebudowanych osteonach,
- powierzchnia zajmowana przez blaszki między-systemowe,



- powierzchnia zajmowana przez blaszki kostne zewnętrzne i wewnętrzne oraz ich grubość,
- rozmiar zatok resorpcyjnych,
- średnice kanałów Haversa,
- odsetek powierzchni zajmowanej przez kanały Haversa,
- stosunek powierzchni zajmowanej przez osteony do ich liczby,
- stosunek powierzchni zajmowanej przez kanały Haversa do ich liczby,
- najmniejsza średnica kanału Haversa w polu widzenia,
- średnia liczba blaszek kostnych przypadających na osteon,
- łączny procentowy udział osteonów i kanałów Haversa w polu widzenia mikroskopu.

Wyniki przeprowadzonych badań wskazują na to, iż takie cechy, jak ilość osteonów w polu widzenia, powierzchnia zajmowana przez osteony, powierzchnia zajmowana przez fragmenty po przebudowanych osteonach, powierzchnia zajmowana przez blaszki międzysystemowe i obwodowe (zewnętrzne i wewnętrzne) oraz ich grubość, rozmiar zatok resorpcyjnych, średnice kanałów Haversa, wykazują największą korelację zmiennych związanych z wiekiem.

Prowadzone przez wielu badaczy analizy preparatów histologicznych wykazały, że z wiekiem wzrasta liczba osteonów oraz zajmowana przez nie powierzchnia na jednostkę powierzchni przekroju kości, wzrasta rozmiar zatok resorpcyjnych, powierzchnia zajmowana przez fragmenty – pozostałości po przebudowanych osteonach, średnia średnica kanałów Haversa, jak również następują zmiany ilościowe innych struktur, np. zmniejszenie powierzchni zajmowanej przez międzysystemowe i obwodowe blaszki kostne (Jowsey 1960; Dudar i in. 1993; Sobol i in. 2015). Zmniejszeniu ulega również stosunek powierzchni obwodowych blaszek kostnych do całkowitej powierzchni przekroju istoty kostnej zbitej (Kerley 1965; Kim i in. 2007).

W celu szczegółowej analizy wyżej wymienionych struktur mikroskopowych kości przeprowadza się badania mikroskopowe w świetle przechodzącym przy powiększeniu  $\times 20$ ,  $\times 50$ ,  $\times 100$ , a dodatkowo używa się filtrów polaryzacyjnych, co ułatwia ocenę jakościową i ilościową wybranych struktur kości. Działanie mikroskopu polaryzacyjnego jest oparte na zjawisku dwójłomności substancji. Filtry polaryzacyjne przepuszczają tylko tę część światła, która ma ściśle określoną polaryzację, a promienie są skrzyżowane względem siebie o  $90^\circ$ . W preparatach

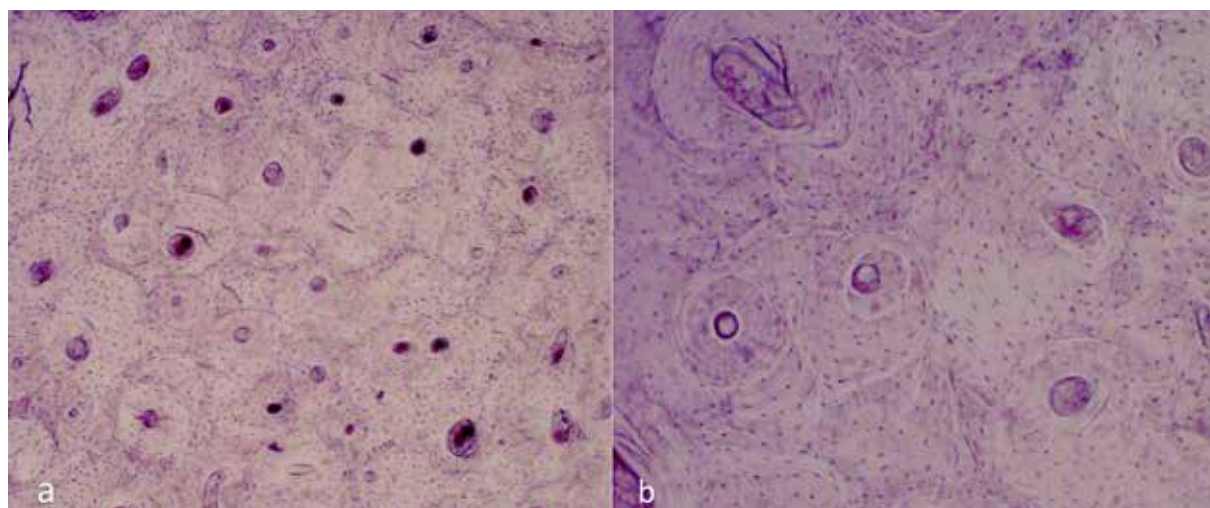
histologicznych kości efekt polaryzacji obserwuje się z uwagi na bardzo charakterystyczną budowę pojedynczych blaszek kostnych, a mianowicie układ substancji organicznych (m.in. włókien kolagenu) i nieorganicznych (hydroksyapatytu) względem siebie w sąsiadujących blaszkach kostnych, co powoduje, że w trakcie przechodzenia światła przez próbkę jest ona „dwójłomna” i przy przechodzeniu światła przez filtr polaryzacyjny oko obserwatora postrzega efekty barwne ze względu na to, że zmiana stanu polaryzacji jest różna dla różnych długości światła.

Prowadzone w praktyce medyczno-sądowej badania na próbkach pobranych ze szczątków, dające możliwość weryfikacji otrzymanych wyników obserwacji i pomiarów z wiekiem metrykalnym zmarłych osób, pozwoliło na opracowanie metod, które z powodzeniem można stosować w badaniach materiałów szkieletowych ze stanowisk archeologicznych (Turner-Walker i Mays 2007).

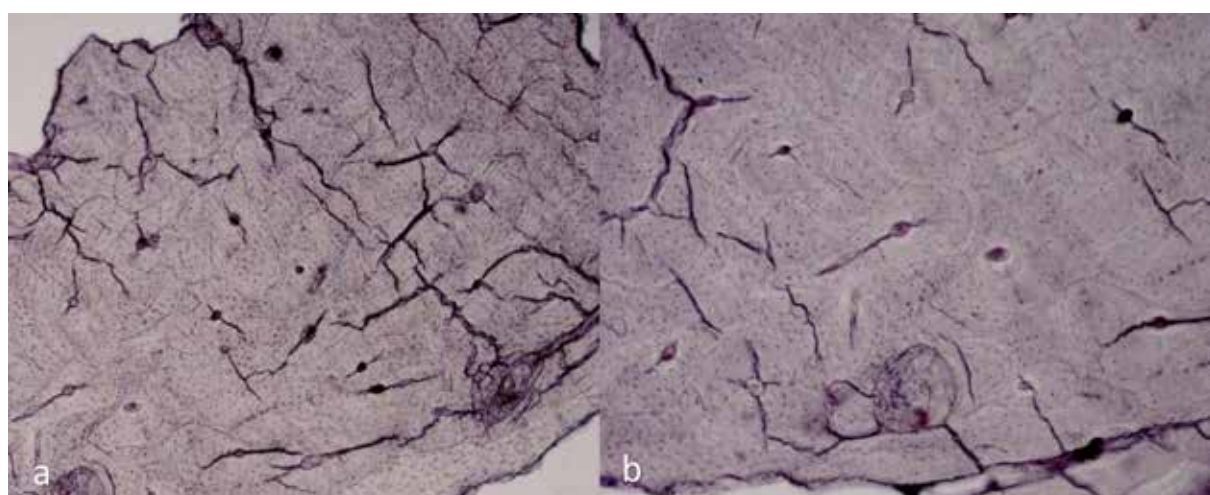
Przykłady wykorzystania analiz w procesie określania pochodzenia gatunkowego zaprezentowano na rycinach 1-5, a szacowania wieku kostnego na rycinach 5-7.

### **Analiza mikroskopowa wybranych elementów kostnych, przykłady badań**

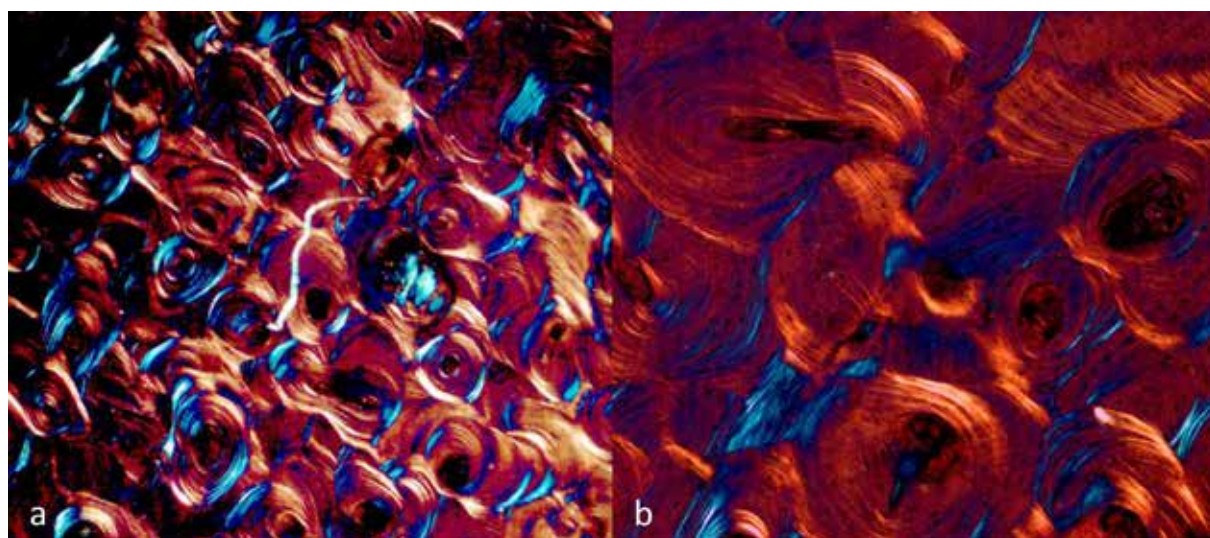
W badaniach materiałów szkieletowych z wykorzystaniem mikroskopii stereoskopowej nie są wymagane specjalne preparatyki próbek, barwienie czy cięcie. Analizie poddaje się wybrane elementy kostne pokazujące zmiany pourazowe czy chorobowe będące celem obserwacji. W złamaniach czaszki, kości kończyn, żeber czy innych elementów szkieletu badania z wykorzystaniem mikroskopu stereoskopowego poszerzają klasyczne analizy makroskopowe. Są przydatne w określaniu rodzaju urazu, czasu jego wystąpienia, mechanizmu obrażeń układu kostnego, charakterystyki narzędzia użytego podczas zadawania ciosu. W badaniach dotyczących urazów układu kostnego ważna jest ocena wystąpienia takiego urazu, gdzie wyróżnia się obrażenia świeże, obrażenia wskazujące początkowe i zaawansowane stadia gojenia (Teresiński 2019). Ważne jest także określenie, czy uszkodzenia powstały za życia, czy po śmierci. Do oceny czasu powstania obrażeń mogą zostać wykorzystane badania makroskopowe, mikroskopowe i badania obrazowania medycznego (w przypadku szczątków w stanie zeszkielestowania tomografia komputerowa CT).



**Ryc. 1.** Szlif trzonu obojczyka 59-letniego mężczyzny, światło przechodzące, powiększenie 50× (a) i 100× (b) (wyk. J. Sobol)

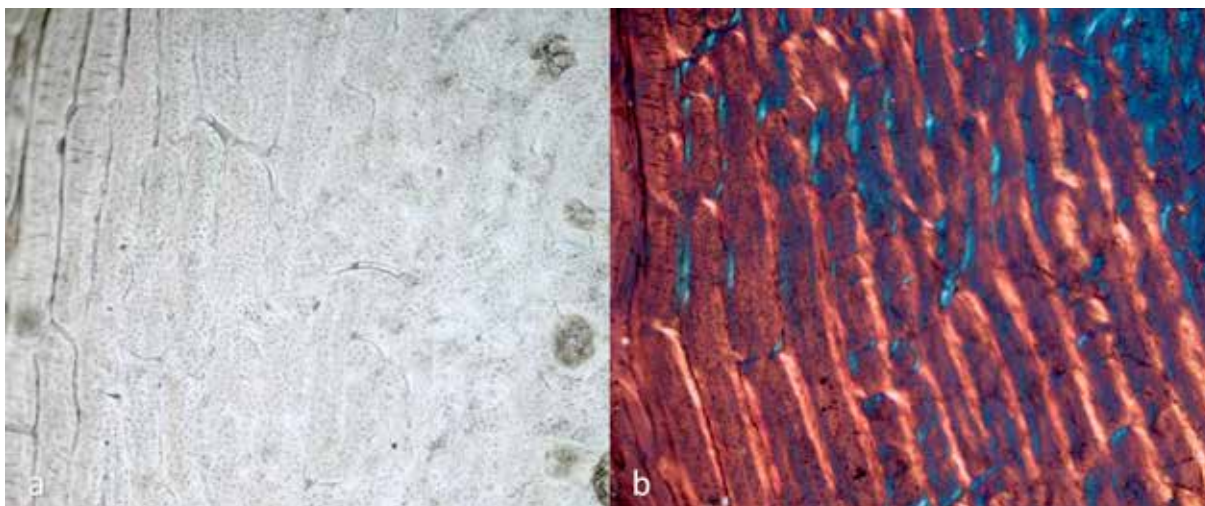


**Ryc. 2.** Szlif trzonu spalonego obojczyka 22-letniego mężczyzny, światło przechodzące, powiększenie 50× (a) i 100× (b) (wyk. J. Sobol)

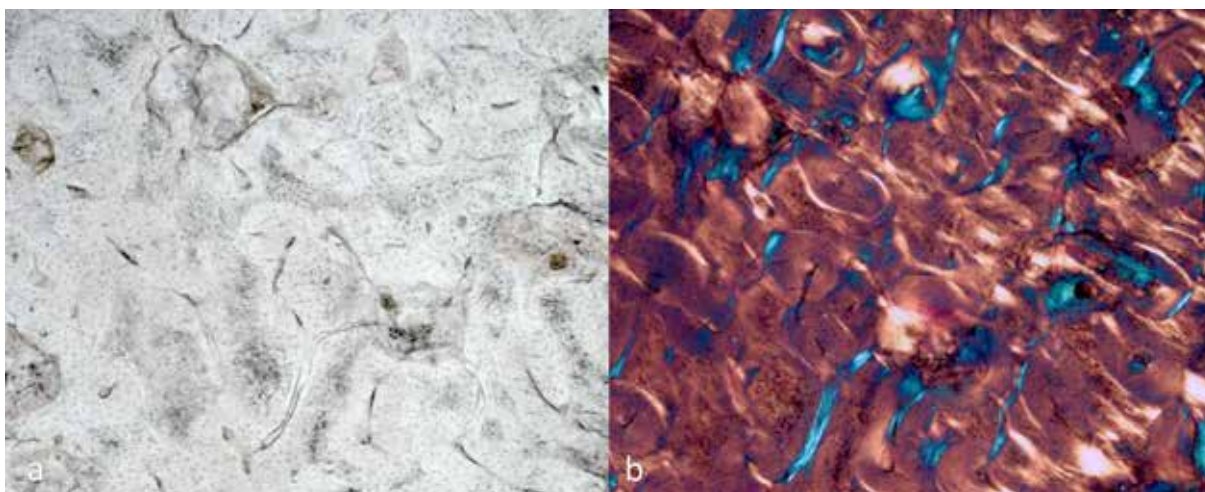


**Ryc. 3.** Szlif trzonu obojczyka 54-letniego mężczyzny, światło spolaryzowane, powiększenie 50× (a) i 100× (b) (wyk. J. Sobol)

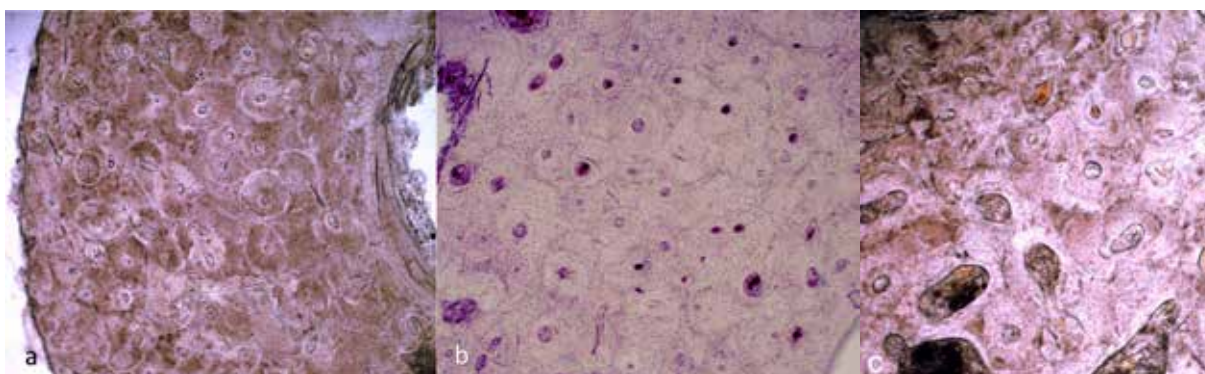




**Ryc. 4.** Szlif trzonu kości udowej świni, światło przechodzące (a) i światło spolaryzowane (b), powiększenie 50× (wyk. J. Sobol)



**Ryc. 5.** Szlif trzonu kości udowej bydlę, światło przechodzące (a) i światło spolaryzowane (b), powiększenie 50× (wyk. J. Sobol)



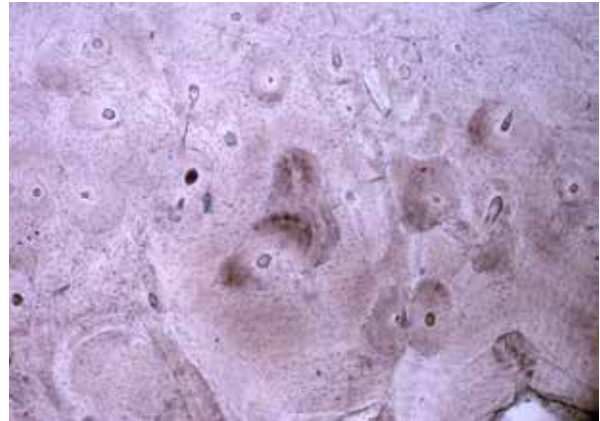
**Ryc. 6.** Preparaty histologiczne obojczyka osób płci żeńskiej w wieku: 42 lata (a), 66 lat (b), 72 lata (c) (wyk. J. Sobol)



Podczas prac ziemnych w okolicy Piły ujawniono szczątki ludzkie oraz elementy amunicji. Wyeksplorowano trzy częściowo zachowane szkielety ludzkie wraz z wyposażeniem wskazującym, że mogą być to szczątki żołnierzy niemieckich z okresu II wojny światowej. W przypadku szkieletu oznaczonego literą C czaszka zachowana była częściowo i w stanie rozfragmentowanym. W zakresie łuski kości czołowej po stronie lewej ujawniono ubytek o cechach otworu wlotowego – na powierzchni zewnętrznej o brzegach ostrych (ryc. 8a), od strony wewnętrznej z kraterowatymi ubytkami na obwodzie (ryc. 8b). Badania makroskopowe poszerzono o obserwacje pod mikroskopem stereoskopowym (ryc. 8a i b), wykonano pomiary (z wykorzystaniem narzędzia pomiarowego programu Olympus Stream) średnicy otworu na powierzchni zewnętrznej i na powierzchni wewnętrznej. Średnica otworu od strony zewnętrznej była węższa niż średnica otworu od strony wewnętrznej. Od otworu promieniście rozchodziły się cztery szczeliny złamania.

Poniżej przedstawiono fotografie z obserwacji pod mikroskopem stereoskopowym dotyczące innych przypadków uszkodzeń mechanicznych, spowodowanych pośmiertnie przez zwierzęta (ryc. 9) i przez człowieka (ryc. 10 i 11).

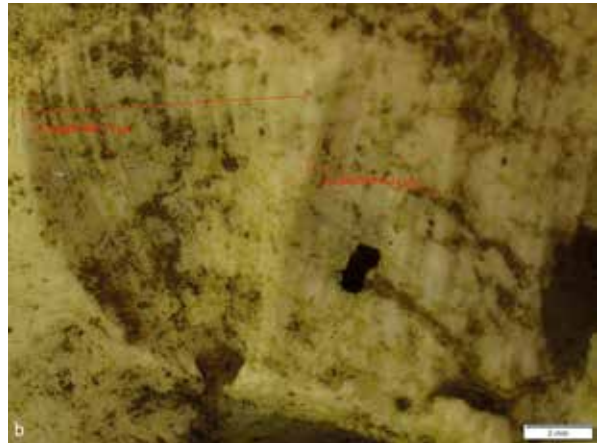
Przykłady z badań archeologicznych na rycinach 11a, b, c i d przedstawiają kość strzałkową szkieletu osobnika dorosłego płci żeńskiej z grobu nr 13 ze stanowiska Hrubieszów-Podgórze, datowanego na wczesną epokę brązu. Na kości strzałkowej prawej stwierdzono dwie grupy ubytków powierzchniowej warstwy trzonu kości o różnym charakterze. Ubytki obserwuje się na wszystkich trzech powierzchniach kości i trzech brzegach kości. Część ubytków ma charakter wydrążeń o płaskich, zaokrąglonych na obwodach brzegach i zartartych granicach, na powierzchni których ujawniono powierzchowne linijne zarysowania ułożone poprzecznie do osi długiej kości i prawie równoległe względem siebie (ryc. 11d). Drugi rodzaj ubytków zlokalizowany jest w części bliższej trzonu kości na powierzchni przyśrodkowej i tylnej, obejmują one również brzeg międzykostny (ryc. 11a, b i c). W tym obszarze stwierdza się liczne powierzchowne linijne ubytki zbitej warstwy kości. Miejscami w zakresie brzegu międzykostnego obejmują one całą grubość części zbitej, a w najgłębiej położonym



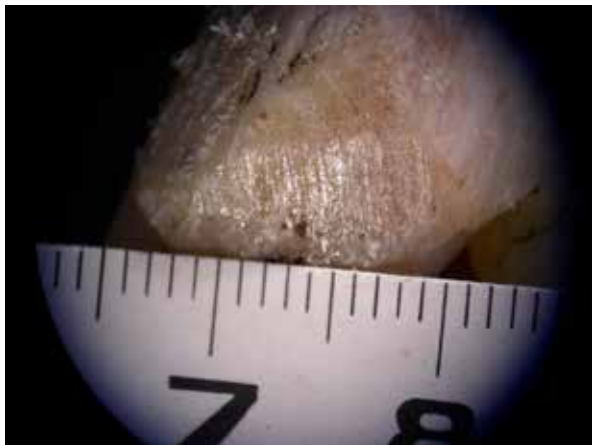
**Ryc. 7.** Preparat histologiczny obojczyka osoby płci męskiej w wieku 23 lata (wyk. J. Sobol)



**Ryc. 8.** Badania czaszki osobnika dorosłego płci męskiej z grobu zbiorowego, II wojna światowa. Badania z wykorzystaniem mikroskopu stereoskopowego Olympus SZ 61. Zbliżenie otworu obecnego w zakresie łuski kości czołowej po stronie lewej: powierzchnia zewnętrzna, pomiary średnicy otworu od strony zewnętrznej (a), powierzchnia wewnętrzna (b) (wyk. D. Lorkiewicz-Muszyńska)



**Ryc. 9.** Przypadki obserwowanych na czaszkach ludzkich uszkodzeń spowodowanych aktywnością zwierząt. Ślady zębów zwierzęcych. Na zdjęciu a widać uszkodzenia kości w wyniku wbicia i zagłębienia zębów w kość czołową, na zdjęciu b są to ślady wskazujące na uszkodzenia powstałe w wyniku przesuwania zębów po powierzchni kości, skutkujące ubytkami istoty zbitnej zewnętrznej. Badania i pomiary z wykorzystaniem mikroskopu stereoskopowego Olympus SZ 61 i narzędzia pomiarowego programu Olympus Stream. Materiały współczesne (wyk. D. Lorkiewicz-Muszyńska, J. Sobol)



**Ryc. 10.** Uszkodzenie kości ramiennej spowodowane narzędziem ostrokrawędzistym. Przypadek zabójstwa, materiały współczesne (wyk. J. Sobol)

punkcie obserwuje się odkrycie istoty gąbczastej (ryc. 11a, c).

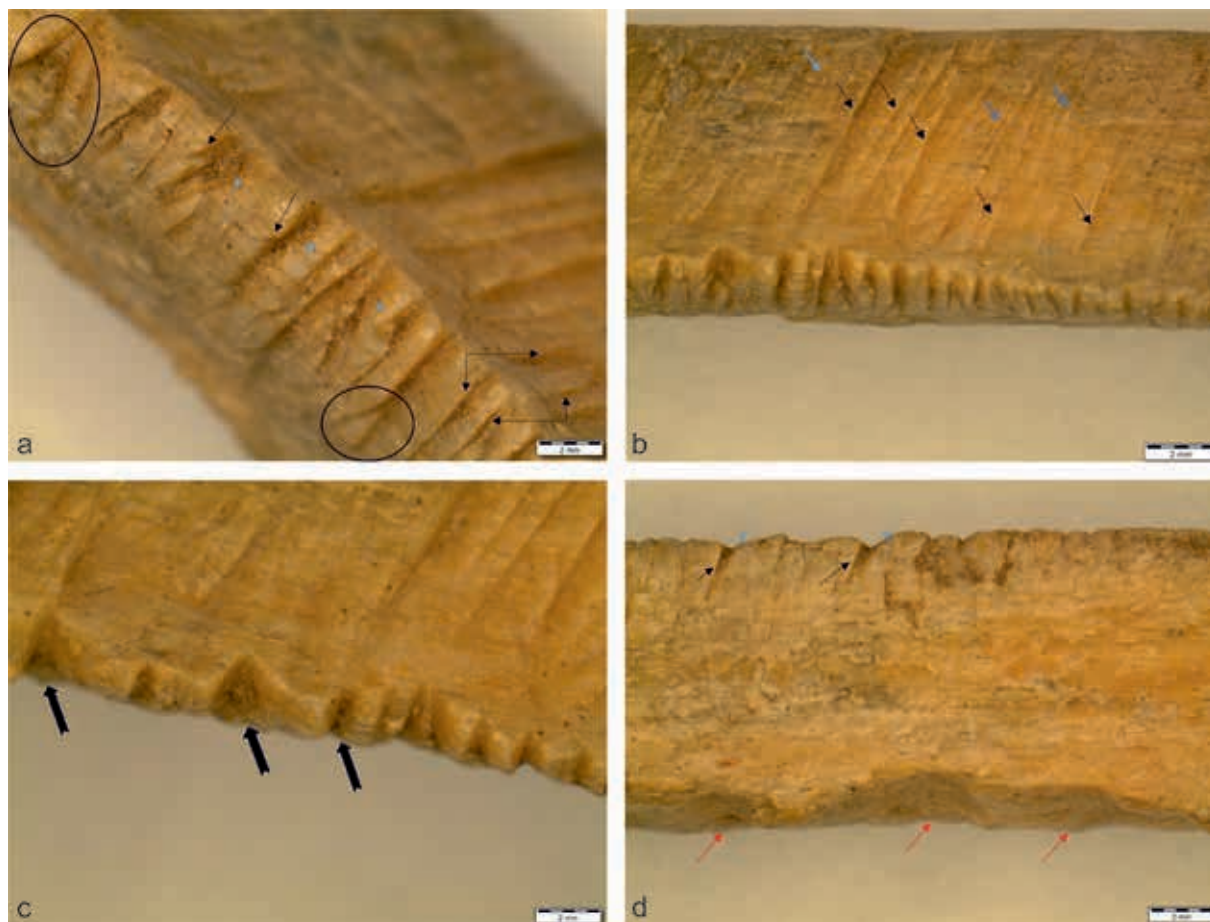
Charakter drugiego rodzaju ubytków wskazuje, że powstały one w wyniku działania narzędzia ostrokrawędzistego na skutek postępującego przesuwania względem powierzchni i brzegu trzonu kości z wywieraniem pewnego nacisku na tę ostrą krawędź. Ostrze użytego przedmiotu było ustawione prostopadle do osi długiej kości bądź pod kątem ostrym do jej powierzchni i brzegu w kierunku od końca dalszego ku górze i nieco w głąb trzonu kości. Obecność liniowych powierzchniowych zarysowań w obrębie brzegów ubytków klinowych oraz rozgałęzienia w miejscu przejścia z brzegu na

powierzchnię przyśrodkową bądź tylną świadczą o wielokrotnie powtarzanych postępujących nacięciach zadawanych pod kątem ostrym do powierzchni kości, większość z nich powodowała powstanie ubytków na powierzchni przyśrodkowej i tylnej, przechodząc przez brzeg międzykostny.

Charakter i lokalizacja ubytków w obrębie kości oraz ich rozmieszczenie względem siebie wskazują, że do uszkodzeń mechanicznych – nacięć na kości – doszło pośmiertnie, lecz w stosunkowo krótkim czasie, maksymalnie do kilkudziesięciu lat od zgonu, kiedy kość zawierała jeszcze składniki organiczne nadające jej elastyczność i zapobiegające drobnofragmentowemu kruszeniu w miejscu jej uszkodzenia. Obserwacje mikroskopowe mogą być przydatne w datowaniu momentu rozkopania grobu jeszcze w pradziejach i wskazują, iż szczątki były już w stanie zeszkieletonowania, lecz w czasie niezbyt odległym (do kilkudziesięciu lat) od zgonu osoby.

Badania stereoskopowe w analizie materiałów szkieletowych mogą także odegrać ważną rolę w przypadku ujawniania pośmiertnych zdobień wykonanych na kościach, co pozwala na szersze poznanie kultury funeralnej populacji pradziejowych. W tym celu badaniom mikroskopowym poddano kości łokciowe, prawą i lewą, pochodzące ze szkieletu jednego osobnika, płci żeńskiej (w wieku 25-30 lat), z grobu 10 ze stanowiska Porohy 3A, (Środkowe Naddniestrze). Obiekt ów jest „najbardziej rubieżowym” – wysuniętym na zachód – poświadczeniem aplikacji „tatuazu” w „pontyjsko-kaspijskiej” przestrzeni zastosowań tego zabiegu





**Ryc. 11.** Kość strzałkowa ze szkieletu osobnika dorosłego płci żeńskiej z grobu nr 13 ze stanowiska Hrubieszów-Podgórze datowanego na wczesną epokę brązu. Kości i wyposażenie były przemieszane, co wskazuje na wcześniejsze rozkopanie grobu. Na kości strzałkowej prawej stwierdzono dwie grupy ubytków powierzchniowej warstwy trzonu kości o różnym charakterze. Widoczne są liczne linijne i klinowe ubytki kości (a, b, c i d) oraz o charakterze wydrążeń (d – oznaczono strzałkami barwy czerwonej) (wyk. D. Lorkiewicz-Muszyńska, J. Sobol)

rytualnego (Lorkiewicz-Muszyńska i in. 2017). W III tys. p.n.e. na kościach szkieletów z pochówków wczesnobrązowych kultur jamowej i katakumbowej odkryto charakterystyczne zdobienia (Teslenko 1996; Shishlina i in. 2013; Lorkiewicz-Muszyńska i in. 2017).

Na kościach widoczne są regularne wzory barwy czarnej. Analizy przeprowadzono z uwzględnieniem charakteru zdobień, ich formy, lokalizacji, stopnia pokrycia kości i budowy anatomicznej kości, pokrycia barwnikiem struktur anatomicznych w miejscach przyczepów mięśni więzadeł. Wzory, które znajdują się na obu kościach łokciowych, poddano badaniom makro- i mikroskopowym oraz fizykochemicznym (Lorkiewicz-Muszyńska i in. 2017). Obserwacje mikroskopowe przeprowadzono z wykorzystaniem mikroskopu stereoskopowego marki Olympus model SZ61.

Wykonano serię zdjęć spod mikroskopu stereoskopowego (ryc. 15-17). Dodatkowo wykonano dokumentację fotograficzną z wykorzystaniem aparatu fotograficznego, lustrzanki cyfrowej marki Pentax model K30 (ryc. 14).

Zdobienia naniesione na obu kościach łokciowych charakteryzują się wysokim stopniem regularnością, z zachowaniem ciągłości na kości łokciowej prawej. W przypadku kości łokciowej lewej wzór wykazuje ciągłość na znacznym jej odcinku, z cechami rozmycia na około 1/3 długości trzonu. Wzory na kości łokciowej prawej przyjmują układ naprzemiennie występujących równoległych, dłuższych pasów łukowatego kształtu z przebiegającymi pomiędzy nimi pojedynczymi, krótszymi pasami, także o łukowatym kształcie (ryc. 12a). Wzory zlokalizowane są na powierzchni tylnej trzonu kości, pomiędzy brzegami tylnym i brzegiem zewnętrznym,





**Ryc. 12.** Zdjęcie kości łokciowej prawej (a) i lewej (b) z widocznymi wzorami (wyk. D. Lorkiewicz-Muszyńska)

zwanym grzebieniem międzykostnym. Na niektórych odcinkach wzory dochodzą do grzebienia międzykostnego. Na kości łokciowej lewej widoczne są regularne wzory w formie łańcuszka pokrywające jednolicie powierzchnię kości (ryc. 12b). Na szczególną uwagę zasługuje lokalizacja zdobień na analizowanych kościach, tj. ich obecność na powierzchniach tylnych trzonów obu kości łokciowych, skierowanych ku tyłowi i bocznie, od strony kości promieniowej. Ponadto obserwuje się regularność i zachowanie ciągłości wzorów obejmujących powierzchnie kości w miejscach będących przyczepami mięśni, więzadeł, ścięgien i błony międzykostnej. Istotny jest także aspekt naturalnych nierówności kości i sposobu nałożenia barwnika, jak również miejsc objętych zmianami (ubytkami) pośmiertnymi kości i obecności w nich barwnika.

Bliższa obserwacja pod mikroskopem stereoskopowym wykazała regularność krycia równych powierzchni (ryc. 13-15). Zaobserwowano brak barwnika w niektórych zagłębieniach przy nierównej

powierzchni struktury kości, a miejscami na brzegach naturalnych zagłębień (m.in. otworów odżywczych) zaobserwowano większe nagromadzenie barwnika (ryc. 14). Wskazywać to może na wkład siły i uciskanie na narzędzie, którym rozprawiano barwnik, co podczas nanoszenia skutkowało jego nagromadzeniem na brzegach otworów. Podczas obserwacji mikroskopowej zaobserwowano także pokryte barwnikiem naturalne ubytki (zmiany erozyjne) istoty zbitkiej kości (ryc. 15). Obserwacje pod mikroskopem stereoskopowym wskazują, że został on naniesiony na kość pośmiertnie, przy jej stanie już zeszkieleutowania i obecnych drobnych ubytkach erozyjnych na powierzchni kości (ryc. 15).

### Badania mikroskopowe zębów

Zęby, oprócz elementów kostnych, stanowią ważne narzędzie wykorzystywane w rekonstrukcji



**Ryc. 13.** Zdjęcie fragmentu wzoru na kości łokciowej prawej spod mikroskopu stereoskopowego – widoczne regularne wzory pokrywające jednolicie powierzchnię kości (wyk. D. Lorkiewicz-Muszyńska)



**Ryc. 14.** Zdjęcie fragmentu wzoru spod mikroskopu stereoskopowego (kość łokciowa prawa) – widoczne nagromadzenie barwnika w naturalnych zagłębieniach i otworach istoty zbitiej kości. Barwnik zgromadzony jest z tej samej strony w obu zagłębieniach, co wskazuje na kierunek, w jakim barwnik był наносzony (wyk. D. Lorkiewicz-Muszyńska)

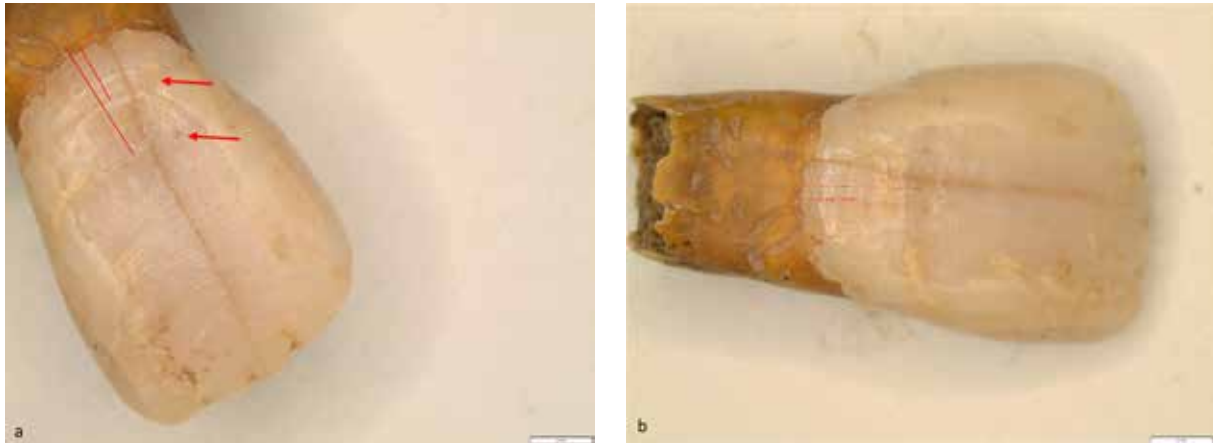
warunków życia populacji pradziejowych (Przystańska i in. 2016). Na podstawie obserwacji budowy zewnętrznej i badania mikrostruktury zębów uzyskuje się wiele informacji dotyczących morfologii, kształtu, wielkości, warunków zgryzowych, jak również miejscowych i uogólnionych stanach chorobowych czy anomaliach rozwojowych. W badaniach dotyczących uzębienia znaczący wkład mają metody obrazowania medycznego oraz mikroskopowego.

W badaniach hipoplazji szkliwa prowadzi się obserwacje cech morfologicznych, a także wykonuje pomiary. Hipoplazja szkliwa powstaje w wyniku zakłócenia tworzenia się szkliwa w procesie rozwoju zęba, a raz uformowane szkliwo, nie podlega już przemodelowaniu (Krenz i Piontek 1996). Regularny i rytmiczny rozwój szkliwa może zostać zakłócony oddziaływaniem różnych czynników, które mają wpływ na rozwój zęba, co skutkuje chronologicznym zapisem działania czynników w morfologii korony zęba (Krenz i Piontek 1996; Tomczyk i in. 2012). Efektem działania czynników (np. chorobowych, niedoborów żywieniowych) są defekty szkliwa w postaci dołków, rowków lub linii widocznych na koronie zębowej. W celu określenia wieku biologicznego, w jakim wystąpiło zaburzenie, dokonuje się pomiarów odległości od defektu do wysokości miejsca kontaktu szkliwa z cementem. Badania wykonane z wykorzystaniem mikroskopu stereoskopowego gwarantują dużą precyzję obserwacji i pomiarów. Poniżej przedstawiono wyniki

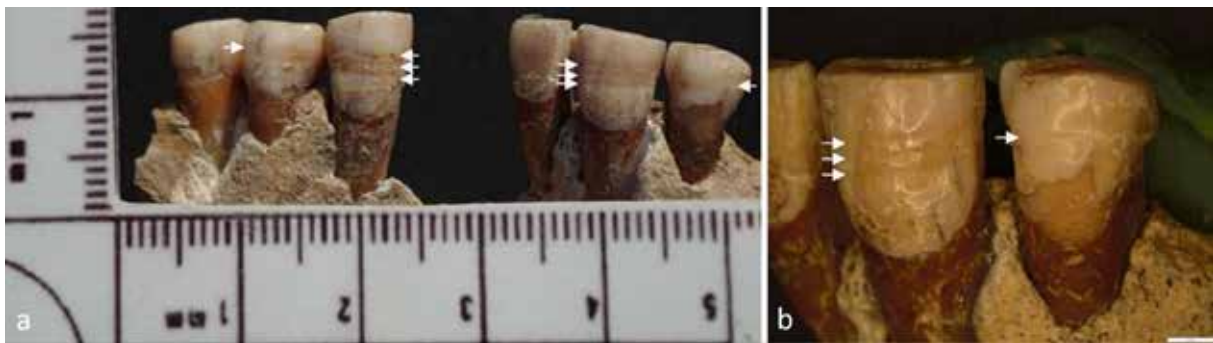


**Ryc. 15.** Zdjęcie fragmentu wzoru spod mikroskopu stereoskopowego (kość łokciowa lewa) – widoczne regularne wzory w formie łańcuszka pokrywające jednolicie powierzchnię kości, obserwuje się nagromadzenie barwnika w zagłębieniach o charakterze naturalnych zmian erozyjnych (wyk. D. Lorkiewicz-Muszyńska)

badan mikroskopowych hipoplazji szkliwa w materiałach archeologicznych. Na rycinie 16 przedstawiono centralny lewy siekacz szczęki (21) osobnika z grobu nr 1 z cmentarzyska w Horodysku, datowanego na wczesną epokę brązu. Na zębie 21 stwierdzono hipoplazję szkliwa w postaci dwóch liniowych równoległych zagłębień (ryc. 16a i b). Pomiary wykonano na obrazach cyfrowych z użyciem mikroskopu stereoskopowego Olympus SZ61 i narzędzia pomiarowego programu Olympus Stream. Na podstawie zmierzonej wartości tej odległości (ryc. 16b)



**Ryc. 16.** Zdjęcia centralnego lewego siekacza (21) szczęki osobnika z grobu nr 1 spod mikroskopu stereoskopowego; a – liniowa hipoplazja szkliwa (oznaczono strzałkami oraz linijnie odcinki od defektu do oznaczona strzałkami); b – pomiar jednego z odcinków od defektu do wysokości miejsca kontaktu szkliwa z cementem. Stanowisko Horodysko, wczesna epoka brązu (wyk. D. Lorkiewicz-Muszyńska)



**Ryc. 17.** Zdjęcia zębów żuchwy osobnika z grobu nr 8. Widoczna na zębach hipoplazja szkliwa. Obserwacje makroskopowe i mikroskopowe z wykonanymi pomiarami (c) (wyk. D. Lorkiewicz-Muszyńska)

oszacowano wiek wystąpienia defektu z dokładnością do pół roku. Szacowanie wieku wystąpienia defektu przeprowadzono przy użyciu diagramu mineralizacji szkliwa uzębienia stałego, wykonanego przez Masslera i współpracowników (1941), w modyfikacji Swardstedta (1966) (Goodman i in. 1984).

Pomiary odległości defektu do wysokości miejsca kontaktu szkliwa z cementem na obrazach cyfrowych pod mikroskopem stereoskopowym wyniosły 3,9 mm oraz 2,10 mm. Analizy i obliczenia wykazały, iż zaburzenia rozwoju i mineralizacji szkliwa wystąpiły u osobnika w okresie rozwoju co najmniej dwukrotnie, tzn. w wieku pomiędzy 2,5 a 3 rokiem życia i w wieku około 3,5 lat.

Na rycinie 17 przedstawiono analizy makroskopowe i mikroskopowe zębów z hipoplazją szkliwa osobnika z grobu nr 8 (ryc. 17a, b i c) ze stanowiska w Rogalinie, gm. Horodło, datowanego na wczesną epokę brązu. Hipoplazja występowała obustronnie na zębach żuchwy po stronie prawej i lewej.



### Badania obrazowania medycznego w antropologii

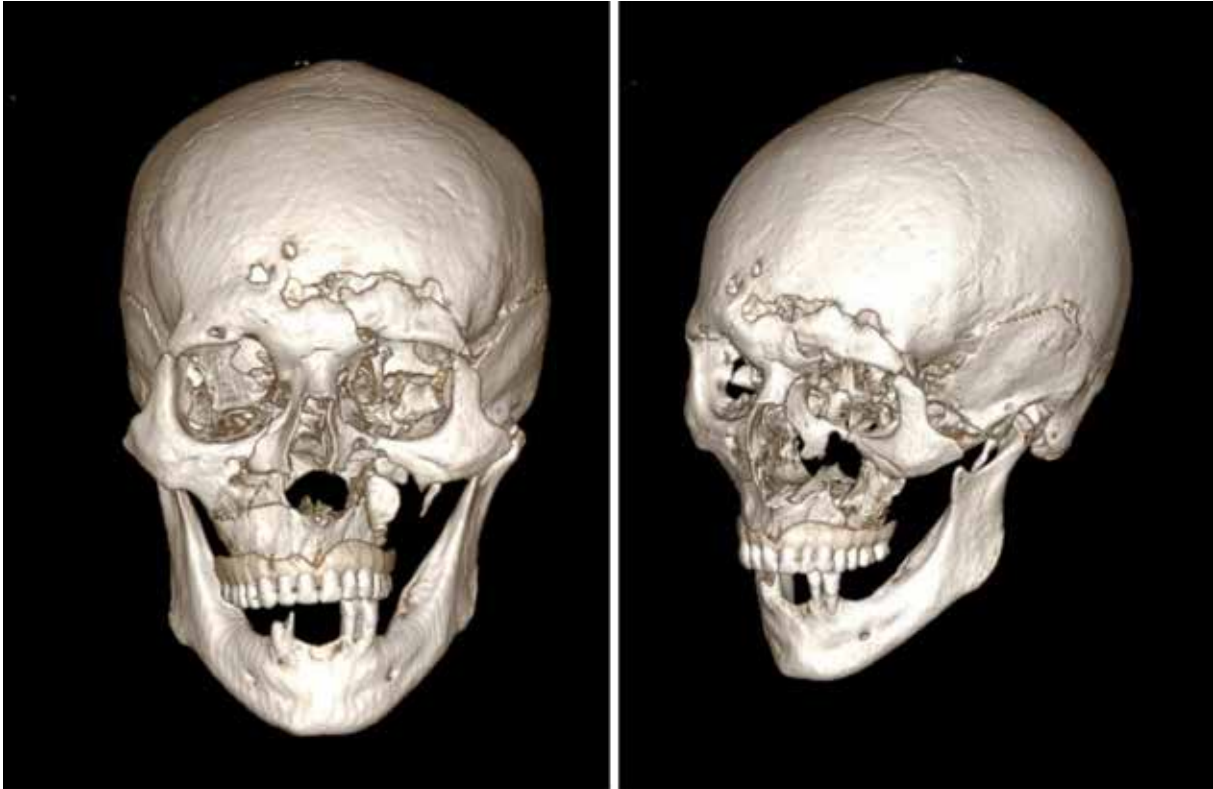
W badaniach materiałów szkieletowych z wykorzystaniem tomografii komputerowej (CT), tomografii stożkowej (CBCT) czy mikrotomografii (micro-CT) nie są wymagane specjalna preparatyka próbek, barwienie czy cięcie. Badania pozwalają na prowadzenie analiz na poszczególnych projekcjach przekrojowych 2D i przestrzennych 3D. Można wybierać dowolny region zainteresowania oraz prowadzić badania ilościowe i jakościowe, tworząc realistyczne modele 3D obiektu oraz jego struktury wewnętrznej. Tomografia komputerowa pozwala m.in. na zobrazowanie charakteru i dokładnej lokalizacji złamań, stopnia zaawansowania kostnienia, zmian chorobowych czy analizy zamkniętych struktur kostnych.

W trakcie dwóch sezonów badawczych w okresie 27.11-1.12.2017 r. i 7-18.5.2018 r. prowadzono prace archeologiczne na terenie dzisiejszego Parku Heweliusza w Poznaniu. Prace realizowane były w ramach projektu Instytutu Pamięci Narodowej: „Poszukiwanie nieznanych miejsc pochówku ofiar terroru komunistycznego z lat 1944-1956”. Odkryte i przebadane jamy grobowe zawierały szczątki kostne od 1 do 11 osób, łącznie 44 szkielety. Podczas badań antropologicznych i medyczno-sądowych w wielu przypadkach obserwowano zaleczone zmiany pourazowe oraz obrażenia bez cech gojenia wskazujące na udział osób trzecich. W badaniach wykorzystano klasyczne metody stosowane w antropologii sądowej, a także badania specjalistyczne z wykorzystaniem mikroskopii stereoskopowej oraz metod obrazowania medycznego (tomografia komputerowa, radiografia cyfrowa). W przypadku szkieletu oznaczonego numerem 12 w zakresie części twarzowej i części mózgowej czaszki ujawniono złamanie wieloodłamowe kości czołowej w okolicy nadoczołowej z wgłobieniem kości oraz przemieszczeniem niektórych fragmentów kostnych do zatoki czołowej. Obrażenia powstały w mechanizmie czynnym, energia była znaczna, skutkująca złamaniem z wgłębieniem kości do zatoki czołowej. Ściany oczodołu z licznymi szczelinami złamań. Kość jarzmowa lewa i kość szczękowa lewa były uszkodzone, przemieszczone przyśrodkowo i ku tyłowi. Trzon kości szczękowej lewej wykazywał na przedniej i bocznej powierzchni ubytki kości z otwarciem zatoki szczękowej. Kości nosowe były

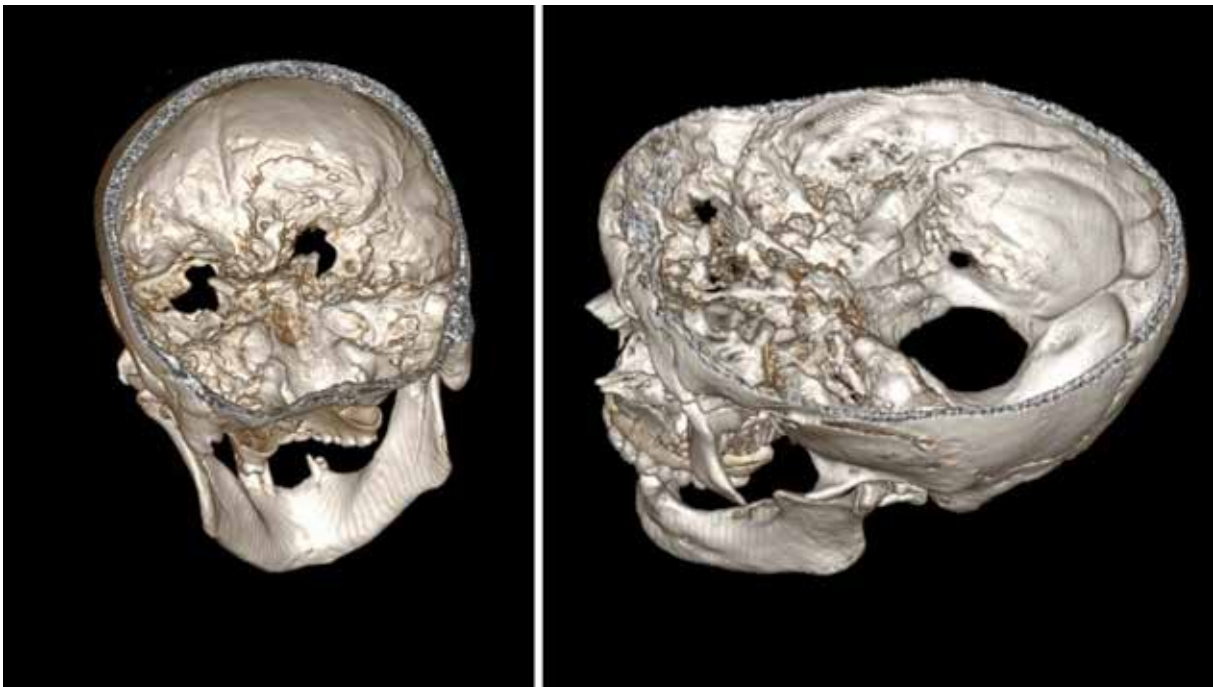
złamane w połowie ich długości. Doszło ponadto do rozejścia się kości w szwach jarzmowo-czołowych po stronie lewej i prawej. Klasyczne badania metodami makroskopowymi poszerzono o badania tomografii komputerowej, dokonano wirtualnego otwarcia czaszki celem oceny stanu kości od strony wewnętrznej (ryc. 18 i 19). Obrażenia powstały w wyniku działania osób trzecich, a przyczyną zgonu mogły być obrażenia czaszkowo-mózgowe w wyniku doznanych urazów czaszki.

Główną zaletą wykorzystania tomografii komputerowej w archeologii jest możliwość przeprowadzenia wielu analiz bez konieczności otwierania zamkniętych przestrzeni. W przypadku osobnika dorosłego z grobu 166 ze stanowiska archeologicznego na poznańskiej Śródce (wystawa stała w Rezerwacie Archeologicznym Genius Loci w Poznaniu, projekt „Pokolenie 966”), datowanego na okres średniowiecza, „otwarcie” jamy czaszki mózgowej pozwoliło na ocenę powierzchni wewnętrznej kości czaszki, a szczególnie w okolicy otworu trepanacyjnego. Uwidoczniono dobrze zachowane rowki żył na powierzchni wewnętrznej, jeden z nich „przerwany” wykonaną trepanacją, co pozwala na wysunięcie przypuszczenia, iż mogło dojść do krwawienia żylnego podczas zabiegu. Całkowite wyoblenie kości na obwodzie otworu wskazuje na zaleczony charakter zmian i pozwala wnioskować, iż niewątpliwie osoba przeżyła zabieg i z pewnością trepanacja nie była przyczyną zgonu osobnika (ryc. 20 i 21).

Badania tomografii komputerowej pozwalają na analizy kształtu, wykonywanie pomiarów liniowych i obliczanie objętości zamkniętych struktur czaszki, jak np. zatok przynosowych, w celu analizy ich zmienności międzyosobniczej, międzypłciowej czy międzypopulacyjnej. Z powodu ukrytej lokalizacji zatok przynosowych ich badanie możliwe jest jedynie z wykorzystaniem metod obrazowania medycznego. Zatoki przynosowe, w skład których wchodzi zatoka czołowa, zatoka szczękowa, zatoka klinowa, zatoka sitowa, to złożone struktury, które wykazują indywidualne zróżnicowanie. Rozmiar i kształt zatok, obecność przegród kostnych wykazują dużą zmienność w różnych czaszkach, a w przypadku parzystych zatok szczękowych zlokalizowanych obustronnie w kościach szczękowych tej samej czaszki obserwuje się generalnie podobieństwo, lecz z pewnego stopnia zróżnicowaniem cech morfometrycznych



**Ryc. 18.** Szkielet nr 12, stanowisko Park Heweliusza. Trójwymiarowe rekonstrukcje przestrzenne czaszki na podstawie badania tomografii komputerowej. Widoczne jest wieloodłamowe złamanie kości czołowej z wgłobieniem oraz złamanie kości twarzoczaszki z przemieszczeniem (wyk. D. Lorkiewicz-Muszyńska)



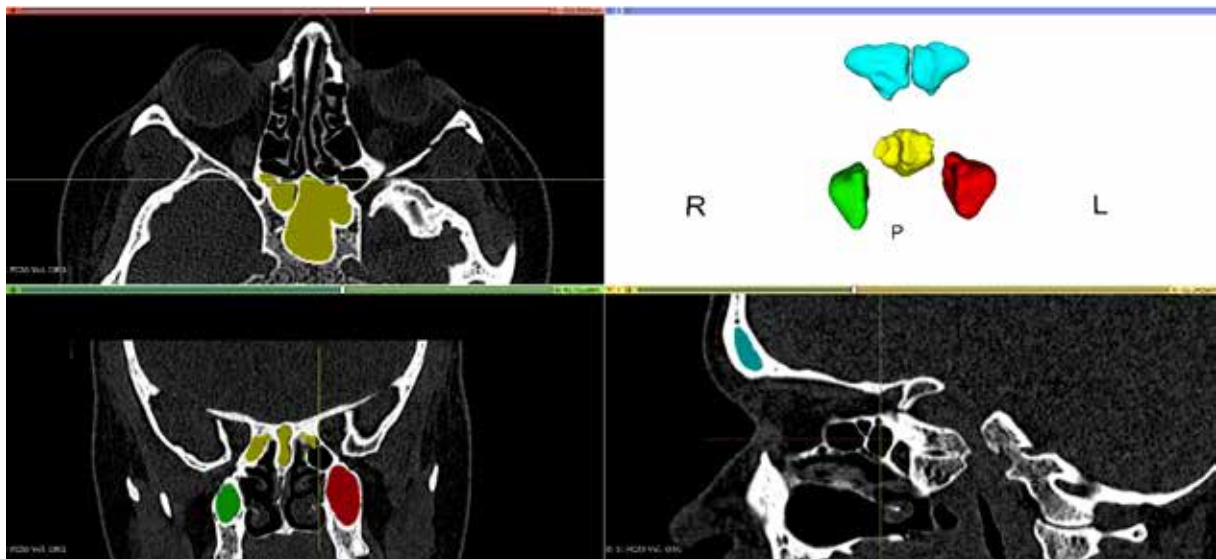
**Ryc. 19.** Szkielet nr 12, stanowisko Park Heweliusza, II wojna światowa. Wirtualne otwarcie jamy czaszki celem oceny stanu kości od strony wewnętrznej. Stwierdzono liczne szczeliny złamania kości dołu przedniego (wyk. D. Lorkiewicz-Muszyńska)



**Ryc. 20.** Grób nr 166, Poznańska Śródka, średniowiecze. Trójwymiarowe rekonstrukcje przestrzenne czaszki na podstawie badania tomografii komputerowej. Widoczne zaleczone zmiany po trepanacji. Rekonstrukcja 3D czaszki w celu oceny zmian po przeprowadzonej za życia trepanacji czaszki (wyk. W. Kociemba)



**Ryc. 21.** Grób nr 166, Poznańska Śródka – „otwarta” jama czaszki mózgowej w celu oceny otworu po przeprowadzonej trepanacji od strony wewnętrznej (wyk. W. Kociemba)

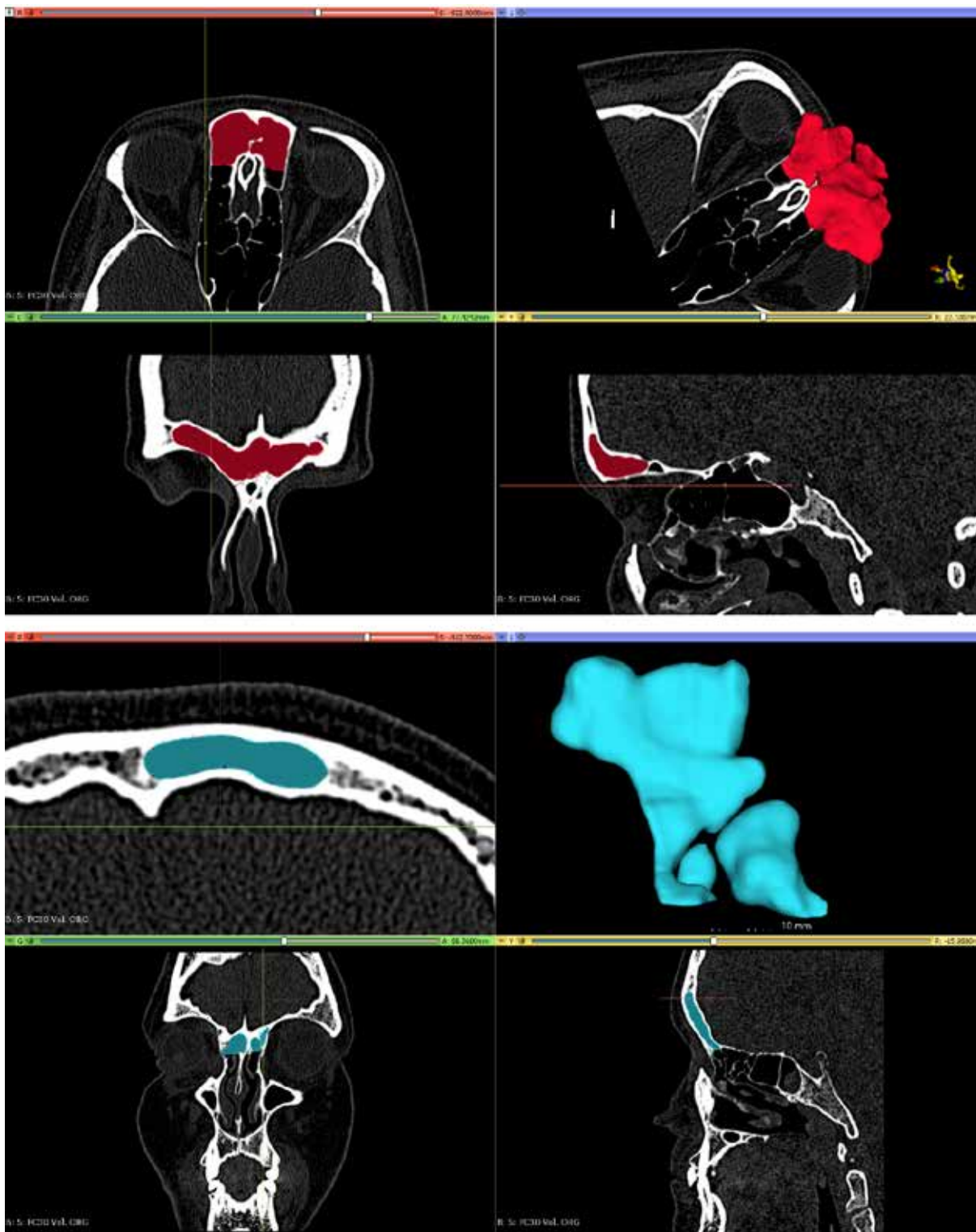


**Ryc. 22.** Segmentacja i rekonstrukcja 3D zatok przynosowych: zatoki czołowej, zatoki szczękowej i zatoki klinowej na podstawie badań tomografii komputerowej (wyk. D. Lorkiewicz-Muszyńska)

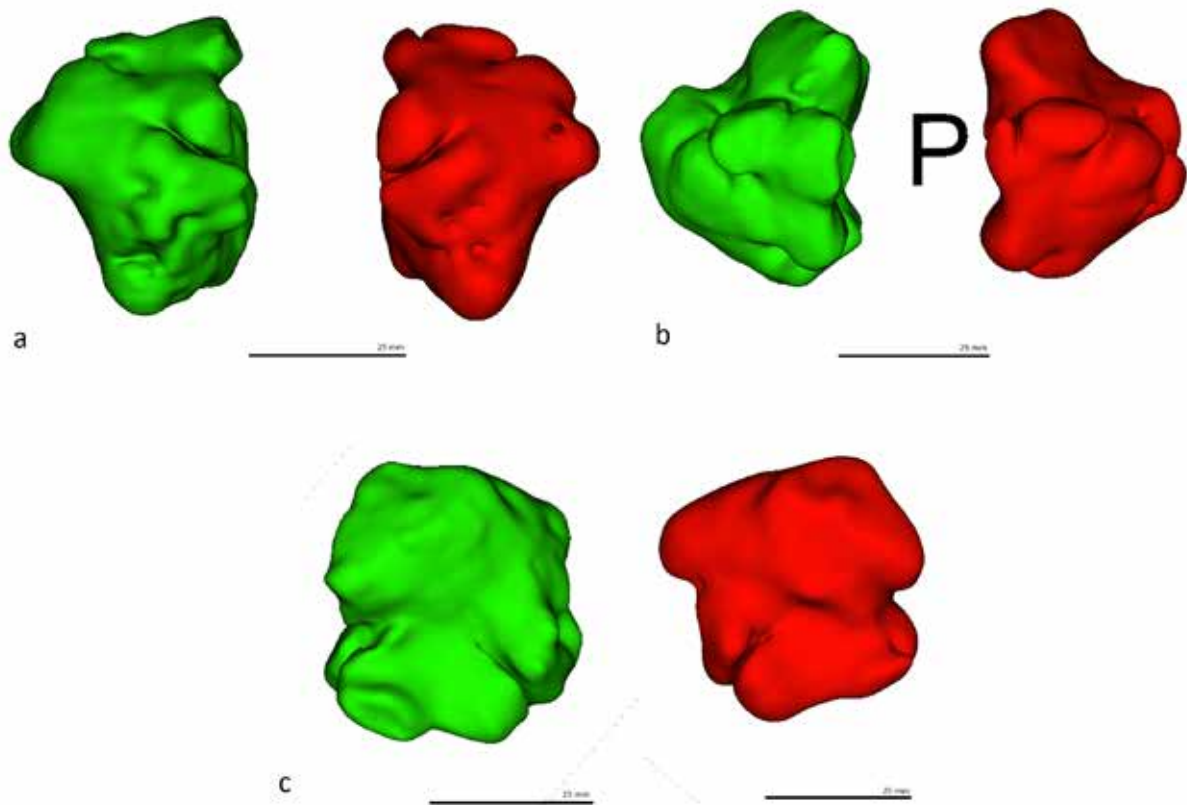
(kształtu, wymiarów, objętości, przegród kostnych). Poprzez segmentację i wolumetryczną rekonstrukcję 3D poszczególnych zamkniętych struktur czaszki można uzyskać ich modele 3D, które następnie można analizować ze wszystkich stron i powierzchni (ryc. 22-24). Poniższe rekonstrukcje wykonano z wykorzystaniem programu

Slicer 3D. Wykorzystując badania tomografii komputerowej, można badać i porównywać zmienność tych struktur między populacjami współczesnymi i pradziejowymi. Z uwagi na dużą zmienność międzyosobniczą badania dotyczące zatok przynosowych mają także ogromne znaczenie w identyfikacji osobniczej.





**Ryc. 23.** Segmentacja i rekonstrukcja 3D zatoki czołowej. Przestrzenne modele 3D wskazują na dużą zmienność międzyosobniczą morfologii zatoki czołowej (wyk. D. Lorkiewicz-Muszyńska)

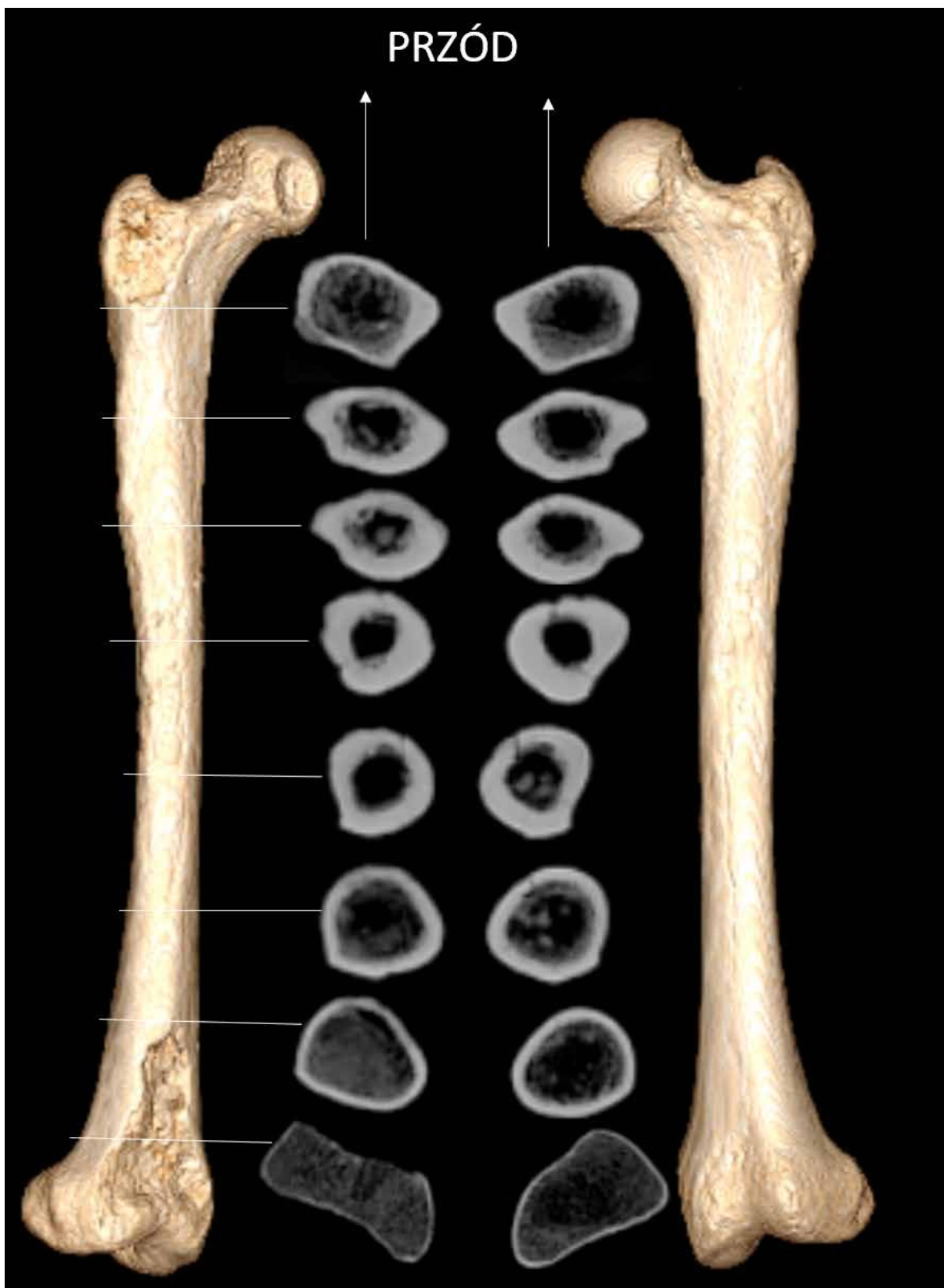


**Ryc. 24.** Segmentacja i rekonstrukcja 3D zatoki szczękowej prawej i lewej z licznymi przegrodami kostnymi. Wizualizacja modeli przestrzennych od różnych stron i ich powierzchni (a, b i c) (wyk. D. Lorkiewicz-Muszyńska)

Badania tomografii komputerowej, będące metodą nieinwazyjną, pozwalają także na badania przekrojów kości długich na różnych ich długościach, w celu badania zmienności geometrii, kształtu trzonów kości i grubości istoty zbitiej bez ich niszczenia (Gosman i in. 2013). Badania na przekrojach kości udowej i piszczelowej na próbkach archeologicznych prowadzone były przez wielu badaczy (Ruff i in. 1994; Sumner i Andriacchi 1996; Cowgill i in. 2010). Zmiany związane ze wzrostem kości długich i ich morfologii oraz cechy biomechaniczne są kluczowymi elementami dla zrozumienia zmienności i funkcjonalnego znaczenia struktury kości osób dorosłych (Ruff 2005). Na zmienność kształtu i wielkości trzonu kości długich następującą podczas ontogenezy mają wpływ czynniki genetyczne, żywieniowe, hormonalne i mechaniczne (Gosman i in. 2011). Modelowanie kości to szereg złożonych procesów zachodzących na poziomie tkanki, głównie podczas wzrostu i rozwoju, który prowadzi do

zmian wielkości i kształtu kości szkieletu. Na kształt kości duży wpływ mają aktywność fizyczna i czynniki mechaniczne oddziałujące na kość.

Pochówek z wczesnej epoki brązu odkryto w 2012 r. podczas budowy obwodnicy Hrubieszowa na stanowisku nr 5 w Świerszczowie. Przeprowadzono klasyczne badania antropologiczne i odontologiczne, a następnie wiele uzupełniających badań specjalistycznych. W analizach wykorzystano metody obrazowania medycznego oraz badania mikroskopowe. Zdjęcia rentgenowskie wybranych elementów kostnych wykonano z wykorzystaniem mobilnego aparatu rentgenowskiego DX-D-100. Badania tomografii komputerowej wykonano z wykorzystaniem 16 rzędowego tomografu komputerowego Somatom marki Siemens. Obserwacje pod mikroskopem stereoskopowym wykonano z wykorzystaniem mikroskopu marki Optimus. Określono płeć żeńską osobnika, a wiek biologiczny oszacowano w kategorii *juvenis/adultus* (około  $20 \pm 1$  rok). Na szczególną uwagę,

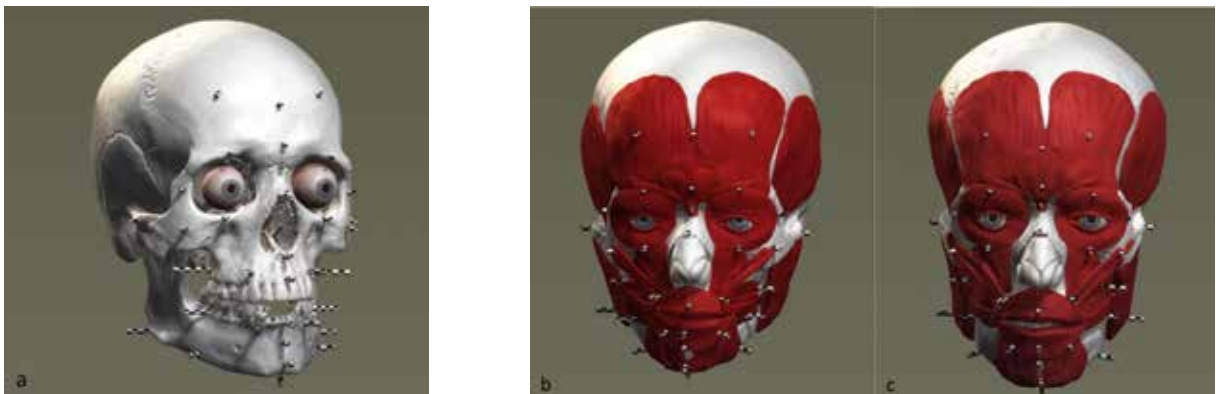


**Ryc. 25.** Analiza kształtu i geometrii kości udowych szkieletu młodej kobiety z grobu stanowiska nr 5, Świerszczów, gm. Hrubieszów. Wczesna epoka brązu (wyk. D. Lorkiewicz-Muszyńska)





**Ryc. 26.** Rekonstrukcje przestrzenne czaszki (3D) mężczyzny z wczesnośredniowiecznego cmentarzyska w Brześciu Kujawskim na podstawie badania tomografii komputerowej. (wyk. W. Kociemba)



**Ryc. 27.** Model czaszki 3D mężczyzny z wczesnośredniowiecznego cmentarzyska w Brześciu Kujawskim z osadzonymi gałkami ocznymi i wyznaczonymi grubościami tkanek miękkich (a). Modele czaszki 3D kobiety (b) i mężczyzny (c) z wczesnośredniowiecznego cmentarzyska w Brześciu Kujawskim z osadzonymi gałkami ocznymi i wyznaczonymi grubościami tkanek miękkich oraz wymodelowanymi mięśniami (wyk. D. Lorkiewicz-Muszyńska)

w przypadku badanego szkieletu młodej kobiety, zasługuje geometria kości długich. Zaobserwowano silnie ukształtowaną rzeźbę przyczepów mięśniowych w zakresie kości miednicznych oraz kości długich kończyn górnych i dolnych, co wskazuje na intensywną aktywność fizyczną. W przypadku kości długich kończyn górnych i dolnych na podstawie badań tomografii komputerowej wykonano analizy na przekrojach poprzecznych z wykorzystaniem programu

RadiAnt DICOM Viewer 2020.2. W przypadku kości udowych analizy wykonano na pięciu i ośmiu przekrojach (*cross-sections*), a wizualizację z otrzymanych przestrzennych modeli kości udowych z badań tomografii (CT) komputerowej i ośmiu ich przekrojów przedstawiono na rycinie 25.

Badania tomografii komputerowej wykorzystywane są dziś powszechnie w badaniach identyfikacyjnych w antropologii sądowej, ale także mają



**Ryc. 28.** Rekonstrukcje wyglądu twarzy (a i b) metodą komputerową 3D na podstawie czaszki kobiety i mężczyzny z wczesnośredniowiecznego cmentarzyska w Brześciu Kujawskim. Wizualizacja twarzy kobiety (c) i mężczyzny (d) z widocznymi czaszkami, wyznaczonymi grubościami tkanek miękkich oraz wymodelowanymi mięśniami ze zjawiskiem przenikania warstw/obrazów (c i d). Badania wykonano w ramach projektu „Cyfrowe udostępnianie zasobów biomolekularnych i opisowych Biobanku i Katedry Antropologii Uniwersytetu Łódzkiego – charakterystyka populacji zamieszkujących tereny dzisiejszej Polski na przestrzeni dziejów. Platforma informacyjna e-Człowiek.pl” (wyk. D. Lorkiewicz-Muszyńska)

zastosowanie w badaniach materiałów kostnych ze stanowisk archeologicznych. Jedną z metod coraz częściej wykorzystywanych w archeologii są badania rekonstrukcji wyglądu twarzy na podstawie czaszki. W zależności od wybranej metody badawczej i różnych narzędzi badawczych w procesie rekonstrukcji tkanek miękkich twarzy wykorzystać można zdjęcie czaszki, wirtualny model 3D lub replikę czaszki (Lorkiewicz-Muszyńska 2020). Model przestrzenny czaszki 3D można uzyskać m.in. na podstawie badania tomografii komputerowej i na podstawie danych biomedycznych, tj. plików DICOM. W dalszych wieloetapowych czynnościach, wykorzystując model czaszki 3D, w oczodołach osadza się gałki oczne, rekonstruuje się nos chrząstny, modeluje mięśnie i pozostałe tkanki miękkie. Cały proces kończą czynności związane z nałożeniem kolorów oraz uzupełnieniem modelu o elementy owłosienia głowy, odzieży. Poniżej przedstawiono przykłady rekonstrukcji wyglądu twarzy na podstawie czaszek kobiety i mężczyzny z wczesnośredniowiecznego cmentarzyska w Brześciu Kujawskim, z wykorzystaniem metody 3D, w tym programu 3D ZBrush 021.6.2 (ryc. 27 i 28). Przestrzenne modele czaszek uzyskano wykorzystując dane DICOM z badań tomografii komputerowej (ryc. 26).

## PODSUMOWANIE

Dynamiczny rozwój technik obrazowania, w tym medycznego czy mikroskopowego, pozwala na uzyskiwanie coraz lepszych powiększeń obiektów, a następnie daje możliwości analiz i archiwizacji tych obrazów z wysoką rozdzielczością.

Badanie kości czy zębów, w tym ich mikrostruktur, przy dużych powiększeniach przekłada się na jakość otrzymanych obrazów o najwyższej wartości diagnostycznej w medycynie, medycynie sądowej, antropologii, jak również archeologii.

Techniki obrazowania stosowane w radiologii okazują się niezwykle przydatne także w badaniach archeologicznych. Główną zaletą wykorzystania tomografii komputerowej w archeologii jest nieinwazyjność i brak konieczności otwierania zamkniętych przestrzeni – przykładowo, można badać zamknięte przestrzenie i struktury czaszki (Lynnerup i in. 1997; Kociemba 2015), można „zajrzeć” do zamkniętej amfory czy urny

kremacyjnej (Truszkiewicz i in. 2018), prowadzić nieinwazyjne badania zwłok w stanie mumifikacji (Lynnerup i in. 1997; Urbanik i in. 2001; Harvig i in. 2012), czy wreszcie oceniać części szkieletu pod kątem ich wieku, ewentualnych uszkodzeń, zmian chorobowych czy urazów (Saleem i Hawaass 2014; Glapiński i in. 2015; Kociemba 2015; Lorkiewicz-Muszyńska i in. 2015: 130–139; Przysańska i in. 2016; Przysańska i in. 2017). Dzisiejsze tomografy komputerowe z dużą dokładnością i w krótkim czasie pokazują struktury kostne czy zęby, pozwalają na wykonanie w celach diagnostycznych ich rekonstrukcji trójwymiarowych, nie tracąc na jakości i dokładności obrazowania (Kociemba 2015; Rychlik 2015: 184–193; Kulczyk i in. 2019). Dokładność skanowania umożliwia odwzorowanie badanych kości, zębów w modelach trójwymiarowych z zachowaniem najdrobniejszych szczegółów (Kulczyk i in. 2019). Z wykorzystaniem odpowiednich narzędzi wirtualnych możemy zabezpieczyć w wersji wirtualnej skanowane elementy szkieletu, jak również wykonać replikę dowolnego obiektu w postaci wydruków 3D (Rychlik 2015: 194–205; Rychlik i in. 2015: 206–209; Kulczyk i in. 2019).

## LITERATURA

- Ahlqvist, J., Damsten, O. 1969. Modification of Kerley's method for the microscopic determination of age in human bone. *Journal of Forensic Sciences*, 14: 205–212.
- Bednarek, J. 2008. Metody oceny wieku w chwili śmierci w oparciu o histomorfometrię istoty zbitą tkanki kostnej. *Archiwum Medycyny Sądowej i Kryminologii* 58: 197–204.
- Bello, S.M., Wallduck, R., Parfitt, S.A. Stringer, Ch.B. 2017. An Upper Palaeolithic engraved human bone associated with ritualistic cannibalism. *PLoS One* 12: e0182127.
- Boyde, A., Jones, S.J. 1968. Scanning electron microscopy of cementum and sharpey fibre bone. *Zeitschrift für Zellforschung und Mikroskopische Anatomie* 92: 536–548.
- Boyde, A. Hobdell, M.H. 1969. Scanning electron microscopy of lamellar bone. *Zeitschrift für Zellforschung und Mikroskopische Anatomie* 93: 213–231.
- Boyde, A., Wood, C. 1969. Preparation of animal tissues for surface scanning electron microscopy. *Journal of Microscopy* 90: 221–249.
- Cowgill, L.W., Warrenner, A., Pontzer, H., Ocobock, C. 2010. Waddling and toddling: the biomechanical effects of an immature gait. *American Journal of Physical Anthropology* 143: 52–61.

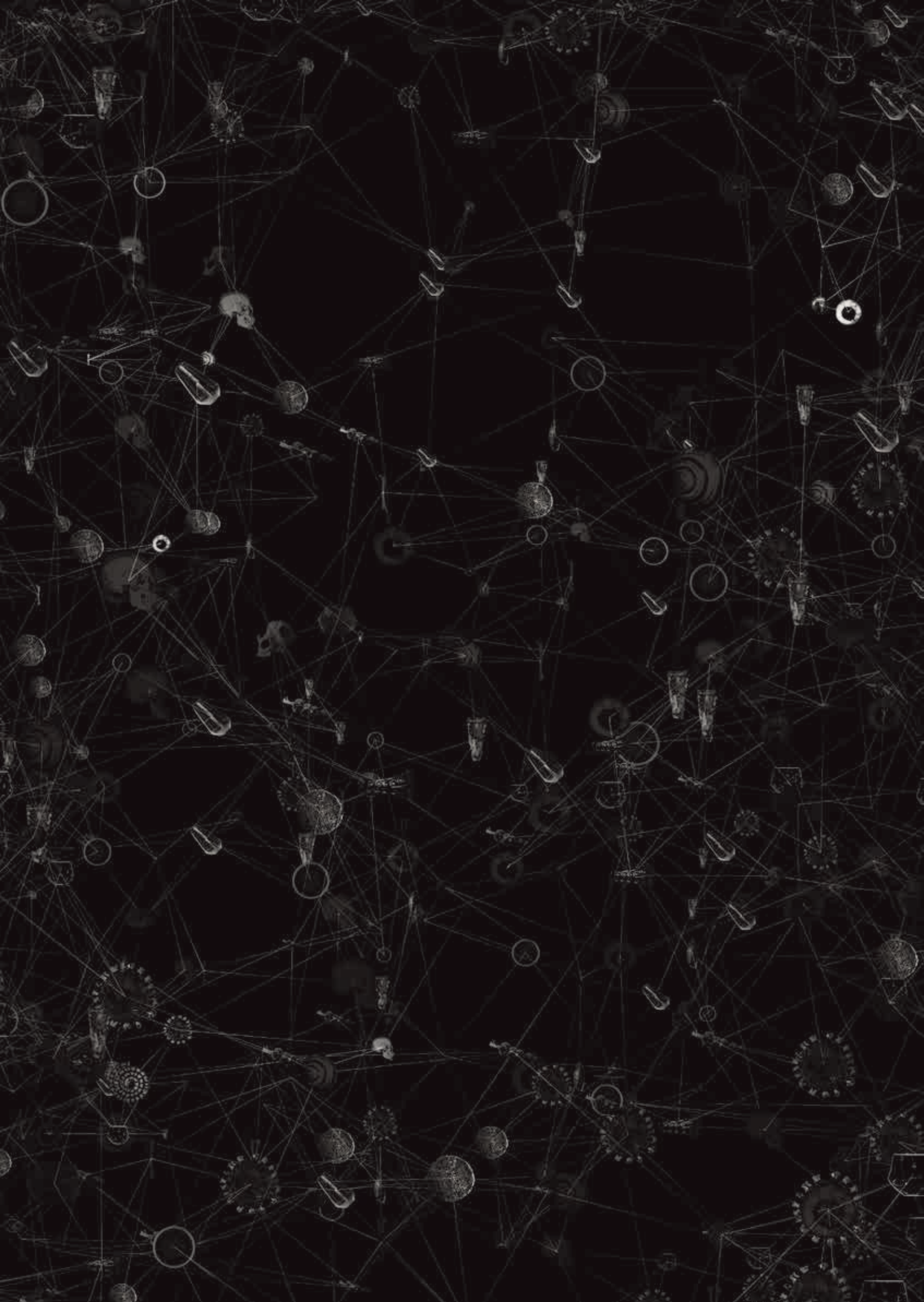


- Dudar, J.O., Pfeiffer S., Saunders S.R. 1993. Evaluation of morphological and histological adult skeletal age-at-death estimation techniques using ribs. *Journal of Forensic Sciences* 38: 677–685.
- Dziedzic-Gociławska, A. 1995. Tkanka kostna, (w:) Ostrowski K. (red.), *Histologia*. Warszawa, 244–304.
- Eriksen, E.F. 1986. Normal and pathological remodeling of human trabecular bone: Three dimensional reconstruction of the remodeling sequence in normals and in metabolic bone disease. *Endocrine Reviews* 7: 379–408.
- Glapiński, M., Przysańska, A., Kulczyk, T. 2015. Zabawa w Puzzle i rozwiązywanie zagadek, (w:) A. Hyrczała, B. Bartecki (red.), *Wojownik i księżniczka – archeologia – medycyna sądowa – sztuka*. Hrubieszów, 154–161.
- Goodman, A.H., Armelagos, G. J., Rose J.C. 1984. The chronological distribution of enamel hypoplasia from prehistoric Dickson Mounds populations. *American Journal of Physical Anthropology* 65: 259–266.
- Gosman, J.H., Hubbell, Z.R. Shaw, C.N. Ryan, T.M. 2013. Development of cortical bone geometry in the human femoral and tibial diaphysis. *The Anatomical Record* 296: 774–787.
- Gosman, J.H., Stout, S.D., Larsen, C.S. 2011. Skeletal biology over the life span: a view from the surfaces. *American Journal of Physical Anthropology* 146: 86–98.
- Harvig, L., Lynnerup, N., Amsgaard Ebsen, J. 2012. Computed tomography and computed radiography of late bronze age cremation urns from Denmark: an interdisciplinary attempt to develop methods applied in bioarchaeological cremation research. *Archaeometry* 54: 369–387.
- Johnson, K.A., Howlet, C.R., Bellenger, C.R., Armati-Cukson, P. 1988. Osteogenesis by canine and rabbit bone marrow in diffusion chambers. *Calcified Tissue International* 42: 113–118.
- Jones, Ch.G. 2012. Scanning Electron Microscopy: Preparation and Imaging for SEM, (w:) Bell L.S (red.), *Forensic Microscopy for Skeletal Tissues: Methods and Protocols*. New York, 1–20.
- Jowsey, J. 1960. Age changes in human bones. *Clinical Orthopedics* 17: 210–217.
- Kerley, E.R. 1965. Microscopic determination of age in human bone. *American Journal of Physical Anthropology* 23: 149–164.
- Kim, Y., Kim, D., Park, D., Lee, J., Chung, N., Lee, W., Han, S. 2007. Assessment of histomorphological features of the sternal end of the fourth rib for age estimation in Koreans. *Journal of Forensic Sciences* 52: 1237–1241.
- Kociemba, W. 2015. Techniki obrazowania w radiologii, rola tomografii komputerowej i rezonansu magnetycznego w archeologii, (w:) A. Hyrczała, B. Bartecki (red.), *Wojownik i księżniczka – archeologia – medycyna sądowa – sztuka*. Hrubieszów, 124–129.
- Kuryszek, J., Zarzycki, J. 2000. *Histologia zwierząt*. Warszawa, 139–158.
- Kulczyk, T., Glapiński, M., Przysańska, A. 2015. Uwidocznienie niewidoczne, (w:) A. Hyrczała, B. Bartecki (red.), *Wojownik i księżniczka – archeologia – medycyna sądowa – sztuka*. Hrubieszów, 150–153.
- Krenz, M. 1994. Enamel hypoplasia in contemporary population from Poznań (Poland). Methodics and preliminary results. *Variability and Evolution* 4: 73–88.
- Krenz-Niedbała, M., Piontek, J. 1996. Hipoplazja szkliwa a średniowiecznej populacji ze Słaboszewa. *Przegląd Antropologiczny* 59: 87–90.
- Kulczyk, T., Rychlik, M., Lorkiewicz-Muszyńska, D., Abreu-Głowacka, M., Czajka-Jakubowska, A., Przysańska, A. 2019. Computed Tomography versus Optical Scanning: A Comparison of Different Methods of 3D Data Acquisition for Tooth Replication. *Hindawi BioMed Research International*, Volume 2019, ID 4985121, 985121-1 – 985121-7, <https://doi.org/10.1155/2019/4985121>
- Morales, J.P., Roa, I.H., Zavando, D., Galdames, I.S. 2012. Determination of the Species from Skeletal Remains Through Histomorphometric Evaluation and Discriminant Analysis. *International Journal Morphology* 30: 1035–1041.
- Lanfranco, L.P., Eggers, S. 2012. Caries through time: An anthropological overview, contemporary approach to dental caries, (w:) Ming-Yu Li (red.), *Contemporary approach to dental caries*. Shanghai Jiao Tong University, 1–33.
- Lorkiewicz, W. 2011. Nonalimentary tooth use in the Neolithic population of the Lengyel Culture in Central Poland (4600–4000 BC). *American Journal of Physical Anthropology* 144: 538–551.
- Lorkiewicz-Muszyńska, D. 2015. Zapisane w kościach ... Wyczytane z kości..., (w:) A. Hyrczała, B. Bartecki (red.), *Wojownik i księżniczka – archeologia – medycyna sądowa – sztuka*. Hrubieszów, 116–123.
- Lorkiewicz-Muszyńska, D., Sobol, J., Kociemba, W. 2020. Wirtualna Identyfikacja, (w:) Grzegorz Teresiński (red), *Medycyna sądowa. T. 2. Diagnostyka sądowa*. Warszawa, 714–723.
- Lorkiewicz-Muszyńska, D., Kociemba, W., Rewekant, A. 2015. Charakterystyka szczątków kostnych z cmentarzyska w Rogalinie, (w:) A. Hyrczała, B. Bartecki (red.), *Wojownik i księżniczka – archeologia – medycyna sądowa – sztuka*. Hrubieszów, 130–139.
- Lorkiewicz-Muszyńska, D., Kociemba, W., Rychlik, M. 2016. Badania identyfikacyjne szczątków, (w:) T. Dzieńkowski (red.), *Horodysko. Od epoki kamienia do wczesnego średniowiecza. Badania 2005–2006*. Lublin, 309–322.
- Lorkiewicz-Muszyńska, D., Sobol, J., Langer, J.J., Koško, A., Włodarczak, P., Żurkiewicz, D., Potupchyk, M. 2017. Ritual position and “tattooing” techniques in the funeral practices of the “barrow cultures” of the Pontic-Caspian steppe/forest steppe area. Porohy 3A, Yampil Region, Vinnytsia Oblast: specialist analysis research perspectives. *Baltic-Pontic Studies* 22: 64–90.

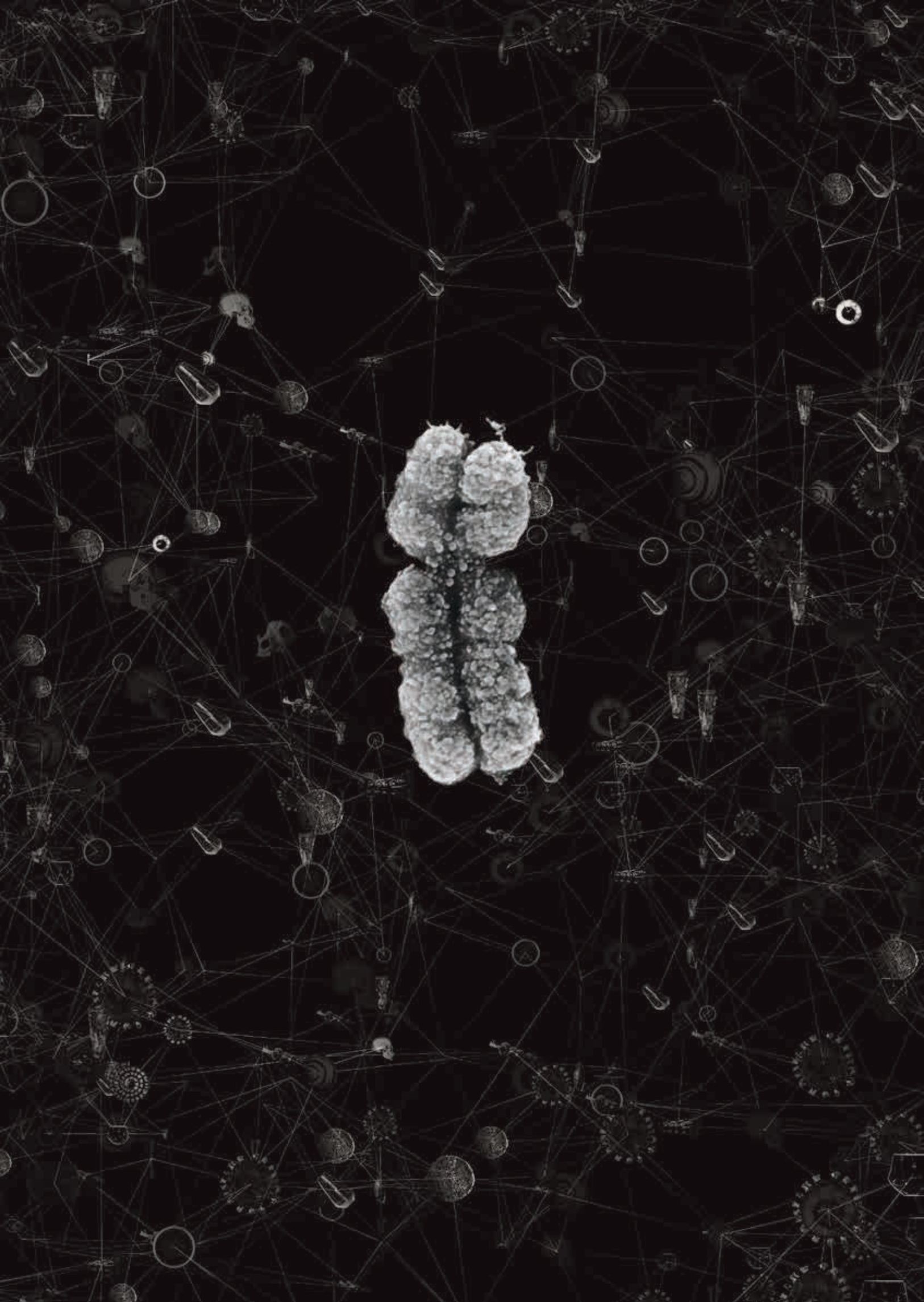
- Lorkiewicz-Muszyńska, D. 2020. Rekonstrukcja wyglądu twarzy nieznanych osób, (w:) G. Teresiński (red.), *Medycyna sądowa. T. 2. Diagnostyka sądowa*. Warszawa, 757–765.
- Lorkiewicz-Muszyńska, D., Sobol, J. 2021. Identyfikacja żyjących osób na podstawie danych wizyjnych, (w:) G. Teresiński (red.) *Medycyna sądowa. T. 3. Opiniowanie i kliniczna medycyna sądowa*. Warszawa, 498–513.
- Lorkiewicz-Muszyńska, D., Thannhauser, A., 2021. Szacowanie wieku szkieletowego oraz ustalanie długości ciała na podstawie badań antropometrycznych, (w:) G. Teresiński (red.), *Medycyna sądowa. T. 3. Opiniowanie i kliniczna medycyna sądowa*. Warszawa, 855–886.
- Lynnerup, N., Hjalgrim, H., Nielsen, L.N., Gregersen, H., Thuesen, I. 1997. Non-invasive Archaeology of Skeletal Material by CT Scanning and Three-dimensional Reconstruction. *International Journal of Osteoarchaeology* 7: 91–94.
- Łasińska, A. 2013. Skaningowa mikroskopia elektronowa w badaniach kryminalistycznych. *Prokuratura i Prawo* 10: 145–166.
- Malinowski, A. 1999. *Wstęp do antropologii i ekologii człowieka*. Łódź.
- Malinowski A., Bożilow, W. 1997. *Podstawy antropometrii. Metody, techniki, normy*. Warszawa.
- Malinowski, A., Strzałko, J. 1985. *Antropologia*. Warszawa.
- Malinowski, A., Wolański, N. 1988. *Metody badań w biologii człowieka. Wybór metod antropologicznych*. Warszawa.
- Novitskaya, E., Chen, P., Hamed, E., Li, J., Lubarda, V.A., Jasiuk, I., McKittrick, J. 2011. Recent advances on the measurement and calculation of the elastic moduli of cortical and trabecular bone: a review. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics* 38: 209–297.
- Piontek, J. 1996. *Biologia populacji pradziejowych*. Poznań.
- Przystańska, A., Kulczyk, T., Glapiński, M., Lorkiewicz-Muszyńska, D. 2016. Badania odontologiczne szczątków. Odontological research of remains, (w:) T. Dzieńkowski (red.), *Horodysko. Od epoki kamienia do wczesnego średniowiecza. Badania 2004–2005*. Lublin.
- Przystańska, A., Lorkiewicz-Muszyńska, D., Abreu-Głowacka, M., Glapiński, M., Sroka, A., Rewekant, A., Hyrczała, A., Bartecki, B., Żaba, Cz., Kulczyk, T. 2017. Analysis of human dentition from Early Bronze Age: 4000-year-old puzzle. *Odontology* 105: 13–22.
- Ruff, C.B., Hayes, W.C. 2005. Sex differences in age-related remodeling of the femur and tibia. *Journal of Orthopaedic Research* 6: 886–896.
- Ruff, C.B., Walker, A., Trinkhaus, E. 1994. Postcranial robusticity in Homo. III. Ontogeny. *American Journal of Physical Anthropology* 95: 35–54.
- Ruff, C.B., Scott, W.W., Liu, A.Y.C. 1991. Articular and diaphyseal remodeling of the proximal femur with changes in body mass in adults. *American Journal of Physical Anthropology* 86: 397–413.
- Rychlik, M. 2015. Opracowanie trójwymiarowego modelu komputerowego czaszki osobnika z grobu nr 10 na podstawie obrazowania TK, (w:) A. Hyrczała, B. Bartecki (red.), *Wojownik i księżniczka – archeologia – medycyna sądowa – sztuka*. Hrubieszów, 184–193.
- Rychlik, M. 2015. Wykonanie rzeczywistego modelu czaszki osobnika z grobu nr 10 z zastosowaniem technik szybkiego prototypowania, (w:) A. Hyrczała, B. Bartecki (red.), *Wojownik i księżniczka – archeologia – medycyna sądowa – sztuka*. Hrubieszów, 194–205.
- Rychlik, M., Lorkiewicz-Muszyńska, D., Kociemba, W. 2015. Porównanie obiektu rzeczywistego z komputerowym modelem 3D oraz wydrukowanym modelem fizycznym, (w:) A. Hyrczała, B. Bartecki (red.), *Wojownik i księżniczka – archeologia – medycyna sądowa – sztuka*. Hrubieszów, 206–209.
- Saleem, S.N., Hawaass, Z. 2014. Ankylosing Spondylitis or Diffuse Idiopathic Skeletal Hyperostosis (DISH) in Royal Egyptian Mummies of 18th–20th Dynasties? CT and Archaeology Studies. *Arthritis & Rheumatology* 66: 3311–3316.
- Seiler, R., Spielman, A.I., Zink, A., Rühli, F. 2013. Oral pathologies of the Neolithic Iceman, c. 3,300 BC. *European Journal of Oral Sciences* 121: 137–141.
- Shah, F.A., Ruscsák, K., Palmquist, A. 2019. 50 years of scanning electron microscopy of bone – a comprehensive overview of the important discoveries made and insights gained into bone material properties in health, disease, and taphonomy. *Bone Research* 7: 15.
- Shishlina, N., Belkevich, E.V., Usachuk, A.N. 2013. Bronze age Tattoos: Sympathetic magic or decoration? *Zurich Studies in Archaeology* 9: 67–74.
- Sobol, J., Ptaszyńska-Sarosiek, I., Charuta, A., Okłota-Horba, M., Żaba, Cz., Niemcunowicz-Janica, A. 2015. Estimation of age at death: examination of variation in cortical bone histology within the human clavicle. *Folia Morphologica* 74: 378–388.
- Stewart, A.D., Boyde, A. 1962. Ion etching of dental tissues in a scanning electron microscope. *Nature* 196: 81–2.
- Stock, S.R., Ignatiev, K., Dahl, T., Barss, J., Fezzaa, K., Veis, A., Lee, W.K., De Carlo, F. 2003. Multiple microscopy modalities applied to a sea urchin tooth fragment. *Journal of Synchrotron Radiation* 10: 393–397.
- Stout, S.D. 1988. Histomorphometric Analysis of Human Remains, (w:) M.Y. Iscan MY, K.A.R. Kenedy (red.), *Reconstruction of Life from the skeleton*. New York, 41–52.
- Streeter, M. 2012. The Determination of Age in Subadult from the Rib Cortical Microstructure, (w:) L.S Bell (red.), *Forensic Microscopy for Skeletal Tissues: Methods and Protocols*. New York, 1–20.
- Sumner, D., Andriacchi, T. 1996. Adaptation to differential loading: comparison of growth-related changes in

- cross-sectional properties of the human femur and humerus. *Bone* 19: 121–126.
- Temple, D.H. 2010. Patterns of systematic stress during the agricultural transition in prehistoric Japan. *American Journal of Physical Anthropology* 142:112–24.
- Teresiński, G. 2019. Ocena czasu wystąpienia urazu głowy, (w:) G. Teresiński (red.), *Medycyna sądowa. T. 1. Tanatologia i traumatologia sądowa*. Warszawa, 548–551.
- Teslenko, D.L. 1996. Ritual covering of skulls in the yamnaya culture graves, *North – East Asov coastline area in the System of Eurasian Antiquity (Eneolith – Bronze Age)*. Donetsk, Part 1: 28–30.
- Thannhauser, A., Szleszkowski, Ł., Wochna, K. 2019. Antropologia, tafonomia i odontologia sądowa, (w:) G. Teresiński (red.), *Medycyna sądowa. T. 1. Tanatologia i traumatologia sądowa*. Warszawa, 187–199.
- Thannhauser, A., Lorkiewicz-Muszyńska, D. 2019. Szacowanie wieku szkieletowego oraz ustalanie długości ciała na podstawie badań antropometrycznych, (w:) G. Teresiński (red.), *Medycyna sądowa. T. 1. Tanatologia i traumatologia sądowa*. Warszawa, 200–203.
- Thannhauser, A., Lorkiewicz-Muszyńska, D. 2019. Ocena wieku dziecka i osoby dorosłej, (w:) G. Teresiński (red.), *Medycyna sądowa. T. 1. Tanatologia i traumatologia sądowa*. Warszawa, 204–213.
- Thannhauser, A., Lorkiewicz-Muszyńska, D. 2019. Szacowanie wysokości i masy ciała, (w:) G. Teresiński (red.), *Medycyna sądowa. T. 1. Tanatologia i traumatologia sądowa*. Warszawa, 218–219.
- Tomczyk, J., Tomczyk-Gruca, M., Zalewska, M. 2012. Frequency and chronological distribution of linear enamel hypoplasia (LEH) in the Late Neolithic and Early Bronze Age population from Żerniki Górne (Poland) – preliminary report, *Anthropological Review* 75: 61–73.
- Truskiewicz, A., Bober, Z., Wojtasik, A., Ożóg, Ł., Rogóż, J. 2018. Metodyka badania techniką tomografii komputerowej urn kremacyjnych (popielnic). *Iżynier i Fizyk Medyczny* 7: 391–394.
- Turner-Walker, G., Mays, S. 2007. Histological Studies on Ancient Bone, (w:) R. Pinhasi, S. Mays (red.), *Advances in Human Palaeopathology*, Sussex.
- Ubelaker, D. 1989. *Human Skeletal Remains. Excavation, Analysis, Interpretation*. taraxacum. Washington, Appendix 2.
- Urbanik, A., Chrzan, R., Wojciechowski, W., Szymańska, H., Babraj, K., Czubak, A. 2001. Badanie mumii egipskich. *Polski Przegląd Radiologii* 66: 79–83. <https://sjp.pwn.pl/>









# Archeogenetyka

Maciej Chyleński

---

## WPROWADZENIE

Z wszystkich dostępnych źródeł, z których uzyskujemy wiedzę na temat przeszłości człowieka, praca z kopalnym DNA jest jedną z najbardziej wymagających. Pomimo to kopalny DNA jest narzędziem, które może dostarczyć bezpośrednich danych na temat dawnych migracji, interakcji między populacjami pradziejowymi i struktury ich pokrewieństwa. Dlatego właśnie badania kopalnego DNA (określane mianem archeogenetyki, paleogenetyki lub archeologii biomolekularnej) są jedną z najszybciej rozwijających się gałęzi bioarcheologii. Dzięki szybkiemu rozwojowi technologii sekwencjonowania wysokoprzepustowego wzrasta ilość generowanych danych, które możemy wykorzystywać w badaniach DNA. W konsekwencji w ciągu ostatniej dekady przeszliśmy od badania fragmentów pojedynczych genomów mitochondrialnych do badania pełnych genomów jądrowych setek osobników. Stosowane metody, nadążając za tym rozwojem, szybko się zmieniają, co prowadzi do częstej dezaktualizacji informacji posiadanych przez część z potencjalnie zainteresowanych badaczy. Rozdział ten ma za zadanie przedstawić obecny stan wiedzy na temat badań kopalnego DNA oraz nakreślić potencjalne ścieżki rozwoju, choć niewykluczone, że sam też będzie wymagał regularnych aktualizacji.

DNA (kwas deoksyrybonukleinowy) występuje we wszystkich tkankach organizmów i w związku z tym jest wszechobecny tam, gdzie organizmy te występują (lub występowały). Jest obecne w samych organizmach, we wszystkich ich wydzielinach oraz – co dla nas istotne – w ich szczątkach. Jest przy tym cząsteczką unikatową dla każdego organizmu pozwalającą nam rozróżnić, w zależności od rozdzielczości danych, jakimi dysponujemy, poszczególne gatunki, populacje czy osobniki. Dane genomowe mogą pomóc w odpowiedzi na wiele pytań badawczych. Pytania te są bezpośrednio związane z właściwościami i charakterystyką kopalnego DNA, które z kolei wymuszają stosowanie specyficznej metodyki. Aby więc poznać zastosowania analiz kopalnego DNA, należy najpierw zrozumieć jego charakterystykę oraz metody badań, jakimi dysponujemy.

## HISTORIA BADAŃ I CHARAKTERYSTYKA KOPALNEGO DNA

Historia badań kopalnego DNA liczy już sobie prawie 40 lat. Pierwsze próby izolacji DNA z eksponatów muzealnych podejmowane w 1984 r. (Higuchi i in. 1984). Ale aż do końca XX w. badania kopalnego DNA, stanowiły raczej ciekawostkę, jako że nie miały usystematyzowanej metodyki, zwłaszcza w kwestii potwierdzania autentyczności



otrzymywanych wyników. Skutkowało to niestety licznymi przypadkami, w których otrzymany wynik okazywał się skutkiem zanieczyszczenia badanego materiału współczesnym DNA. Dopiero w pierwszej dekadzie XXI w. wykrył się powoli zestaw zaleceń i reguł umożliwiających weryfikację autentyczności otrzymanego wyniku (Poinar i Cooper 2000). W tym samym czasie wzrastała też systematycznie ilość badanych materiałów, co pozwoliło z kolei wprowadzić metody statystyczne pomagające weryfikować hipotezy badawcze dotyczące przepływu genów czy migracji. Prawdziwy rozkwit w badaniach kopalnego DNA nastąpił jednak w drugiej dekadzie XXI w. wraz z rozwojem technologii sekwencjonowania wysokoprzepustowego mogących generować olbrzymie ilości danych genetycznych. Umożliwiło to analizowanie coraz większej ilości prób i stosowanie bardziej wyrafinowanych metod statystycznych, zarówno by weryfikować hipotezy badawcze, jak i autentyczność otrzymanywnych wyników.

## WSPÓŁCZESNY DNA A KOPALNY DNA

Według niektórych definicji kopalny DNA (zwany też starożytnym DNA od *ancient DNA*) to DNA izolowany albo z materiałów zdeponowanych X lat temu. Przy czym X jest umowny i różny w zależności od autora definicji i może wynosić np. 75 lat (Graham 2007). Kopalny DNA może też być definiowany bardziej ogólnie, jako DNA izolowany ze szczątków niezdeponowanych z myślą o analizie genetycznej. W definicjach tych trudno jednak wskazać różnice między kopalnym DNA a DNA analizowanym w postępowaniach medycyny sądowej, tak jak czasami trudno w przypadku pochówków ludzkich wskazać granice między ekshumacją a wykopaliskami prowadzonymi przez archeologów.

W dużym uproszczeniu kopalny DNA to DNA silnie pofragmentowany i posiadający charakterystyczne zmiany w swojej strukturze, powstałe w wyniku procesów depozycyjnych i postdepozycyjnych zachodzących po śmierci (*post-mortem*) danego organizmu.

DNA jest polimerem, długim łańcuchem składającym się z 4 rodzajów podjednostek zwanych nukleotydami, różniących się zawartymi w nich zasadami azotowymi: adeniną, tyminą, guaniną i cytozyną, skrótowo określanymi odpowiednio jako A, T,

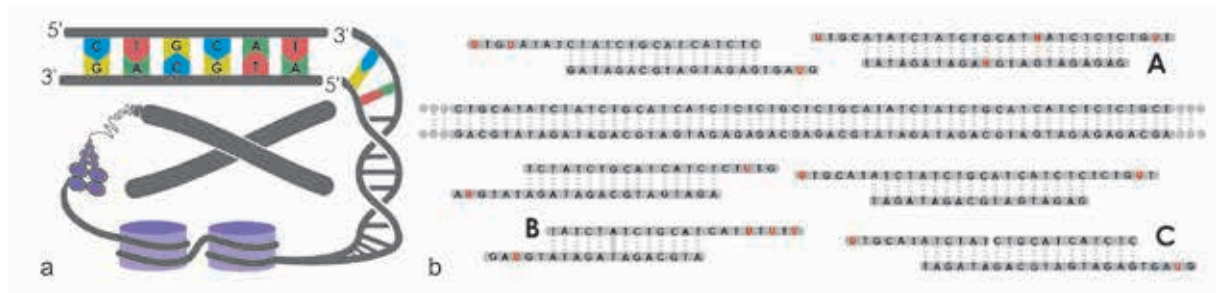
G i C. W organizmach DNA występuje najczęściej w postaci bardzo długich, liczących miliony nukleotydów cząsteczek. Poza tworzącymi łańcuch DNA silnymi wiązaniami kowalencyjnymi nukleotydy są w stanie też tworzyć słabe wiązania wodorowe między nukleotydami dwóch różnych łańcuchów, formując dwuniciowe cząsteczki zwinęte w ikoniczną podwójną helisę. Wiązania te występują jedynie w dwóch kombinacjach, adenina zawsze wiąże się z tyminą, a guanina z cytozyną. Z tego powodu dwuniciowe cząsteczki DNA składają się z łańcuchów komplementarnych względem siebie, w których A w jednym łańcuchu zawsze odpowiada T na drugim, a G występuje naprzeciw C (ryc. 1a).

Przeciętna komórka ludzka zawiera dwie pary 23 cząsteczek DNA, zwanych chromosomami, o łącznej długości około 3 miliardów pz (par zasad) każda. Dodatkowo każda komórka zawiera kilka do kilkudziesięciu tysięcy kopii cząsteczki DNA mitochondrialnego o długości 16 tysięcy pz. U wszystkich eukariontów (organizmów, których genom jest zawarty w jądrze komórkowym) te długie cząsteczki są w celach porządkowych, regulatorowych oraz (co istotne dla nas) ochronnych, skomasowane m.in. przez nawinięcie na kompleksy białkowe zwane histonami (ryc. 1a).

## CHARAKTERYSTYKA FIZYKOCHEMICZNA CZĄSTECZEK KOPALNEGO DNA

Fragmentacja DNA zawartego w komórkach rozpoczyna się wraz z momentem śmierci organizmu. W pierwszej kolejności DNA ulega fragmentacji pod wpływem uwolnionych w wyniku śmierci komórkowej endogennych nukleaz, enzymów tnących kwasy nukleinowe (w tym DNA). W pierwszej kolejności cząsteczki DNA przecinane są w niechromonionych przez histony odcinkach i jako że na pojedynczy histon nawinięty jest fragment liczący 146 pz, na takiej długości fragment (oraz wielokrotność tej wartości) będzie wstępnie przecinany DNA.

Do degradacji DNA bardzo szybko mogą przystąpić mikroorganizmy (głównie bakterie), które rozkładają sam DNA, jak i chroniące go struktury (w tym histony). Procesy te dotyczą niemal wszystkich szczątków niezależnie od warunków środowiska i są odpowiedzialne za bardzo szybką utratę większości zawartego w tych szczątkach DNA (około 90% w ciągu pierwszego roku po depozycji



**Ryc. 1.** a – schematyczna struktura i sposób upakowania DNA w komórce eukariotycznej. Od prawej zgodnie z ruchem wskazówek zegara: podwójna nić DNA, DNA w postaci helisy, DNA nawinięte na histony, chromosom; b – schematyczny wygląd cząsteczek DNA w izolacji kopalnego DNA. Widoczne zmiany *post-mortem*: fragmentacja i deaminacja cytozyny w postaci czerwonych U oraz zanieczyszczenia współczesnym DNA w postaci długich i niemodyfikowanych cząsteczek. Dodatkowo pokazane są zmiany uniemożliwiające analizę DNA: zniszczenia spowodowane oksydacją (A), *cross-linking* pod wpływem światła UV (B) i przerwanie jednej nici (C)



**Ryc. 2.** a – zęby o różnym (malejącym od lewej do prawej) stopniu wizualnego stanu zachowania. Jedynie ząb po prawej stronie rokuje dobrze dla izolacji kopalnego DNA; b – cała kość skroniowa z widoczną częścią skalistą; c – odseparowana część skalista kości skroniowej; d – przecięta część skalista z widocznymi strukturami ucha wewnętrznego

(Campos i in. 2012). Degradacja pozostałej ilości DNA postępuje pod wpływem czynników środowiskowych, zależnych od warunków depozycji danego organizmu. To właśnie te procesy, określane mianem rozkładu abiotycznego, odpowiedzialne są za przeważającą większość charakterystycznych zmian, jakim podlega DNA. Jest to przede wszystkim dalsza fragmentacja DNA. Także na tym etapie nie jest to proces przypadkowy, jako że odbywa się on najczęściej na drodze depurynacji hydrolytycznej, czyli przecinania łańcucha DNA w miejscu, w którym występują puryny (czyli G i A), prowadząc do powstania niesymetrycznych cząsteczek z tzw. lepкими końcami (ryc. 2). Co ciekawe, według

niektórych badań fragmentacja ta następuje stosunkowo szybko, tak że już po około 150 latach większość fragmentów ma średnią długość w granicach 40-80 pz (Sawyer i in. 2012). Tej długości fragmenty DNA mogą być chronione przed dalszą degradacją przez adsorpcję w macierzy albo tkanki kostnej albo sedymencie w miejscu depozycji (zwłaszcza zawartej w nim krzemionce).

Kolejnym istotnym abiotycznym procesem, jakiemu podlega DNA w wyniku depozycji, jest deaminacja nukleotydów (najczęściej cytozyny). Proces ten dotyczy najczęściej nukleotydów w jednokoniowych końcach 5' fragmentów DNA (powstałych w wyniku asymetrycznej fragmentacji) lub

nukleotydów z tymi końcami sąsiadujących. W wyniku tego procesu cytozyna zostaje przemieniona w uracyl-nukleotyd, który zastępuje tyminę w RNA (kwasie rybonukleinowym) i jako T odczytywany na drodze dalszych analiz. Gdy taki fragment DNA jest namnażany (krok niezbędny w celu dalszych jego analiz), w miejscu znajdującej się w oryginalnej sekwencji C występuje więc T, a na nici komplementarnej w miejscu G pojawia się A. Zmiany te następują stopniowo, skupiają się głównie na 10 ostatnich nukleotydach każdego fragmentu i w zależności od sprzyjających czynników i wpływającego czasu mogą dotyczyć nawet 40% znajdujących się tam cytozyn (Dabney i in. 2013).

### **CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA STAN ZACHOWANIA KOPALNEGO DNA**

Badanie czynników wpływających na stan zachowania DNA jest trudne, jako że jest wiele potencjalnych zmiennych mogących występować w dowolnych kombinacjach i często połączonych ze sobą siecią wzajemnych zależności. Ponadto warunki depozycji mogą ulegać zmianie w wyniku działań antropogenicznych i środowiskowych i nie wszystkie z tych zmian jesteśmy w stanie prześledzić i wykryć. Część z tych czynników możemy badać lub szacować eksperymentalnie, jednak nie zawsze zaobserwowane w ten sposób zależności znajdują potwierdzenia w badanych materiałach. Mimo to dzięki posiadanej ilości danych jesteśmy w stanie wytypować te mające największe znaczenie.

#### **Średnia temperatura**

Temperatura wydaje się mieć największe znaczenie dla stanu zachowania DNA, zwłaszcza że pośrednio wpływa też na inne czynniki. W dużym uproszczeniu: im niższa temperatura, tym lepiej zachowuje się DNA, szacuje się, że wraz z spadającą temperaturą częstość depurynacji zmniejsza się logarytmicznie, o rząd wielkości co około 16°C (Lever i in. 2015). Negatywny wpływ na stan zachowania DNA mogą mieć nie tylko wysokie okresowe temperatury, ale też jej wahania prowadzące do cykli zamrażania i odmrażania.

#### **pH gleby**

Także wzrastające pH ma wpływ na zmniejszenie tempa depurynacji, dlatego gleby obojętne lub lekko zasadowe lepiej prognozują dla pozyskiwania wystarczającej ilości DNA, w przeciwieństwie do kwaśnych środowisk. Wyjaśnia to też, dlaczego tak trudno uzyskać DNA ze szczątków zdeponowanych w bardzo kwaśnych torfowiskach, mimo ich pozornie dobrego wizualnego stanu zachowania.

#### **Obecność ciekłej wody**

Woda jest niezbędna do zachodzenia reakcji związanych z rozkładem i degradacją DNA zarówno biotycznych, jak i abiotycznych. Sama woda nie jest czynnikiem rozkładającym, a jedynie środowiskiem, w którym te procesy się odbywają. Pozyskiwanie wystarczającej do analiz ilości DNA z materiałów pochodzących ze stanowisk podwodnych jest więc możliwe, choć trudne (np. Briggs 2020).

#### **Obecność tlenu**

Tlen, a zwłaszcza jego reaktywne formy, ma bardzo destrukcyjny wpływ na DNA, powodując modyfikacje nukleotydów, które uniemożliwiają namnażanie DNA, a w konsekwencji jego analizę. W teorii większość potencjalnych materiałów jest zdeponowana w środowisku beztlenowym, jednak zniszczenia dokonywane przez tlen (ale też światło UV) mogą być jedną z przyczyn, dla których ciężko otrzymać odpowiedniej jakości DNA ze szczątków zmumifikowanych lub eksponowanych przez jakiś czas przed depozycją.

#### **Światło UV**

Światło UV jest kolejnym czynnikiem o destrukcyjnym wpływie. Promienie UV powodują powstawanie trwałych wiązań między oboma łańcuchami DNA (tzw. *cross-linking*, ryc. 1b) uniemożliwiających ich rozplecenie, a w konsekwencji analizę. Wystawienie szczątków na bezpośrednie działanie światła słonecznego przez dłuższy czas (przed depozycją, w jej trakcie lub po niej) może uniemożliwić



uzyskanie odpowiednich ilości DNA do dalszych analiz.

wody opadowej (z drugiej strony może też ułatwić dostęp wody gruntowej).

### Obecność soli

Pewne sole, jak np. NaCl, mogą mieć wpływ na zmniejszenie tempa depurynacji, ale też ułatwić adsorpcję DNA przez krzemionkę, a więc sprzyjać zachowaniu się DNA.

### Obecność kwasów humusowych

Kwasy humusowe oraz fulwowe, taniny i polifenole związane są ze środowiskiem glebowym i powstają głównie na skutek rozkładu materiału roślinnego. Ich ilość zależy od rodzaju flory porastającej glebę, pH, temperatury, a także uwodnienia. Obecne w glebie nie tylko obniżają pH środowiska, ale są też inhibitorami enzymów, które wykorzystują się w analizach DNA.

### Obróbka termiczna

Towarzyszące spalaniu, gotowaniu czy kremacji wysokie temperatury mają bardzo destrukcyjny wpływ na DNA. Jakkolwiek eksperymentalnie dowiedziono, że można DNA wyizolować ze szczątków kostnych poddanych temperaturze do 600°C (Harbeck i in. 2011). Jednak kombinacja spalania i czynników postdepozycyjnych sprawiają, że przypadki uzyskania nadających się do analizy ilości DNA z materiałów spalonych są nieliczne i co najwyżej dotyczą szczątków o słabym stopniu przepalenia.

Niektóre z powyższych czynników mogą być częściowo modyfikowane i bezpośrednio związane z zmiennymi takimi jak głębokość depozycji, obecność mikroorganizmów i wiek materiału.

### Głębokość depozycji

Gleba przykrywająca szczątki może odgrywać rolę izolacyjną oraz ochronną przed czynnikami atmosferycznymi. Warstwa gleby nad szczątkami obniża wahania temperatury, chroniąc je przed ich ekstremalnymi wartościami. Ponadto, w zależności od głębokości depozycji, może ograniczyć dostęp dla

### Obecność mikroorganizmów

Mikroorganizmy rozkładające materię organiczną (a więc są bezpośrednio odpowiedzialne za biotyczny rozkład DNA) są wszechobecne, ich ilość jest więc raczej pochodną warunków środowiskowych niż zmienną samą w sobie. Ponadto ich obecność prowadzi do uwalniania na przestrzeni wielu lat dużych ilości DNA pochodzenia głównie bakterieryjnego, który zanieczyszcza nam badane materiały.

Obecnie jedną z najważniejszych wartości używanych do określania jakości otrzymanego kopalnego DNA jest właśnie stosunek endogennego DNA badanych szczątków do zanieczyszczającego go DNA „środowiskowego”. Odróżnienie jednych fragmentów DNA od drugih nie przysparza trudności metodycznych (o ile przedmiotem naszych badań nie są mikroorganizmy blisko spokrewnionych z tymi występującymi w glebie), ale wymaga nakładu pracy i środków. Przyjmuje się, że do jakichkolwiek analiz nadają się materiały zawierające przynajmniej 1% endogennego DNA (oznacza to, że w przypadku takich prób 99% generowanych danych jest w zasadzie wyrzucanych).

### Wiek materiału

Czas, jaki upłynął od momentu depozycji do pobrania próby do badań molekularnych, jest bez wątpienia czynnikiem limitującym. Opierając się na szacowanym teoretycznym tempie degradacji DNA, obliczono, że nie powinien on być w stanie przetrwać dłużej niż kilkaset tysięcy, ewentualnie, w stanie ciągłego zamrożenia, do dwóch milionów lat (Lindahl 1993). I rzeczywiście, najstarsze do tej pory poznane sekwencje DNA liczą sobie około 1 200 000 lat i pochodzą z wydobytych z wiecznej zmarzliny szczątków mamuta (van der Valk i in. 2021). Co ciekawe, nie stwierdzono znaczącej korelacji między wiekiem prób a długością sekwencji (jak już wspomniałem wcześniej, większość fragmentacji dokonuje się w pierwszym stuleciu). Wydaje się, że najmocniejsza zaobserwowana zależność (zakładając zbliżone warunki depozycji)

występuje między wiekiem próby a ilością zdeaminowanych cytozyn na końcach fragmentów DNA (Sawyer i in. 2012).

Co warto jednak zaznaczyć, często z różnych szczątków pochodzących z pozornie zbliżonego kontekstu można otrzymać zróżnicowane wyniki izolacji kopalnego DNA. Może to wynikać albo z tego, że część z badanych szczątków została poddana procesowi depozycyjnemu lub postdepozycyjnemu, który nam jako badaczom umyka (np. szczególne praktyki pogrzebowe). Innym potencjalnym wyjaśnieniem zróżnicowania stopnia zachowania DNA jest sugerowane przez niektórych badaczy znaczenie tzw. mikrośrodowiska panującego w bezpośrednim sąsiedztwie opróbkowanego materiału. Jak się okazuje, w przypadku pobierania wielu prób z tego samego materiału (w tym przypadku tej samej kości tego samego szkieletu), dla których wszystkie wymienione wcześniej zmienne środowiskowe powinny być bardzo zbliżone, można uzyskać bardzo zróżnicowane ilości nadającego się do analiz kopalnego DNA (Hagelberg i in. 1991).

Podsumowując więc, kopalny DNA (ryc. 1b) zawiera niewielkie ilości krótkich (40-80 bp) fragmentów najczęściej przeciętych asymetrycznie w miejscach, gdzie pierwotnie znajdowały się G i A ze zdeaminowanymi do uracylu cytozynami przy końcach fragmentów (wraz z innymi, rzadszymi modyfikacjami). Ponadto występuje w postaci mieszaniny fragmentów DNA pochodzących zarówno od badanego organizmu, jak i z występujących w środowisku mikroorganizmów. Cechy te dostarczają trudności w izolacji oraz analizach kopalnego DNA, ale też, co zobaczymy w następnych podrozdziałach, mogą służyć do weryfikacji autentyczności otrzymanych wyników.

## METODYKA PRACY Z KOPALNYM DNA

Wszystkie kroki, jakie podejmujemy, pracując z kopalnym DNA, mają na celu uzyskanie izolatów DNA o najwyższej, z punktu widzenia badań kopalnego DNA, jakości. Oznacza to dążenie do uzyskania izolatów zawierających jak najmniejszy stosunek DNA środowiskowego do endogennego oraz ograniczanie ryzyka kontaminacji DNA wspólnym.

## PREFEROWANE MATERIAŁY DO BADAŃ

DNA jest wszechobecne i znajduje się we wszystkich szczątkach organizmów. Jednak, jak można wywnioskować z poprzedniego podrozdziału, nie we wszystkich materiałach DNA zachowuje się równie dobrze. Najczęściej DNA izoluje się ze szczątków kostnych, preferowanie pochodzących z inhumacji lub na innej drodze przykrytych osadami (najlepiej obojętnymi lub zasadowymi, w klimacie umiarkowanym lub chłodniejszym), lub ze stanowisk jaskiniowych. Nie oznacza to, że nadającego się do analiz DNA nie można uzyskać ze szczątków zmumifikowanych, zdeponowanych w kwaśnej glebie lub torfie albo poddanych umiarkowanej obróbce termicznej (gotowanie, nadpalenie). W tych przypadkach należy się jednak liczyć ze znacznym zwiększeniem nakładów (zarówno pracy, jak i finansowych) oraz koniecznością pobrania większej ilości prób w celu zwiększenia prawdopodobieństwa uzyskania izolatów nadających się do dalszych analiz.

W przypadku materiałów kostnych preferowanymi elementami szkieletu są zęby (z zachowanym korzeniem) i części skaliste kości skroniowej, w przypadku braku tych elementów do badań nadają się też fragmenty trzonów kości długich zawierające kość zbitą. Celem jest wybranie fragmentów jak najmniej porowatych, których wnętrza są odcięte od środowiska zewnętrznego, niepokrytych żadnym nalotem i nieposiadających żadnych przebarwień. Początkowo za najlepsze źródło kopalnego DNA uważano zęby (a w zasadzie wnętrza korzeni zębów chronione przez nieprzepuszczalne, ale pod względem zawartości DNA jałowe, szkliwo). Najlepiej, by pobierane zęby były dobrze zachowane, w pełni wykształcone, nieporowate i nie popękane (ryc. 2a).

W ciągu ostatnich paru lat okazało się jednak, że jeszcze lepsze rezultaty można uzyskać, izolując DNA z elementów ucha wewnętrznego (Pinhasi i in. 2015). Elementy te są (przynajmniej u ssaków) tkanką kostną o największej gęstości, dodatkowo chronioną przez kość zbitą części skalistej kości skroniowej (ryc. 2). Zdaniem niektórych badaczy izolaty DNA uzyskane z tych elementów mogą zawierać kilkakrotnie do kilkasetkrotnie większe ilości endogennego DNA niż inne elementy szkieletu (Gamba i in. 2014; Pinhasi i in. 2015). Z drugiej strony wydaje się, że w przypadku względnie dobrze zachowanych szczątków, izolując DNA jedynie

z cementu zęba (warstwy zewnętrznej korzenia), z pominięciem zębiny (znajdującej się wewnątrz zęba, ale podobnie jak szkliwo dość jałowej), i miazgi (zawierającej dużo żywych komórek, ale otwartej i podatnej na działanie środowiska zewnętrznego), można osiągnąć podobne efekty jak z kości skalistej (Hansen i in. 2017). W przypadkach mniej optymalnych uważa się kość skalistą za bezpieczniejszy wybór.

Jednak, co istotne, nie tylko szczątki kostne mogą być źródłem DNA. Liczne badania wskazują, że zarówno włosy (Rasmussen i in. 2011; 2010), jak i koprolity (Gilbert i in. 2008) mogą dawać dobre wyniki w przypadku braku dostępu do materiałów szkieletowych. Są też badania pokazujące uzyskanie nadających się do analiz ilości DNA z fragmentów skorupki jaj ptasich (Oskam i in. 2010). Gdy interesuje nas flora bakteryjna (w tym obecność patogenów) i/lub dieta, można izolować DNA z kamienia nazębnego (Weyrich i in. 2015) lub z noszących ślady żucia fragmentów dziegiu (Kashuba i in. 2019). Z obu tych źródeł udaje się uzyskać również DNA ludzkie, a w przypadku dziegiu nawet w dużych ilościach i to przy całkowitym braku szczątków kostnych (Jensen i in. 2019).

Osobną poddziedziną są też badania DNA środowiskowego, w których to dokonujemy izolacji DNA z warstw (zarówno antropogenicznych, jak i naturalnych), by poznać skład gatunkowy obecnej w nich materii organicznej. DNA środowiskowe może pomóc wykryć obecność gatunków zwierząt i roślin trudno uchwytanych w mikro- i makroskopowych szczątkach roślin (np. roślin owadopylnych). Dane takie mogą nam dostarczyć informacji na temat paleośrodowiska, uzupełniając dane archeobotaniczne i archeozoologiczne (Willerslev i in. 2014) oraz gospodarki człowieka i jej wpływu na środowisko (Smith i in. 2015) (por. Kołaczek i in., w tym tomie).

Planując badania, trudno oszacować, jaki procent pobieranych prób będzie zawierał DNA w ilości i jakości nadającej się do dalszych analiz, w dużej mierze będzie to zależało od badanego stanowiska i może wahać się od kilku do około 80%. Szacunków nie ułatwia fakt, że badacze bardzo rzadko podają łączną ilość prób pobranych do badań, w publikacjach opisując tylko te, z których udało się pozyskać nadające się do dalszych analiz DNA. Ilość prób, które należy pobrać, zależy też oczywiście od

pytań badawczych. jakie chcemy zadać. i dostępnych danych porównawczych. Strategie próbkowania będą się różnić w zależności od tego, czy interesuje nas jedynie struktura krewniacza grupy pochowanej na jednym stanowisku (wtedy należy pobrać ich jak najwięcej z danego stanowiska), czy struktura i relacje danej grupy z innymi populacjami. W tym drugim przypadku należy zadać sobie dodatkowe pytania: czy nasza grupa jest jednorodna (czy przypadkiem nie podejrzewamy, że składają się na nią dwie oddzielne subpopulacje należące np. do różnych klas społecznych), czy istnieją już dane referencyjne dla populacji, które podejrzewamy o pokrewieństwo genetyczne z badaną grupą, jak dokładnej rozdzielczości strukturę chcemy zrekonstruować (czy interesują nas kontakty między potencjalnie odległymi od siebie grupami czy dużo bliższymi podgrupami reprezentującymi sąsiednie regiony osadnicze).

Planując takie badania „populacyjne” najlepiej dysponować wynikami wstępnymi, pozwalającymi oszacować procent osobników z dobrze zachowanym DNA. Tak by docelowo dążyć do minimum dziesięciu „dobrych” osobników (zwierających przynajmniej 5% DNA endogennego) dla każdej z badanych populacji (grup, podgrup i populacji referencyjnych).

## POBRANIE PRÓB DO BADAŃ

Mając już wytypowane materiały, możemy przystąpić do ich pobrania oraz izolacji samego DNA. Od tego momentu do momentu namnożenia materiału genetycznego wszystkie procedury powinny być podporządkowane minimalizacji ryzyka kontaminacji współczesnym DNA.

## KONTAMINACJA WSPÓŁCZESNYM DNA I SPOSOBY JEJ ZAPOBIEGANIA

Zanieczyszczenie współczesnym DNA było do niedawna, z uwagi na brak dobrych narzędzi do jego detekcji, przeszkodą w badaniach kopalnego DNA. Za najgroźniejsze uważa się zanieczyszczenie szczątków ludzkich przez DNA badaczy tych materiałów, począwszy od archeologów, przez antropologów fizycznych i muzealników po pracowników laboratoriów kopalnego DNA.





**Ryc. 3.** a – autor rozdziału w ubraniu ochronnym; b – proces przecinania części skalistej kości skroniowej. Fot. A. Wykrota (a), A. Juras (b)

Bezpośrednim źródłem zanieczyszczenia mogą być włosy, fragmenty naskórka, drobiny potu oraz oddech osób mających styczność z próbami. Współczesny DNA jest o tyle groźny, że metody amplifikacji materiału genetycznego mogą w preferowany sposób namnażać właśnie zanieczyszczenia. Największe zagrożenie wiąże się jednak z zanieczyszczeniami współczesnymi produktami namnażania DNA. Powstające w wyniku reakcji PCR (o której więcej poniżej) stężenia DNA są nieporównywalnie większe niż jego ilości w badanych materiałach i izolatach. Szacuję się, że jedna kropla aerozolu powstająca w wyniku zamknięcia probówki zawierającej namnożony DNA może zawierać go więcej niż cały izolat. Dlatego też laboratoria kopalnego DNA, zwane potocznie czystymi laboratoriami (z ang. *clean lab*), muszą być fizycznie odseparowane od laboratoriów, w których pracuje się z namnożonym DNA, zwanych współczesnymi laboratoriami (z ang. *modern lab*). Separacja taka powinna polegać na:

- lokalizacji obu typów laboratoriów w innych budynkach (lub przynajmniej oddzielnych częściach budynku);
- instalacji osobnego, filtrowanego obiegu powietrza w czystym laboratorium;
- noszeniu ubrań ochronnych w laboratorium czystym: pełnych kombinezonów, maseczek, ochrony oczu, podwójnych rękawiczek, których spodnia warstwa nie powinna być zdejmowana w laboratorium, a wierzchnia zmieniana co próbę (ryc. 3a);
- utrzymywaniu laboratorium czystego w nadciśnieniu, z osobnym pomieszczeniem, służą służącą do przebrania się w strój ochronny;

- regularnej dekontaminacji wszystkich powierzchni, sprzętów i narzędzi;
- utrzymaniu ruchu jednokierunkowego między laboratoriami, możliwe jedynie przejścia od laboratorium czystego do współczesnego. Powrót do czystego laboratorium powinien być możliwy tylko następnego dnia, po uprzednim prysznicu i zmianie ubrań.

## POBIERANIE PRÓB W TERENIE

Ekspozycje potencjalnych prób na kontakt z ludźmi należy ograniczyć jak najwcześniej i prowadzić wszystkie prace w maksymalnie sterylnych warunkach. Oczywiście bardzo rzadko możemy mieć kontrolę nad tymi czynnikami od momentu wykopalisk archeologicznych i większość badań dotyczy prób pobieranych z kolekcji muzealnych, które znalazły się w nich bez uwzględnienia możliwości badań kopalnego DNA. W przypadkach, gdy jednak mamy wpływ na proces pobierania prób jeszcze w terenie, należy przestrzegać (w ramach możliwości) paru wskazań:

- ograniczyć czas ekspozycji części szkieletu, z których planujemy pobrać próby do badań (najczęściej czaszki). Na czas ekspozycji reszty szkieletu do momentu jego dokumentacji i ekstrakcji można tą część przykryć materiałem lub folią;
- nigdy nie myć kości na mokro, jeśli zachodzi taka konieczność, można je oczyścić z osadu na sucho;
- jak najszybciej, po odpowiednim udokumentowaniu pobrać próby do badań, najlepiej jeszcze

w trakcie eksploracji obiektu, z którego pochodzą, w ostateczności po dokumentacji i opracowaniu materiałów przez specjalistę;

- zabezpieczyć wybrane materiały przed światłem słonecznym i wilgocią, np. zawinąć w czysty ręcznik papierowy do wysuszenia, a następnie w folię aluminiową i/lub woreczek strunowy;
- wszystkie powyższe czynności wykonywać przynajmniej w maseczce i rękawiczkach zmienianych regularnie (przynajmniej przy każdym przystąpieniu do danych materiałów);
- jeśli jednak próby do badań będziemy pobierać z kolekcji muzealnej, nie będziemy mieć wpływu (a często nawet wiedzy) na temat ilości osób oraz sposobu, w jaki się one obchodziły z danymi materiałami. Należy w takich przypadkach założyć, że najprawdopodobniej powierzchnia tych materiałów uległa kontaminacji. Nadal jednak, pobierając próby, powinniśmy zachowywać podobne środki ostrożności jak w przypadku robienia tego w trakcie wykopalisk.

## WYBÓR WŁAŚCIWYCH FRAGMENTÓW MATERIAŁÓW SZKIELETOWYCH

W przypadku pobierania zębów, w pierwszej kolejności, kierujemy się ich wizualnym stanem zachowania (ryc. 2a). Pozostałymi kryteriami, które należy uwzględnić, mogą być:

- obecność antymerów (symetryczne odpowiedniki po drugiej stronie żuchwy lub szczęki), tak by jeden ząb z pary pozostawić do badań morfologicznych;
- łatwość ekstrakcji i jej destrukcyjny wpływ na przylegające struktury. Z zasady łatwiej pobiera się zęby jednokorzeniowe (siekacze, kły);
- koordynacja z innymi specjalistycznymi badaniami o charakterze destrukcyjnym. Teoretycznie analiz izotopowych szkliwa, izolacji DNA czy nawet datowania radiowęglowego można dokonać z tego samego zęba, jako że inne jego części mogą być wykorzystane do każdego z tych badań. W takich wypadkach, jeśli badania izotopowe są standaryzowane dla określonego zęba (np. pierwszego trzonowca), należy w celu ograniczenia destrukcyjności pobrać ten właśnie ząb (pod warunkiem, że jego stan zachowania jest dobry). Przy czym, z uwagi na ryzyko kontaminacji, należy w pierwszej kolejności przeprowadzić izolację DNA.

Pobieranie części skalistej kości skroniowej w zależności od stanu zachowania mózgowcowej może być bardziej złożone. Jeśli poszczególne kości nie są ze sobą połączone, wystarczy pobrać samą część skalistą, często zachowującą się jako osobny element, nawet przy bardzo słabym stanie zachowania czaszki (ryc. 2c) lub całą kość skroniową (ryc. 2b). Gdy jednak czaszka jest zachowana w całości, należy część skalistą wyciąć (np. przy użyciu wyposażonego w tarczki tnące elektronarzędzia).

Gdy natomiast zamierzamy izolować DNA z tkanki zbitą trzonów kości długich, należy najlepiej pobrać całe kości (mogą to być np. paliczki, kości śródstopia) albo, gdy uległy one fragmentacji w wyniku procesów postdepozycyjnych, ich najlepiej zachowane fragmenty.

Osobne protokoły stosuje się przy pobieraniu próbek z rdzeni glebowych, kamienia nazębnego czy warstw archeologicznych, należy jednak we wszystkich przypadkach zachować podobne względy ostrożności w celu minimalizacji ryzyka kontaminacji.

## IZOLACJA KOPALNEGO DNA

### Dekontaminacja pobranych prób

Po pobraniu próby należy ją jak najszybciej dostarczyć do czystego laboratorium, gdzie pobrane materiały należy umieścić w zamrażarce. Nie należy ich jednak zamrażać zaraz po pobraniu, jeśli nie jesteśmy w stanie zapewnić ich transportu w stanie zamrożonym (np. za pomocą przesyłki w suchym lodzie), jako że kolejne cykle zamrażania i rozmrażania mogą mieć destrukcyjny wpływ na DNA.

Niezależnie od sposobu pobrania prób w dalszej kolejności, już w czystych laboratoriach, stosuje się kroki mające za zadanie usunąć wszelkie zanieczyszczenia powierzchniowe. Można tego dokonać przy użyciu dowolnej kombinacji (lub najlepiej wszystkich) następujących metod:

- przemycie prób nisko stężonym (między 0,5% a 2%) roztworem podchlorynu sodu, w celu chemicznej degradacji znajdującego się na powierzchni próbek DNA. Gdy próby są niewielkich rozmiarów (np. zęby), można to zrobić przez zanurzenie w roztworze. Gdy są większe, można do przemycia użyć np. sterylnych jednorazowych wacików czy patyczków higienicznych;

- dekontaminację przez wystawienie na krótki czas (do 2 h) na silne promieniowanie UV (np. za pomocą specjalnych urządzeń zwanych *cross-linkerami*);
- usunięcie mechaniczne wierzchniej warstwy fragmentu, z którego bezpośrednio będziemy pobierali materiał do izolacji. Można tego dokonać np. jednorazowym skalpelem (przez skrobanie powierzchni), końcówką rozcierającą za pomocą elektronarzędzia (dekontaminując ją między użyciami) lub przez przecięcie fragmentu tarczką tnącą (znowu albo jednorazową, albo dekontaminowaną między użyciami) w celu odsłonięcia wnętrza fragmentu (ryc. 2d i 3b).

### Rozdrobnienie materiału przed izolacją

Następnym krokiem jest albo rozdrobnienie części przeznaczanej do izolacji, albo jej odseparowanie od fragmentu kości w celu ekstrakcji DNA. Rozdrobnienia można dokonać bezpośrednio przy użyciu końcówek rozcierających i elektronarzędzia, celując w cement korzenia zęba lub widoczne po przecięciu kości skalistej struktury ucha wewnętrznego (ryc. 2d). Można też użyć mózdzierza i tłuczka po odseparowaniu od części niepożądanych (korony zęba, tkanki gąbczastej i zbitej wokół struktur ucha wewnętrznego). Oddzielenia od części niepożądanych można dokonać za pomocą tarczek tnących i elektronarzędzi lub pistoletu do piaskowania. Wszystkich te czynności należy wykonać, ograniczając nagrzewanie się materiału w wyniku tarcia, poprzez wykorzystywanie możliwie niskich obrotów elektronarzędzia i wiercenie interwałowe lub używając mózdzierza z opcją chłodzenia (tzw. *frezer-mill*).

Celem rozdrobnienia jest uzyskanie między 50 mg a 500 mg zhomogenizowanej do postaci drobnego proszku tkanki kostnej, z której następnie dokonamy ekstrakcji i izolacji DNA. Warto jednak nadmienić, że wyniki wstępne badań sugerują, że rozpuszczanie całych odciętych fragmentów (wymagające dłuższego czasu i większej objętości buforu ekstrakcyjnego) może dawać lepsze efekty niż rozpuszczanie proszku.

### Ekstrakcja DNA

Proszek należy rozpuścić, doprowadzając do uwolnienia (ekstrakcji) DNA do roztworu. W tym celu

stosuje się około 1-2 ml buforu zawierającego składniki mające na celu rozpuścić zarówno frakcję mineralną (hydroksyapatyt), jak i organiczną (kolagen) kości. Reakcję prowadzi się w temperaturze 37-54°C do momentu rozpuszczenia proszku kostnego, zazwyczaj 24-48 godzin. Gdy jednak dokonujemy ekstrakcji z nierozdrobnionego fragmentu, ekstrakcja może potrwać do 5 dni, w czasie to których codziennie należy bufor ekstrakcyjny wymieniać i zbierać do późniejszej izolacji.

Część badaczy proponuje wykonywać krótką ekstrakcję wstępną, wychodząc z założenia, że endogenne DNA jest zamknięte i zaadsorbowane głęboko w macierzy tkanki kostnej, a zanieczyszczenia środowiskowe w większej ilości znajdują się w porach i przestrzeniach między tą macierzą (Damgaard i in. 2015). Według tej hipotezy pierwsza objętość ekstraktu, po 15-30 minutach inkubacji, zawiera przeważającą ilość DNA pochodzenia środowiskowego, można ją więc wyrzucić, wymieniając bufor, by zmaksymalizować ilość endogenego DNA w buforze docelowym.

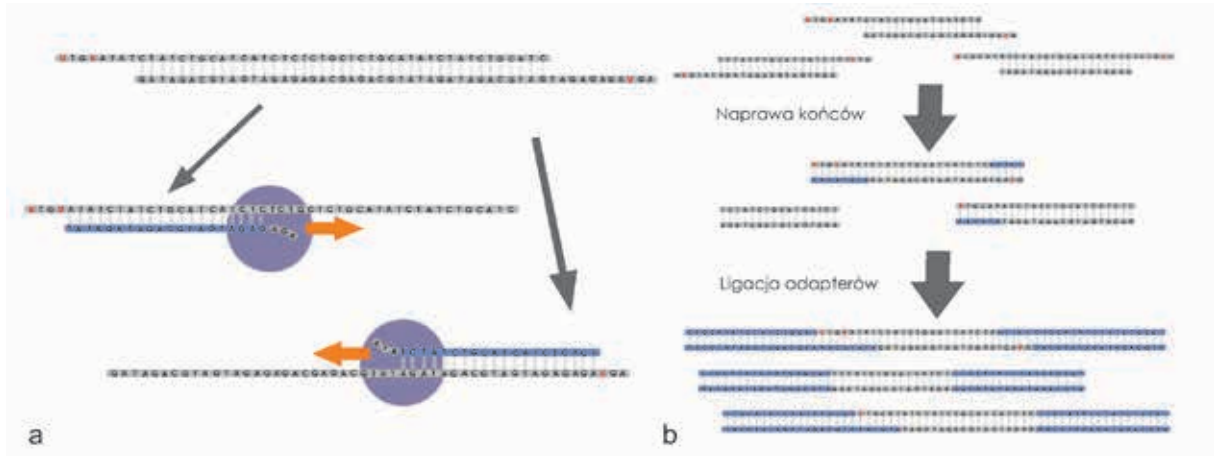
### Izolacja DNA

Z uzyskanego ekstraktu należy następnie wyizolować DNA, czyli oddzielić go od pozostałych składników ekstraktu. W biologii molekularnej dominuje kilka metod izolacji DNA, ale w badaniach kopalnego DNA wykorzystuje się w zasadzie różne warianty izolacji na podłożu krzemionkowym.

Metoda ta wykorzystuje właściwość DNA, którą już wspominaliśmy, czyli że w obecności niektórych soli absorbuje się on na powierzchni krystalicznej krzemionki. Krzemionka ta może w tej metodzie być unieruchomiona w postaci odpowiedniego filtra na kolumie, przez którą przepuszczamy poszczególne bufor w postaci drobnego proszku, który między poszczególnymi krokami zawirowujemy na dno próbki, w której prowadzimy izolację, lub opłaszczona na drobnych metalowych kulkach, które za pomocą magnesu unieruchamiamy na ściance próbki na czas wymiany buforów.

W wyniku izolacji otrzymujemy małą objętość (zazwyczaj między 40 µl a 100 µl) względnie czystego izolatu DNA. W zależności od protokołu wstępna objętość ekstraktu może być dużo większa (nawet do 5 ml), izolacja ma na celu również zagęszczenie roztworu, czasem w tym celu przed właściwą





**Ryc. 4.** a – pojedynczy cykl PCR. Aby polimeraza (zaznaczona na fioletowo) mogła działać, niezbędne jest, by sekwencje docelowe dla starterów (zaznaczonych na niebiesko) były dobrze zachowane; b – schemat tworzenia biblioteki genomowej

izolacją dokonuje się wstępnego przefiltrowania ekstraktu na filtrach celulozowych.

### Namnożenie kopalnego DNA

Stężenia DNA w otrzymywanych izolatach są bardzo niskie, często poniżej poziomu detekcji metod wykorzystywanych standardowo w laboratoriach biologii molekularnej. Ponadto na stężenia te najczęściej składają się fragmenty DNA pochodzące od obecnych w środowisku mikroorganizmów. Niezależnie zresztą od pochodzenia izolatu, w celu analizy sekwencji DNA należy go najpierw namnożyć. Namnożenie może mieć na celu amplifikację tylko wybranych fragmentów genomu albo całego zawartego w izolacie DNA (tworzymy wtedy tzw. bibliotekę genomową). W obu przypadkach będziemy wykorzystywać cykliczną reakcję polimerazy (ang. *polymerase chain reaction*, PCR).

### Reakcja PCR

Reakcja PCR jest podstawową metodą wykorzystywaną w genetyce i biologii molekularnej. Reakcja polega na cyklicznym zapętlaniu występujących w biologii komórki procesów w celu wykładniczego namnażania fragmentu DNA, tak by w krótkim czasie otrzymać miliony jego kopii. W dużym uproszczeniu metoda wykorzystuje enzym polimerazę, by po rozpleceniu dwuniciowej cząsteczki DNA (w wyniku działania wysokiej temperatury) stworzyć jej

dwie kopie, a następnie całość powtórzyć określoną ilość razy, za każdym razem otrzymując dwukrotną ilość fragmentów DNA. Do zajścia reakcji potrzebne jest kilka składników:

- polimeraza, a właściwie jej odmiana znaleziona w bakterii żyjącej w gorących źródłach i w związku z tym działająca w wysokiej temperaturze potrzebnej do rozplecenia podwójnej nici DNA;
- deoksynukleotydy, czyli cegiełki, z których będziemy budować nowe kopie interesujących nas fragmentów;
- bufor tworzący optymalne warunki do przeprowadzenia reakcji;
- startery. Polimeraza wymaga dwuniciowego fragmentu, który rozpoznaje jako miejsce początku reakcji. W tym celu do reakcji dodajemy dwie krótkie (do około 25 pz) syntetyczne jednoniciowe cząsteczki DNA, zwane starterami, które flankują interesujący nas region. Gdy po wstępnym rozpleceniu nici obniżymy ponownie temperaturę, w pierwszej kolejności do obu pojedynczych nici przyłącza się krótsze fragmenty, tworząc dwie częściowo dwuniciowe cząsteczki które polimeraza następnie dokończy (ryc. 4).

Bezpośredni PCR wybranych fragmentów genomu zawierających interesujące nas informacje był dominującą metodą w pracy z kopalnym DNA do końca pierwszej dekady XXI w. Jednak wraz z rozwojem technik sekwencjonowania wysokopręstowego został wyparty przez metody oparte na bibliotekach genomowych.

## Biblioteki genomowe

Biblioteka genomowa, zgodnie z definicją, to zbiór wszystkich fragmentów DNA w danej próbie (izolacie) umieszczonych na identycznym wektorze. W praktyce funkcję wektora pełnią najczęściej adaptery, czyli krótkie dwuniciowe fragmenty DNA przyklejone do końców wszystkich cząsteczek biblioteki. Sposobów przyklejenia (ligacji) tych fragmentów jest kilka, zarówno dostępnych w komercyjnych zestawach do tworzenia bibliotek (udostępnianych przez producentów sekwenatorów), jak i opracowanych przez samych badaczy. Większość tych protokołów składa się z kilku podobnych kroków, czasami wykonywanych jeden po drugim w następujących po sobie reakcjach, czasami zgrupowanych w jednej reakcji. Pierwszym krokiem jest „przytępienie” lepkich końców przez ich uzupełnienie lub przycięcie (najczęściej przycięcie końca 3' i uzupełnienie 5' za pomocą polimerazy T4), tak by wszystkie cząsteczki DNA były symetryczne i miały same tępe końce. Potem następuje ligacja samych adapterów, za pomocą enzymu ligazy. Na samym końcu bibliotekę amplifikujemy, wykorzystując sekwencje adapterów jako sekwencje docelowe dla starterów w PCR. Oprócz umożliwienia nam namnożenia całości zawartego w izolacie DNA adaptery pełnią inną ważną funkcję, pozwalając na przyłączenie się starterów w reakcji sekwencjonowania (działającej na podobnej zasadzie jak PCR).

PCR jest celowy, dąży do namnożenia z góry wybranego fragmentu. Może to być fragment zawierający polimorfizm odpowiedzialny za jakąś określoną cechę, np. zdolność trawienia laktozy (Mnich i in. 2018) albo fragment charakteryzujący się dużą zmiennością, a więc przydatny w badaniach populacyjnych, np. region hiperzmienny genomu mitochondrialnego (Juras i in. 2014). W wyniku sekwencjonowania wysokoprzepustowego w jednej reakcji dostajemy informację na temat przynajmniej dziesiątek tysięcy zmiennych. Z drugiej strony w metodach opartych na bibliotekach genomowych informacje, które otrzymujemy, są w dużej mierze losowe i im więcej obecnych w naszej próbie zanieczyszczeń pochodzenia środowiskowego, tym więcej otrzymywanych sekwencji jest nieprzydatnych (jeśli nie interesują nas obecne w środowisku mikroorganizmy). Jednak sama skala sekwencjonowania wysokoprzepustowego (sekwencjonowanie dziesiątek milionów fragmentów z każdego izolatu)

nawet w przypadku izolatów, które zawierają 95% fragmentów środowiskowych pozwala nam uzyskać tysiące informatywnych sekwencji.

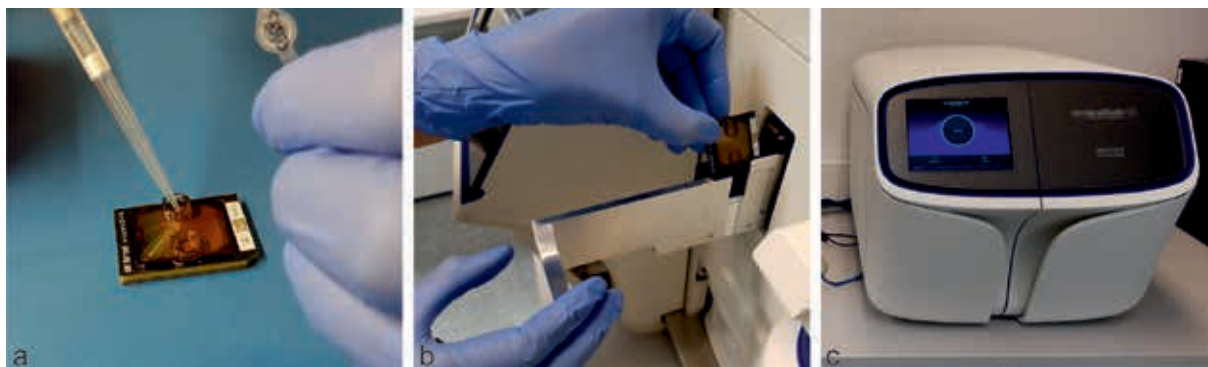
Ponadto bezpośredni PCR wychodzi z założenia, że docelowy fragment jest w całości zachowany, co w przypadku kopalnego DNA jest mało prawdopodobne. Szanse powodzenia możemy zwiększyć przez wybór bardzo krótkich sekwencji docelowych (pamiętając, że średnia długość fragmentów rzadko kiedy przekracza 80 pz), ale nadal musimy mieć nadzieję, że przynajmniej w którejś z cząsteczek interesujące nas fragmenty znajdują się w ich wnętrzu, a sekwencje docelowe dla starterów nie zawierają uniemożliwiających ich przyłączenie modyfikacji (co zważając, że te najczęściej będą się znajdować przy końcach cząsteczek DNA, jest mało prawdopodobne). W takim wypadku może dojść do sytuacji, w której to fragment pochodzący z zanieczyszczeń, a nie od badanych szczątków, będzie w preferowany sposób namnażany. Tymczasem metody oparte na bibliotekach genomowych prowadzą do namnożenia wszystkich cząsteczek (razem z częściowo lub całkowicie zachowanymi końcami), a proces produkcji bibliotek można zmodyfikować w ten sposób, by odsiewać długie cząsteczki pochodzące z dużą dozą prawdopodobieństwa z zanieczyszczeń.

## Sekwencjonowanie DNA

Zakładając, że mamy już albo namnożone interesujące nas fragmenty, albo bibliotekę genomową, możemy się przenieść do „współczesnego laboratorium”, gdzie będziemy mogli poznać ich sekwencję. Zasadniczo możemy mówić o dwóch typach sekwencjonowania: Sangera (nazywanym tak od wynalazcy metody) i sekwencjonowniu wysokoprzepustowym.

## Sekwencjonowanie Sangera

Sekwencjonowanie Sangera polega na przeprowadzeniu specyficznej reakcji amplifikacji DNA, do której oprócz zwykłych deoksynukleotydów dodajemy też stopujące polimerazę i wybarwione barwnikami fluorescencyjnymi (każdy innym) dideoksynukleotydy. Jako że produktem wyjściowym reakcji PCR były miliony identycznych cząsteczek, statystycznie w wyniku reakcji sekwencjonowania



**Ryc. 5.** a – ładowanie za pomocą mikropipety biblioteki genomowej na chip do sekwencjonowania w technologii ION. b – instalacja chipa do sekwenatora. c – sekwenator ION Gene Studio S5

otrzymamy wiele wariantów produktu reakcji o różnej długości (a dokładniej tyle wariantów, jaką długość liczy nasz produkt PCR). Fragmenty te następnie należy rozdzielić pod względem długości, przy użyciu wąskich i długich kapilar wypełnionych polimerem stanowiącym przeszkodę dla DNA. Na końcu kapilary umieszczony jest detektor, który wykrywa, jakim barwnikiem wybarwione są kolejno przechodzące przez nią produkty reakcji sekwencjonowania. Z kolejności produktów, od najkrótszego (długości 1 pz) do najdłuższego (o długości równej wielkości analizowanego fragmentu) oraz obecnego w nich barwnika jesteśmy w stanie odtworzyć badaną sekwencję.

### Sekwencjonowanie wysokoprzepustowe

Jest kilka technologii sekwencjonowania wysokoprzepustowego, ale w analizie sekwencji kopalnego DNA dominują głównie metody oparte na sekwencjonowaniu przez syntezę. W dużym skrócie metody te polegają na tym, by w jednym punkcie syntetyzować (znowu za pomocą polimerazy) wiele kopii pojedynczej cząsteczki DNA w taki sposób by przyłączenie każdego nukleotydu dawało wykrywalny sygnał. Rolę punktu może odgrywać dołek w mikrochipie (ryc. 5a) albo wydzielone pole na specjalnej płytce. Przyłączanie nukleotydu może być wykrywane albo przez zmianę pH, albo przez sygnał świetlny, gdy do nukleotydów przyłączone są fluorochromy. Cała idea sprowadza się do tego, by tych punktów (a więc zsekwencjonowanych w jednej reakcji fragmentów) było jak najwięcej, najlepiej setki milionów. Obecnie dominują dwie wiodące technologie: ION (od *Life Technologies*)

oraz metoda firmy *Illumina*. Niezależnie od producenta technologii sekwencjonowanie dotyczy względnie krótkich fragmentów (co w przypadku kopalnego DNA nie jest wadą a zaletą), do 200 pz, albo 400 pz w przypadku IONa i 75 pz, 100 pz albo 150 pz w przypadku *Illuminy*. Ilość sekwencji generowanych w jednej reakcji wynosi do 80 milionów w przypadku ION'a lub do 10 miliardów (sic!) w przypadku *Illuminy*.

## CHARAKTERYSTYKA DANYCH POLIMORFIZMY DNA

By omówić specyfikę danych paleogenomicznych, warto przypomnieć główne rodzaje zmiennych (w genetyce nazywanych polimorfizmami) obecnych w DNA oraz to, w jaki sposób są one dziedziczone. To właśnie obecność (lub brak) oraz częstości występowania wariantów (zwanych w genetyce allelami) różnicuje nam osobniki oraz populacje i jest celem sekwencjonowania.

### Polimorfizmy pojedynczego nukleotydu

Najczęściej analizowanym przez badaczy kopalnego DNA rodzajem zmiennych są polimorfizmy pojedynczego nukleotydu (ang. *single nucleotide polymorphism*, SNP). Jak nazwa wskazuje, są to różnice w sekwencji, w których badane osoby, osobniki, gatunki, szczepy itp. różnią się pojedynczym nukleotydem. Może to oznaczać, że dany nukleotyd jest inny w zależności od allelu albo w niektórych wariantach danego nukleotydu nie ma. Najczęściej (ze względu



na częstość występowania, ale też łatwość badania) w danych paleogenomicznych mamy do czynienia z tym pierwszym przypadkiem. W organizmach diploidalnych (czyli posiadających dwa zestawy chromosomów) w genomie jądrowym każdy osobnik ma dwa warianty danego polimorfizmu, mogą być one albo takie same (mówimy wtedy, że dla danego polimorfizmu osobnik jest homozygotą), albo różne (wtedy jest heterozygotą). W rozmnażaniu płciowym potomstwo otrzymuje losowo po jednym wariantcie od każdego z rodziców. W perspektywie długiego czasu można założyć, że polimorfizmy dziedziczą się niezależnie od siebie. Dzieje się tak dzięki rekombinacji, procesowi, w którym w rozmnażaniu płciowym u każdego z rodziców dwa chromosomy z pary wymieniają się fragmentami. Im dalej od siebie na chromosomie znajdują się dwa polimorfizmy, tym bardziej prawdopodobne, że będą one dziedziczone niezależnie.

### Polimorfizmy ilości powtórzeń

Zdecydowanie rzadziej wykorzystywanymi przez badaczy kopalnego DNA (mimo dominacji w biologii sądowej) są polimorfizmy ilości powtórzeń. Ponownie nazwa dobrze opisuje to złożone zjawisko, są to warianty charakteryzujące się zmienną ilością powtórzeń jakiegoś motywu w sekwencji DNA. Spośród kilku typów polimorfizmów ilości powtórzeń, najczęściej analizowanymi są krótkie powtórzenia tandemowe (ang. *short tandem repeats*, STR). Są to powtórzenia krótkich (2-4 bp) motywów następujących kilka (zazwyczaj od 5 do 20) razy. Oznacza to, że „siła rozdzielcza” STR jest zdecydowanie większa. Dużo niższe jest prawdopodobieństwo, że dwie osoby w sposób zupełnie przypadkowy dzielą ten sam z 15 możliwych niż z dwóch (jak w przypadku SNP) wariantów. Z tego powodu STR zdominowały badania z dziedziny medycyny sądowej. Jednakże ich użyteczność w badaniach kopalnego DNA jest ograniczona. STR są względnie długie, a ich badaniach wykorzystuje się metody oparte na bezpośrednim PCR. Pojedynczy STR ma większą moc statystyczną niż pojedynczy SNP, ale przy użyciu metod opartych na sekwencjonowaniu wysokoprzepustowym łatwiej jest uzyskać informacje na temat tysięcy SNP niż przy użyciu bezpośredniego PCR na temat kilku STR. Ponadto wykluczenie kontaminacji współczesnym DNA na

podstawie STR jest zadaniem zdecydowanie trudniejszym i mimo kilku zakończonych umiarkowanym sukcesem prób w poprzedniej dekadzie, obecnie raczej się od tej metody odchodzi.

### HAPLOTYPY I HAPLOGRUPY

Pojęciem często używanym w genetyce populacyjnej, ale też w genealogii zarówno przez genetyków, jak i pasjonatów dziedziny, jest haplogrupa. By zrozumieć to pojęcie, musimy sobie przypomnieć, że człowiek (jak i wszystkie ssaki i większość kręgowców) ma genom diploidalny, ale jego fragmenty mogą być haploidalne (czyli posiadać tylko jedną kopię lub wariant). Dotyczy to przede wszystkim DNA mitochondrialnego i fragmentów chromosomu Y u osobników płci męskiej (u człowieka). Mitochondria jako centra energetyczne komórki, mają własny krótki genom (o długości 16569 pz). Mimo że w jednej komórce może być wiele mitochondriów (nawet tysiące), to zasadniczo wszystkie posiadają ten sam identyczny genom mitochondrialny (mtDNA). Mitochondria (a więc ich genomy) są u większości eukariotów dziedziczone w linii matczynej (z matki na potomstwo obu płci). Genom mitochondrialny w żaden sposób nie rekombinuje i za wyjątkiem losowo pojawiających się pod wpływem czynników środowiskowych, pojedynczych mutacji nie zmienia się z pokolenia na pokolenie. Genomy mitochondrialne różnią się od siebie polimorfizmami, przed wszystkim w postaci SNP, które nagromadziły się w poszczególnych liniach na drodze ewolucji. Taką linię ewolucyjną o określonym zestawie alleli w miejscach polimorficznych określamy mianem haplotypu. Grupę haplotypów o wspólnym pochodzeniu (znajdującą się na tej samej gałęzi drzewa filogenetycznego) nazywamy haplogrupą. Analogicznie, nie-rekombinujący region chromosomu Y (stanowiący 95% całego chromosomu) jest dziedziczony w niezmienionej postaci w linii męskiej (z ojca na potomstwo płci męskiej). Cały chromosom Y jest znacznie dłuższy niż genom mitochondrialny, liczy 58 milionów pz i zawiera w sobie znacznie większą ilość polimorfizmów różnych rodzajów.

Schemat dziedziczenia uniparentalnego (od jednego rodzica) oraz fakt dziedziczenia w niezmienionej postaci ma istotne implikacje dla badań genetycznych zarówno współczesnego, jak i kopalnego DNA:

- znając genotyp tylko części polimorfizmów, możemy przypisać danego osobnika do haplogrupy lub subhaplogrupy bez konieczności rekonstrukcji całego genomu. Początkowo badania kopalnego DNA polegały na sekwencjonowaniu tzw. regionu hiperzmiennego mtDNA, który to region, liczący sobie około 1000 pz, zawiera około 30% polimorfizmów obecnych w mtDNA. Poprzez sekwencjonowania kilku krótkich (poniżej 100 pz) produktów można uzyskać informacje z wystarczającej liczby polimorfizmów, by przypisać danej próbie haplogrupę. Jednak by poznać subhaplogrupę lub dokładny haplotyp (w celu np. wykluczenia pokrewieństwa w linii matczynej), niezbędne jest sekwencjonowanie całego genomu mitochondrialnego;
- możemy patrzeć na całe genomy haploidalne jako pojedyncze zmienne (a nie zbiory zmiennych). Przedmiotem analiz statystycznych są wtedy nie poszczególne polimorfizmy, a haplogrupy i haplotypy. Informatywne dla nas są wtedy nie tylko obecność (lub brak) poszczególnych haplogrup, ale częstości ich występowania w poszczególnych populacjach;
- nierekombinujące i dziedziczone uniparentalnie (w linii od jednego rodzica) markery niosą jednak z sobą ograniczoną ilość informacji. Rozpoznanie haplotypu mtDNA informuje nas o genetycznym wpływie ograniczonej ilości przodków, np. świadczy tylko o pojedynczym osobniku sprzed czterech pokoleń (praprababce od strony matki). Tymczasem w analogicznym przypadku dane uzyskane w wyniku analizy genomu jądrowego niosą ze sobą informacje o wszystkich 16 przodkach sprzed czterech pokoleń.

Ponadto genomy mitochondrialne, co ma niebagatelne znaczenie w badaniach kopalnego DNA, są obecne w komórkach w wielu (nawet tysiącach) kopiach. W związku z tym ilość fragmentów DNA pochodzących z genomu mitochondrialnego, mimo że genom ten jest stosunkowo niewielki, potrafi być bardzo duża. Skutkiem tego zrekonstruowanie haplogrupy lub haplotypu mitochondrialnego jest możliwe nawet w przypadku prób z bardzo słabym stopniem zachowania DNA, dla których uzyskanie, nadających się do analiz statystycznych ilości DNA jądrowego jest nieopłacalne.

## Analiza danych

Analiza danych genetycznych stanowi osobną dziedzinę na styku biologii populacyjnej, statystyki i bioinformatyki i w przypadku badań kopalnego DNA składa się z kilku kroków: analiz sekwencji, mapowania i genotypowania.

## Analizy sekwencji

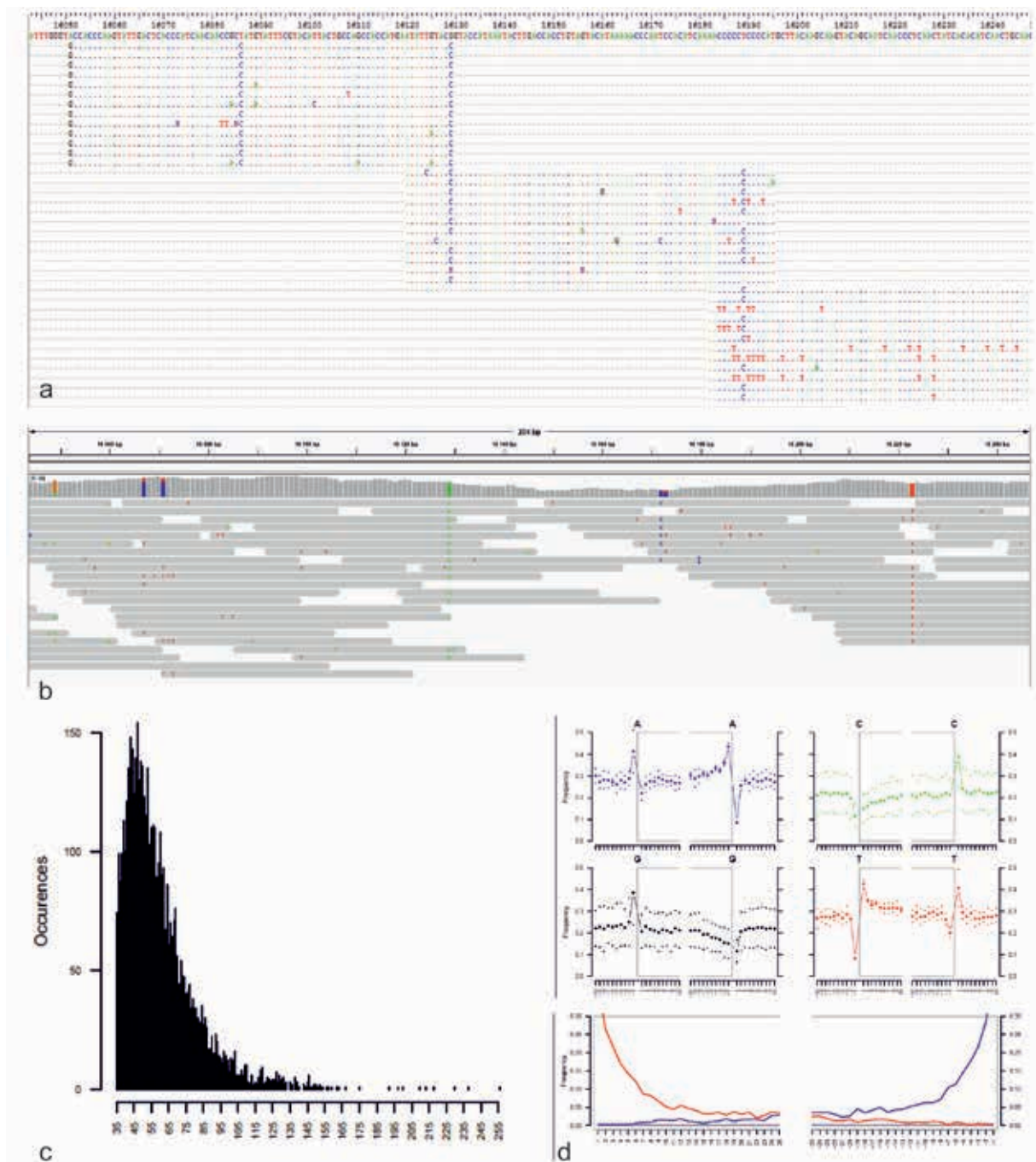
Bioinformatyczna obróbka danych sekwencjonowania istotna zwłaszcza w metodach wysokoprzepustowych, mająca za zadania odfiltrować sekwencje o niskiej jakości, artefakty, pozostałości sekwencji adapterów itp.

## Mapowania do genomu(-ów) referencyjnych

W przypadku wyników uzyskanych na drodze sekwencjonowania produktów PCR uzyskane sekwencje można ręcznie porównać między sobą i sekwencją referencyjną nawet przy użyciu dowolnego edytora tekstowego, choć znacznie wygodniej wykorzystać do tego specjalne oprogramowanie. Wyniki sekwencjonowania wysokoprzepustowego wymagają specjalistycznego oprogramowania oraz dużej mocy obliczeniowej (najlepiej centrów superkomputerowych) w celu określenia, czy i w których miejscach miliony uzyskanych sekwencji pasują do sekwencji referencyjnej. W przypadku gdy interesuje nas jeden gatunek, którego genom znamy (jak wtedy, gdy badamy szczątki ludzkie), proces ten jest prostszy i szybszy niż w przypadku gdy badamy bioróżnorodność, np. fauny bakteryjnej kamienia nazębnego, lub w próbach środowiskowych. W takim przypadku musimy porównywać otrzymane sekwencje do całych baz danych (lub ich wycinków, jeśli interesuje nas tylko określona grupa organizmów).

## Analizowania stopnia zanieczyszczenia prób

Istotny krok niezbędny do potwierdzenia autentyczności uzyskanych danych, wymagający jednak wcześniejszego zmapowania sekwencji do referencji, zostanie omówiony bardziej szczegółowo poniżej.



**Ryc. 6.** a – sekwencje regionu hiperzmienionego mtDNA uzyskane w wyniku sekwencjonowania metodą Sanger produktów wielu PCR (widoczne są tylko różnice względem sekwencji referencyjnej); b – ten sam fragment genomu mitochondrialnego, ale pokryty sekwencjami uzyskanymi w wyniku sekwencjonowania wysokoprzepustowego biblioteki genomowej (ponownie widoczne są tylko różnice względem referencji); c – wykres rozkładu długości fragmentów endogennego DNA obecnych w bibliotece genomowej; d – wzorce zmian *post-mortem* obliczone za pomocą programu mapDamage. U góry częstość nukleotydów w sąsiedztwie końców fragmentów DNA (częstsze A i G przy końcach 5' oraz C i T przy końcach 3'). Na dole częstość zmian C na T (na czerwono) i G na A (na niebiesko) względem ich pozycji fragmentach DNA (wzrastająca przy końcach tych fragmentów) (wyk. M. Chyleński)



## Genotypowanie

Proces wyszukiwania polimorfizmów, które są obecne w naszych danych, oraz określenie alleli, które nasze badane próby posiadają w miejscach polimorficznych. Inaczej mówiąc, jest to wyszukiwanie zmiennych, których następnie użyjemy w analizach statystycznych i też wymaga osobnego podrozdziału w celu dokładniejszego omówienia.

## Analizy statystyczne, populacyjne i inne

Zbiór metod i narzędzi, które mają za zadanie weryfikować nasze hipotezy badawcze, zostanie im poświęcony osobny podrozdział.

## WYKLUCZANIE KONTAMINACJI WSPÓŁCZESNYM DNA

W metodach opartych na bezpośrednim PCR jedynym sposobem wykluczenia kontaminacji jest replikacja wyniku. Replikacja może polegać na kolejno:

- przeprowadzeniu kilku (min. 2) izolacji z pojedynczej próby;
- przeprowadzeniu kilku (min. 2) PCR z pojedynczego izolatu;
- sekwencjonowaniu kilku (min. 2) produktów z każdego PCR.

Jeśli we wszystkich przypadkach otrzymamy taki sam wynik i przy jego otrzymywaniu zastosowaliśmy wszystkie zalecenia wskazane do pracy z kopalnym DNA, to możemy uznać ostateczny wynik za autentyczny. Dodatkowym kryterium może być występowanie substytucji względem referencji C na T i G na A w niektórych sekwencjach, ich brak nie wyklucza jednak jednoznacznie, że sekwencje pochodzą z kopalnego DNA (ryc. 6a).

Sekwencjonowanie wysokoprzepustowe dostarcza nam sekwencji całych fragmentów DNA (ryc. 6B). Takie sekwencje zawierają w sobie dodatkowe, przydatne w wykrywaniu zanieczyszczeń informacje. Jako że danych jest duża ilość, można te informacje skwantyfikować i opracować statystycznie. Zmiany, o których tu mowa, to przede wszystkim:

- informacje o zmianach *post-mortem* względem sekwencji referencyjnej, przede wszystkim zmiany C na T i G na A blisko końców fragmentów DNA (ryc. 6d);

- rozkład długości fragmentów DNA pokazujący przewagę fragmentów krótkich i bardzo krótkich (ryc. 6c);
- wzorzec fragmentacji DNA pokazujący zwiększoną częstość puryn (A i G) w bezpośrednim sąsiedztwie końców 5' i odpowiadające im pirymidyny (C i T) przy końcach 3' (ryc. 6d).

Ponadto ilość sekwencji, jaką dysponujemy umożliwia oszacowanie stopnia kontaminacji poprzez przyjrzenie się sekwencjom zmapowanym do haploidalnych części badanych genomów, takich jak mtDNA i chromosom X (w przypadku osobników płci męskiej) w celu kwantyfikacji i analizy wszystkich niezgodności i niekonsekwencji w otrzymanych sekwencjach (Fu i in. 2013; Renaud i in. 2015).

## GENOTYPOWNIE

W przypadku bezpośredniego PCR najczęściej z góry znamy polimorfizmy, które analizujemy, mogą to być polimorfizmy odpowiadające za określoną cechę albo diagnostyczne dla określenia haplogrup (mtDNA i Y-DNA) lub przynależności gatunkowej. W przypadku danych pochodzących z sekwencjonowania wysokoprzepustowego do genotypowania należy użyć specjalistycznego oprogramowania wyszukującego polimorfizmy. Zakładając, że dysponujemy dużą ilością danych dla większej ilości prób reprezentujących określoną populację, możemy dokonywać tego tylko za pomocą wygenerowanych przez nas sekwencji. Można też (co stosuje się najczęściej w badaniach kopalnego DNA) wykorzystać listy polimorfizmów uzyskane dla referencyjnych populacji współczesnych. Genotypowanie danych kopalnych wiąże się jednak z trudnościami związanymi bezpośrednio z charakterystyką kopalnego DNA, a zwłaszcza z dwoma jej aspektami: fragmentarycznym charakterem danych oraz zmianami *post-mortem*.

## FRAGMENTARYCZNY CHARAKTER DANYCH

Wbrew potocznie używanym i pojawiającym się w doniesieniach prasowych określeniom w badaniach kopalnego DNA bardzo rzadko uzyskujemy „całe genomy”. Genom jest pojęciem problematycznym, tak naprawdę do tej pory nie udało nam

się zrekonstruować w 100% całego dużego genomu eukariotycznego. Nawet najlepiej zbadany genom ludzki ma spore luki i mimo że minęło już ponad 15 lat od ogłoszenia wielkiego sukcesu, jakim było jego zsekwencjonowanie, dopiero w zeszłym roku poznaliśmy pierwszą kompletną sekwencję chromosomu (Miga i in. 2020). Sekwencjonowanie wysokoprzepustowe nadal jest kosztownym i czasochłonnym przedsięwzięciem, w związku z czym najczęściej ograniczamy je w momencie, gdy uzyskamy wystarczającą ilość danych, by wykorzystać je w planowanych analizach statystycznych.

Często więc sekwencje dla jednej próby, które nazywamy potocznie zrekonstruowanym genomem, będą pokrywały się z genomem referencyjnym w zakresie nie przekraczającym 10%. Pojęciem, którego najczęściej się używa do opisu ilości danych, jaką dysponujemy, jest „pokrycie genomu”. Pokrycie genomu równe 1x oznacza, że ilość nukleotydów, jaką zmapowaliśmy do genomu referencyjnego, jest równa wielkości tego genomu. Nie oznacza to, że zrekonstruowaliśmy cały genom tego osobnika, bo wiele miejsc w takim genomie będzie pokryte więcej niż jedną sekwencją i równocześnie o wielu jego częściach nie będziemy mieć żadnych informacji.

### ZMIANY POST-MORTEM

Substytucje C na T i G na A będące skutkiem deaminacji cytozyny w pojedynczej sekwencji w miejscu polimorficznym są nie do odróżnienia od alleli występujących przyżyciowo. W celu rozwiązania tego problemu można zastosować kilka podejść (lub ich kombinacji):

- ignorować całkowicie polimorfizmy (zwane tranzycjami), w których allelami są C/T oraz A/G i używać do analiz tylko polimorfizmów (zwanych transwersjami), w których możliwymi allelami są G/T, G/C, A/T oraz A/C. Stosując to podejście, jako że tranzycje występują w genomie znacznie częściej niż transwersje, świadomie rezygnujemy z ponad 60% polimorfizmów, które moglibyśmy analizować;
- dążyć do wysokiego pokrycia genomu. Zmiany *post-mortem* występują losowo, jeśli dany polimorfizm będzie pokryty wieloma odczytami to, nawet jeśli w danym miejscu wystąpi tranzycja wywołana deaminacją cytozyny, statystyczna szansa na to, że pojawi się na więcej niż jednym odczycie,

jest bardzo niska. Pozostałe sekwencje zweryfikują rzeczywisty genotyp w danym miejscu (patrz też ryc. 6b). Podejście to wymaga jednak bardzo dobrego zachowania DNA albo dużych nakładów finansowych na sekwencjonowanie;

- usuwać zdeaminowane do uracylu cytozyny odpowiednimi enzymami w trakcie tworzenia biblioteki genomowej. Tak potraktowane biblioteki pozbawione są charakterystycznych dla kopalnego DNA zmian, co utrudnia potwierdzenie autentyczności otrzymanego wyniku. Dlatego w takich przypadkach najczęściej tworzy się przynajmniej dwie biblioteki, jedną niemodyfikowaną, którą wykorzystuje się do szacowania stopnia kontaminacji, i jedną modyfikowaną, z której można wykorzystać wszystkie polimorfizmy w trakcie analiz statystycznych;
- ucinając końce sekwencji przed genotypowaniem. Zmiany *post-mortem* znajdują się najczęściej przy i na końcach cząsteczek DNA, można więc, genotypując tranzycje, ignorować kilka (7 do 10) par zasad na końcach analizowanych sekwencji;
- uznawać i wykorzystywać tylko genotypy, które nie mogły powstać w wyniku zmian *post-mortem*. Czyli tylko C w polimorfizmie C/T i tylko G w polimorfizmie G/A.

### ANALIZY STATYSTYCZNE

Zakładając, że mamy już nasze próby zgenotypowanie (względem wybranych danych referencyjnych), możemy przystąpić do analiz statystycznych służących do porównywania naszych prób między sobą oraz danymi referencyjnymi. Same analizy, które wybierzemy, będą zależały od pytań badawczych, na jakie chcemy odpowiedzieć. Na potrzeby tego rozdziału podzielimy je na: analizy pokrewieństwa, analizy populacyjne i analizy filogenetyczne.

### ANALIZY POKREWIEŃSTWA

Analiz pokrewieństwa dokonuje się na danych pochodzących ze szczątków ludzkich w celu wyszukania pokrewieństwa genetycznego między porównywanymi próbami. Próby odpowiedzi na pytania dotyczące tego, czy i w jakim stopniu struktura przestrzenna pochówków odpowiada strukturze

pokrewieństwa pomiędzy osobami pochowanymi w danych obiektach, mają szerokie implikacje w rekonstrukcji struktury społecznej danej grupy lub populacji.

Zasady dziedziczenia alleli w rozmnażaniu płciowym (po jednym losowym allelu od każdego z rodziców) i wykorzystanie rachunku prawdopodobieństwa do określenia, czy dwie osoby mogą być z sobą spokrewnione, są metodą od dawna wykorzystywaną w badaniach genetycznych. Jednak w celu porównywania ze sobą danych pochodzących z sekwencjonowania wysokoprzepustowego kopalnego DNA, metody te należy odpowiednio zmodyfikować.

Czysto teoretycznie, w obecności całkowicie zrekonstruowanych genomów oraz odpowiednich danych referencyjnych, metody te są w stanie zrekonstruować pokrewieństwo nawet do 11 stopnia. Oczywiście w przypadku kopalnego DNA wynik ten jest nieosiągalny. Możliwe jest jednak z dużym prawdopodobieństwem wykrywanie pierwszego i drugiego stopnia nawet w przypadku słabego zachowania DNA w jednej z porównywanych prób przy paru zastrzeżeniach:

- częstość występowania poszczególnych alleli jest dla badanej populacji znana albo nie odbiega znacząco od częstości obecnych w populacjach współczesnych. Częstość alleli jest istotna, jako że dużo większą wagę ma fakt dzielenia tego samego allelu przez dwie osoby, jeśli w populacji występuje on rzadko);
- badana populacja charakteryzuje się niewielkim kojarzeniem krewniaczym lub jesteśmy w stanie obliczyć częstość tego zjawiska dla danej populacji.

Wymagane jest zmodyfikowanie metody, by uwzględniała niskie pokrycie i niekompletność danych. Stosowane w badaniach współczesnego DNA metody zakładają, że dysponujemy informacją o obu allelach, jakie posiadał każdy z porównywanych osobników w danym miejscu. Tymczasem w przypadku kopalnego DNA najczęściej dysponujemy tylko kilkoma odczytami dla każdego polimorfizmu, które rzadko kiedy reprezentują oba allele obecne w danym miejscu za życia. By wziąć na to poprawkę, można losowo zawsze wybierać tylko jeden allel obecny w danym miejscu (niezależnie, czy dysponujemy jednym czy dwoma) i rekompensować utratę informacji ilością analizowanych markerów.

Innym podejściem jest wykorzystanie haplotypów występujących lokalnie w genomie jądrowym,

zwanych czasami segmentami IBD (ang. *identical by descent*). Większość metod statystycznych zakłada, że polimorfizmy mogą być dziedziczone niezależnie, dzięki zjawisku rekombinacji. W rzeczywistości, jak pamiętamy, im bliżej siebie na genomie znajdują się dwa polimorfizmy, tym mniej jest to prawdopodobne. Sytuację tę, która jest problematyczna w standardowych metodach (i wymaga losowego wybierania jednego polimorfizmu z kilku sąsiadujących ze sobą), można wykorzystać zarówno w badaniach pokrewieństwa i populacyjnych szukając, kwantyfikując i mierząc segmenty IBD. Im bliżej ze sobą spokrewnione dwie osoby tym mniej będzie miejsc rekombinacji (których ilość kumuluje się wraz z następującymi pokoleniami) i tym dłuższe będą lokalne haplotypy. W celu szacowania pokrewieństwa nawet przy stosunkowo niewielkich ilościach danych można w ten sposób zweryfikować pokrewieństwo pierwszego i drugiego stopnia (Monroy Kuhn i in. 2018). Jak zwykle niekompletny charakter danych i zmiany *post-mortem* uniemożliwiają wykrycie dalszych stopni pokrewieństwa, choć stosowanie bardziej wyrafinowanych metod i genomów o wysokim pokryciu w niektórych przypadkach może pozwolić do wykrycia nawet piątego stopnia pokrewieństwa (Cassidy i in. 2020).

By jednak z dużym prawdopodobieństwem ocenić, czy dwie osoby były ze sobą spokrewnione w pierwszym lub drugim stopniu, szacuje się, że w zależności od metody wystarczy 5000-8000 nakładających się między porównywanymi próbami SNP, co jest wynikiem względnie łatwym do osiągnięcia. Nie oznacza to, że będziemy w stanie zweryfikować wszystkie pary osób w badanej grupie, np. nie będziemy w stanie porównać dwóch bardzo słabo zachowanych prób, ale możemy każdą z nich porównać z inną dobrze zachowaną, co także może dostarczyć nam informacji (lub zweryfikować niepewną informację) o ich wzajemnym pokrewieństwie.

By jednak dokładniej zweryfikować otrzymane wyniki i ustalić rodzaj pokrewieństwa danego stopnia, np. rozróżnić, czy pierwszy stopień oznacza rodzeństwo, czy rodzica i dziecko, niezbędne jest wykorzystanie danych dotyczących płci badanych osób, posiadanych przez nie haplogrup mtDNA i Y-DNA oraz ich wieku w chwili śmierci (ryc. 8b). Z uwagi zresztą na sposób dziedziczenia haplogrupy są w stanie całkowicie wykluczyć nam pokrewieństwo w linii matczynej.



## ANALIZY POPULACYJNE

Analizy populacyjne mają odpowiadać na pytania, czy i w jakim stopniu badane populacje są ze sobą spokrewnione. Pomagają nam też weryfikować konkretne hipotezy oraz odpowiadać na pytania dotyczące charakteru przepływu genów między populacjami w przypadku jego wykrycia. Są to metody statystyczne, które służą do porównywania dużych ilości zmiennych, w celu np. grupowania i znalezienia alleli i polimorfizmów skorelowanych ze sobą. Przykładami takich analizy są analiza składowych głównych PCA (ang. *principal component analysis*) i skalowanie wielowymiarowe MDS (ang. *multidimensional scaling*) szeroko stosowane do analizowania wielu zmiennych, nie tylko w genetyce.

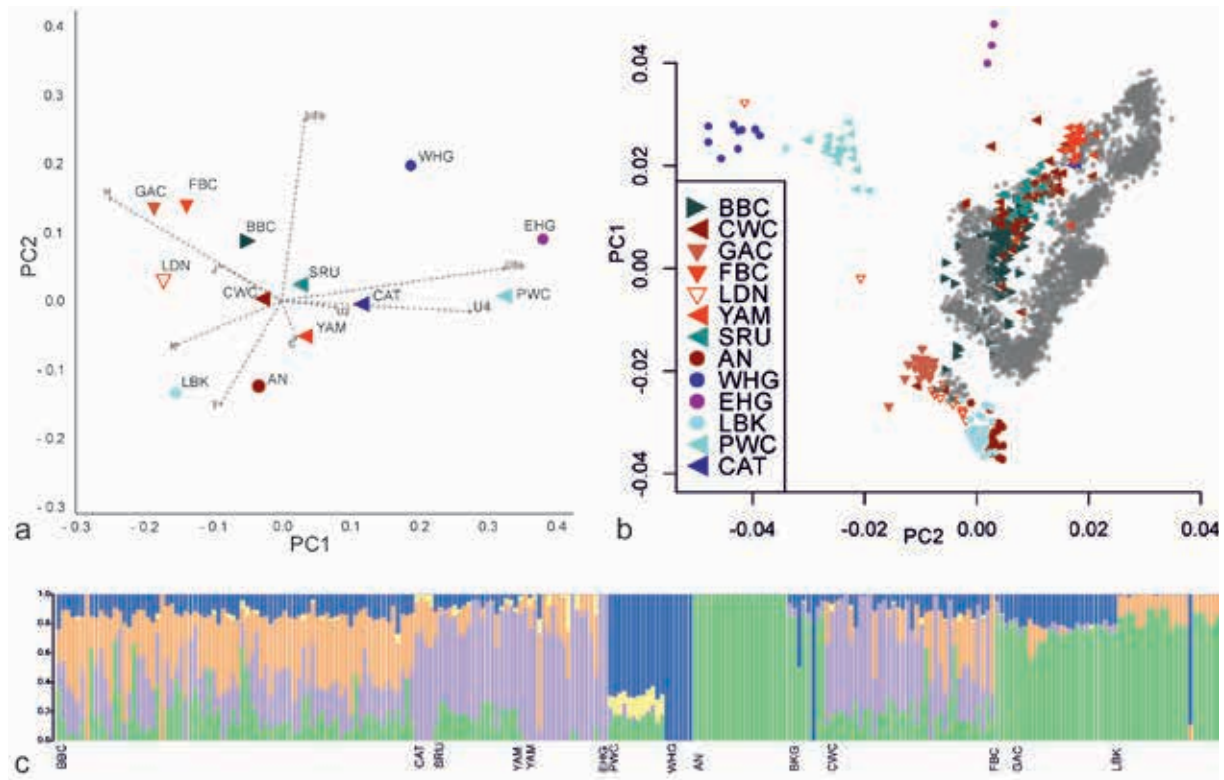
Najprostsze PCA można wykonać na danych zawierających informacje o częstości haplogrup. W takich wypadkach badanymi „obiektami” są populacje, a zmiennymi częstości występowania haplogrup w tych populacjach. Przy odpowiednim dobraniu prób relacje między populacjami powinny być zbliżone do tych obserwowanych w badaniach DNA jądrowego (patrz ryc. 7c i d). Jednak konieczność łączenia osobników w populację *a priori* sprawia, że analiza jest podatna na zaburzenia spowodowane małą liczbą osobników, obecnością osobników odstających (*outliers*) lub związane z dysproporcją płci w mieszających się populacjach (częstość haplogrup mtDNA się nie zmieni, jeśli elementem napływowym będą głównie mężczyźni).

Analizy genomów jądrowych, w których każdy osobnik jest badanym obiektem, a zmiennymi są polimorfizmy, ułatwia wykrycie takich błędów i prawidłowości. W rzeczywistości, z uwagi na niskie pokrycie genomu, rzadko kiedy jesteśmy w stanie porównywać kopalne próby bezpośrednio między sobą. Najczęściej wykorzystujemy w 100% zgenotypowane (dla danego zestawu SNP) próby współczesne, a następnie stosujemy zmodyfikowaną wersję oprogramowania do PCA, która porównuje nam osobno każdego osobnika badanego z danymi referencyjnymi, a następnie „uśrednia” uzyskane wartości, by odtworzyć relacje między badanymi próbami.

Dobór referencji współczesnej ma tu duże znaczenie. Wykorzystanie populacji genetycznie bardzo odległej (np. afrykańskich w badaniach populacji europejskich) może spowodować, że analiza nie wykaże różnicowania pomiędzy badanymi grupami, jako że wszystkie będą jednakowo (bardzo) odległe od populacji referencyjnej. PCA jest dobrym narzędziem do wykrycia istotnych różnic

między badanymi populacjami i – jak zostało wykazane – wynik analizy (w postaci wykresu punktowego) jest stały nawet przy bardzo małej (około 10 tysięcy) ilości SNP (Allentoft i in. 2015). PCA pomaga odpowiedzieć na pytanie, czy badane populacje są do siebie podobne, czy różne pod względem genetycznym. Z wzajemnego położenia tych populacji względem siebie możemy wysnuwać wstępnie interpretacje, ale w celu dokładniejszej rekonstrukcji zdarzeń wymagane są bardziej dokładne analizy.

Procesy demograficzne są zazwyczaj złożone i rzadko polegają na pełnym zastąpieniu jednej populacji inną. Najczęściej, gdy dochodzi do zetknięcia się dwóch populacji, może dojść do ich mieszania się w różnych proporcjach. Do kwantyfikacji takich procesów służą narzędzia, takie jak ADMIXTURE, statystyki *f*, *qpAdm* i *qpGraph* (ryc. 8a). W dużym uproszczeniu metody te służą do określenia, jakie komponenty genetyczne i w jakich proporcjach są obecne w badanych populacjach. Czyli jakie inne populacje i w jakich proporcjach się połączyły, gdy powstała populacja, którą badamy. Niektóre z tych metod, np. *Admixture* mogą wymagać wykorzystania (tak jak w przypadku PCA) populacji współczesnych, inne, np. *qpAdm*, wręcz przeciwnie – wymagają dodania populacji genetycznie odległych jako grup obcych (*outgroups*), względem których nasze badane populacje będą porównywane. Czasami możemy narzucić potencjalne populacje źródłowe, a nawet uzyskać wyliczenie prawdopodobieństwa, z jakim proponowany przez nas model rzeczywiście opisuje obserwowane różnicowanie genetyczne. Przy użyciu takich metod udało się ustalić np. trzy główne populacje źródłowe odpowiedzialne za genetyczne różnicowanie populacji europejskich: mezolitycznych łowców zbieraczy, anatolijskich rolników i późnoneolityczny grupy ze Stepu Pontyjsko-Kaspijskiego utożsamiane z kulturą grobów jamowych (Allentoft i in. 2015; Haak i in. 2015). Obecnie tych właśnie populacji używa się jako równoznacznych z trzema głównymi komponentami genetycznymi wyszukiwanymi w analizach populacyjnych. Bardziej dokładne analizy i rosnąca liczba prób umożliwiły rekonstrukcje bardziej złożonej struktury komponentów genetycznych, np. rozróżnienia komponentów łowiecko-zbierackich wschodniego i zachodniego (Fu i in. 2016) czy rozbieżności komponentu stepowego na wschodni łowiecko-zbieracki, wczesnorolniczy irański i zachodniosyberyjski (Narasimhan i in. 2019). Metody te wymagają



**Ryc. 7.** Przykłady wyników analiz populacyjnych dla kilku populacji pradziejowych; a – wykres obrazujący wynik analizy PCA dokonanej na częstościach haplogrup mtDNA (dodatkowo na szaro zaznaczone są haplogrupy mające znaczenie dla obserwowanego wyniku); b – wynik PCA dla SNP genomów jądrowych osób reprezentujących te same populacje. Na szaro zaznaczone genomy współczesne, względem których była dokonywana analiza; c – wynik analizy Admixture dla tych samych osób ukazujący główne komponenty genetyczne obecne w analizowanych genomach

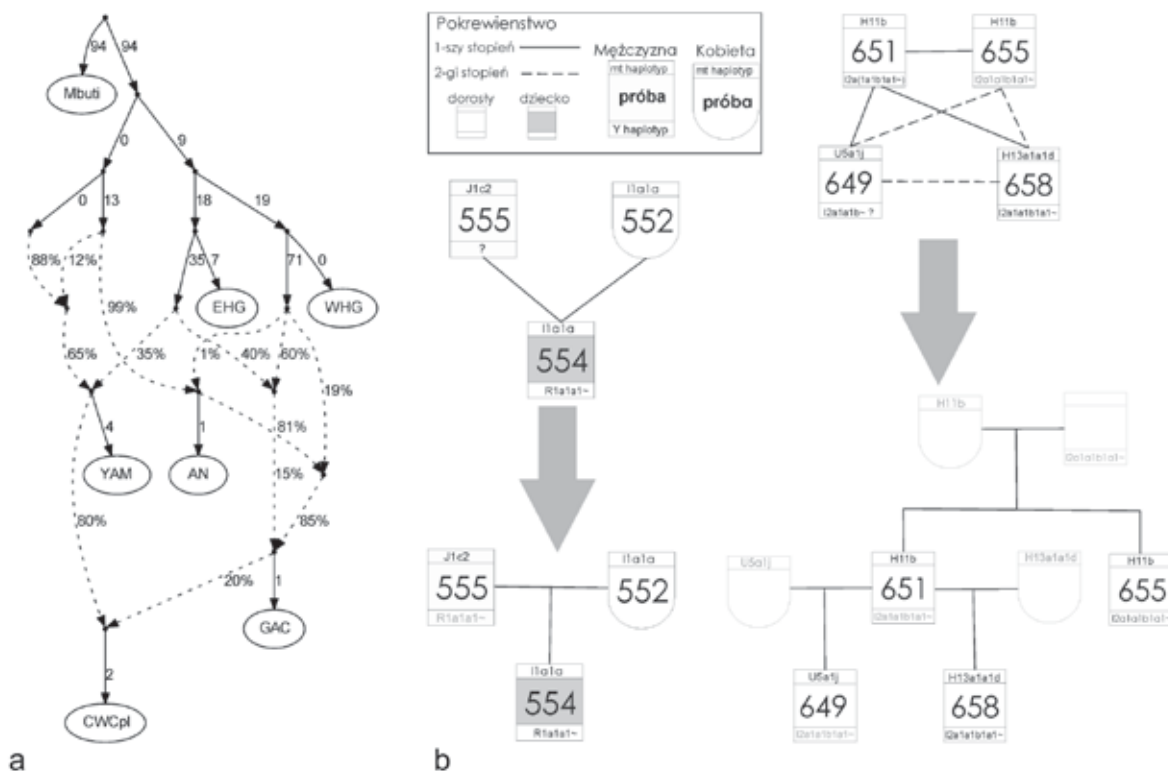
jednak większej ilości danych niż PCA, w postaci pokrycia genomu przynajmniej 0,1-0,2×.

Modelowania za pomocą qpAdm można użyć także do próby identyfikacji, które z potencjalnych populacji mogła być źródłem danego komponentu genetycznego. Na przykład w celu pokazania, że populacje stepowe związane z kulturą pucharów dzwonowatych mieszały się z lokalnymi społecznościami rolniczymi wraz z rozprzestrzenianiem się, a nie rozprzestrzeniały się już po zmieszaniu w miejscu swojej genezy (Olalde i in. 2018).

Sama identyfikacja komponentów genetycznych i ich źródła potrafi weryfikować wiele hipotez, zwłaszcza jeśli komponenty genetyczne są różne w mieszających się populacjach, ale interpretacja wyników może być problematyczna w sytuacji, gdy komponenty genetyczne w badanych populacjach są takie same. Z taką sytuacją mamy zawsze do czynienia w okresach pomiędzy wielkimi migracjami, na przykład w Europie od wczesnej epoki brązu, kiedy to na kontynent został wprowadzony ostatni znaczący

komponent genetyczny, mający swoje źródło na stepie. Zasadniczo od tego momentu wykrycie przepływu genów między „zhomogenizowanymi” populacjami europejskimi wymaga użycia dokładniejszych metod analizy. W takich sytuacjach na pomoc mogą przyjść, tak jak w przypadku badań pokrewieństwa, metody oparte na segmentach IBD, które z reguły powinny być dłuższe w populacjach ze sobą spokrewnionych (Cassidy i in. 2020; Margaryan i in. 2020). Takie podejścia wymagają niestety prób o wysokim pokryciu genomów, choć dla redukcji kosztów można do tych analiz wybrać tylko kilka reprezentatywnych dla populacji osobników z najlepiej zachowanym DNA. Problematiczne jest również ilość dostępnych danych referencyjnych, jako że większość publikowanych genomów charakteryzuje się niskim pokryciem.

Przy użyciu analiz populacyjnych można dodatkowo spróbować odpowiedzieć na pytania związane z charakterem zachodzących procesów demograficznych.



**Ryc. 8.** a – przykład wyniku analizy qpGraph służącej do weryfikacji złożonych modeli demograficznych zawierających wiele następujących po sobie wydarzeń mieszania się populacji wraz z zrekonstruowanymi proporcjami, w jakich te populacje się łączyły; b – przykłady rekonstrukcji struktury pokrewieństwa osób pochowanych w pochówkach zbiorowych z epoki brązu. Warto zwrócić uwagę, jak uzupełnienie wyniku analizy stopnia pokrewieństwa o informacje o wieku płci i haplogrupach umożliwia rekonstrukcję drzew genealogicznych

Porównanie zmieniającej się zmienności na chromosomie X z tą obserwowaną na pozostałych chromosomach pozwoliła stwierdzić, że w migracji rolników z Bliskiego Wschodu do Europy na początku neolitu w równej mierze brały udział kobiety i mężczyźni, natomiast za napływ stepowego komponentu genetycznego na przełomie neolitu i epoki brązu byli odpowiedzialni głównie (w stosunku 7:1) mężczyźni (Goldberg i in. 2017). Ponadto narzędzia pozwalające oszacować, kiedy dany komponent genetyczny został wprowadzony do badanej populacji, wykazały, że migracja ze stepu miała charakter ciągłego procesu, a nie pojedynczego epizodu (Furtwängler i in. 2020).

## ANALIZY FILOGENETYCZNE

Analizami filogenetycznymi określam wszystkie metody, które mają za zadanie odtworzenie tych relacji między badanymi próbkami. W rzeczywistości

część z opisanych w poprzednim podrozdziale analiz jest metodami filogenetycznymi (np. qpAdm), tutaj jednak skupię się na zastosowaniach związanych z odtwarzaniem drzew filogenetycznych w celu zbadania pochodzenia i relacji między gatunkami oraz odmianami i szczepami w obrębie gatunków. Metody te wykorzystują stopniowe gromadzenie się mutacji w badanych genomach wraz z upływem czasu. Obliczając różnice genetyczne pomiędzy badanymi próbkami w postaci pojawiających się nowych polimorfizmów oraz znając tempo zachodzących zmian (w oparciu o modele opracowane o osobniki o znanym datowaniu) i datowania poszczególnych osobników, jesteśmy w stanie zwizualizować relacje pomiędzy nimi w postaci drzewa filogenetycznego.

Drzewa takie tworzy się np. by poznać pochodzenie udomowionych gatunków zwierząt i roślin (porównując je do ich dzikich odmian o znanej dystrybucji geograficznej) lub szczepy patogenów odpowiedzialnych za konkretne epidemie. Czysto teoretycznie analizy te można dokonać (i często się



dokonywać) jedynie na współczesnych materiałach. Jednakże, jak się okazuje, dysponowanie danymi kopalnymi umożliwia datowanie obserwowanych procesów oraz wykrywanie wymarłych i zapomnianych odmian i szczepów.

W przypadku zwierząt najczęściej to mitochondrialny genom jest wykorzystywany do tworzenia drzew filogenetycznych z uwagi na sposób dziedziczenia i relatywnie szybkie i stałe tempo pojawiania się nowych mutacji. Analogiczną funkcję w przypadku roślin pełni DNA pochodzący z chloroplastów, organelli komórkowych odpowiedzialnych za fotosyntezę, posiadających swój genom w wielu kopiach w każdej komórce. Dzięki analizom kopalnego DNA w badaniach filogenetycznych poznaliśmy potencjalne pochodzenie i drogi udomowienia np. psów (Frantz i in. 2016; Thalmann i in. 2013), kotów (Otonari i in. 2017), świni (Larson i in. 2007) czy pszenicy (Scott i in. 2019). Badania archeogenetyczne pozwoliły nam też zrozumieć, w jaki sposób palące dzumy ewoluowały i wywoływały kolejne znane z historii pandemie (Rascovan i in. 2019; Rasmussen i in. 2015) oraz dostarczyły danych na temat pochodzenia i historii wywołującego kiłę krętka bladego w Europie (Majander i in. 2020).

## PODSUMOWANIE I PERSPEKTYWY

Jeśli warto zapamiętać jedną rzecz o badaniach kopalnego DNA to powinna to być ta, że dziedzina ta rozwija się niezwykle dynamicznie, ilość danych, które generujemy i prób, które badamy, przyrasta z roku na rok wykładniczo. Dokonywane na tych danych analizy pozwalają weryfikować rozmaite hipotezy badawcze dotyczące bioróżnorodności, pokrewieństwa i afiliacji genetycznych badanych populacji. Wymaga to jednak umiejętności dostosowania formułowanych pytań do dostępności materiału badawczego zarówno pod względem jego stanu zachowania (i warunków depozycji), jak i reprezentatywności dla potencjalnie różnych biologicznie populacji.

Przyrastająca ilość danych i spadające koszty sekwencjonowania pozwalają na analizy w coraz lepszej rozdzielczości, lepiej odpowiadające regionalnej

złożoności obrazu obserwowanego w kulturze materialnej. Badania o bardziej regionalnym charakterze, skupiające się na konkretnej grupie lub nawet stanowisku (Mittnik i in. 2019; Schroeder i in. 2019) są jedną z potencjalnych ścieżek rozwoju dyscypliny.

Kolejną obiecującą tematyką są badania kopalnego DNA obecnego w warstwach archeologicznych. Mogą one potencjalnie dostarczyć danych genetycznych przy braku makroszczątków i to nie tylko o środowisku i gospodarce, ale też samych twórcach danej warstwy (Slon i in. 2017).

Jednym z ciekawszych, dopiero rozwijanych zagadnień są badania metylacji DNA w populacjach pradziejowych. Metylacje są to modyfikacje DNA, które wpływają na ekspresję genów, dezaktywując lub aktywując określone fragmenty genomu w odpowiedzi na stres biologiczny lub zmiany środowiskowe. Jako że w wyniku zmian *post-mortem* cytozyny deaminują do uracylu, a metylowane cytozyny bezpośrednio do tyminy, porównując częstość zmian C na T między normalnymi bibliotekami a tymi, w których uracyl został usunięty, jesteśmy w stanie powiedzieć, które części genomu były metylowane. Potencjalnie może to pomóc odpowiedzieć na pytanie, w jaki sposób istotne zmiany (np. w stylu życia u zarania neolitu) wpłynęły na ekspresję genów (Hanghøj i Orlando 2019).

Nadal istnieją oczywiście spore luki w naszej wiedzy na temat genetycznego aspektu istotnych z punktu widzenia archeologii przemian i procesów. Niektóre okresy, jak przełom epoki brązu i żelaza, na terenach, na których dominowało ciepłota, chwilowo pozostają poza zasięgiem badań archeogenetycznych (choć i tu może kiedyś uda się uzyskać się nadające do analiz ilości DNA, jeśli nie ze skremowanych szczątków, to może z warstw na osadach). Są też okresy, jak środek epoki brązu, dla których wydawało się, że dane genetyczne (jako że początkowo zdawały się charakteryzować niskim zróżnicowaniem) nie będą w stanie wniesić wiele nowych informacji. Jednak wraz z rosnącą rozdzielczością danych i metod jesteśmy w stanie otrzymać bardziej zniuansowany obraz zróżnicowania genetycznego dla tych populacji.

Warto więc śledzić rozwój dziedziny, jaką są badania kopalnego DNA. Wraz z jej rozwojem wzrasta co prawda stopień skomplikowania metod, jakimi się posługuje, ale należy mieć nadzieję, że powstawanie zespołów i projektów interdyscyplinarnych oraz wzrastająca świadomość na temat realnych zastosowań badań kopalnego DNA ułatwią dialog i zrozumienie pomiędzy genetykami i archeologami.

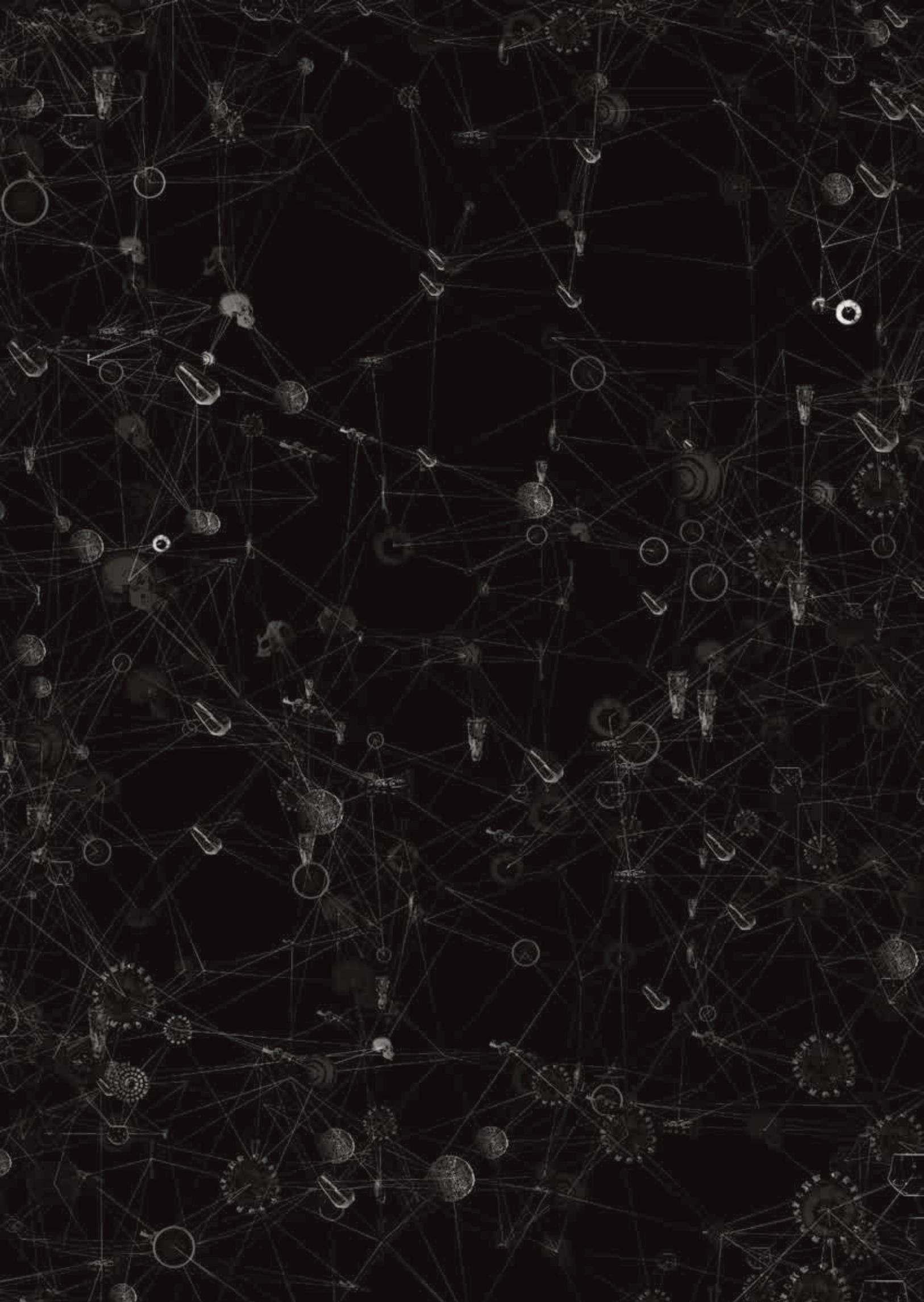
## BIBLIOGRAFIA

- Allentoft, M.E., Sikora, M., Sjogren, K.-G., Rasmussen, S., Rasmussen, M., Stenderup, J. [...] Willerslev, E. 2015. Population genomics of Bronze Age Eurasia. *Nature* 522: 167–172.
- Briggs, L. 2020. Ancient DNA Research in Maritime and Underwater Archaeology: Pitfalls, Promise, and Future Directions. *Open Quaternary* 6(1): 3. <https://doi.org/10.5334/oq.71>
- Campos, P.F., Craig, O.E., Turner-Walker, G., Peacock, E., Willerslev, E., Gilbert, M.T.P. 2012. DNA in ancient bone – Where is it located and how should we extract it? *Annals of Anatomy - Anatomischer Anzeiger* 194(1): 7–16. <https://doi.org/10.1016/j.aanat.2011.07.003>
- Cassidy, L.M., Maoldúin, R.Ó., Kador, T., Lynch, A., Jones, C. [...] Bradley, D.G. 2020. A dynastic elite in monumental Neolithic society. *Nature* 582: 384–388. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2378-6>
- Chyleński, M., Ehler, E., Somel, M., Yaka, R., Krzewińska, M., [...] Juras, A., Marciniak, A. 2019. Ancient Mitochondrial Genomes Reveal the Absence of Maternal Kinship in the Burials of Çatalhöyük People and Their Genetic Affinities. *Genes* 10: 207. <https://doi.org/10.3390/genes10030207>
- Dabney, J., Meyer, M., Pääbo, S. 2013. Ancient DNA Damage. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology* 5: a012567. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a012567>
- Damgaard, P.B., Margaryan, A., Schroeder, H., Orlando, L., Willerslev, E., Allentoft, M.E. 2015. Improving access to endogenous DNA in ancient bones and teeth. *Scientific Reports* 5: 11184. <https://doi.org/10.1038/srep11184>
- Frantz, L.A.F., Mullin, V.E., Pionnier-Capitan, M., Lebrasseur, O., Ollivier, M., Perri, A., [...] Bradley, D.G., Larson, G. 2016. Genomic and archaeological evidence suggest a dual origin of domestic dogs. *Science* 352: 1228. <https://doi.org/10.1126/science.aaf3161>
- Fu, Q., Mittnik, A., Johnson, P.L.F., Bos, K., Lari, M., Bollongino, R., [...] Krause, J. 2013. A Revised Timescale for Human Evolution Based on Ancient Mitochondrial Genomes. *Current Biology* 23: 553–559. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.02.044>
- Fu, Q., Posth, C., Hajdinjak, M., Petr, M., Mallick, S., Fernandes, D., [...] Krause, J., Pääbo, S., Reich, D. 2016. The genetic history of Ice Age Europe. *Nature* 534: 200.
- Furtwängler, A., Rohrlach, A.B., Lamnidis, T.C., Papac, L., Neumann, G.U., [...] Krause, J. 2020. Ancient genomes reveal social and genetic structure of Late Neolithic Switzerland. *Nature Communication* 11: 1915. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15560-x>
- Gamba, C., Jones, E.R., Teasdale, M.D., McLaughlin, R.L., Gonzalez-Fortes, G., [...] Bradley, D.G., Pinhasi, R. 2014. Genome flux and stasis in a five millennium transect of European prehistory. *Nature Communication* 5: 5257. <https://doi.org/10.1038/ncomms6257>
- Gilbert, M.T.P., Jenkins, D.L., Götherstrom, A., Naveran, N., Sanchez, J.J., Hofreiter, M., [...] Willerslev, E. 2008. DNA from Pre-Clovis Human Coprolites in Oregon, North America. *Science* 320: 786. <https://doi.org/10.1126/science.1154116>
- Goldberg, A., Günther, T., Rosenberg, N.A., Jakobsson, M. 2017. Ancient X chromosomes reveal contrasting sex bias in Neolithic and Bronze Age Eurasian migrations. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114(10): 2657–2662.
- Graham, E.A.M. 2007. DNA reviews: Ancient DNA. *Forensic Science, Medicine, and Pathology* 3: 221–225. <https://doi.org/10.1007/s12024-007-9009-5>
- Haak, W., Lazaridis, I., Patterson, N., Rohland, N., Mallick, S., [...] Reich, D. 2015. Massive migration from the steppe was a source for Indo-European languages in Europe. *Nature* 522: 207–211.
- Hagelberg, E., Bell, L.S., Allen, T., Boyde, A., Jones, S.J., Clegg, J.B. 1991. Analysis of ancient bone DNA: techniques and applications. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 333: 399–407.
- Hanghøj, K., Orlando, L. 2019. Ancient Epigenomics, (w:) C. Lindqvist, O.P. Rajora (red.), *Paleogenomics: Genome-Scale Analysis of Ancient DNA*. Cham, 75–111.
- Hansen, H.B., Damgaard, P.B., Margaryan, A., Stenderup, J., Lynnerup, N., Willerslev, E., Allentoft, M.E. 2017. Comparing Ancient DNA Preservation in Petrous Bone and Tooth Cementum. *PLOS ONE* 12: e0170940. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0170940>
- Harbeck, M., Schleuder, R., Schneider, J., Wiechmann, I., Schmahl, W.W., Grupe, G. 2011. Research potential and limitations of trace analyses of cremated remains. *Forensic Science, Medicine, and Pathology* 204: 191–200. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2010.06.004>
- Higuchi, R., Bowman, B., Freiburger, M., Ryder, O.A., Wilson, A.C. 1984. DNA sequences from the quagga, an extinct member of the horse family. *Nature* 312: 282–284. <https://doi.org/10.1038/312282a0>
- Jensen, T.Z.T., Niemann, J., Iversen, K.H., Fotakis, A.K., Gopalakrishnan, S., Vågene, Å.J., Pedersen, M.W., [...] Schroeder, H. 2019. A 5700 year-old human genome and oral microbiome from chewed birch pitch. *Nature*

- Communication 10: 5520. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13549-9>
- Juras, A., Chyleński, M., Krenz-Niedbala, M., Malmström, H., Ehler, E., [...] Jakobsson, M., Dabert, M. 2017. Investigating kinship of Neolithic post-LBK human remains from Krusza Zamkowa, Poland using ancient DNA. *Forensic Science International Genetics* 26: 30–39. <https://doi.org/10.1016/j.fsigen.2016.10.008>
- Juras, A., Dabert, M., Kushniarevich, A., Malmström, H., Raghavan, M., Kosicki, J.Z., Metspalu, E., Willerslev, E., Piontek, J. 2014. Ancient DNA reveals matrilineal continuity in present-day Poland over the last two millennia. *Plos ONE* 9(10): e110839. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0110839>
- Kashuba, N., Kirdök, E., Damlien, H., Manninen, M.A., Nordqvist, B., Persson, P., Götherström, A. 2019. Ancient DNA from mastics solidifies connection between material culture and genetics of mesolithic hunter-gatherers in Scandinavia. *Communications Biology* 2: 185. <https://doi.org/10.1038/s42003-019-0399-1>
- Larson, G., Albarella, U., Dobney, K., Rowley-Conwy, P., Schibler, J., Tresset, A., Vigne, J.-D., Edwards, C.J., Schlumbaum, A., Dinu, A. 2007. Ancient DNA, pig domestication, and the spread of the Neolithic into Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104: 15276–15281.
- Lever, M.A., Rogers, K.L., Lloyd, K.G., Overmann, J., Schink, B., Thauer, R.K., Hoehler, T.M., Jørgensen, B.B. 2015. Life under extreme energy limitation: a synthesis of laboratory- and field-based investigations. *FEMS Microbiology Reviews* 39: 688–728. <https://doi.org/10.1093/femsre/fuv020>
- Lindahl, T. 1993. Instability and decay of the primary structure of DNA. *Nature* 362: 709–715. <https://doi.org/10.1038/362709a0>
- Majander, K., Pfrengle, S., Kocher, A., Neukamm, J., du Plessis, L., Pla-Díaz, M., [...] Krause, J., Schuenemann, V.J. 2020. Ancient Bacterial Genomes Reveal a High Diversity of *Treponema pallidum* Strains in Early Modern Europe. *Current Biology* 30: 3788–3803.e10. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2020.07.058>
- Margaryan, A., Lawson, D.J., Sikora, M., Racimo, F., Rasmussen, S., Moltke, I., Cassidy, L.M., Jørsboe, E. [...] Nielsen, R., Werge, T., Willerslev, E. 2020. Population genomics of the Viking world. *Nature* 585: 390–396. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2688-8>
- Miga, K.H., Koren, S., Rhie, A., Vollger, M.R., Gershman, A., Bzikadze, A., [...] Phillippy, A.M. 2020. Telomere-to-telomere assembly of a complete human X chromosome. *Nature* 585: 79–84. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2547-7>
- Mittnik, A., Massy, K., Knipper, C., Wittenborn, F., Friedrich, R., [...] Stockhammer, P.W., Krause, J. 2019. Kinship-based social inequality in Bronze Age Europe. *Science* 366: 731. <https://doi.org/10.1126/science.aax6219>
- Mnich, B., Spinek, A.E., Chyleński, M., Sommerfeld, A., Dabert, M., Juras, A., Szostek, K. 2018. Analysis of LCT-13910 genotypes and bone mineral density in ancient skeletal materials. *PLOS ONE* 13: e0194966. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194966>
- Monroy Kuhn, J.M., Jakobsson, M., Günther, T. 2018. Estimating genetic kin relationships in prehistoric populations. *PLOS ONE* 13: e0195491. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195491>
- Narasimhan, V.M., Patterson, N., Moorjani, P., Rohland, N., Bernardos, R., Mallick, S., Lazaridis, I. [...] Frachetti, M., Pinhasi, R., Reich, D. 2019. The formation of human populations in South and Central Asia. *Science* 365: eaat7487. <https://doi.org/10.1126/science.aat7487>
- Olalde, I., Brace, S., Allentoft, M.E., Armit, I., Kristiansen, K., [...] Reich, D. 2018. The Beaker phenomenon and the genomic transformation of northwest Europe. *Nature* 555: 190–196. <https://doi.org/10.1038/nature25738>
- Oskam, C.L., Haile, J., McLay, E., Rigby, P., Allentoft, M.E., [...] Bunce, M. 2010. Fossil avian eggshell preserves ancient DNA. *Proceedings of the Royal Society B Biological Sciences* 277: 1991–2000. <https://doi.org/10.1098/rspb.2009.2019>
- Ottoni, C., Van Neer, W., De Cupere, B., Daligault, J., Guimaraes, S. [...] Grange, T., Geigl, E.-M. 2017. The palaeogenetics of cat dispersal in the ancient world. *Nature Ecology & Evolution* 1: 0139. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0139>
- Pinhasi, R., Fernandes, D., Sirak, K., Novak, M., Connell, S. [...] H., Hofreiter, M. 2015. Optimal Ancient DNA Yields from the Inner Ear Part of the Human Petrous Bone. *PLOS ONE* 10: e0129102. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0129102>
- Poinar, H.N., Cooper, A. 2000. Ancient DNA: do it right or not at all. *Science* 5482: 416.
- Rascovan, N., Sjögren, K.-G., Kristiansen, K., Nielsen, R., Willerslev, E., Desnues, C., Rasmussen, S. 2019. Emergence and Spread of Basal Lineages of *Yersinia pestis* during the Neolithic Decline. *Cell* 176: 295–305.e10. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2018.11.005>
- Rasmussen, M., Guo, X., Wang, Y., Lohmueller, K.E., Rasmussen, S., [...] Willerslev, E. 2011. An Aboriginal Australian Genome Reveals Separate Human Dispersals into Asia. *Science* 334: 94–98. <https://doi.org/10.1126/science.1211177>
- Rasmussen, M., Li, Y., Lindgreen, S., Pedersen, J.S., Albrechtsen, A. [...] Willerslev, E. 2010. Ancient human genome sequence of an extinct Palaeo-Eskimo. *Nature* 463: 757–762. <https://doi.org/10.1038/nature08835>
- Rasmussen, S., Allentoft, M.E., Nielsen, K., Orlando, L., Sikora, M. [...] Willerslev, E. 2015. Early Divergent Strains of *Yersinia pestis* in Eurasia 5,000 Years Ago. *Cell* 163: 571–582. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2015.10.009>
- Renaud, G., Slon, V., Duggan, A.T., Kelso, J. 2015. Schmutzi: estimation of contamination and endogenous



- mitochondrial consensus calling for ancient DNA. *Genome Biology* 16: 224. <https://doi.org/10.1186/s13059-015-0776-0>
- Sawyer, S., Krause, J., Guschanski, K., Savolainen, V., Pääbo, S. 2012. Temporal Patterns of Nucleotide Misincorporations and DNA Fragmentation in Ancient DNA. *PLOS ONE* 7: e34131. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0034131>
- Schroeder, H., Margaryan, A., Szmyt, M., Theulot, B., Włodarczak, P., [...] Allentoft, M.E. 2019. Unraveling ancestry, kinship, and violence in a Late Neolithic mass grave. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116: 10705. <https://doi.org/10.1073/pnas.1820210116>
- Scott, M.F., Botigué, L.R., Brace, S., Stevens, C.J., Mullin, V.E., Stevenson, A., Thomas, M.G., Fuller, D.Q., Mott, R. 2019. A 3,000-year-old Egyptian emmer wheat genome reveals dispersal and domestication history. *Nature Plants* 5: 1120–1128. <https://doi.org/10.1038/s41477-019-0534-5>
- Slon, V., Hopfe, C., Weiß, C.L., Mafessoni, F., de la Rasilla, M. [...] Meyer, M. 2017. Neandertal and Denisovan DNA from Pleistocene sediments. *Science* 356: 605. <https://doi.org/10.1126/science.aam9695>
- Smith, O., Momber, G., Bates, R., Garwood, P., Fitch, S., Palen, M., Gaffney, V., Allaby, R.G. 2015. Sedimentary DNA from a submerged site reveals wheat in the British Isles 8000 years ago. *Science* 347: 998. <https://doi.org/10.1126/science.1261278>
- Thalmann, O., Shapiro, B., Cui, P., Schuenemann, V.J., Sawyer, S.K. [...] Wayne, R.K. 2013. Complete Mitochondrial Genomes of Ancient Canids Suggest a European Origin of Domestic Dogs. *Science* 342: 871. <https://doi.org/10.1126/science.1243650>
- van der Valk, T., Pečnerová, P., Díez-del-Molino, D., Bergström, A., Oppenheimer, J. [...] Dalén, L. 2021. Million-year-old DNA sheds light on the genomic history of mammoths. *Nature* 591: 265–269. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03224-9>
- Welker, F., Ramos-Madrigal, J., Gutenbrunner, P., Mackie, M., Tiwary, S. [...], C., Bermúdez de Castro, J.M., Willerslev, E., Cappellini, E. 2020. The dental proteome of Homo antecessor. *Nature* 580: 235–238. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2153-8>
- Weyrich, L.S., Dobney, K., Cooper, A. 2015. Ancient DNA analysis of dental calculus. Special Issue Ancient DNA. *Journal of Human Evolution* 79: 119–124. <https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2014.06.018>
- Willerslev, E., Davison, J., Moora, M., Zobel, M., Coissac, E., Edwards, M.E., Lorenzen, E.D., Vestergård, M., Gusarova, G., Haile, J., Craine, J., Gielly, L., Boessenkool, S., Epp, L.S. [...] Brochmann, C., Taberlet, P. 2014. Fifty thousand years of Arctic vegetation and megafaunal diet. *Nature* 506: 47–51. <https://doi.org/10.1038/nature12921>









# Mikromorfologia

Karolina Leszczyńska, Michał Jankowiak

---

Mikromorfologia to metoda oparta na ilościowej i jakościowej analizie, komponentów organicznych i nieorganicznych (mineralnych) gleb i osadów nieskonsolidowanych, tworzących struktury sedymentacyjne w mikroskali. Analiza mikromorfologiczna zakłada określenie przestrzennego stosunku wszystkich składowych osadu do siebie nawzajem oraz do wolnych przestrzeni. Obserwacje mikromorfologiczne są prowadzone na niezaburzonych, impregnowanych próbach w postaci monolitów lub cienkich płytek (cienkiego szlifu) (Bullock i in. 1985; Courty i in. 1989; Stoops 2003; Budek 2010).

Analizy mikromorfologiczne oparte są na trzech podstawowych założeniach:

- wszystkie elementy osadów utrwalaonych w monolitach i płytkach cienkich przetrwały proces impregnacji, są zachowane i występują w naturalnym, niezaburzonym położeniu (Courty i in. 1989; Goldberg 1980; Fedoroff i in. 1990; Macphail i in. 1990; Goldberg i Macphail 2006; Goldberg i Berna 2010);
- wszystkie elementy i struktury opisane z cienkich płytek są świadectwem występujących w przeszłości zjawisk naturalnych i antropogenicznych (Drees i Wilding 1987);
- żadne z elementów budujących osady utrwalone w cienkich płytkach nie mogą być prawidłowo zinterpretowane bez zrozumienia kontekstu sedymentologicznego (Mucher i Morozova 1981).

Metodami mikromorfologicznymi bada się szerokie spektrum osadów i zapisanych w nich procesów i zjawisk, zarówno naturalnych, jak i antropogenicznych. W płytkach cienkich identyfikowane i opisywane są komponenty organiczny i nieorganiczny, ale również artefakty archeologiczne, fragmenty wytworów ludzkich. Analiza organizacji przestrzennej elementów budujących osad w mikroskali, czyli mikrostruktur, pozwala zrekonstruować występujące w przeszłości naturalne oraz antropogeniczne procesy depozycyjne i postdepozycyjne.

## HISTORIA MIKROMORFOLOGII

Początki mikromorfologii sięgają lat 30. XX w., kiedy to Austriak Walter Kubiena opublikował pierwsze opracowanie dotyczące zasad, założeń, celów badawczych i metod mikromorfologicznych (Kubiena 1938), później rozszerzone przez niego w kolejnych pracach w 1953 i 1970 roku (Kubiena 1953; 1970). W początkowej fazie mikromorfologia była stosowana głównie w gleboznawstwie. Pierwsze analizy osadów w mikroskali miały na celu opis i identyfikację gleb, wyjaśnienie ich genezy oraz powiązania ich ewolucji z procesami rzeźbotwórczymi.

Nieco szerzej w różnych dziedzinach nauki metody mikromorfologiczne zaczęto stosować w latach 60. XX w. W 1964 r. Jongerius (Holandia)

opracował publikację zawierającą zbiór artykułów na temat różnych zastosowań mikromorfologii w analizie osadów, badaniach paleośrodowiskowych, paleogeograficznych i paleopedologicznych. Zamieszczone tam prace dotyczyły zastosowania techniki analizy osadów w mikroskali do badania np.: paleogleb interglacjalnych (Morozova 1964), osadów morenowych (Korina i Faustova 1964) czy rozwoju gleb na osadach wulkanicznych na Islandii (Dalrymple 1964).

Od lat 70. XX w. nastąpił rozkwit mikromorfologii i metoda ta weszła na stałe do kanonu badań osadów. Powstała Międzynarodowa Grupa Robocza ds. Mikromorfologii Gleb i zostało wydanych wiele prac traktujących o metodyce i terminologii badań mikromorfologicznych, zarówno w czasopismach o tematyce gleboznawczej (np. *Catena*, *Geoderma*, *Journal of Soil Science*, *European Journal of Soil Science*), jak i podręczników, m.in.: Bullock i Murphy (1981), Delgado (1978), Douglas (1990), Fedoroff i in. (1987), Ringrose-Voase i Humphreys (1994), Rutherford (1974).

W latach 80. XX w. mikromorfologia wkroczyła w kolejny etap rozwoju: erę zastosowania nowoczesnych technik badawczych. W tomie edytowanym przez Bullocka i Murphiego (1981) opisane zostały pierwsze zastosowania mikroskopu elektronowego (SEM) (Eswaran i Shoba 1985), analiz mikrochemicznych (Bisdom 1985) oraz zautomatyzowanych analiz obrazu (Delgado i Dorronsoro 1985; Guilloire 1985). W tym samym tomie Goldberg (1985) podsumował pierwsze wykorzystanie analizy mikromorfologicznej do rozwiązywania zagadnień archeologicznych. W pracy Fitzpatricka (Fitzpatrick 1984) ukazały się artykuły szczegółowo opisujące proces przygotowania zaimpregnowanych osadów w postaci monolitów i cienkich szlifów do analiz (Fitzpatrick 1984), a także zastosowania technik rentgenowskich, analizy fluorescencyjne oraz barwienia minerałów w zaimpregnowanych w cienkich szlifach osadach.

Zastosowanie mikromorfologii w archeologii, datuje się na lata 50. XX w. i początkowo dotyczyło ono jedynie badania ceramiki i wytworów ludzkich. Przez lata osady, w których znajdowano artefakty archeologiczne, uważano za substrat, tło, znajdujące się poza zasięgiem zainteresowania archeologii (Macphail i in. 1990). Dopiero wraz z rozwojem geoarcheologii (Butzer 1973; 1974; 1977), która zajmuje się badaniem kontekstu,

otoczenia fizycznego (Butzer 1977; Hildebrandt-Radke 2007) geologicznego i sedimentologicznego (Renfrew i Bahn 2002) i ekologicznego (Butzer 1973; 1974), w jakim odkrywane są znaleziska archeologiczne, mikromorfologia zyskała na znaczeniu w tej dziedzinie nauki. Mikromorfologia w geoarcheologii wpisuje się w nurt archeologii kontekstualnej, w której stanowiska archeologiczne, są badane jako część ekosystemu ludzkiego, w którym dawne cywilizacje współoddziaływały wzajemnie w przestrzeni geograficznej, ekonomicznej i społecznej ze środowiskiem naturalnym (Butzer 1980). Mikromorfologia szybko stała się jedną z ważniejszych technik geoarcheologii, umożliwiającą ujęcie znalezisk archeologicznych w kontekście procesów naturalnych na podstawie zapisu ich interakcji w mikroskali.

W 1958 r. Dalrymple jako pierwszy wykorzystał metody mikromorfologiczne do badania osadów ze stanowisk archeologicznych i odróżnienia gleb naturalnych od antropogenicznych (Dalrymple 1958). Kolejne wczesne prace wykorzystujące techniki mikromorfologiczne w archeologii były związane z badaniem środowiskowego i paleoklimatycznego kontekstu rozwoju kultur i cywilizacji (np.: van Vliet 1976; Schuldenrein i Goldberg 1985; Courty i Fedoroff 1982; Macphail 1983), genezą i ewolucją osadów jaskiniowych (np.: Bowler i Thorne 1976; Dalrymple 1958; Goldberg 1979), a także analizą mikromorfologiczną artefaktów, materiałów budowlanych (Goldberg 1979) czy ceramiki (Shepard 1966). Od lat 70. i 80. XX w. zakres tematów badawczych w archeologii i geoarcheologii, w których wykorzystuje się metody mikromorfologiczne stale rośnie.

## MIKROMORFOLOGIA – TEMATY BADAWCZE

Mikromorfologia jako metoda badawcza znajduje zastosowanie w różnych dyscyplinach naukowych zajmujących się opisem stanu i ewolucji środowiska oraz wpływem działalności człowieka na jego elementy. Od lat 80. XX w. jest techniką analityczną powszechnie stosowaną w takich dziedzinach nauki, jak inżynieria drogowa i budowlana, gleboznawstwo, mikrobiologia i mikrobiologia gleb, paleopedologia, geomorfologia, paleoklimatologia, archeologia i geoarcheologia.

Omówienie tematyki badawczej w ramach powyższych dyscyplin jest szerokim zagadnieniem poza zasięgiem prezentowanego artykułu, który przedstawia jedynie zastosowania mikromorfologii w archeologii i geoarcheologii.

### **Badania gleboznawcze i sedimentologiczne**

Analizy mikromorfologiczne w pedologii i paleopedologii (nauce o glebach i glebach kopalnych) dotyczą głównie zagadnień genezy i ewolucji gleb. W osadach, na poziomie mikroskali, zapisane są zarówno naturalne procesy glebotwórcze (procesy ilitwórcze, bielicowania, brunatnienia, glejowienia, torfienia, wmywania, wymywania, mineralizacji), sedimentacyjne, postdepozycyjne (wysychanie, zamrażanie i rozmarzanie, przesiąkanie wodą), jak i te związane z działalnością antropogeniczną, jak np.: orka, przekopywanie, deptanie, zmiatanie (Courty i in. 1989; Goldberg i Macphail 2006; Wattez i in. 1990; Angelucci i in. 2009; Miller i in. 2010). Analizy mikromorfologiczne gleb pozwalają na odróżnienie gleb naturalnych od gleb antropogenicznych oraz stopień i rodzaj wpływu działalności człowieka na naturalne środowisko glebowe (Dalrymple 1958).

### **Badania paleoklimatyczne**

Na podstawie różnorodnych cech mikromorfologicznych można wyodrębnić okresy charakteryzujące się różnymi typami klimatu. Można wyodrębnić okresy chłodne i ciepłe, suche i wilgotne, a także okresy stabilizacji klimatycznej środowiska. Fedoroff i Goldberg (za Goldberg 1980), opisując występowanie ilastych otoczek wewnątrzkanalikowych (*clay coatings*) wnioskowali o zmianach klimatycznych gleb kopalnych z czasów późnego Pleistocenu. Schuldenrein i Goldberg (1985) i Van Vliet (1976) odtworzyli okresy naprzemiennego zamrażania i rozmarzania gleb kopalnych na podstawie analizy mikrolaminacji obecnych w szlifach cienkich. Podobnie rekonstrukcji paleoklimatycznych dokonali Vandermeersch (1969) i Fedoroff (1986), analizując charakter ilastych otoczek wewnątrzkanalikowych (*clay coatings*) w osadach jaskiniowych Quafzeh (Nazareth) i jaskini Lazaret (Nicea). Analizy mikromorfologiczne pomogły

również scharakteryzować zmiany klimatyczne zapisane w osadach Wyżyny Chińskiej 130 000-80 000 lat temu (Kemp i in. 2001), na Równinach Gangesu i Indusu 13 500-5 000 lat temu (Srivastava i in. 2001) czy jeziora Anderson w Tennessee, w USA od 14 300 lat temu do współczesności (Driese i in. 2017).

### **Badania nad chronologią**

Badania mikromorfologiczne pomagają w ustalaniu chronologii stanowisk. Bordes (1954) na podstawie cech mikromorfologicznych wyróżnił dwie różnowiekowe generacje lessu, co pozwoliło na uporządkowanie chronologii stanowisk paleolitycznych w dolinie Sekwany (za Goldberg 1980). Analizy mikromorfologiczne jaskiniowych osadów ilastych wykonane przez Bowlera i Thorne'a (1976) umożliwiło ich wzajemne korelacje.

### **Badania artefaktów archeologicznych**

Bezpośrednie zastosowanie metod mikromorfologicznych do analizy artefaktów i materiałów archeologicznych pozwala ustalać ich skład i pochodzenie czy nawet warunki powstawania lub przetwarzania, jak np. temperatura. Mikromorfologia pozwoliła wyjaśnić, z czego są zrobione cegły. Analizy ceramiki (Shepard 1942; Peacock 1969; 1970; Cornwall i Hodges 1964; Hays i Hassan 1974; Mathieu i Stoops 1972) czy materiałów budowlanych (Goldberg 1979) pozwoliły na ustalenie miejsca pochodzenia surowców, z których były wytworzone artefakty, oraz sposobów ich produkcji (Mathieu i Stoops 1972).

### **POBÓR PRÓB W TERENIE**

Strategia pobierania prób w terenie i ich wielkość zależą od charakterystyki materiału, który jest pobierany, oraz od pytań badawczych i testowanych hipotez, zasobów finansowych i możliwości laboratorium przygotowującego monolity i cienkie szlify (Stoops i Nicosia 2017; Mroczek 2001).

Próby z osadów w terenie mogą być pobrane w dwojaki sposób: 1) z odkrywki za pomocą metalowych puszek, form przypominających formy do ciasta, tzw. puszek Kubieny (ang. *Kubiena*





**Ryc. 1.** Pobór prób do analiz mikromorfologicznych w terenie za pomocą puszek Kubieny: a – wbijanie puszek Kubieny w oczyszczoną odkrywkę; b – wbita puszka Kubieny z oznaczoną orientacją stropu i spągu; c – okopywanie puszek Kubieny; d – pobrana próba, wygląd tuż po odjęciu jej od odkrywki; e – zapakowane do transportu monolity. Fot. K. Leszczyńska, R. Leszczyński

*tins*) (ryc. 1) lub 2) z materiału podpowierzchniowego za pomocą rdzeniownika wbijanego w ziemię. Pierwsza metoda, częściej wykorzystywana w badaniach mikromorfologicznych stosowanych w archeologii, wykorzystująca puszki Kubieny wbijane w ścianę odkrywki (ryc. 1), gwarantuje większą kontrolę nad zniekształceniami struktur sedymentacyjnych spowodowanymi procesem opróbowywania. Metoda wykorzystująca rdzeniownik sprawdza się do opróbowania materiału podpowierzchniowego, do którego nie ma dostępu w formie odkrywki i umożliwia pobranie długich sekwencji osadu. W przypadku obu metod należy dołożyć wszelkich starań, aby oryginalne struktury sedymentacyjne nie zostały naruszone. Praktyka pokazuje jednak, że osad graniczący z próbnikiem (puszką Kubieny czy rdzeniownikiem) zawsze zostaje nieznacznie zdeformowany

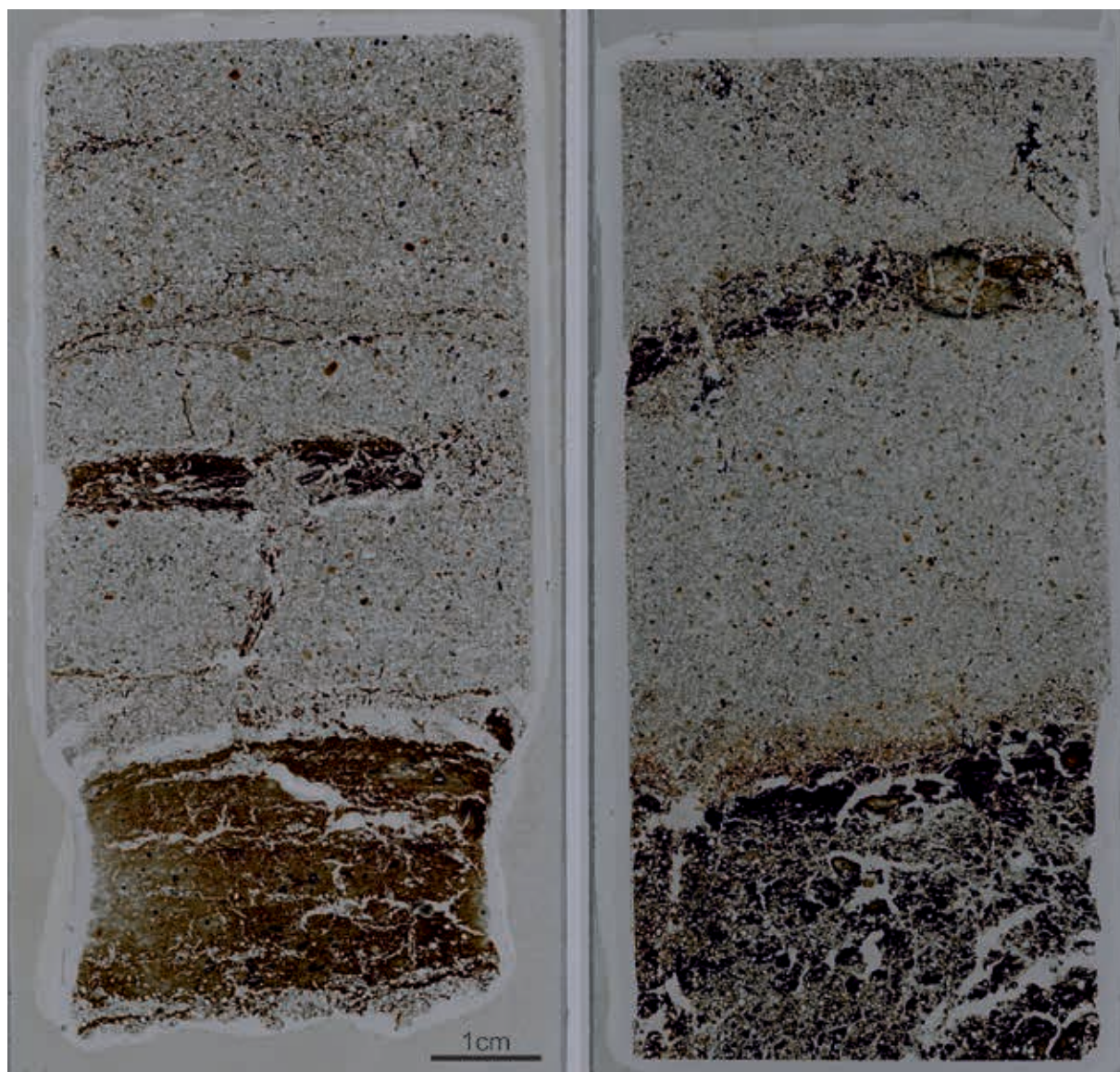
i należy te części odrzucić podczas analizy i interpretacji.

Przed pobraniem próby za pomocą puszek Kubieny cała odkrywka musi być oczyszczona i wyrównana; należy pamiętać, że proces czyszczenia musi odbywać się w poziomie (od prawej do lewej lub odwrotnie), względnie wzdłuż naturalnego biegu warstw osadów, tak aby granice między poszczególnymi warstwami nie zostały zaburzone lub rozmazane. Przygotowaną odkrywkę należy udokumentować: opisać, narysować i sfotografować, tak aby znany był kontekst sedymentologiczny pobranego materiału. Na puszkach oprócz standardowego opisu zawierającego lokalizację poboru próbki (najlepiej długość i szerokość geograficzną i wysokość n.p.m.), numer identyfikacyjny i datę poboru powinna być zaznaczona orientacja względem stropu i spągu oraz zapisana głębokość/wysokość, z jakiej pobrana została próbka oraz głębokość, na jaką została wbita w ścianę odkrywki.

Aby bezpiecznie wydobyć wbity w ścianę puszkę, należy ją ostrożnie okopać (ryc. 1), aż do końca ścian puszek, a następnie odjąć od ściany, odcinając jej spód od ściany odkrywki długim cienkim ostrzem. Po odjęciu puszek od ściany należy ją jak najszybciej zabezpieczyć, pakując szczelnie w dużą ilość folii, uzupełniając ewentualne braki osadu na powierzchni odjętej od ściany odkrywki miękką, zgniecioną folią (ryc. 1). Tak pobrane próby należy ostrożnie transportować do laboratorium, najlepiej tak, aby układ góra-dół z odkrywki był zachowany podczas transportu.

## PREPARATYKA LABORATORYJNA

W laboratorium próbki muszą być jak najszybciej poddane preparatyce, czyli utwardzeniu, tak aby luźna frakcja, często przewarstwiona materiałem organicznym, nie uległa dezintegracji, uniemożliwiając opisanie mikrostruktur, a tym samym odtworzenie procesów w niej zachodzących. Kiedy pobrane monolity lub rdzenie nie mogą być od razu poddane preparatyce, muszą być zabezpieczone przed niekontrolowanym wysychaniem. Pobrane próby najlepiej przechowywać w lodówce, względnie w temperaturze do 10°C. Wysychanie próbek pobranych jako rdzenie lub w puszkach Kubieny powoduje pękanie zawartego w nich osadu i powstanie zaburzeń pierwotnych struktur.



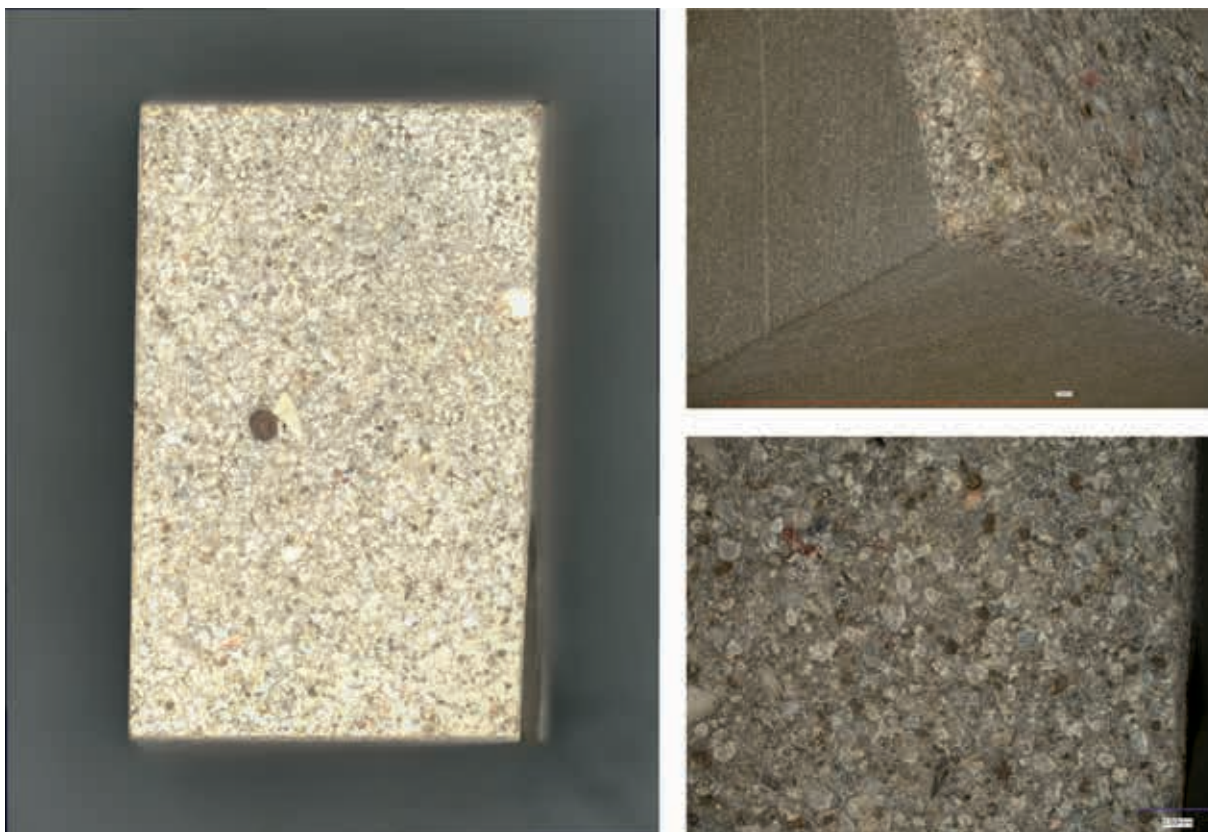
**Ryc. 2.** Przykłady gotowych do analizy mikroskopowej cienkich szlifów o różnych rozmiarach. wykonanie szlifów: Michał Jankowiak (Instytut Geologii, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza), Julie Boreham (Earthslides). Fot. K. Leszczyńska, A. Kurzawska

Suszenie poprzedzające impregnację musi odbywać się w temperaturze pokojowej, a osoba odpowiedzialna za preparatykę musi kontrolować przebieg procesu. Wyższa temperatura suszenia powoduje rekrytalizację minerałów ilastych będących składnikiem osadu, a także nadmierne pękanie osadu.

Płytką cienką to podstawowy preparat mikroskopowy wykorzystywany do badań mikromorfologii osadów (ryc. 2). Ze względu na specyfikę materiału, z którego ma zostać wykonany szlif, należy go najpierw zaimpregnować. Impregnacja próbki ma na celu utwarcenie materiału w nienaruszonej

strukturze. Impregnacja odbywa się metodą próżniową przy użyciu żywicy epoksydowej wraz z utwardzaczem (np. Epidian 35, Araldite 2020). Sama impregnacja przebiega przy użyciu pompy próżniowej podłączonej do szczelnego naczynia, w którym umieszcza się próbkę razem z formą, w której został pobrany, a następnie odpompowuje powietrze, jednocześnie zasysając żywicę epoksydową, która uzupełnia wolne przestrzenie w impregnowanym materiale. Postęp utwardzania musi być kontrolowany tak, aby tworzenie próżni i wypełnianie żywicą nie następowało zbyt szybko, ponieważ mogą zostać naruszone pierwotne struktury.





**Ryc. 3.** Wycięty z rdzenia, zaimpregnowany preparat, z którego następnie ma być skrojony cienki preparat przyklejony do szkiełka podstawowego i poddany szlifowaniu (ten sam preparat w różnych ujęciach). Fot. A. Kurzawska

Ze względu na ograniczenia sprzętowe (przede wszystkim wielkość szlifierek do przygotowywania cienkich płytek oraz stolików mikroskopowych) niemożliwe jest wykonanie i analiza cienkich płytek z całych pobranych monolitów czy rdzeni. Po wyschnięciu zaimpregnowanego materiału należy zaznaczyć najważniejsze dla późniejszych analiz i interpretacji fragmenty, które muszą być zawarte w tworzonych preparatach mikroskopowych. Preparaty do opisu mikromorfologicznego z osadów luźnych mogą mieć wielkość 25 mm × 38 mm lub być wielokrotnością tego pola, nierzadko osiągając wartości 110 mm × 55 mm. VandenBygaart i Protz (1999) podejmowali próby ustalenia optymalnej wielkości szlif, jednakże jego wielkość zależy tylko i wyłącznie od celu i pytania badawczego.

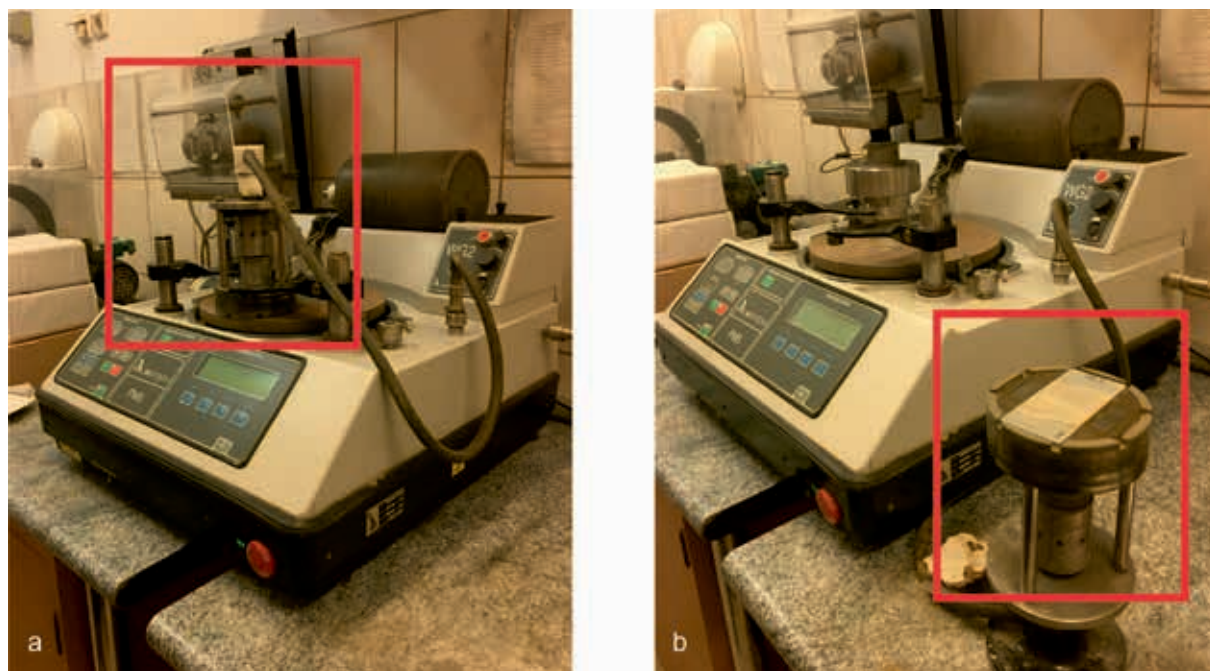
Wytypowane fragmenty rdzeni wycina się z całości (ryc. 3) za pomocą piły mechanicznej z tarczą tnącą o nasypie diamentowym, a następnie szlifuje się do uzyskania płaskiej powierzchni. Ważne jest zaznaczenie orientacji (stropu i spągu) wyciętej próbki, gdyż często z jednego rdzenia wycina się

kilka fragmentów i ważne jest zachowanie ciągłości profilu. Należy zwrócić uwagę na powstanie wolnych przestrzeni w trakcie szlifowania, które należy uzupełnić, impregnując powierzchniowo wszystkie ubytki, najlepiej żywicą epoksydową o współczynniku załamania światła zbliżoną do kwarcu.

Tak przygotowaną powierzchnię należy przykleić do mikroskopowego szkiełka podstawowego przy użyciu tej samej żywicy i następnie wyszlifować do zadanej grubości. Szlifowanie wstępne odbywa się za pomocą luźnych proszków ściernych wykonanych z węgliku krzemu SiC nanoszonych na płaską tarczę żeliwną szlifiarki mechanicznej, np. Logitech PM5 (ryc. 4). Szlifowanie wykańczające przeprowadza się do zadanej grubości szlif mechanicznie lub ręcznie przy użyciu drobniejszych frakcji węgliku krzemu lub zawiesin diamentowych.

Nie ma ściśle określonej standardowej grubości szlifów (płytek) wykonywanych do analizy mikromorfologicznej osadów nieskonsolidowanych, ponieważ zależy ona od celu analizy, cech osadu, które chcemy opisać, a także stosunku ilości minerałów





**Ryc. 4.** Szlifierka Logitech PM5 do szlifowania preparatów mikroskopowych do zadanej grubości (a i b). Grubość wyjściowa materiału przyklejonego do szkiełka podstawowego może wynosić do 2 mm, a wynikowa od 100 do 30  $\mu\text{m}$ . Proces szlifowania trwa od kilkunastu minut do kilku godzin, w zależności od szlifowanego materiału oraz wielkości i grubości szlif. Podczas szlifowania w ruch obrotowy wprawiana jest tarcza żeliwna wraz z dozowanym materiałem ściernym. Jej obrót wymusza rotację głowicy z umieszczonym w niej szlifowanym preparatem; a – czerwona ramka – głowica szlifierki z nałożoną na nią płytką, która ma być szlifowana; b – czerwona ramka – głowica nałożona na szlifierkę. Płytką, która jest szlifowana (na zdjęciu A) położona na głowicy), znajduje się pomiędzy głowicą a dyskiem żeliwnym z naniesionym materiałem ściernym. Fot. K. Leszczyńska

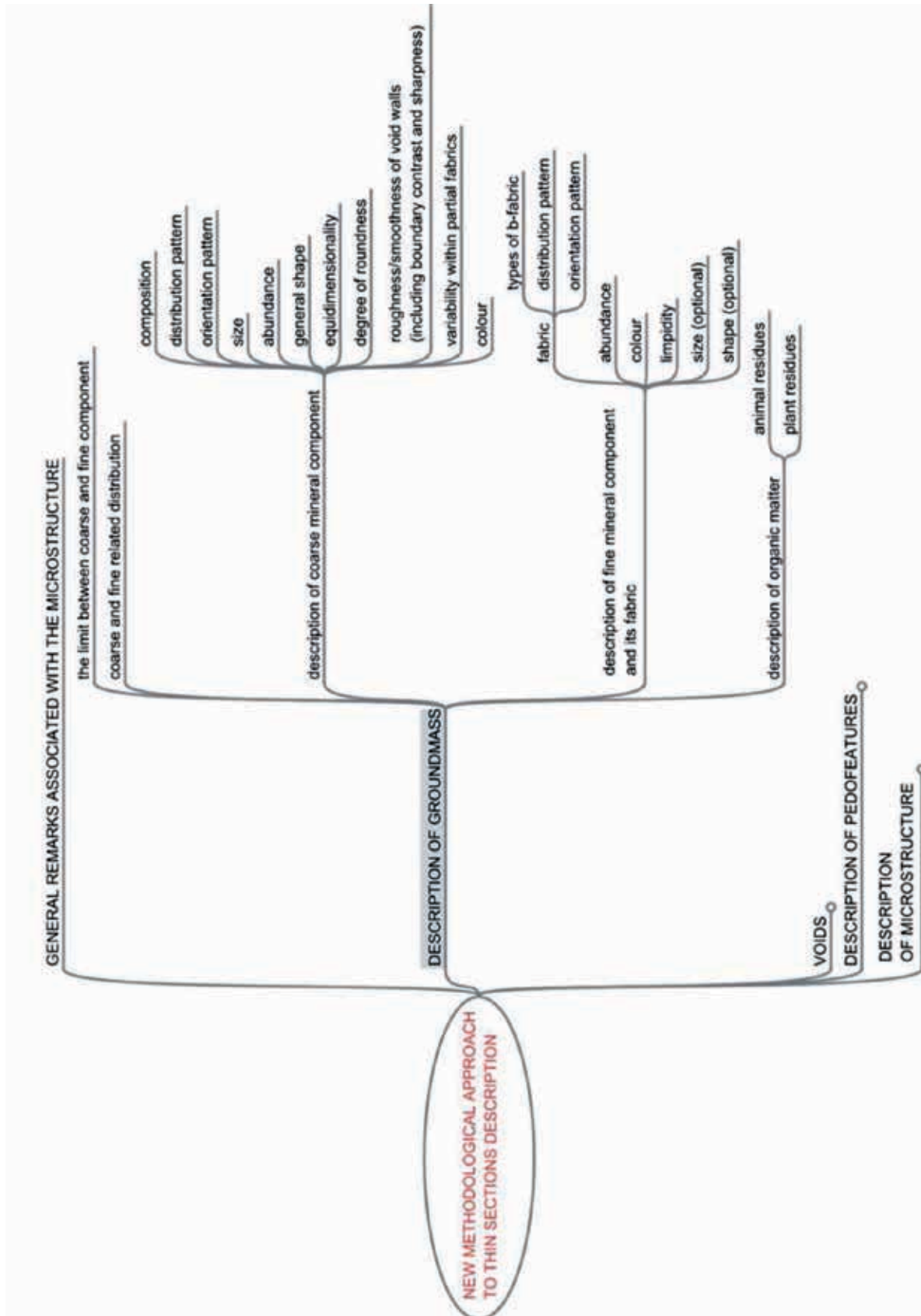
twardych (kwarc, skałen) do części miękkich (np. torf, bituminy). Najczęściej płytki mają grubość od 100 do 30  $\mu\text{m}$ . Podczas szlifowania znacznie szybciej szlifują się miękkie części. Z tego powodu należy dobrać optymalną grubość preparatu, która z jednej strony nie zaburzy obrazu, a z drugiej pozostawi wszystkie elementy obrabianego materiału. Wykończeniem powierzchni po uzyskaniu satysfakcjonującej grubości szlif jest poler, czyli wygładzenie preparatu do lustrzanej powierzchni lub nakrycie preparatu szkiełkiem nakrywkowym. Szkiełko nakrywkowe ma na celu utrwalić powierzchnię, a poler powierzchni umożliwi podjęcie dalszych badań.

#### ANALIZA MIKROSKOPOWA I OPIS PŁYTEK CIENKICH

Po zaimpregnowaniu osadów i przygotowaniu cienkich szlifów kolejnym etapem jest analiza preparatu pod polaryzacyjnym mikroskopem petrograficznym

ze zmiennym oświetleniem. Szczegółowy opis komponentów i ich wzajemnego ułożenia, a także stosunku do przestrzeni wolnych pozwala na odróżnienie pierwotnych i wtórnych elementów osadu i jego struktury. Pomimo wieloletniej tradycji metody mikromorfologicznej nie ma jednolitego, uniwersalnego systemu metodologicznego opisu cienkich szlifów ani ogólnie uznanej terminologii. Według Goldberga i Aldeiasa (2016) jest to związane przede wszystkim z jakościowym i subiektywnym charakterem metody i szerokim wachlarzem tematycznym zastosowania analiz mikromorfologicznych, obejmującym liczne dyscypliny naukowe i niezliczone pytania badawcze. Pytania badawcze, do których rozwikłania dąży analiza mikromorfologiczna, oraz dyscyplina, której wyniki takiego opisu mają posłużyć implikuje terminologię (Hildebrandt-Radke 2007).

Pierwsze próby usystematyzowania *metodyki* opisu cienkich szlifów były podjęte na przełomie lat 60. i 70. (Brewer i Sleeman 1960; 1988; Brewer 1964; 1972; 1976). W roku 1985 Bullock zaproponował



**Ryc. 5.** Przykład diagramu prowadzącego krok-po-kroku przez szczegółowy opis mikromorfologiczny cienkiego szlif (za: Leszczyńska i in. 2011: 275)

w książce *Handbook for soil and thin section description* kompleksowy system opisu cienkich szlifów, którego później wersja, rozszerzona przez Stoops'a (2003) stała się najbardziej powszechnym przewodnikiem do przeprowadzania analiz mikromorfologicznych.

Interdyscyplinarnym opracowaniem metodologii opisu cienkich płytek, adresowanym do osób zapoznających się dopiero z metodą tworzenia analiz mikromorfologicznych, jest *New methodological approach for thin sections descriptions* (Leszczyńska 2011). W artykule tym zaprezentowany jest klucz do opisu cienkich szlifów prowadzący krok po kroku przez kolejne etapy analizy. Podążając za rozgałęziającymi się odnogami grafu (ryc. 5), badacz ma pewność, że nie pominie żadnego etapu opisu próbki, a także, że opis poszczególnych elementów i struktur będzie następował zawsze w tej samej kolejności, co sprawi, że będą one łatwe w porównywaniu. Zaprezentowany schemat opisu cienkich szlifów ma charakter interaktywny, co znaczy, że w zależności od pytań badawczych, na jakie ma odpowiedzieć analiza mikromorfologiczna, można go modyfikować, dodając lub usuwając poszczególne etapy. Klucz do opisu jest dostępny w formie cyfrowej (Leszczyńska i in. 2011).

Klucz do szczegółowego opisu próbek mikromorfologicznych pod mikroskopem zaproponowany przez Leszczyńską i in. (2011) dzieli opis preparatów na 5 głównych kategorii cech, jakie należy scharakteryzować, są to: 1) uwagi ogólne o wyglądzie osadu zaimpregnowanego (ang. *general remarks*); 2) opis komponentów budujących osad (ang. *groundmass*): gruboziarnistych, drobnoziarnistych oraz materii organicznej; 3) opis przestrzeni wolnych; 4) opis agregatów (ang. *pedofeatures*) i 5) opis mikrostruktury. W uwagach ogólnych powinna być zawarta informacja o głównych elementach gruboziarnistych i drobnoziarnistych budujących osad utrwalony w cienkim szlifie i mikrostrukturze, a także powinny być wyznaczone, jeśli istnieją, poszczególne facje. Opisując poszczególne komponenty osadu, należy zdefiniować granicę pomiędzy drobno- i gruboziarnistymi komponentami, a także scharakteryzować ich wzajemną przestrzenną organizację (ang. *coarse and fine related distribution: monic, gefuric, chitonic, porphyritic, enaulic*). Charakteryzując komponenty gruboziarniste, należy określić ich rozkład przestrzenny, rozmiar, licznosc, ogólny kształt, orientację,

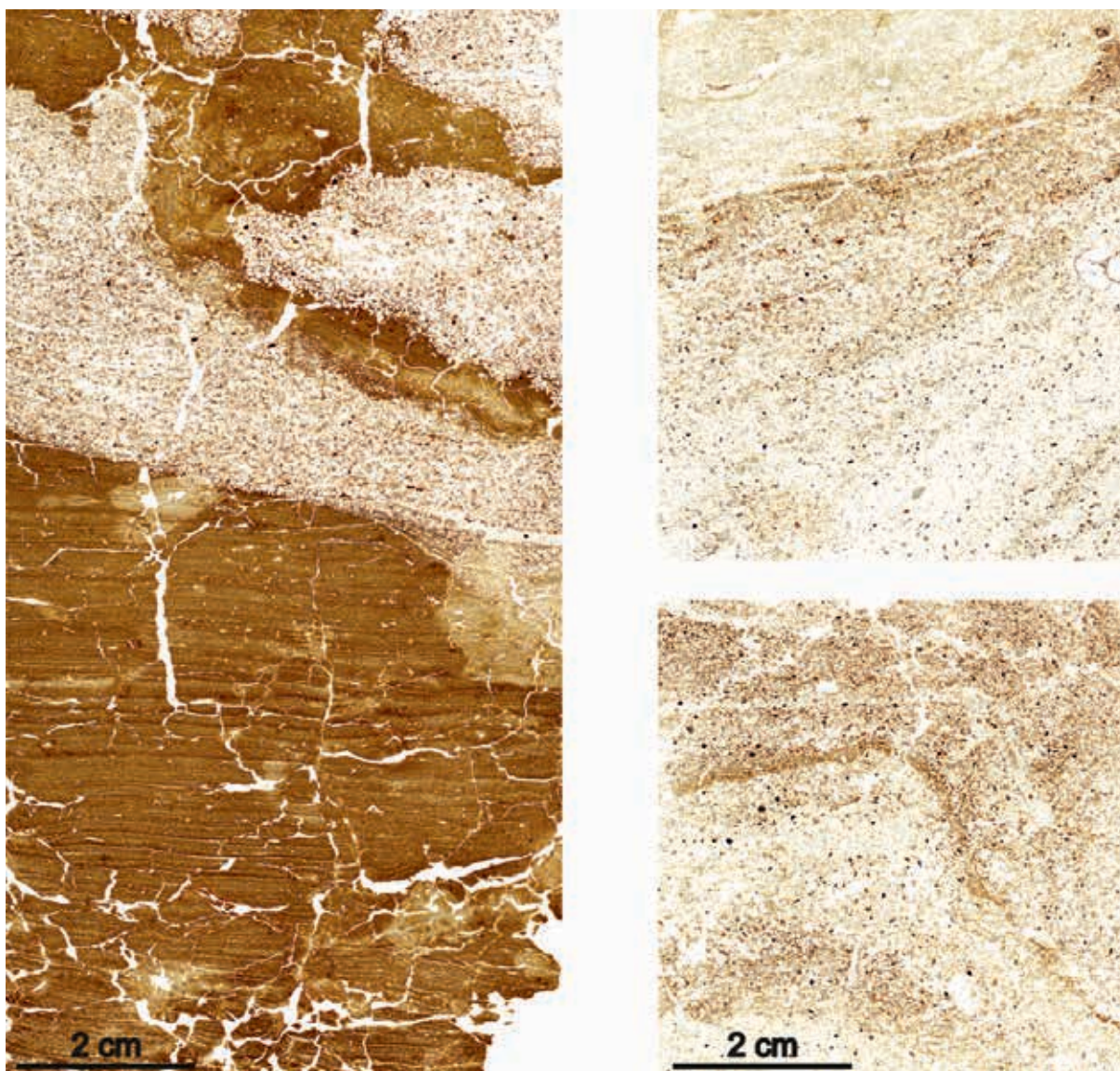
wymiary i charakter powierzchni oraz kolor i stopień zróżnicowania poszczególnych ziaren. Do najważniejszych cechy komponentów drobnoziarnistych należy ich rozkład w przestrzeni i orientacja ziaren (tworzące teksturę), licznosc, kolor, przezroczystosc lub jej brak i inne cechy optyczne oraz kształt (jeśli widoczny). Opisując przestrzenie wolne, należy określić ich typ (np. kanaliki, szczeliny, pory), kształt, rozmiar, procentowy udział w powierzchni cienkiego szlifu, procentowy udział poszczególnych typów przestrzeni wolnych, stopień wygładzenia ścian, rozkład w przestrzeni i orientację. Agregaty powinny być opisane pod kątem ich licznosci, stopnia oddzielenia od siebie nawzajem i dopasowania, wielkości, kształtu, rozkładu w przestrzeni i orientacji, stopnia wygładzenia ścian i zewnętrznej morfologii, a także licznosci i zróżnicowania. Wszystkie cechy, na jakie należy zwrócić uwagę, zawarte są w kluczu zaproponowanym przez Leszczyńską i in. (2011).

Problem nieujednoliconej *terminologii* staje się szczególnie ważki w przypadku posługiwania się językiem innym niż angielski. Terminologia nieangielskojęzyczna operuje terminami, które często są kalkami językowymi. Brzmiały one obco, jak np.: angielski termin *nodules* w języku polskim: nodule, angielski termin *nucleic nodules* w języku polskim: nodule nukleidowe; często też mają charakter opisowy, jak np. angielski termin *clay coatings* tłumaczy się na język polski jako ilaste otoczki wewnątrzkanalikowe. Dobrą praktyką tworzenia opisów mikromorfologicznych w innych językach niż angielski jest zapisywanie angielskich odnośników, najszerzej znanych i łatwych w interpretacji, w nawiasach za terminami w języku macierzystym.

## PREZENTACJA WYNIKÓW ANALIZ MIKROMORFOLOGICZNYCH

Jednym z trudniejszych etapów badań mikromorfologicznych, zarówno w geoarcheologii, jak i innych dziedzinach nauki, jest prezentacja danych, wyników i interpretacji wraz z wnioskami. Wynikiem mikroskopowych analiz mikromorfologicznych, jakościowych w swej naturze, są subiektywne opisy komponentów, struktur i ich wzajemnych powiązań. Dla podniesienia poziomu obiektywności opisów i porównywalności prezentowanych danych





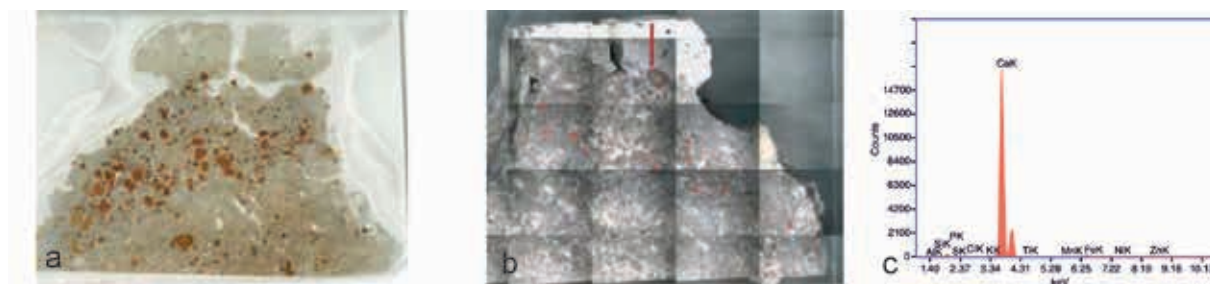
**Ryc. 6.** Skany szlifów cienkich. Przykłady osadów peryglacialnych z Royak Oak Pit, UK. Zmodyfikowane za: Leszczyńska i in. 2011: 279, ryc. 5 i 6; 282, ryc. 8

konieczny jest dostęp do rozbudowanej kolekcji referencyjnej zawierająca próbki wzorcowe (Goldberg i Macphail 2006; Hildebrandt-Radke 2007) oraz doświadczenie osoby wykonującej opis mikromorfologiczny, a także przejrzysta organizacja prezentowanych wyników.

Jak zauważają Goldberg i Aldeias (2016), prezentacja danych w postaci ciągłego tekstu jest najczęściej zbyt długa, zawiła i niezrozumiała, trudno zwrócić uwagę na najważniejsze cechy i informacje oraz wnioski. Taki sposób prezentacji zmniejsza użyteczność danych mikromorfologicznych. Podobnie zgeneralizowane, syntetyczne tabele nie sprzyjają czytelności prezentowanych danych. Dane

szczegółowe powinny być prezentowane w załącznikach do artykułów, natomiast w części głównej publikowanych tekstów powinien znaleźć się jedynie syntetyczny opis najważniejszych cech charakterystycznych pozwalających odróżnić poszczególne facje.

Przedstawiane dane mikromorfologiczne powinny być zilustrowane. Do tego celu dobrze sprawdzają się zarówno tradycyjne fotografie wykonane pod mikroskopem, jak i skany (ryc. 6). Dobrze wykonane zdjęcia preparatów mikromorfologicznych robione są w mniejszym powiększeniu niż komponent lub struktura, którą chcemy przedstawić, tak aby widoczny był kontekst prezentowanego



**Ryc. 7.** Przykład wizualizacji wyników analizy XRF: a – cienki szlif, osady ze stanowiska paleolitycznego, widok pod mikroskopem, światło odbite; b – widok obrazu analizowanego metodą XRF; c – spektrum chemiczne charakteryzujące próbę, widoczne podwyższone zawartości Ca i P. Rycina zmodyfikowana za: Mentzer 2017: 437, ryc. 41.3

materiału. Skany całych płytek cienkich prezentują tło dla ujętych w pomniejszeniu elementów, zapewniają kontekst prezentowanych później w pomniejszeniu elementów (Courty i in. 1989; Goldberg i Aldeias 2016); wykonanie zdjęcia całego szlifu jest trudne. Skany powinny być wykonane w rozdzielczości między 1200 a 2400 dpi.

Materiały ilustrujące wyniki analiz mikromorfologicznych muszą zawierać również zdjęcia odkrywek, z których pobrane były monolity. Ważny jest dobrze naszkicowany profil osadów, względnie schematyczny rysunek stratygrafii, z naniesionymi miejscami poboru monolitów, umiejscowieniem puszek Kubieny, a także – w miarę możliwości – cienkich szlifów pobranych z osadów.

### ZAAWANSOWANE METODY BADAWCZE W MIKROMORFOLOGII

Na przestrzeni lat, wraz z rozwojem nowoczesnych technologii analitycznych, zwiększały się możliwości interpretacyjne mikromorfologii. Obecnie oprócz podstawowej metody opisu cienkich szlifów pod mikroskopem petrograficznym ze zmiennym źródłem światła, omówionej w poprzednim dziale, zaimpregnowane osady można poddawać szeregowi dodatkowych analiz, do których należą, z najważniejszych:

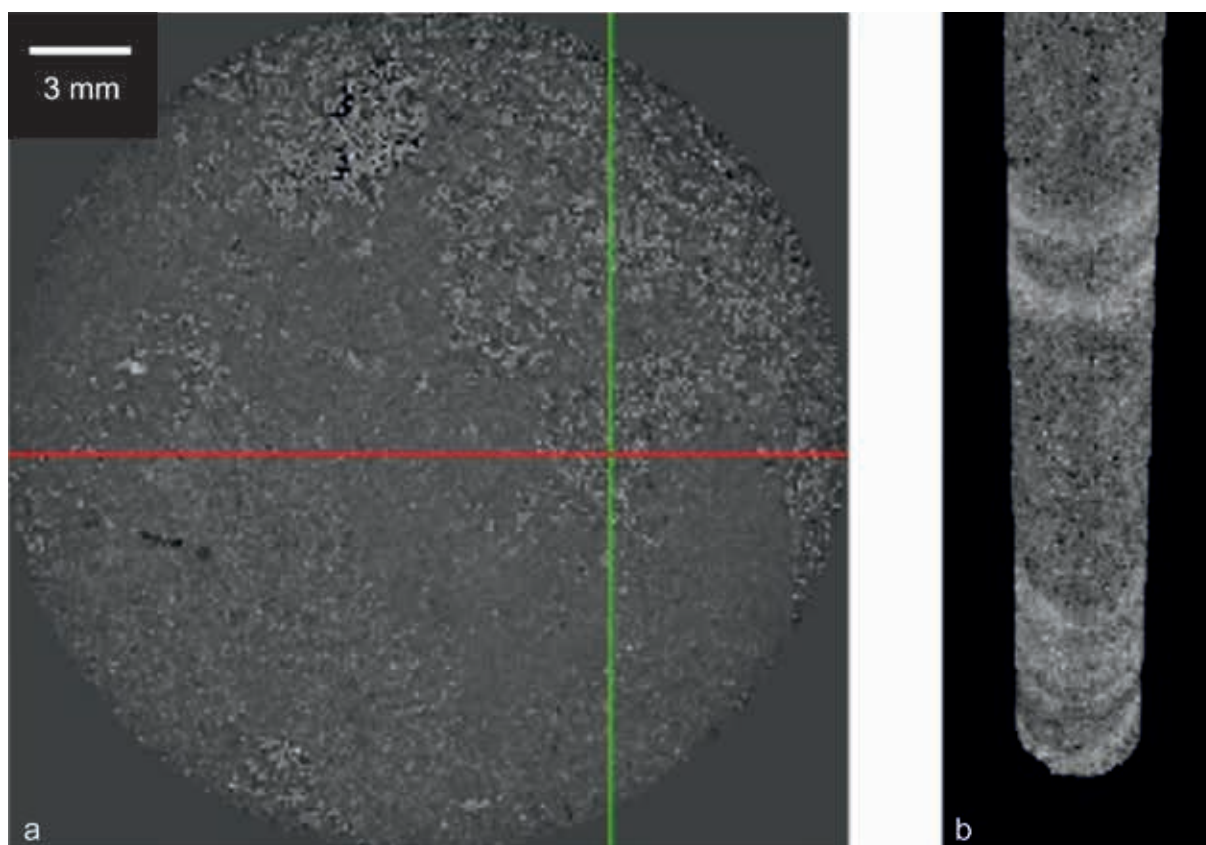
- analizy fluorescencyjne,
- analiza światła odbitego,
- fluorescencyjna spektroskopia rentgenowska,
- analiza rentgenowska w mikroobszarze,
- (izotopowa) spektrometria mas w chromatografii gazowej

Optyczne analizy fluorescencyjne (ang. *fluorescence analysis*) cienkich szlifów wykonuje się

głównie w celu zidentyfikowania materii organicznej i szczątków roślinnych w preparatach. Badania te przeprowadzane są za pomocą mikroskopów fluorescencyjnych, w których obiektywy są jednocześnie kondensatorami. Źródło światła o określonej długości fali, generowane w obiektywie, wysyłane jest w kierunku próbki, a wzbudzona fluorescencja analizowane w kondensatorze. Szczególnym przypadkiem mikroskopii fluorescencyjnej jest mikroskopia katodoluminescencyjna, w której do wzbudzenia fluorescencji wykorzystywana jest wiązka elektronów (Stoops 2017; Barbin 2013). Przykłady zastosowania metody: badania genezy gleb i warunków ich ewolucji w Prowincji Fars w Iranie (Khormali i in. 2006), identyfikacja sposobów kultuwowania i nawożenia gleb w epoce brązu na stanowisku Tofts Ness, Sanday, Orkney (Simpson i in. 1999).

Analiza światła odbitego (ang. *reflected light analysis*) to metoda stosowana podczas analiz mikromorfologicznych impregnowanych osadów organicznych, takich jak torf, węgiel drzewny, węgiel kamienny oraz wszelkich osadów zawierających węgiel organiczny z cienkich szlifów. Pozwala ona na zidentyfikowanie, opisanie i sklasyfikowanie materiału organicznego, jego dojrzałość i stopnia rozkładu (Diessel 1992; Suárez-Ruiz i in. 2012; Sýkorová i in. 2005). Używa się jej również do identyfikacji minerałów metalicznych, takich jak piryt, hematyt, geotyt, mangan i różnego rodzaju tlenki, które w cienkich szlifach są nieprzeźroczyste i niemożliwe do zidentyfikowania (Ligouis 2017). Przykłady zastosowania metody: zidentyfikowanie węglików i popiołów z palenisk pochodzących z różnego rodzaju szczątków roślinnych i zwierzęcych (Kwiecińska i Petersen 2004; Goldberg i in. 2009; Stahlschmidt i in. 2015), szacowanie temperatury





**Ryc. 8.** Przykład wizualizacji wyników analizy micro-CT: a – 2-wymiarowy widok poprzeczny przez rdzeń; b – 3-wymiarowy widok rdzenia. Rycina zmodyfikowana za: Falvard i Paris, 2017: 456, ryc. 2

tworzenia się węglików (Jones i Lim 2000; Bustin i Guo 1999; Jones i in. 1991).

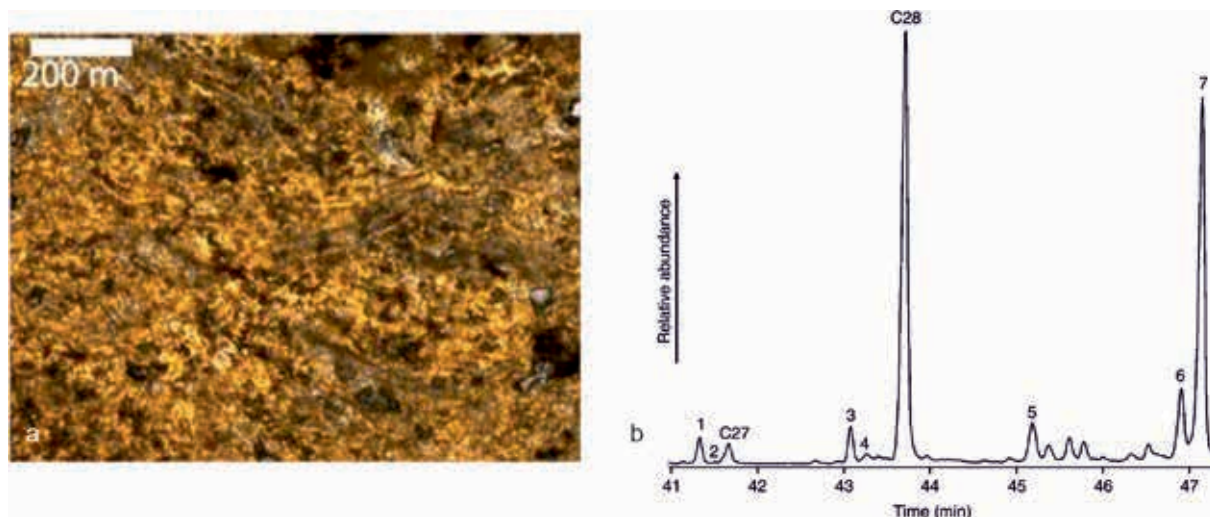
Fluorescencyjna spektroskopia rentgenowska (ang. *X-ray fluorescence spectroscopy*, XRF), przeprowadzana zarówno na płytkach cienkich, jak i impregnowanych monolitach (Mentzer i Quade 2013; Mentzer 2017) informuje o składzie chemicznym elementów budujących osady (o XRF Krueger, w tym tomie). Zaletą tej metody jest możliwość prezentacji wyników w formie graficznej w tej samej skali co dane mikromorfologiczne uzyskane pod mikroskopem optycznym (ryc. 7). Przykłady zastosowania metody: badanie procesów wietrzenia gleby, skał i poszczególnych minerałów (Strawn i in. 2002; Thorne i in. 2009); analiza materiału z podłoża neolitycznych konstrukcji Mentzer Quade (2013); analiza stanu zachowania i wpływu środowiska na stan zachowania kości (Adderley i in. 2007).

Analiza rentgenowska w mikroobszarze (ang. *X-ray micro-computed tomography scanning*, micro-CT scanning) może być stosowana do analizy składu wewnętrznego i struktury szerokiego spektrum

materiałów, zarówno bezpośrednio w terenie, w odkrywkach, jak i z impregnowanych monolitów (Ngan-Tillard i Huisman 2017). Jest to metoda wykorzystująca promienie rentgenowskie do tworzenia modeli 3D struktur wewnątrz obiektów (ryc. 8). Przykłady zastosowania metody: stworzenie trójwymiarowej mapy składników gleby, w tym rozmieszczenia minerałów, materii organicznej i wolnych przestworów (Adderley i in. 2001), analiza budowy wewnętrznej termitier na poziomie mikrostruktur, ze szczególnym uwzględnieniem szczątków organicznych i koprolitów, których identyfikacja nie jest możliwa w płytkach cienkich pod mikroskopem optycznym (Husmein i in. 2014; Villagran i in. 2019), analiza wewnętrznych zniekształceń osadów archeologicznych i ich podatność na zniszczenie (Ngan-Tillard i in. 2014; 2016).

(Izotopowa) spektrometria mas w chromatografii gazowej (ang. *gas-chromatography – (isotope ratio) mass spectrometry*, GC-(IR)MC) to metoda ustalania procentowego składu mieszanin chemicznych. Próbkę poddawane tej analizie muszą





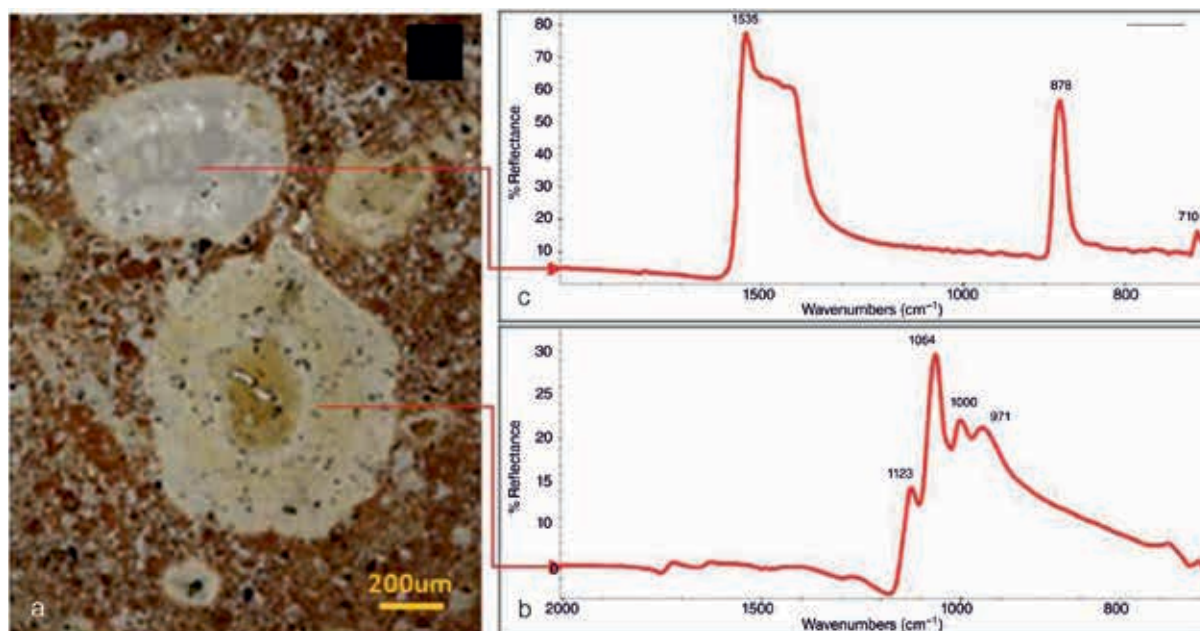
**Ryc. 9.** Przykład wizualizacji wyników analizy GC IRMC: a – widok próby pochodzi ze stanowiska Sheik-e Abda, analizowanej metodą GC IRMC, pokazujący sterole zawarte w odchodach zwierzęcych; b – spektrum GC IRMC dopowiadające próbie. Rycina zmodyfikowana za: Shillito, 2017: 400, ryc. 37.1

być rozdrobnione przed wprowadzeniem do spektrometru, a więc do niedawna analiza ta była najczęściej wykonywana na osadach nieimpregnowanych jako uzupełnienie analiz mikromorfologicznych. Najnowsze badania wykazują, że metodą GC-MC możliwe jest wykonywanie analiz chemicznych i biochemicznych na osadach impregnowanych, a następnie rozdrobnionych (Rodríguez de Vera i in. 2020). Zastosowanie do analizy GC-MC próbek uprzednio impregnowanych i opisanych pod mikroskopem optycznym zapewnia dużą trafność w pobieraniu materiału do analiz chemicznych. Przykłady zastosowania metody: rozróżnienie mikroskopowo identycznych warstw osadniczych z neolitycznego stanowiska Çatalhöyük, interpretowanych na podstawie analiz mikromorfologicznych jako warstwy spalania, a opisanych jako różne warstwy osadnicze na podstawie wyników analizy spektrometrii mas w chromatografii gazowej (Mallol i in. 2013); rozróżnienie mikroskopowo identycznych warstw spalania na podstawie ich składu chemicznego, który wykazał, że materiał, z którego pochodzą spalone szczątki poszczególnych poziomów, miał inny skład organiczny (Shillito i in. 2011; 2013) (ryc. 9).

Elektronowa analiza rentgenowska w mikroobszarze (pod mikroskopem skaningowym) (ang. *scanning electron microscope – electron probe microanalysis*, SEM-EPMA), to kolejna metoda do określania składu chemicznego prób, którą można wykonywać bezpośrednio na cienkich szlifach lub

impregnowanych monolitach. Polega ona na mierzeniu promieniowania rentgenowskiego wzbudzonego wiązką elektronów skupioną na powierzchni próbki. Wielkość pola analizy wynosi 1 μm, a więc wykorzystanie tej metody umożliwia analizowanie wybranych elementów osadu, np. ziaren czy fragmentów materiału archeologicznego, bez konieczności analizowania całych prób wraz ze wszystkimi komponentami (Bisdom 1981; Jongmans i in. 1999). Przykłady zastosowania metody: zidentyfikowanie elementów składowych gleby antropogenicznej związanej z działalnością człowieka w Krainie Jezior, w regionie Rio de Janeiro w Brazylii (Corrêa i in. 2013), odtworzenie kolejnych etapów ewolucji gleby (Macphail i in. 2013; Nicosia i in. 2012; Macphail i in. 2004), analiza pochodzenia i składu warstw archeologicznych wraz z określeniem tempa i charakteru zmian tafonomicznych artefaktów (Wilson 2017; Falsone i in. 2014; Wilson i in. 2013), analiza stanu rozkładu kości w pokładach archeologicznych (Estévez i in. 2014), analiza sposobu oraz tempa migracji i rozkładu różnych związków chemicznych w glebach o różnym reżimie wilgotności i w potencjalny wpływ tych procesów na zjawiska tafonomiczne (Wilson i in. 2008) czy odtworzenie procesów mumifikacji za pomocą osadów ilastych ze znalezisk Chinchorro, w Arica, w północnym Chile w Ameryce Południowej (van Hoesen i Arriaza 2011).

Spektroskopia w podczerwieni z transformacją Fourier'a (ang. *Fourier transform infrared*



**Ryc. 10.** Przykład wizualizacji wyników analizy FTIR: a – mikrograf osadów z jakini Manot (Izrael) z krystalicznymi nodulami i fragmentem speleotemu; b – spektrum FTIR fragmentu speleotemu; c – spektrum FTIR fragmentu noduli. Rycina zmodyfikowana za: Berna 2017: 413, ryc. 39.2

*spectroscopy*, FTIR) – metoda wykorzystywana do identyfikacji grup funkcyjnych związków chemicznych, jak np. amidy, fosforany, węglany, grupy hydroksylowe obecne w związkach organicznych poprzez mierzenie absorpcji fal podczerwonych/promieniowania podczerwonego w różnych spektrach (50 do 5000  $\text{cm}^{-1}$  długości fali) (Berna 2017) (ryc. 10). Metoda ma szerokie zastosowanie w archeologii, można nią datować, badać spalone materiały, procesy diagenety i transformacji materiałów archeologicznych oraz procesy na stanowiskach archeologicznych (Weiner 2010). Jest przydatna do badania gleb, a szczególnie do analizy procesów syndepozycyjnych i postdepozycyjnych; w cienkich szlifach mogą być zidentyfikowane minerały, takie jak: wapń, aluminium, żelazo i fosfory żelaza jak: apatyt, taranakit, mongomeryt, które są dowodem na niektóre procesy geochemiczne. Tą metodą na poziomie molekularnym można zbadać stopień zachowania kości, kości słoniowej, zębów i węgielków (Goldberg i Berna 2010; Weiner 2010), co z kolei pozwala wnioskować o warunkach geochemicznych na stanowisku. Metoda pozwala na określanie temperatury transformacji minerałów ilastych, fosforanów, wapieni (Weiner 2010; Berna i in. 2007; Berna 2010; Weiner i in. 2015). Przykłady

zastosowania: Wonderwerk Cave, South Africa – zidentyfikowano spalone fragmenty kości pomieszczone ze spalonymi szczątkami roślinnymi w materiale *in situ* wraz z wczesnoaszełskimi materiałami archeologicznymi (Berna i in. 2012) – można określić temperaturę palenia, pozwoliło to określić ciągłość użytkowania paleniska. Ograniczenia – nie identyfikuje skaleni, piroksenów i tlenków żelaza i obecności materiału impregnującego.

## PODSUMOWANIE

Pomimo tego, że mikromorfologia jest jedną z podstawowych metod analitycznych stosowanych do osadów, jej rola w badaniach archeologicznych i geoarcheologicznych jest niedoceniona. Jak zauważają Goldberg i Aldeias (2016), jedną z przyczyn zaniedbania technik mikromorfologicznych w badaniach osadów może być jej jakościowy charakter i subiektywność analiz, brak usystematyzowanej metodologii i terminologii opisów mikromorfologicznych, duża rola doświadczenia badacza w osiągnięciu zadowalających wyników oraz trudności w prezentacji i komunikowaniu wyników analiz. Uzupełnienie tradycyjnych analiz

mikromorfologicznych nowoczesnymi technikami ilościowymi i półilościowymi, a co za tym idzie bardziej obiektywnymi, jak np.: FTIR, XRF, XRD, micro-CT, SEM, EPMA, znacznie zwiększa potencjał tej metody we współczesnych badaniach archeologicznych i geoarcheologicznych.

## LITERATURA

- Adderley, W.P., Simpson, I.A., Barrett, R., Wess, T.J. 2007. *Archaeological soils and sediments: application of microfocus synchrotron X-ray scattering, diffraction and fluorescence analyses in thin section*. ACS Symposium Series 968.
- Adderley, W.P., Simpson, I.A., MacLeod, A. 2001. Testing high-resolution X-ray computed tomography for the micromorphological analyses of archaeological soils and sediments. *Archaeological Prospection* 8: 107–112.
- Angelucci, D.E., Boschian, G., Fontanals, M., Pedrotti, A., Verges, J.M. 2009. Shepherds and karst: the use of caves and rock shelters in the Mediterranean region during the Neolithic. *World Archaeology* 41(2): 191–214.
- Barbin, V. 2013. Application of cathodoluminescence microscopy to recent and past biological materials: a decade of progress. *Mineralogical Petrology* 107: 353–362.
- Berna, F. 2010. Bone alteration and diagenesis, (w:) G. Artioli (red.), *Scientific methods and cultural heritage. An introduction to the application of materials science to archaeometry and conservation science*. Oxford, 364–367.
- Berna, F. 2017. FTIR microscopy, (w:) C. Nicosia, G. Stoops (red.), *Archaeological soil and sediment micromorphology*. London, 411–415.
- Berna, F., Behar, A., Shahack-Gross, R., Berg, J., Boaretto, E., Gilboa, A., Sharon, I., Shalev, S., Shilstein, S., Yahlom-Mack, N., Zorn, J.R., Weiner, S. 2007. Sediments exposed to high temperatures: reconstructing pyrotechnological processes in late Bronze and Iron Age strata at Tel Dor (Israel). *Journal of Archaeological Science* 34: 358–373.
- Berna, F., Goldberg, P., Kolska Horwitz, L., Brink, J., Holt, S., Bamford, M., Chazan, M. 2012. Microstratigraphic evidence of in situ fire in the Acheulean strata of Wonderwerk Cave, Northern Cape province, South Africa. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 109: 1215–1220.
- Bisdom, E.B.A. 1981. *Submicroscopy of soils and weathered rock*. Wageningen.
- Bisdom, E.B.A. 1985. Microchemical analysis in thin sections of soils, (w:) P. Bullock, C.P. Murphy (red.), *Soil micromorphology*. Rothamsted, 53–70.
- Bordes, F. 1954. Les limons quaternaires du bassin de la Seine – stratigraphie et archéologie paléolithique. *Institut du Paléontologie Humaine Memoire* 26: 1–26.
- Bowler, J.M., Thorne, A.G. 1976. Human remains from Lake Mungo, (w:) A.G. Thorne (red.), *The origin of the Australians*. Canberra, 127–138.
- Brewer, R. 1964. *Fabric and mineral analysis of soils*. New York.
- Brewer, R. 1972. The basis of interpretation of soil micromorphological data. *Geoderma* 8: 81–94.
- Brewer, R. 1976. *Fabric and mineral analysis of soils*. New York.
- Brewer, R., Sleeman, J.R. 1960. Soil structure and fabric – their definition and description. *Journal of Soil Science* 11: 172–185.
- Brewer, R., Sleeman, J.R. 1988. *Soil structure and fabric*. Australia.
- Budek, A., 2010. Zastosowanie analizy mikromorfologicznej w badaniach gleb i osadów czwartorzędowych. *Landform Analysis* 12: 23–30.
- Bullock, P., Fedoroff, N., Jongerius, A., Stoops, G., Tursina, T., Babel, U., Aguilar, J., Altemüller, H.-J., Fitzpatrick, E.A., Kowalinski, S., Paneque, G., Rutherford, G.K., Yarilowa, E.A. 1985. *Handbook for thin section description*. Albrighton.
- Bullock, P., Murphy, C.P. 1981. *Soil micromorphology*. Volume 1: techniques and applications. Berkhamsted.
- Bustin, R.M. Guo, Y., 1999. Abrupt changes (jumps) in reflectance values and chemical compositions of artificial charcoals and inertinite in coals. *International Journal of Coal Geology* 38: 237–260.
- Butzer, K.W. 1973. Re-evaluation of the geology of the Elandsfontein Hopefield site, south-western Cape, South Africa. *South African Journal of Science* 69: 234–238.
- Butzer, K.W. 1974. Geo-archaeological interpretation of acheulian calc-pan sites at Doornlaagte and Rooidam (Kimberley, South Africa). *Journal of Archaeological Science* 1: 1–25.
- Butzer, K.W. 1977. Geo-archaeology in practice. *Reviews of Anthropology* 4: 125–131.
- Butzer, K.W. 1980. Context in archaeology: an alternative perspective. *Journal of Field Archaeology* 7: 417–422.
- Cornwall, I.W., Hodges, H.W.M. 1964. Thin sections of British Neolithic pottery: Windmill Hill – a test site. *Institute of Archaeology Bulletin, London University* 4: 29–33.
- Corrêa, G.R., Schaefer, C.E., Gilkes, R.J. 2013. Phosphate location and reaction in an archaeoanthrosol on shell-mound in the Lakes region, Rio de Janeiro state, Brazil. *Quaternary International* 315: 16–23.
- Courty, M.A., Fedoroff, N. 1982. Micromorphology of a Holocene dwelling. *PACT* 7: 257–277.
- Courty, M.A., Goldberg, P., Macphail, R., 1989. *Soil and micromorphology in archaeology*. Cambridge.

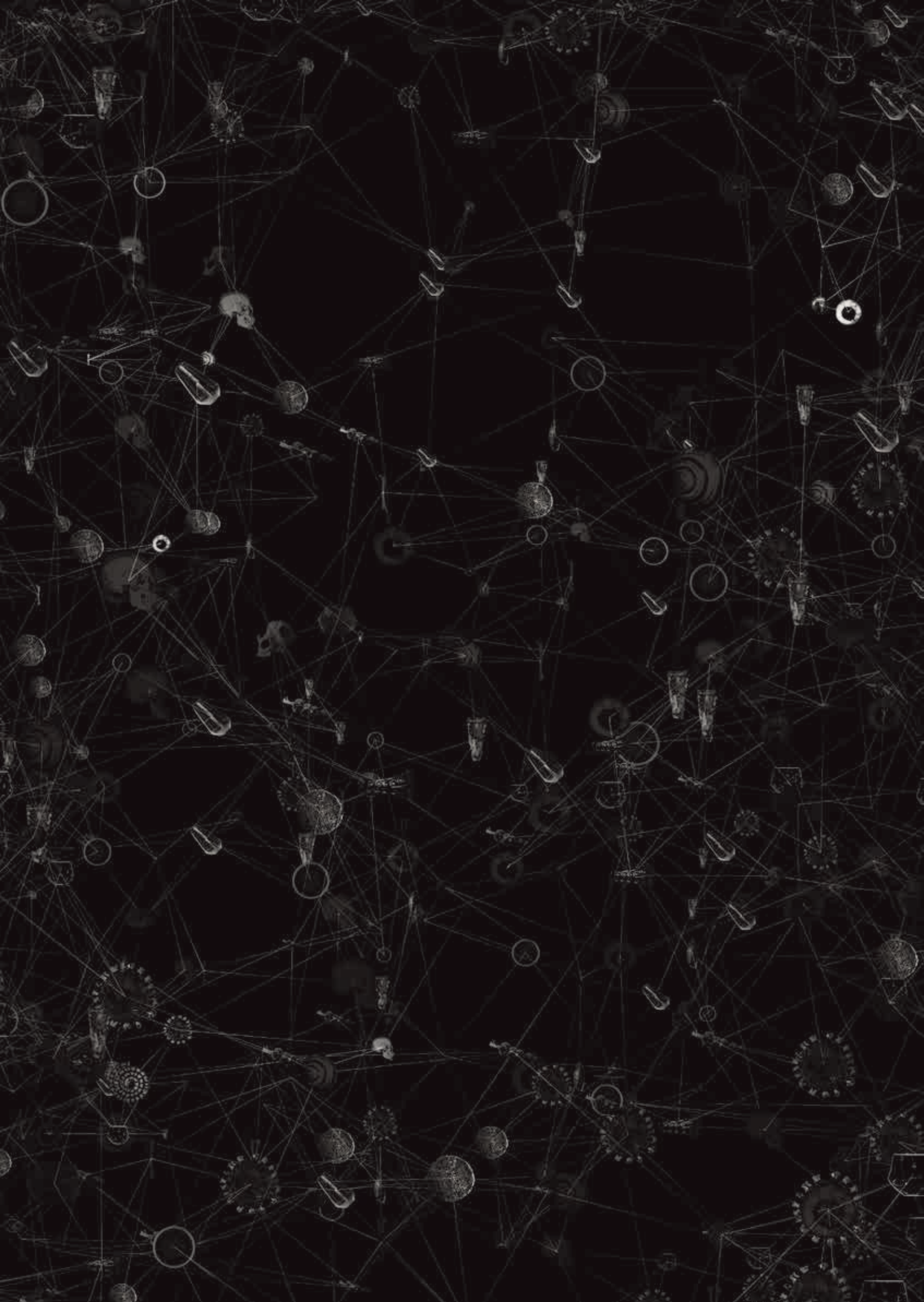


- Dalrymple, J.B. 1958. The application of soil micromorphology to fossil soils and other deposits from archaeological sites. *Journal of Soil Science* 9: 199–209.
- Dalrymple, J.B. 1964. The application of soil micromorphology to the recognition and interpretation of fossil soils in volcanic ash deposits from the Northern Island, New Zealand, (w:) A. Jongerius (red.), *Soil micromorphology*. Amsterdam, 339–349.
- Delgado, M. 1978. *Micromorphologia de Suelos. Soil microscopy: proceedings of the fifth International Working Meeting on soil micromorphology*. Granada.
- Delgado, M., Dorronsoro, C. 1985. Image analysis, (w:) P. Bullock, C.P. Murphy (red.), *Soil micromorphology*. Rothamsted, 71–86.
- Diessel, C.F.K. 1992. *Coal-bearing depositional systems*. Berlin-Heidelberg.
- Douglas, L.A. 1990. Soil micromorphology: a basic and applied science. *Development in Soil Science* 19.
- Drees, L.R., Wilding, L.P. 1987. Micromorphic record and interpretations of carbonate forms in the Rolling Plains of Texas. *Geoderma* 40: 157–175.
- Driese, S.G., Horn, S.P., Ballard, J.P., Boehm, M.S., Li, Z. 2017. Micromorphology of late Pleistocene and Holocene sediments and a new interpretation of the Holocene chronology at Anderson Pond, Tennessee, USA. *Quaternary Research* 87: 82–95.
- Estévez, J., Villagran, X.S., Balbo, A.L., Hardy, K. 2014. Microtaphonomy in archaeological sites: the use of soil micromorphology to better understand bone taphonomy in archaeological context. *Quaternary International* 330: 3–9.
- Eswaran, H., Shoba, A.S. 1985. Scanning electron microscopy in soil research, (w:) P. Bullock, C.P. Murphy (red.), *Soil micromorphology*. Rothamsted, 19–52.
- Falsone, G., Wilson, C.A., Cloy, J.M., Graham, M.C., Bonifacio, E. 2014. Relating microfeatures of soil organic matter to C stabilization: optical microscopy, SEM-EDS, abiotic oxidation. *Biology and Fertility of Soils* 50: 623–632.
- Falvard, S., Paris, R. 2017. X-ray tomography of tsunami deposits: Towards a new depositional model of tsunami deposits. *Sedimentology* 64: 453–477.
- Fedoroff, N. 1986. Un plaidoyer en faveur de la paléopédologie. *Bulletin Association Français Quaternaire* 1986-3/4: 195–204.
- Fedoroff, N., Bresson, L.M., Courty, M.A. 1987. *Micromorphologie des sols – soil micromorphology*. Plaisir.
- Fedoroff, N., Courty, M.A., Thompson, M.L. 1990. Micromorphological evidence of palaeoenvironmental change in Pleistocene and Holocene paleosols, (w:) L.A. Douglas (red.), *Soil micromorphology: a basic and applied science*. Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo.
- Fitzpatrick, J.A. 1984. *Micromorphology of soil*. London.
- Goldberg, P. 1979. Geology of Late Bronze Age mud brick from Tel Lachish. *Tel Aviv* 6: 60–67.
- Goldberg, P. 1980. Micromorphology in archaeology and prehistory. *Paleorient* 6: 159–164.
- Goldberg, P. 1985. Applications of micromorphology in archaeology, (w:) P. Bullock, C.P. Murphy, (red.), *Soil micromorphology*. Rothamsted, 139–150.
- Goldberg, P., Aldeias, V. 2016. Why does (archaeological) micromorphology have such little traction in (geo)archaeology?. *Journal of Archaeological and Anthropological Sciences* 9: 1005–1015.
- Goldberg, P., Berna, F. 2010. Micromorphology and context. *Quaternary International* 214: 56–62.
- Goldberg, P., Macphail, R. 2006. *Practical and theoretical geoarchaeology*. Oxford.
- Goldberg, P., Miller, C.E., Schiegl, S., Ligouis, B., Berna, F., Conard, N.J., Wadley, L. 2009. Bedding, hearths, and site maintenance in the Middle Stone Age of Sibudu Cave, KwaZulu-Natal, South Africa. *Archaeological and Anthropological Sciences* 1: 95–122.
- Guillote, P. 1985. Colour photograms of soil thin sections using the Ilford, Cibachrome-A' print system, (w:) P. Bullock, C.P. Murphy (red.), *Soil micromorphology*. Rothamsted, 87–90.
- Hays, T.R., Hassan, F.A. 1974. Mineralogical analysis of Sudanese Neolithic Ceramics. *Archaeometry* 16: 71–79.
- Hildebrandt-Radke, I. 2007. Geochronologiczne aspekty badań pradziejowych i historycznych zespołów osadniczych, (w:) M. Makohonienko, D. Makowiecki, Z. Kurnatowska (red.), *Środowisko – Człowiek – Cywilizacja*. Poznań, 57–70.
- Husmein, D.J., Ngan-Tillard, D.J.M., Tensen, M.A., Laarman, A., Raemaekers, D.C.M. 2014. A question of scale: studying Neolithic subsistence using micro-CT scanning of midden deposits. *Journal of Archaeological Science* 49: 585–594.
- Jones, T.P., Lim, B. 2000. Extraterrestrial impact and wildfires. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 164: 57–66.
- Jones, T.P., Scott, A.C., Cope, M. 1991. Reflectance measurements and the temperature of formation of modern charcoals and implications for studies of fusain. *Bulletin de la Société Géologique de France* 162: 192–200.
- Jongmans, A., van Oort, F., Denaix, L., Jaunet, A. 1999. Mineral micro- and nano-variability revealed by combined micromorphology and in situ submicroscopy. *Catena* 35: 259–279.
- Kemp, R.A., Derbyshire, E., Meng, X. 2001. A high-resolution micromorphological record of changing landscapes and climates on the western Loess Plateau of China during oxygen isotope stage 5. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 170: 157–169.

- Khormali, F., Abtahi, A., Stoops, G. 2006. Micromorphology of calcite features in highly calcareous soils of Fars Province, Southern Iran. *Geoderma* 132: 31–46.
- Korina, N.A., Faustova, M.A. 1964. Microfabric of modern and old moraines, (w:) A. Jongerius (red.), *Soil micromorphology*. Amsterdam, 333–338.
- Kubiena, W.L. 1938. *Micropedology*. Ames.
- Kubiena, W.L. 1953. *The soils of Europe*. Madrid.
- Kubiena, W.L. 1970. *Micromorphological features of soil geography*. New York.
- Kwiecińska, B., Petersen, H.I. 2004. Graphite, semi-graphite, natural coke and natural char classification. *International Journal of Coal Geology* 37: 99–116.
- Leszczyńska, K. 2011. A Novel Methodological Approach for Thin-Section Description and its Application to periglacially disturbed Pleistocene deposits from Danbury, Essex, UK, Netherlands. *Journal of Geoscience* 90: 271–291.
- Ligouis, B. 2017. Reflected light, (w:) C. Nicosia, G. Stoops, (red.), *Archaeological soil and sediments micromorphology*. London, 461–470.
- Macphail, R. 1983. The micromorphology of spodosols in catenary sequence of lowland heathlands in Surrey, England, (w:) P. Bullock, C.P. Murphy (red.), *Soil micromorphology*. Berkhamsted, 647–653.
- Macphail, R., Bill, J., Cannell, R., Linderholm, J., Rødsrud, C.L. 2013. Integrated microstratigraphic investigations of coast archaeological soils and sediments in Norway: the Gokstad ship burial mound and its environs including the Viking harbour settlement of Heimdaljordet, Vestfold. *Quaternary International* 315: 131–146.
- Macphail, R., Courty, M.A., Goldberg, P. 1990. Soil micromorphology in archaeology. *Endeavour New Series* 14: 163–171.
- Macphail, R.I., Cruise, G., Allen, M.J., Linderholm, J., Reynolds, P. 2004. Archaeological soil and pollen analysis of experimental floor deposits; with special reference to Butser Ancient Farm, Hampshire, UK. *Journal of Archaeological Science* 31: 175–191.
- Mallol, C., Hernández, C.M., Cabanes, D., Sistiaga, A., Machado, J., Rodriguez, A., Pérez, L., Galván, B. 2013. The black layer of Middle Palaeolithic combustion structures. Interpretation and archaeological implications. *Journal of Archaeological Science* 40: 2515–2537.
- Mathieu, C., Stoops, G. 1972. Observations pétrographiques sur la paroi d'un four à chaux carolingien creusé en sol limoneux. *Archéologie Médiévale* 2: 347–354.
- Mentzer, S.M. 2017. Micro XRF, (w:) C. Nicosia, G. Stoops (red.), *Archaeological soil and sediment micromorphology*. London, 431–440.
- Mentzer, S.M., Quade, J. 2013. Compositional and isotopic analytical methods in archaeological micromorphology. *Geoarchaeology* 28: 87–97.
- Miller, C.E., Conard, N.J., Goldberg, P., Berna, F. 2010. Dumping, sweeping and trampling: experimental micromorphological analysis of anthropogenically modified combustions features. *P@lethnology* 2: 25–37. <http://www.palethnologie.org>
- Morozova, T.D. 1964. The micromorphological method in paleopedology and paleogeography, (w:) A. Jongerius (red.), *Soil micromorphology*. Amsterdam, 325–331.
- Mroczek, P. 2001. Mikromorfologia osadów klastycznych i gleb. Przedmiot, zastosowanie i wybrane metody analiz. *Czasopismo Geograficzne* 72: 211–229.
- Mucher, H.J., Morozova, T.D. 1981. The application of soil micromorphology in Quaternary geology and geomorphology, (w:) P. Bullock, C.P. Murphy (red.), *Soil micromorphology. Techniques and applications*. Berkhamsted.
- Ngan-Tillard, D.J.M., Brinkgreve, R., Huisman, D.J., van Meerten, H., Muller, A., van Kappel, K. 2016. Tools for predicting damage to archaeological sites caused by one-dimensional loading. *Conservation and Management of Archaeological Sites* 18: 70–85.
- Ngan-Tillard, D.J.M., Huisman, D.J. 2017. Micro-CT scanning, (w:) C. Nicosia, G. Stoops (red.), *Archaeological soil and sediment micromorphology*. London, 441–449.
- Ngan-Tillard, D.J.M., Verwaal, V., Mulder, A., Husmain, H., Muller, A. 2014. Resistance of buried archaeological site to one-dimensional mechanical loading. *Engineering Geology for Society and Territory* 8: 103–106.
- Nicosia, C., Langohr, R., Mees, F., Arnoldus Huyzendveld, A., Bruttini, J., Cantini, F. 2012. Medieval dark earth in an active alluvial setting from the Uffizi Gallery Complex in Florence, Italy. *Geoarchaeology* 27: 105–122.
- Peacock, D.P.S. 1969. A petrological study of certain Iron Age pottery from western England. *Proceedings of Prehistoric Society* 34: 414–427.
- Peacock, D.P.S. 1970. The scientific analysis of ancient ceramics: a review. *World Archaeology* 1: 375–389.
- Renfrew, C., Bahn, P. 2002. *Archeologia. Teorie, metody, praktyka*. Warszawa.
- Ringrose-Voase, A.J., Humphreys, G.S. 1994. *Soil micromorphology: studies in management and genesis*. Amsterdam.
- Rodríguez de Vera, C., Herrera-Herrera, A., Jambrina-Enriquez, M., Sossa-Ríos, S., González-Urquijo, J., Lazuen, T., Vanlandeghem, M., Alix, C., Monnier, G., Pajović, G., G., T., Mallol, C. 2020. Micro-contextual identification of archaeological lipid biomarkers using resin-impregnated sediment slabs. *Scientific Reports* 10: 20574. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77257-x>
- Rutherford, G.K. 1974. *Soil microscopy*. Ontario.
- Schuldenrein, J., Goldberg, P. 1985. Late Quaternary paleoenvironments and prehistoric site distributions in the Lower Jordan Valley: a preliminary report. *Paleorient* 6: 1–13.

- Shepard, A.O. 1942. Rio Grande glaze pain ware. *Carnegie Institute of Washington Publication* 528: 39.
- Shepard, A.O. 1966. Rio Grande glaze paint pottery: a test of petrographic analysis, (w:) F.T. Matson, (red.), *Ceramics and Man*. London, 62–87.
- Shillito, L.-M. 2017. Gas chromatography – mass spectrometry, (w:) C. Nicosi, G. Stoops (red.), *Archaeological soil and sediment micromorphology*. London, 399–401.
- Shillito, L.-M., Bull, I.D., Matthews, W., Almond, M.J., Williams, J.M., Evershed, R.P. 2011. Bimolecular and micromorphological analysis of suspected faecal deposits at Neolithic Çatalhöyük, Turkey. *Journal of Archaeological Science* 38: 1869–1877.
- Shillito, L.-M., Matthews, W., Bull, I.D., Almond, M.J., Williams, J.M., Evershed, R.P. 2013. Integrated geochemical and microscopic analysis of human coprolites, animal dung and organic remains in burials, (w:) I. Hodder, (red.), *Humans and landscapes of Çatalhöyük: reports from the 2000-2008 excavations*. Çatalhöyük Research Project Series Volume 8. Los Angeles, 75–79.
- Simpson, I.A., Dockrill, S.J., Bull, I.D., Evershed, R.P. 1999. Early anthropogenic soil formation at Tofts Ness, Sanday, Orkney. *Journal of Archaeological Science* 25: 729–746.
- Srivastava, P., Aruche, M.K., Arya, K.A., Pal, K.D., Singh, L.P. 2001. A micromorphological record of contemporary and relict pedogenic processes in soils of the Indo-Gangetic Plains: Implications for mineral weathering, provenance and climatic changes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 170:
- Stahlschmidt, M.C., Miller, C.E., Ligouis, B., Goldberg, P., Berna, F., Urban, B., Conard, N.J. 2015. The depositional environments of Schöningen 13 II-4 and their archaeological implications. *Journal of Human Evolution* 89: 71–91.
- Stoops, G. 2003. *Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections*. Wisconsin.
- Stoops, G. 2017. Fluorescence microscopy, (w:) C. Nicosia, G. Stoops (red.), *Archaeological soil and sediment micromorphology*. London, 393–391.
- Stoops, G., Nicosia, C. 2017. Sampling for soil micromorphology, (w:) C. Nicosia, G. Stoops (red.), *Archaeological soil and sediment micromorphology*. London, 383–391.
- Strawn, D., Doner, H., Zavarin, M., MgHugo, S. 2002. Microscale investigation into the geochemistry of arsenic, selenium, and iron in soil developed in pyritic shale materials. *Geoderma* 108: 237–257.
- Suárez-Ruiz, I., Flores, D., Filho, J.G.M., Hackley, P.C. 2012. Review and update of the applications of organic petrology: part 2, geological and multidisciplinary applications. *International Journal of Coal Geology* 98: 73–94.
- Sýkorová, I., Pickel, W., Christianis, K., Wolf, M., Taylor, G.H., Flores, D. 2005. Classification of huminite – ICCP System 1994. *International Journal of Coal Geology* 62: 85–106.
- Thorne, R., Herrington, R., Roberts, S.J. 2009. Composition and origin of the Çaldağ oxide nickel laterite. *Mineralium Deposita* 44: 581–595.
- van Hoesen, J., Arriaza, B. 2011. Characterizing the micromorphology of sediments associated with Chinchorro mummification in Africa, Chile using SEM and EDS. *Archeometry* 53: 986–995.
- van Vliet, B. 1976. Traces de ségrégation de glace en lentilles associées aux sols et phénomènes periglaciaires fossiles. *Biuletyn Peryglacjalny* 26: 41–55.
- VandenBygaart, A.J., Protz, R. 1999. The representative elementary area (REA) in studies of quantitative soil micromorphology. *Geoderma* 89: 333–346.
- Vandermeersch, N.B. 1969. Les nouveaux squelettes moustériens découverts à Qafzeh (Israel) et leur signification. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences* 268: 2562–2565.
- Villagran, X., Strauss, A., Alves, M., Oliveira, R.E. 2019. Virtual micromorphology: the application of micro-CT scanning for the identification of termine mounds in archaeological sediments. *Journal of Archaeological Science: Reports* 24: 785–795.
- Wattez, J., Courty, M.A., Macphail, R. 1990. Burnt organo-mineral deposits related to animal and human activities in prehistoric caves, (w:) L.A. Douglas, (red.), *Soil micromorphology: a basic and applied science*. Amsterdam, 431–441.
- Weiner, S. 2010. *Microarchaeology: beyond the visible archaeological record*. Cambridge.
- Weiner, S., Brumfeld, V., Marder, O., Barzilai, O. 2015. Heating of debitage from Upper Palaeolithic context at Manot Cave, Israel: changes in atomic organization due to heating using infrared spectroscopy. *Journal of Archaeological Science* 54: 45–53.
- Wilson, C.A. 2017. Electron probe X-ray mincroanalysis (SEM-EPMA) techniques, (w:) C. Nicosia, G. Stoops (red.), *Archaeological Soil and Sediment Micromorphology*. London, 451–459.
- Wilson, C.A., Cloy, J.M., Graham, M.C., Hamlet, L.E. 2013. A microanalytical study of iron, aluminium and organic matter relationship in soils with contrasting hydrological regimes. *Geoderma* 202-203: 71–81.
- Wilson, C.A., Davidson, D.A., Cresser, M.S., 2008. Multielement soil analysis: an assessment of its potential as an aid to archaeological interpretation. *Journal of Archaeological Science* 35: 412–424.









# Petroarcheologia

Piotr Gunia, Ewa Lisowska

---

## PETROARCHEOLOGIA – INFORMACJE OGÓLNE

Badania petroarcheologiczne wpisują się w nauki z pogranicza archeologii i geologii, przy szczególnym uwzględnieniu warsztatu właściwego petrografii. Petroarcheologia skupia się na badaniach surowców skalnych i mineralnych oraz ich pochodnych wytworzonych przez człowieka. Celem analiz petrograficznych zabytków jest, w zależności od zadawanych pytań, przede wszystkim określenie, z jakiego materiału został wykonany analizowany przedmiot. W dalszej kolejności podejmowane są próby określenia, w jakim miejscu pozyskano daną skałę (studia proveniencji), jakie są jej reprezentatywne cechy petrograficzne, a w przypadku materiałów przetworzonych, takich jak np. ceramika, często podejmuje się badania innych parametrów geochemicznych i fizycznych uwarunkowanych specyfiką badanego zabytku. W petroarcheologii jednym z podstawowych urządzeń stosowanych w analizach są mikroskopy. W zależności od potrzeb używa się mikroskopów tradycyjnych optycznych oraz mikroskopów wykorzystujących skaningowy obraz elektronowy.

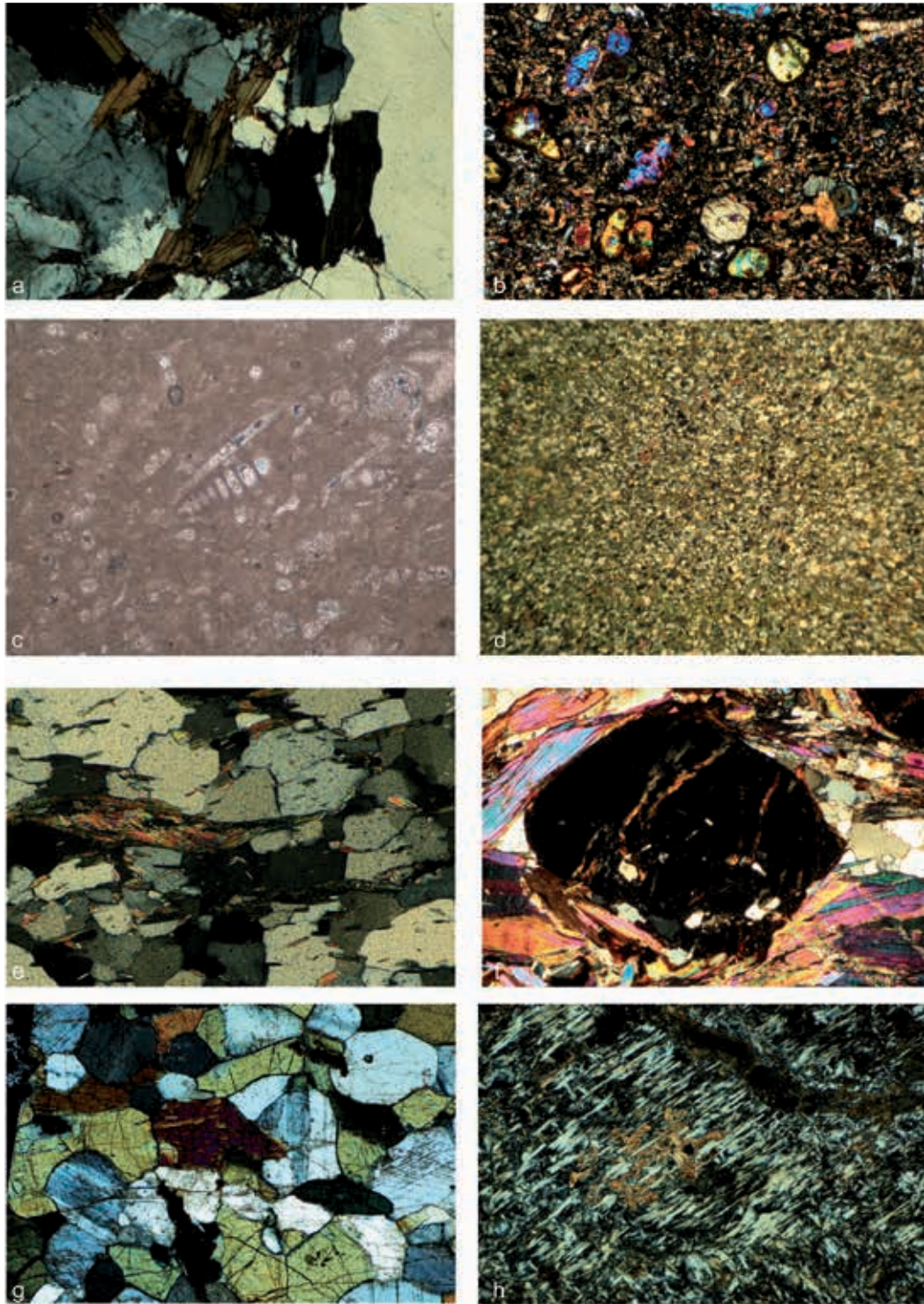
Poza badaniem skał, minerałów i ceramiki (ryc. 1, 2) petroarcheologia w dalszej kolejności pozwala badać także stopy metali i żuźle, szkło, zaprawy, ceramikę budowlaną oraz pigmenty (ryc. 3). Analizom podlegają nie tylko przedmioty

zabytkowe, ale także potencjalne wychodnie surowców, w których pozyskiwano materiał służący do ich produkcji, a więc dawne kamieniołomy (łomy), miejsca wydobywania glin (glinianki), obszary pozyskiwania rud i kruszców (płuczki, szyby) oraz hałdy pohutnicze (warpie). W dalszej kolejności procedura badawcza obejmuje interpretację tych wyników, a więc: wzajemne relacje między kulturami, w których zachodzi zjawisko importu surowców, proces obróbki i przygotowania wyrobów do użytku (wypalanie, przetwarzanie, obróbka mechaniczna), znaczenie badanych zabytków w kulturze i symbolice danych społeczeństw.

Specyfiką badań petroarcheologicznych jest nawiązanie ścisłej relacji pomiędzy pracą archeologa i geologa. Wzajemny dialog i zrozumienie potencjału oraz ograniczeń każdej z tych dziedzin pozwala często rozwiązać z pozoru trudne i wymagające zagadnienia. Do największych wyzwań takiej współpracy należy poznanie przez współpracujących ze sobą badaczy zakresu pojęć z obu „stykających się” ze sobą dziedzin nauki, odpowiednio dla archeologa – geologii, a dla geologa – archeologii. Bez takiej możliwości przeprowadzenie właściwie ukie-  
runkowanych i uzasadnionych naukowo badań petroarcheologicznych staje się niemal niewykonalne.

Kolejnym specyficznym elementem badań petroarcheologicznych jest to, iż często badane





**Ryc. 1.** Zastosowanie mikroskopu polaryzacyjnego do badań petrograficznych zabytków z surowców skalnych z południowo-zachodniej Polski: a – granit dwułuszczykowy z okolicy Chwałkowa k/Sobótki. Mikrofotografia, pow. ok. 40×, nikole skrzyżowane; b – bazanit z neogeńskiej formacji dolnośląskich bazaltoidów. Mikrofotografia, pow. ok. 40×, nikole skrzyżowane; c – wapień organogeniczny z okolic Opola. Mikrofotografia, pow. ok. 40×, nikole skrzyżowane; d – mułowiec. Lokalizacja nieznana. Mikrofotografia, pow. ok. 40×, nikole skrzyżowane; e – łupek kwarcowo-serycytowy. Jegłowa/k Strzelina. Mikrofotografia, pow. ok. 40×, nikole skrzyżowane; f – łupek łuszczykowy z granatami z okolic Kamieńca Żąbkowickiego. Mikrofotografia, pow. ok. 40×, nikole skrzyżowane; g – amfibolit apogabrowy z okolic Piławy Górnej (Blok Przedsudecki). Mikrofotografia, pow. ok. 40×, nikole skrzyżowane; h – serpentynit antygorytowy z Przemysłowa k/Sobótki. Mikrofotografia, pow. ok. 40×, nikole skrzyżowane. Fot. P. Gunia, E. Lisowska

obiekty są w trwały sposób uszkodzane w celu pobrania z nich materiału do analiz mikroskopowych. Zarówno w zakresie kompetencji archeologa i geologa leży właściwa ocena stopnia zniszczenia zabytku w odniesieniu do jego wartości ekspozycyjnej i naukowej. Bezrefleksyjne wybranie przedmiotów do analiz mogą skutkować trwałym i nieodwracalnym zniszczeniem naszego dziedzictwa kulturowego.

Badania petroarcheologiczne są również czasochłonne i kosztowne. Wymagają zatem umiejętności pozyskiwania środków finansowych na ich przeprowadzenie, a więc również wiedzy o kosztach poszczególnych analiz, co ważne – wraz z interpretacją ich wyników! Stąd dla archeologa podejmującego się współpracy w zakresie petroarcheologii istotna jest wiedza o aktualnych cenach oznaczeń wykonywanych w poszczególnych laboratoriach, które mogą się różnić, w zależności od danego kraju, nawet o kilkaset procent. Ważne jest również, żeby analizy te wykonywane były przez akredytowane laboratoria, co daje gwarancję obiektywności uzyskanych wyników.

## HISTORIA BADAŃ

Badania petrograficzne przedmiotów zabytkowych swoją historię sięgają połowy XIX w., chociaż sam termin petroarcheologia zaczęto stosować dopiero w 1970 r. (Štelcl i Malina 1970; 1975). W XIX i na początku XX w. pionierskie badania petrograficzne prowadzono jedynie dla zabytków kamiennych, a zainteresowanie badaczy skupione było głównie na neolitycznych toporach i siekierach (Damour 1863; Fischer 1875; Geschwendt 1941). W tym czasie rzadko badano inne artefakty (Łuniewski 1885). Warto również zaznaczyć, że termin petroarcheologia jest rozpowszechniony niemalże jedynie w Europie Środkowej (Polska, Czechy, Słowacja, Węgry), w innych zaś rejonach świata znacznie częściej używa się określenia archeomineralogia (Rapp 2009).

W Polsce przełomem w badaniach petroarcheologicznych były lata 70. i 80. XX w. Wzorem czeskich kolegów podjęto się szeregu analiz petrograficznych, w tym toporów neolitycznych (Majerowicz i in. 1980; Prinke i Skoczylas 1980; Wojciechowski 1988), osełek (Pazda i Sachanbiński 1991; Michniewicz 1999), zabytków z kamieni

szlachetnych (Kaźmierczyk i Sachanbiński 1978) i innych (Wirską-Parachoniak 1980; Skoczylas 1990). W dalszym ciągu jednak badania petrograficzne stosowano niemal wyłącznie do wyrobów kamiennych, poza nielicznymi wyjątkami badań ceramiki (Wirską-Parachoniak 1980). Sytuacja uległa zmianie w pierwszych dwóch dekadach XXI w., od kiedy to obserwujemy znaczący wzrost liczby publikacji petroarcheologicznych podejmujących tematykę związaną z badaniami surowców, takich jak szkło, zaprawy, ceramika, pigmenty, metale (np. Miazga 2017; Pankiewicz i in. 2017).

Petroarcheologia jest dziedziną, która obecnie powszechnie wspiera badania archeologiczne, a opracowania petrograficzne zabytków leżą w standardach większości publikacji naukowych. Badania takie stosuje się również w architekturze, co zyskało z czasem również miano tzw. petroarchitektury (Skoczylas 1990; Kryza 2011). Petroarcheologia pozwala badaczom sięgnąć do wnętrza zabytków i odpowiedzieć na pytania: jak powstały?, skąd czerpano surowiec do ich produkcji?, jakie były preferencje wyboru określonej odmiany surowca?, jakie parametry technologiczne sprzyjały jego wykorzystaniu?, skąd i jakimi szlakami handlowymi importowano wyroby kamienne lub surowce do ich produkcji? Te zagadnienia i wiele innych o charakterze technicznym, kulturowym czy symbolicznym są najczęściej przedmiotem badań petroarcheologicznych.

## PROCEDURA BADAWCZA – PRZYGOTOWANIE PRÓBEK DO BADAŃ MIKROSKOPOWYCH, RODZAJE SZLIFÓW

### Przygotowanie próbek do szlifów

Istotnym elementem przygotowania opracowania petroarcheologicznego jest zebranie informacji o samym stanowisku w zakresie występujących na nim innych przedmiotów (w tym kluczowe znaczenie mają tzw. importy) i przekazanie tej wiedzy geologowi-petrografowi. Warto również na tym etapie rozpocząć kwerendę w literaturze fachowej, w której zamieszczono podobne opisy danych artefaktów i skał. Konieczne jest też zapoznanie się ze szczegółową mapą geologiczną obszaru stanowiska archeologicznego. Konfrontacja wyników badań geoarcheologicznych stanowi zwykle początkowy etap opracowania petroarcheologicznego, który wykonuje





**Ryc. 2.** Zastosowanie mikroskopu polaryzacyjnego do petrograficznych badań skalnych surowców importowanych i eratycznych: a – średniowieczny przęślik wykonany z importowanego łupka pirofyllitowego z doliny rzeki Owruć na Ukrainie (stan. Wrocław, Ostrów Tumski); b – tło średniowiecznego przęślika wykonanego z importowanego łupka pirofyllitowego (stan. Wrocław, Ostrów Tumski). Mikrofotografia, pow. ok. 40×, nikole skrzyżowane; c – fragment średniowiecznej oselki kamiennej wykonanej z importowanego łupka kwarcowo-skalieniowego z zachodniej Norwegii (stan. Przedmoście); d – tło średniowiecznej oselki wykonanej z importowanego łupka kwarcowo-skalieniowego z Norwegii (stan. Przedmoście). Mikrofotografia, pow. ok. 40×, nikole skrzyżowane; e – neolityczny toporek kamienny (Kultura Ceramiki Sznurowej) wykonany z eratycznego lamprofiru (kersantyt). Szprotawa, znalezisko luźne; f – tło neolitycznego toporka wykonanego z eratycznego lamprofiru (kersantyt). Szprotawa, znalezisko luźne; g – siekieromłot z wczesnej epoki brązu wykonany z eratycznego granitognejsu. Krzywczyce, znalezisko luźne; h – tło siekieromłota z wczesnej epoki brązu wykonanego z eratycznego granitognejsu. Krzywczyce, znalezisko luźne. Mikrofotografia, pow. ok. 40×, nikole skrzyżowane. Fot. P. Gunia, E. Lisowska



się wspólnie z udziałem archeologa i geologa-petrograфа.

Każdy artefakt czy materiał masowy pozyskany podczas badań wykopaliskowych lub przypadkowych odkryć nadaje się do przeprowadzenia petroarcheologicznych badań mikroskopowych. Jego zabezpieczenie i przygotowanie do badań petroarcheologicznych nie różni się od standardowych zabiegów konserwacyjnych, takich jak np. czyszczenie i mycie w czystej wodzie. Znacznie więcej pracy wymaga jednak pobranie w terenie próbek do badań porównawczych, które często służą do lepszego rozpoznania tła geologicznego miejsc pozyskiwania surowców (np. skalnych czy ilastych). Próbki pozyskane w kamieniołomach czy gliniankach stanowią często wzorce wykorzystywane do porównań zabytków z surowcem podczas prowadzenia specjalistycznych badań mineralogiczno-petrograficznych, a czasem są przydatne do oznaczeń składu chemicznego. Pobieranie próbek w terenie odbywa się za pomocą młotka geologicznego, którym odbijamy większe fragmenty skał. Z uwagi na zmienność litologii w danym odsłonięciu konieczne jest pobranie kilku reprezentatywnych próbek, a szczególną uwagę należy zwracać na jednorodność ich struktury i tekstury. Próbki skał z dużą ilością zmian wietrzeniowych oraz zawierające dużą ilość wtórnych żyłek i spękań są raczej bezwartościowe. W przypadku skał drobnoziarnistych, luźnych (np. piaski, pyły czy gliny) pobieramy próby z różnych poziomów intersekcyjnych bezpośrednio do worka strunowego za pomocą szufelki z tworzywa sztucznego.

Każdą próbkę pobraną w terenie należy skatalogować i opisać, uwzględniając dokładną lokalizację miejsca jej pozyskania (np. współrzędne, wysokość w metrach n. p. m. i inne). Można to wykonać tradycyjnie poprzez naniesienie punktów na mapę topograficzną lub geologiczną, z wykorzystaniem podręcznego GPS. Do opisów można dołączyć schematyczny rysunek danego odsłonięcia z miejscami pobrania próbek lub wykonać bardzo dokładne pomiary terenu za pomocą geodezyjnych odbiorników GPS.

We wstępnym stadium petroarcheologicznej współpracy archeologa z geologiem powinno dojść do wymiany informacji na temat kontekstu archeologicznego próbek oraz oczekiwanych efektów badań specjalistycznych. Wówczas należy przygotować próbki przeznaczone do badań mineralogiczno-petrograficznych wraz z metryką i opisem

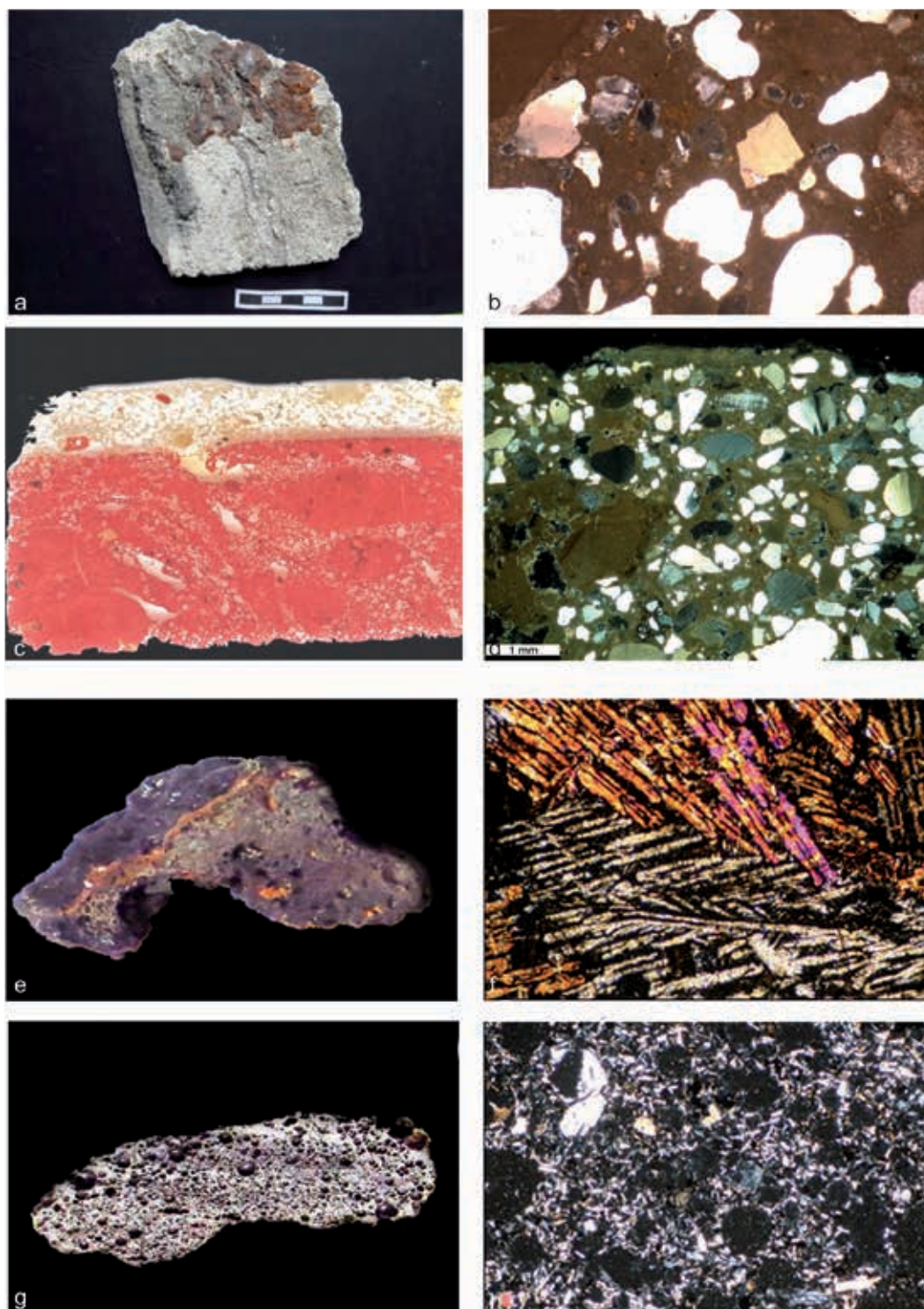
archeologicznego kontekstu ich odkrycia. Próbkę te katalogujemy, nadając każdej z nich indywidualny numer próbki (szlifu, analizy itp.), przypisany do danych metryki polowej zabytku (numer inwentarzowy, stanowisko, numer stanowiska, warstwa, obiekt, chronologia).

Na tym etapie podstawowym zadaniem archeologa jest wykonać możliwie jak najdokładniejszą dokumentację przeznaczonego do szlifu zabytku. W tym celu sporządzamy rysunek, fotografię i jeśli są takie możliwości to skanowanie 3D badanego przedmiotu. Przeprowadzamy również klasyfikację chronologiczno-kulturową materiału, wykorzystując do tego celu istniejące typologie (np.: Callmer 1977; Waldhauser 1981; Resi 1990; Kulczycka-Leciejewiczowa i in. 1996), modyfikując znane w literaturze klasyfikacje (np. Lisowska 2013: 112) lub tworząc własne. Dokumentację tego zabiegu składamy zarówno w instytucji zarządzającej zabytkiem, jak i u geologa (często jest to forma raportu).

## RODZAJE SZLIFÓW MIKROSKOPOWYCH W PETROARCHEOLOGII

Wybór próbek przeznaczonych do badań petroarcheologicznych polega na rozpoznaniu cech makroskopowych skał tworzących badany zbiór oraz dokładnym jego skatalogowaniu. Po oznaczeniach cech makroskopowych skał występujących w danej kolekcji zabytków dokonuje się selekcji próbek reprezentatywnych dla wyznaczonych grup petrograficznych. Przykładowo, jeśli w zbiorze mamy pięć rodzajów skał, dla każdego z nich powinno się wybrać co najmniej jeden zabytek o najmniejszym potencjale ekspozycyjnym, przeznaczając go do wykonania preparatu mikroskopowego, co niestety wiąże się z jego uszkodzeniem wynikającym z konieczności odspojenia niewielkiego fragmentu koniecznego do wykonania płytki cienkiej (szlifu – ryc. 4). Miejsce uszkodzenia artefaktu z reguły wybiera archeolog po konsultacji z geologiem, a linię cięcia piłą diamentową zaznacza się na zabytku markerem lub wskazuje osobiście pracownikowi wykonującemu preparaty mikroskopowe (np. w szlifierni).

Oznaczanie cech petrograficznych wymaga wykonania odpowiednich preparatów mikroskopowych. Przygotowanie preparatu przeznaczonego do tradycyjnej, mikroskopowej analizy petrograficznej,



**Ryc. 3.** Zastosowanie mikroskopu polaryzacyjnego do badań dawnych zapraw budowlanych i żużli hutniczych żelaza. 1. Fragment zaprawy tynkarskiej z dawnego klasztoru Augustianów w Stargardzie. 2. Szkielet ziarnowy zaprawy tynkarskiej z klasztoru Augustianów w Stargardzie. Mikrofotografia. pow. ok. 40×, nikole skrzyżowane. 3. Skan fragmentu cegły z warstwą zaprawy murarskiej z dawnego klasztoru augustianów w Stargardzie. 4. Szkielet ziarnowy zaprawy murarskiej z dawnego klasztoru z klasztoru Augustianów w Stargardzie. Mikrofotografia. pow. ok. 40×, nikole skrzyżowane. 5. Fragment (zgład) średniowiecznego żużla z okolic Gilowa/k. Żąbkowic Śląskich. 6. Szkliste tło żużla z okolic Gilowa zawierające zespoły pręcikowych kryształów fajalitu. Mikrofotografia. pow. ok. 40×, nikole skrzyżowane. 7. Fragment (zgład) średniowiecznego porowatego żużla z okolic wsi Żarek k. Jawora. 8. Porowate tło średniowiecznego żużla z kulistymi skupieniami szklawa (Żarek/k Jawora). Mikrofotografia. pow. ok. 40×, nikole skrzyżowane. Fot. P. Gunia

polega na tym, że z badanego fragmentu skały, za pomocą piły diamentowej, wycina się kostkę o wielkości w przybliżeniu  $2\text{ cm} \times 2\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ , którą za pomocą gorącego balsamu kanadyjskiego przykleja się do szkiełka podstawkowego, o rozmiarach około  $28\text{ mm} \times 48\text{ mm}$  i grubości podścielającego szkła 3 mm. Po przyklejeniu i wysuszeniu, kostkę poddaje się szlifowaniu na stalowej tarczy pokrytej proszkiem szlifierskim, w celu uzyskania z niej płytki o grubości około  $30\text{ }\mu\text{m}$ . Następnie zeszlifowana powierzchnia skały zostaje powleczone warstwą balsamu kanadyjskiego (na gorąco) i przykryta mikroskopowym szkiełkiem nakrywkowym. Po wyschnięciu balsamu uzyskujemy płytkę cieką (ang. *thin section*) przeznaczoną do badań w świetle przechodzącym (Bolewski i Jaskólski 1951). W podobny sposób wykonuje się również preparaty służące do petrograficznych badań mikroskopowych zabytkowej ceramiki czy dawnych żużli hutniczych (Quinn 2013; Piatak i in. 2015).

W zależności od rodzaju planowanych badań mineralogiczno-petrologicznych wykonuje się również inne preparaty. Mogą być to tzw. mikroskopowe preparaty uniwersalne (czyli potocznie zwane szlify odkryte). Zaletą tych preparatów jest możliwość wykonania nie tylko opisu mikroskopowego skały, ale również oznaczeń mikrochemicznych faz mineralnych (np. mikrochemiczna analiza kroplowa), analiz składu chemicznego pojedynczych ziaren lub kryształów (analiza mikrosondowa), analiz minimalnych zawartości pierwiastków i składu izotopowego (ablacja laserowa), badań metodą katodoluminescencji i innych. Pod względem wielkości nieco inne są preparaty służące do badań stratygraficzno-paleontologicznych, które zwykle nie są nakrywane, a wielkość ich szkiełek podstawkowych jest zależna od rozmiarów badanej fauny (Maneck 1979).

Do petrograficznych badań mikroskopowych w świetle odbitym (np. minerałów rudnych i stopów metali) konieczne jest wykonanie trzeciego rodzaju preparatu, czyli zglądów o dokładnie wypolerowanej powierzchni. Ze skał zwięzłych i litych zglądy uzyskuje się poprzez wycięcie kostki materiału z badanego obiektu, którą poleruje się następnie do wysokiego połysku. Ze skał luźnych wykonuje się tzw. preparaty nasypowe, umieszczając wyselekcjonowaną frakcję ziarnową na szkiełku podstawowym, która jest następnie zwilżana balsamem kanadyjskim i przykrywana szkiełkiem nakrywkowym (Maneck 1979). W podobny sposób

przygotowywane są preparaty służące np. do badań palinologicznych (por. Kołaczek i in., w tym tomie).

Inny rodzaj preparatów mikroskopowych stanowią próbki gleb (skał luźnych) o nienaruszonej strukturze, które są zwykle pobierane w odpowiedni sposób ze ścian wykopów archeologicznych. Materiał ten służy zwykle do wykonania preparatów nasypowych, stabilizowanych żywicą epoksydową na podkładce z pleksiglasu. Po zastygnięciu żywicy, w celu zabezpieczenia gruntu przed przemieszczeniem, preparat taki zostaje dodatkowo owinięty przezroczystą folią polietylenową zgrzewaną na gorąco (Holliday 2004).

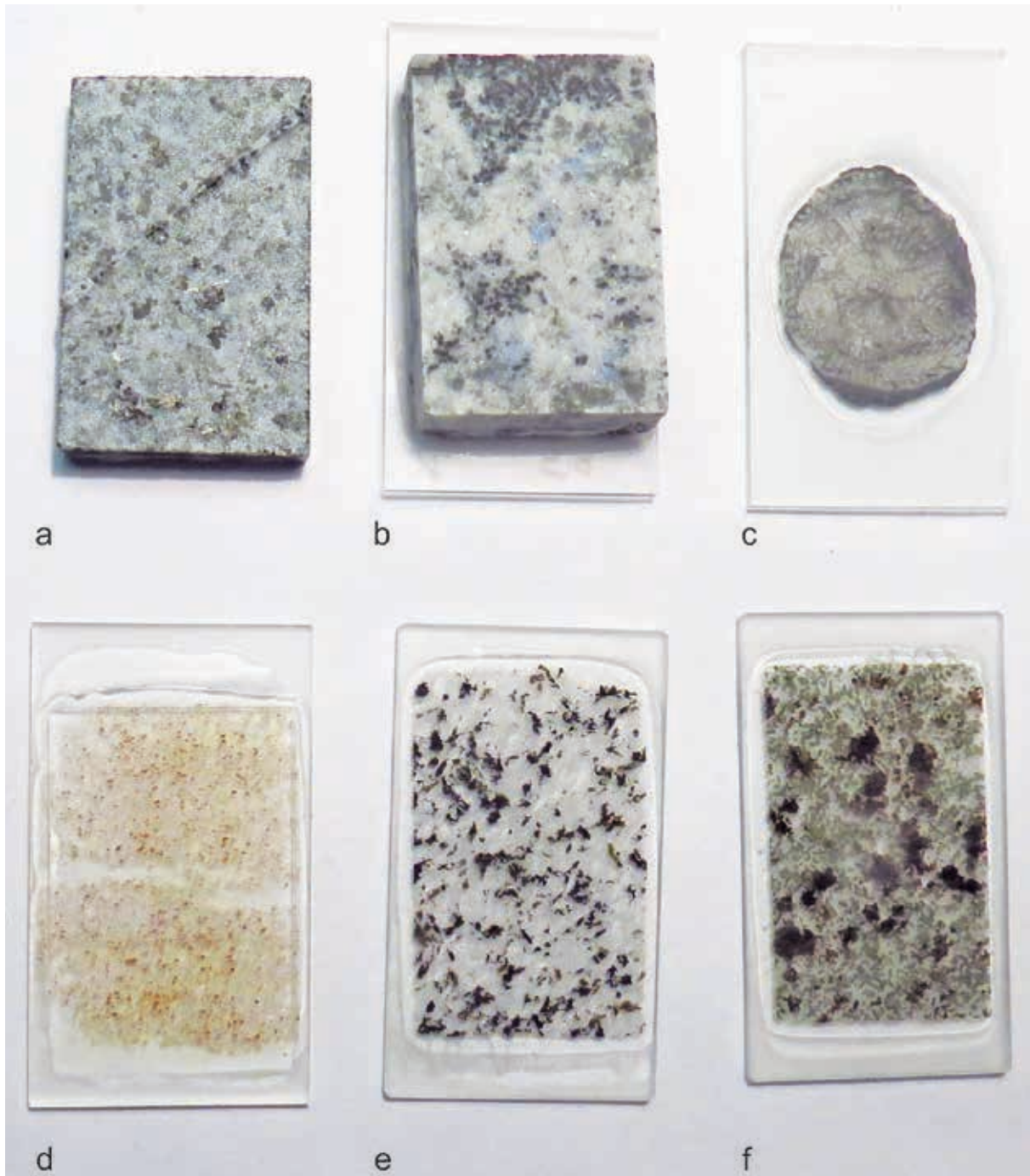
Szlify i próbki do badań petroarcheologicznych zazwyczaj są przechowywane w specjalnie przeznaczonych do tego pudełkach w laboratorium, w którym wykonano analizy. W nielicznych przypadkach badacze decydują się na przechowywanie ich w jednostkach związanych z działalnością archeologiczną. W Polsce nie ma obecnie regulacji prawnych wskazujących, gdzie i kto powinien takie materiały kolekcjonować.

## BADANIE MIKROSKOPOWE

Jednym z podstawowych zadań petroarcheologii jest analiza cech petrograficznych zabytków kamiennych. Ma ona na celu oznaczenie typu genetycznego skały, z której wykonano oznaczany artefakt (np. magmowa, osadowa, metamorficzna) oraz nadanie skale nazwy systematycznej (np. granit, wapień, łupek itp.). W pierwszym etapie badań makroskopowych i przy użyciu lupy dokonuje się oznaczeń cech, takich jak: barwa i jej zmienność, struktura i tekstura, minerały główne, poboczne i akcesoryczne oraz charakter zmian wtórnych.

W kolejnym etapie po sklasyfikowaniu megaskopowym całego zespołu wykonuje się opisy szlifów wykonanych z zabytków. Na wartość naukową petrograficznych opisów mikroskopowych składają się charakterystyki takich parametrów, jak: struktura, tekstura i skład mineralny badanego materiału. Czasem wykonuje się również ilościowe oznaczenia składu mineralnego (analizy planimetryczne) oraz analizy wielkości uziarnienia (analizy granulometryczne) surowców, z których wykonano zabytki (ryc. 7). Uzyskane w ten sposób całościowe





**Ryc. 4.** Preparaty mikroskopowe wykorzystywane w analizach archeometrycznych. Etapy przygotowywania preparatów do badań petroarcheologicznych: a – kostka wycięta ze skały; b – kostka naklejona na szkiełko podstawkowe; c – zeszlifowana płytka o grubości ok. 30  $\mu\text{m}$ ; d – preparat nakrywany gotowy do badań mikroskopowych metodą tradycyjną; e – preparat o grubości płytki ok. 60  $\mu\text{m}$  (nienakrywany, z wypolerowaną powierzchnią) przeznaczony do badań składu chemicznego minerałów na mikroanalizatorze rentgenowskim; f – preparat o grubości płytki ok. 130  $\mu\text{m}$  (nienakrywany, z wypolerowaną powierzchnią) do badań geochronologicznych lub geochemicznych metodą ablacji laserowej. Fot. P. Gunia

dane dają możliwość porównania ich cech petrograficznych z próbkami skał z różnych jednostek geologicznych. Dzięki temu można określić potencjalne miejsce (źródło) pozyskiwania surowca skalnego wykorzystywanego do produkcji zabytkowych wyrobów kamiennych (Prinke i Skoczylas 1985; 1987). W ten sposób rozpoznane wychodnie stają się reperami petroarcheologicznymi.

Przy selekcji zabytków kamiennych do badań petrograficznych pewne utrudnienie stanowią dość powszechnie występujące zmiany wietrzeniowe na powierzchniach artefaktów. Inną przeszkodę mogącą mieć wpływ na wyniki oznaczeń mikroskopowych stanowi oddziaływanie wysokiej temperatury na zewnętrzne części zabytków. Te nietypowe zmiany własności optycznych minerałów skałotwórczych mogą być spowodowane wygrzewaniem narzędzi kamiennych w ognisku lub są efektem oddziaływania pożarów na skały, z których wykonano drobne artefakty. Dokonując standardowej selekcji, należy unikać wyboru tego typu zabytków, poza wyjątkami, kiedy cechy te stanowią przedmiot naszego badania.

### **PRZYKŁADY BADAŃ MIKROSKOPOWYCH W PETROARCHEOLOGII OKIEM ARCHEOLOGA I PETROGRAFA**

Pod względem petroarcheologicznym można zbadać większość substancji zabytkowych, które pozyskujemy w trakcie badań archeologicznych stanowisk datowanych od epoki kamienia po okres nowożytny (Gašper 2018). Poniżej zaprezentowano kilka przykładów zagadek archeologicznych, które zostały wyjaśnione dzięki stosowaniu procedur badawczych powiązanych z użyciem mikroskopów oraz technik uzupełniających w petroarcheologii.

Zagadnienie pojawienia się importów zawsze budziło dyskusje dotyczące zarówno charakteru ich napływu, jak i tego, skąd trafiały na dane stanowisko. We wczesnym średniowieczu wśród surowców kamiennych odkrywanych na obszarze ziem polskich znanych jest kilkanaście tego typu produktów, które dotarły do naszego kraju z różnych miejsc w Europie czy Azji. Zwykle stanowiły one wynik wymiany barterowej narzędzi kamiennych z innymi surowcami (Żak 1967). Do najpopularniejszych

surowców importowanych w średniowieczu należą różowe łupki pirofyllitowe z wychodni zlokalizowanych w rejonie miasta Owruć na Ukrainie, z których wykonywano przęśliki. Wychodnie te znane były polskim badaczom od lat 30. XX w. (Kostrzewski 1939: 133-134), a ich pochodzenie raczej nie budziło dyskusji (Wołoszyn 2007).

Przedmiotem ożywionej polemiki naukowej jest natomiast pochodzenie fyllitów i mułowców, z których wytwarzano osełki odkrywane na stanowiskach wczesnośredniowiecznych. Pomimo pewnych przesłanek natury archeologicznej o skandynawskiej naturze tych przedmiotów (Żak 1967) w badaniach J. Skoczylasa ustalono, że surowiec służący do ich produkcji pozyskiwany był z rejonu Głuchołaz z warstw określanych mianem Andělskiej Hory (Majerowicz i Skoczylas 1983; Skoczylas 1990). Wydaje się, że wówczas (w latach 80. XX w.) nieznane były geologom ustalenia norweskiego zespołu J.G. Mitchella, H. Askvika oraz H.G. Resi (1984) dotyczące różnic z datowaniem wieku geologicznego skał, z których produkowano osełki odkryte na Wolinie, zdecydowanie wykluczające sudecką proveniencję tego materiału. W 2010 r. po konsultacjach w Oslo i Bergen z ww. badaczami kilkunastu szlifów wykonanych z osełek wczesnośredniowiecznych jednoznacznie potwierdzono skandynawskie pochodzenie tego materiału (Lisowska 2013: 216), od wielu lat postulowane przez archeologów (Kara 2006; Łosiński 2008; Szydlowski 2011).

Podczas prowadzenia petrograficznych badań mikroskopowych osadów luźnych petrograf spotyka czasem formy tzw. mikrogeomorfologiczne (Nicosia i Stoops 2017), które nie są efektem procesów geologicznych, lecz produktami działalności człowieka lub zwierząt (np. fitolity, odłamki kości ludzi i zwierząt, węgiel drzewny, zwęglone pędy roślin i inne). Do wiarygodnego oznaczenia charakteru tych form często niezbędna jest konsultacja uzyskanych wyników badań mikroskopowych z archeobotanikami, archeozoologami, gleboznawcami czy archeologami zajmującymi się problematyką odpadów gromadzonych w przeszłości na danym obszarze. Ciekawym przykładem takich badań są badania mikroskopowe przęślików z margli i wapieni, pochodzących z wczesnośredniowiecznego Ostrówka w Opolu. W niektórych z nich odkryto fragmenty otwornic, ramienionogów i skorupki mięczaków, które są charakterystyczne dla triasowych pokładów wapieni tzw. formacji gogolińskiej, której wychodnie znajdują się



**Ryc. 5.** Zastosowanie mikroskopu gemmologicznego w badaniach archeometrycznych; a – ślady obustronnie wierconego otworu w średniowiecznym paciorku z kryształu górskiego (Wolin, stan. 1). Mikrofotografia, pow. ok. 12×, światło przechodzące; b – powierzchnia średniowiecznego paciorka wykonanego ze szkła (Wrocław, Ostrów Tumski). Mikrofotografia, pow. ok. 40×, światło skośne; c – ślady pierścieni Liesenganga i struktura oczkowa chalcedonu w tle średniowiecznego paciorka z karneolu (Wolin, stan. 1). Mikrofotografia, pow. ok. 40×, światło skośne; d – ślady szlifowania ścianek średniowiecznego fasetowanego paciorka z karneolu (Wolin, stan. 1). Mikrofotografia, pow. ok. 20×, światło zwykłe; e – słupkowy kryształ wanadynitu (czerwony) w spinelu syntetycznym (fioletowy) (kolekcja Muzeum Mineralogicznego Uniwersytetu Wrocławskiego). Mikrofotografia, pow. ok. 40×, światło przechodzące; f – pozostałości inskrypcji na wewnętrznej części fragmentu średniowiecznego pierścienia wykonanego z bursztynu (Wrocław, Ostrów Tumski). Mikrofotografia, pow. ok. 20×, światło skośne. Fot. P. Gunia



również na obszarze Opola (Lisowska i Gunia 2009). Mikroorganizmy te są swoistą ciekawostką z racji odkrycia ich wewnątrz zabytku archeologicznego.

Interesujące pod względem rozwoju możliwości i metodologii badań jest petrografia ceramiki oraz innych materiałów przetworzonych przez człowieka. Pod względem petrograficznych bada się nie tylko naczynia, ale także kafle piecowe, dachówki, cegły, zaprawy czy rury ceramiczne (August i in. 2011; por. Gunia i in., w tym tomie).

Ilościowe wyniki oznaczeń zawartości głównych składników mineralnych szkieletu ziarnowego służą przeważnie do odtworzenia pierwotnego składu zapraw murarskich (lub tynkarskich; Arioglu i Acun 2006). Obecnie badania te prowadzone są razem z oceną stopnia deterioracji spajanych zapraw elementów architektonicznych. Uzyskane wyniki pozwalają na określenie stopnia oddziaływania czynników atmosferycznych na obiekty zabytkowe. Informacje te są bardzo przydatne do określenia sposobu późniejszej renowacji i zabezpieczenia zabytkowych kamiennych elementów okładzinowych budynków o historycznym znaczeniu (Jochemczyk i Skoczyła 1991). Za przykład mogą służyć badania petrograficzne kamieni budowlanych z Lublina (Huber i Mroczek 2012), dzięki którym stwierdzono wyraźną zmienność w czasie (od średniowiecza do czasów nowożytnych), rodzajów i proveniencji surowców kamiennych wykorzystywanych w budownictwie świeckim i sakralnym. Początkowo we wczesnym średniowieczu kamień budowlany sprowadzano z wychodni znajdujących się w najbliższej okolicy miasta, stopniowo poszerzając bazę źródłową o surowce sprowadzane z Gór Świętokrzyskich i Przedgórze Sudeckiego w okresie późnośredniowiecznym i nowożytnym (Huber i Mroczek 2012: 444-448).

Mikroskopia optyczna minerałów rudnych w świetle odbitym wykorzystuje preparaty w postaci jednostronnie polerowanych zgładów o powierzchni około 2-4 cm<sup>2</sup> i grubości 1-2 cm. Czasem do badań używa się wypolerowanych płytek cienkich (ryc. 6) przygotowanych do badań mikrosondowych o wielkości obszaru badawczego w przybliżeniu 2 cm × 2 cm i o grubości 50-60 µm (Maneck 1979).

Badania mikroskopowe stopów metali (metalurgiczne) przeprowadzane są na mikroskopach metalograficznych. Analizowane są wtedy stopy metali uzyskiwane drogą wytopu z różnych rud. Na podstawie badań tą metodą można również odtworzyć procesy późniejszych procesów technologicznych

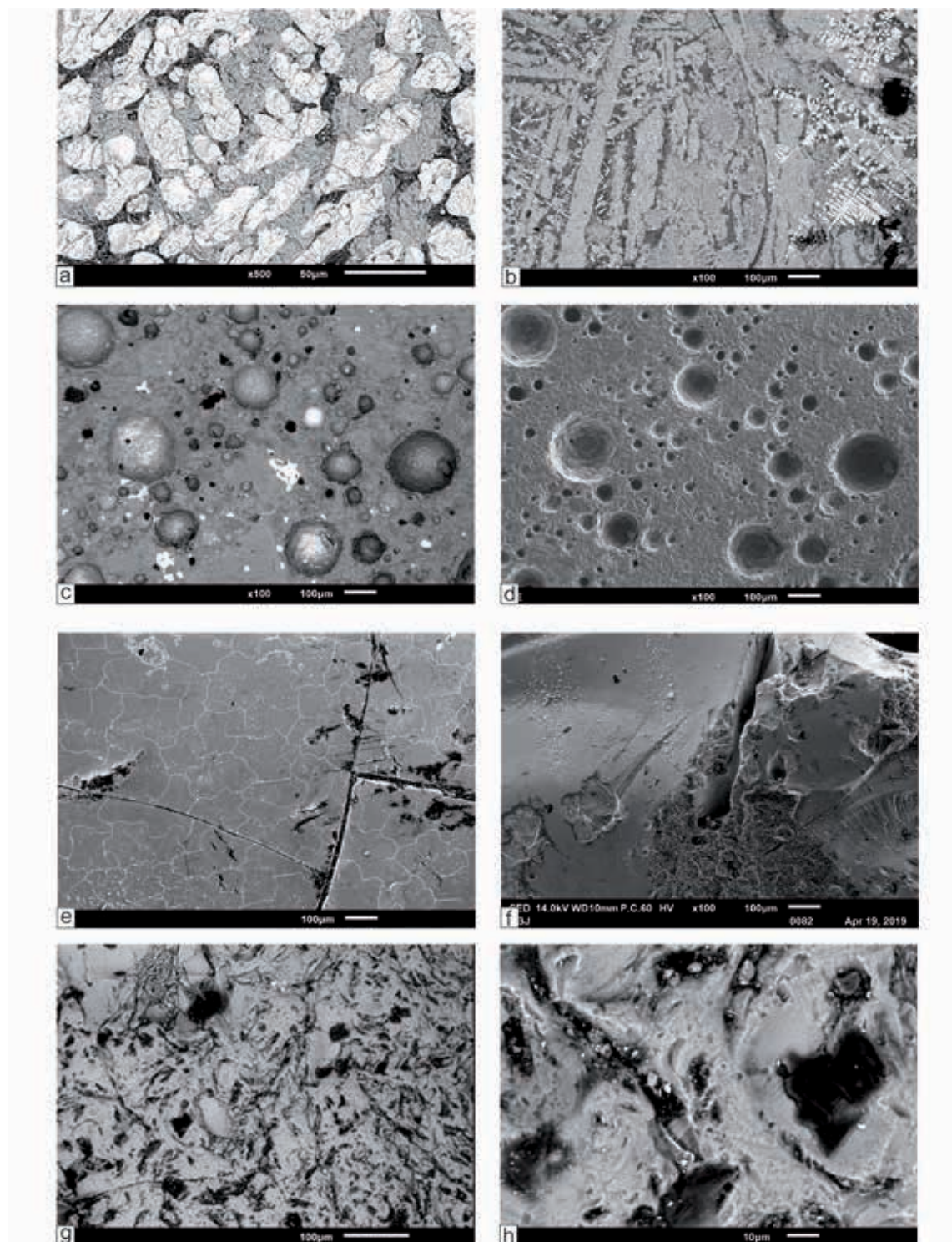
mających na celu poprawę własności mechanicznych produktów hutniczych (np. kucie, hartowanie, odpuszczanie itp.; Pleiner 1987). Czasem można uzyskać również: informacje o niektórych cechach morfologicznych odpadów po przeróbce rud metali i żużli oraz dane o obecnej strukturze różnych metali i ich stopów (Buchwald i Wivel 1998; Piatak i in. 2015) (por. Biborski i Biborski, w tym tomie).

Obserwacje pod mikroskopem można prowadzić na zgładach nietrawionych i wtedy określa się: wielkość, ilość i rozmieszczenie wszelkiego rodzaju wtrąceń niemetalicznych oraz wykrywa drobne pęcherze gazowe, mikropęknięcia i inne (Piaskowski 1987a).

Obserwacje mikroskopowe zgładów trawionych różnymi odczynnikami pozwalają oznaczyć: strukturę badanego materiału, rodzaj i ilość poszczególnych faz, kształt i wielkość ziaren, grubość warstwy zahartowanej, odwęglonej lub ochronnej itd. (Piaskowski 1987b).

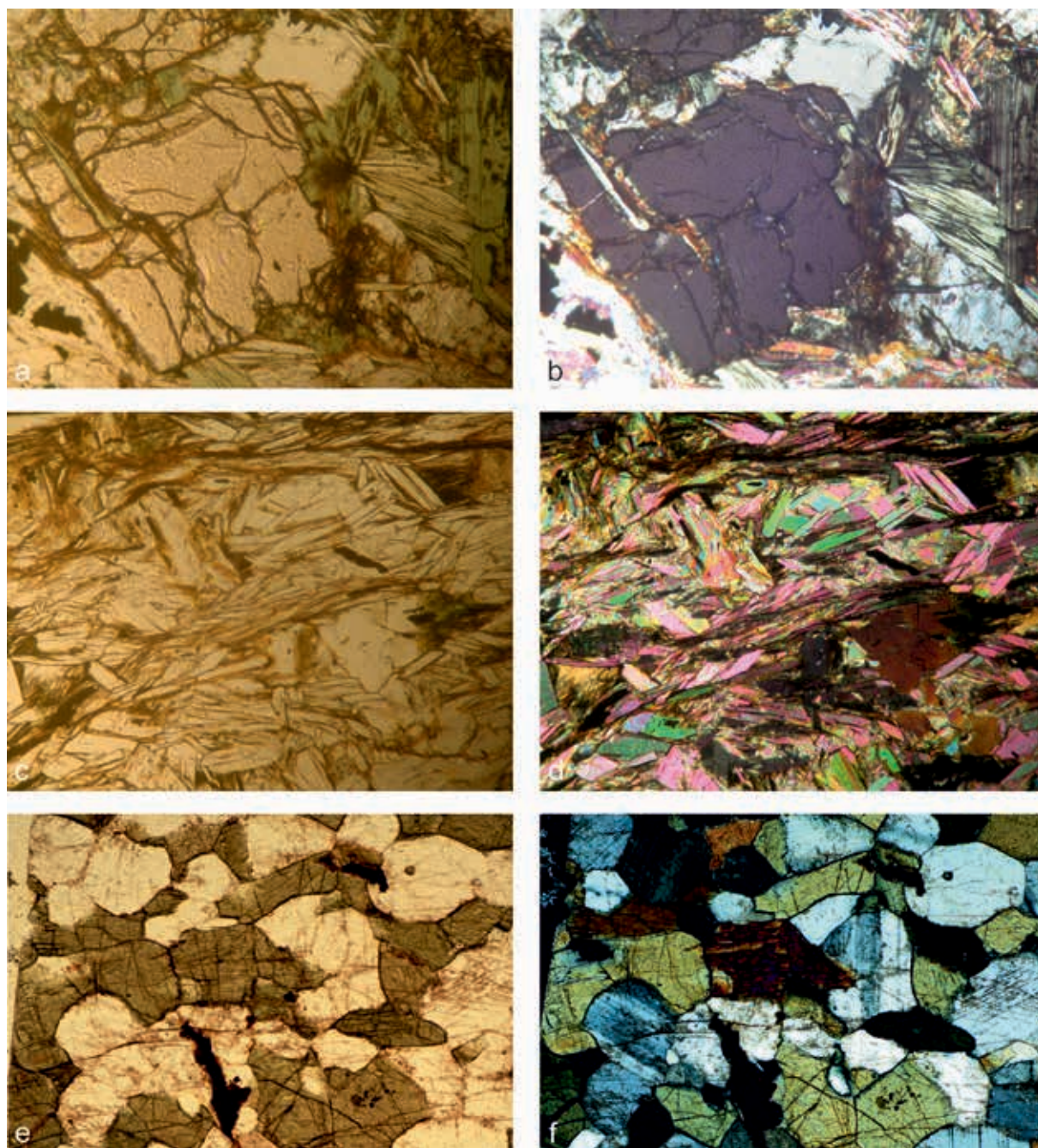
Do badań struktury metali w świetle odbitym często stosuje się metodę kontrastu fazowego lub ciemnego pola, wprowadzając w bieg promieni świetlnych odpowiednią płytkę kontrastową. Czasem stosowania jest również mikroskopia fluorescencyjna z oświetleniem tła lampami emitującymi fale o długości 405-435 nm (światło niebieskie) lub 365 nm (światło UV) (Banaś 1979). Badania te mogą być podstawą do wytypowania próbek minerałów do dalszych badań, np. z zastosowaniem skaningowego mikroskopu elektronowego.

Często prowadzone badania dotyczą rodzaju pigmentów mineralnych wykorzystywanych w dawnym malarstwie czy zdobieniu ceramiki (Łaciak i in. 2019), chociaż również przedmiotem zainteresowania są zabytkowe kamienie jubilerskie (ryc. 5), a w tym żywice kopalne (Łydźba-Kopczyńska i in. 2018) czy odmiany kolorowe kwarcu i chalcedonu (Filipowiak i Szydłowski 2019). Interesującym przykładem takich badań były analizy zabytków bursztynowych kultury łużyckiej przeprowadzone przez zespół wrocławskich badaczy dla stanowiska w Domasławiu (Łydźba i in. 2012). Otóż dzięki badaniom ramanowskim okazało się, że surowiec bursztynowy obecny na tym stanowisku nie jest popularnym, występującym nad Bałtykiem sułecynitem, a walchowitem, którego źródło należałoby szukać na Morawach. Skłoniło to kolejnych badaczy do analogicznych prób podjęcia badań nad alternatywnymi źródłami pozyskiwania bursztynu w pradziejach i średniowieczu (Lisowska i in. 2018).



**Ryc. 6.** Zastosowanie elektronowego mikroskopu w badaniach archeologicznych żużli, ceramiki szkliwionej oraz szkła; a – owalne nagromadzenia fazy metalicznej (Fe) w szklistym tle średniowiecznego żużla hutniczego z okolic Gilowa. Obraz BSE, pow. ok. 500×; b – listewkowe przerosty szkliwa współwystępujące ze szkieletowymi skupieniami fazy metalicznej (Fe) w tle średniowiecznego żużla z okolic Gilowa. Obraz BSE, pow. ok. 100×; c – kropłowe skupienia szkliwa w tle średniowiecznego żużla z okolic Żarka. Obraz BSE, pow. ok. 100×; d – kropłowe skupienia szkliwa w tle średniowiecznego żużla z okolic Żarka. Obraz SE, pow. ok. 100×; e – powierzchnia szkliwionego kafla piecowego z XVII w. (Stargard). Obraz BSE, pow. ok. 100×; f – powierzchnia późnośredniowiecznej ceramiki szkliwionej ze Smolnicy (zachodnio-pomorskie). Obraz BSE, pow. ok. 100×; g – powierzchnia wczesnośredniowiecznego paciorka szklanego z Jeleniej Góry. Obraz BSE, pow. ok. 100×; h – powierzchnia wczesnośredniowiecznego paciorka szklanego z Jeleniej Góry. Obraz BSE, pow. ok. 1000×. Fot. P. Gunia, W. Bartz





**Ryc. 7.** Porównanie obserwacji mikroskopowych w świetle przechodzącym (a, c, e) i odbitym (b, d, f); a-d – łupek łyszczykowy, kamień żarnowy (Kamieniec Żąbkowicki, pow. żąbkowicki); e-f – ortoamfibolit plagioklazowy, ośelka (Zawada, stan. 1, pow. zielonogórski). Fot. P. Gunia

## PODSUMOWANIE

Petroarcheologia jako nauka wspierająca archeologię (rzadziej petrografię) przy zaangażowaniu reprezentantów nauk humanistycznych i przyrodniczych stwarza szeroki wachlarz możliwości badawczych dla materiałów zabytkowych. Potencjał tej dziedziny może być wykorzystany przede wszystkim

w ustaleniu proveniencji wyrobów ze skał i minerałów. Pozwala to następnie budować koncepcje o przebiegu dawnych tras handlowych, a także charakterze kontaktów pomiędzy danymi społeczeństwami. Wskazanie potencjalnych źródeł pozyskiwania surowców jest również kluczem do poznania technologii i zaplecza logistycznego dawnego kamieniarstwa i górnictwa. Petroarcheologia pozwala



na badania materiałów przetworzonych, gdzie podstawowym pytaniem stawianym przez archeologów jest: z czego to zostało wykonane? Nauka ta pozwala również na określenie materiału, z którego wykonano zabytki dość silnie wtórnie zniszczone (np. przepalone).

W petroarcheologii głównym narzędziem badawczym jest mikroskop, jednak warto wspomnieć, że ustalenia poczynione dzięki badaniom optycznym najczęściej uzupełniane są za pomocą innych specjalistycznych metod badań mineralogicznych (np. XRD, DTA, SEM) oraz instrumentalnych metod analiz składu chemicznego (np. XRF, INAA, LA-ICP-MS) (por. Sobkowiak-Tabaka, w tym tomie; Krueger, w tym tomie).

Stosowanie mikroskopii w petroarcheologii uwarunkowane jest przede wszystkim postępowaniem badawczym wypracowanym przez petrologię, w której jest to podstawowe narzędzie pracy służące identyfikacji skał. Doświadczenie wypracowane w ciągu niemal 200 lat w naukach geologicznych stawia badanie mikroskopowe na pierwszym miejscu w procesie badawczym materiałów kamienia. Charakterystyczne ułożenie i skład minerałów w próbkach, dzięki tysiącom innych analiz geologicznych prowadzonych na całym świecie, pozwala na dość dokładne wskazanie źródeł skał, chociaż nie zawsze jest to zadanie proste, ze względu na podobieństwo różnych formacji. W tym wypadku pomocne okazują się inne techniki analityczne, pozwalające na zawężenie obszaru wcześniejszych obserwacji optycznych.

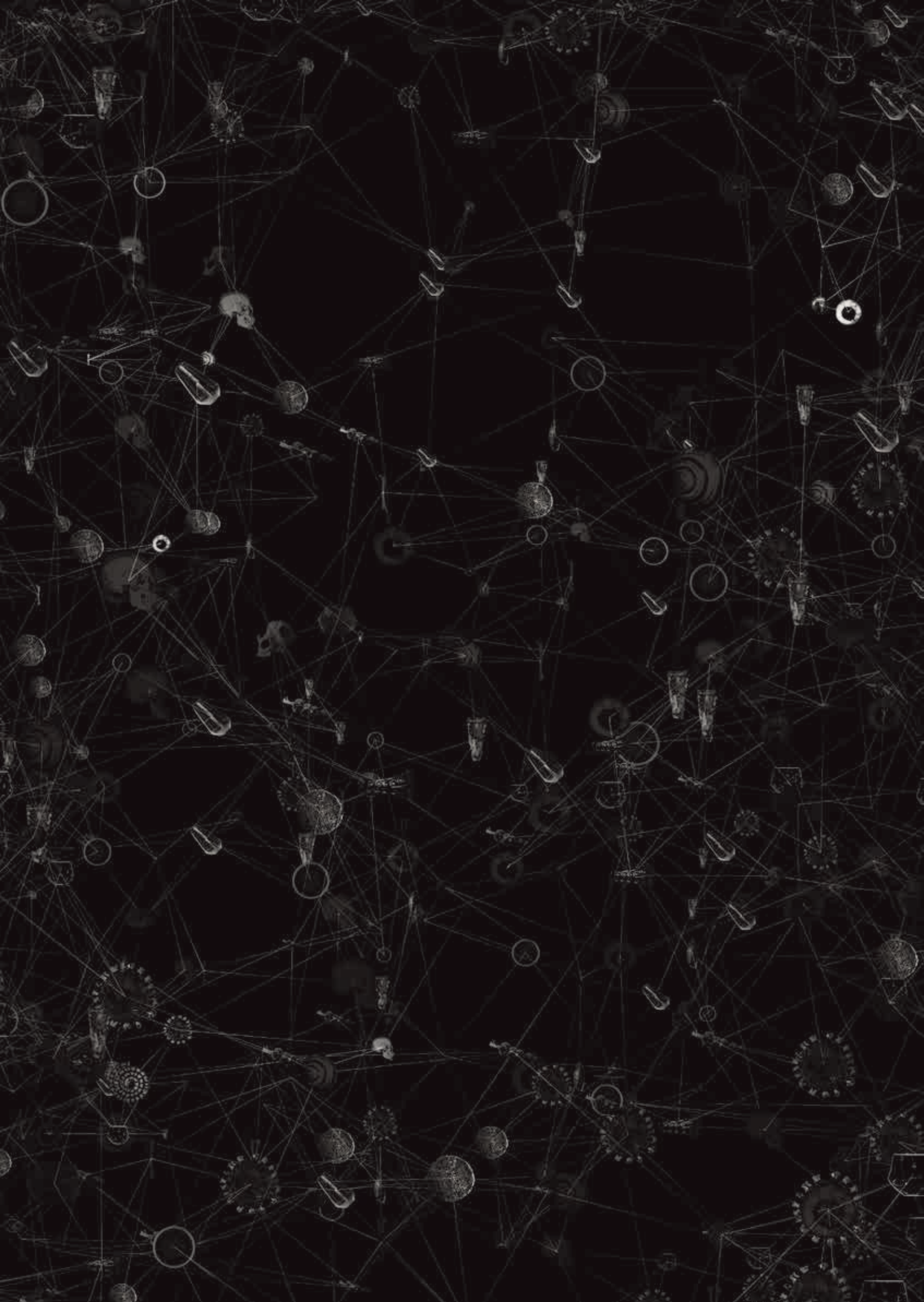
## LITERATURA

- Arioglu, N., Acun, S. 2006. A research about a method for restoration of traditional lime mortars and plasters: A staging system approach. *Building and Environment* 41: 1223–1230.
- August, C., Chudziak, J., Gunia, P. 2011. Temperatura wypału ceramiki budowlanej z późnośredniowiecznego Wrocławia w świetle badań fazowych, (w:) A. Jaszewska, A. Michalak (red.), *Ogień – żywioł ujarzmiony i nieujarzmiony. VI Polsko-Niemieckie Spotkania Archeologiczne. Materiały z konferencji w Garbiczu 5–6 września 2008*. Zielona Góra, 393–405.
- Banaś, M. 1979. Badania w świetle odbitym, (w:) A. Bolewski, W. Żabiński (red.), *Badania minerałów i skał*. Warszawa, 118–167.
- Barbacki, A. 2003. *Mikroskopia elektronowa*. Poznań.
- Bolewski, A., Jaskólski, S. 1951. *Oznaczanie minerałów*. Państwowy Instytut Geologiczny, Prace Specjalne 2. Warszawa.
- Borkowska, M., Smulikowski, K. 1973. *Minerały skałotwórcze*. Warszawa.
- Buchwald, V. F., Wivel, H. 1998. Slag Analysis as a Method for the Characterization and Provenancing of Ancient Iron Objects. *Materials Characterization* 40: 73–96.
- Callmer, J. 1977. *Trade beads and bead trade in Scandinavia ca. 800–1000 A. D.* Acta Archaeologica Lundensia, Series in 4°. Nr 11. Lund.
- Chachlikowski, P., Skoczylas, J. 2001. Pochodzenie i użytkowanie surowców kamiennych spoza Niżu Polskiego w neolicie i we wczesnej epoce brązu na Kujawach. *Fontes Archaeologici Posnanienses* 39: 163–190.
- Damour, A. 1863. *Notice et analyse sur le jade vert – Réunion de cette matière minérale à la famille des wernerites*. Comptes Rendus de l'Academie 56, Paris.
- Elsen, J. 2006. Microscopy of historic mortars – a review. *Cement and Concrete Research* 36: 1416–1424.
- Filipowiak, W., Szydłowski, M. 2019. Stone artefacts, (w:) M. Rębkowski (red.), *Wolin – the Old Town. Vol. II: Studies on Finds*. Szczecin, 221–244.
- Fischer, H. 1875. *Nephrit und Jadeit nach ihren mineralogischen Eigenschaften sowie nach ihrer urgeschichtlichen und ethnographischen Bedeutung*, Stuttgart.
- Gašper, O. (red.) 2018. *The past under the microscope. Scientific Analyses in Museums*, Ljubljana.
- Geschwendt, F. 1941. Des schlesische Nefrit und seine Verwendung in geschichtlicher Zeit. *Alt Schlesien* 10: 26–44.
- Górska-Zabielska, M. 2008. Obszary macierzyste skandynawskich eratyków przewodnich osadów ostatniego zlodowacenia północno-zachodniej Polski i północno-wschodnich Niemiec. *Geologos* 14(2): 55–73.
- Gunia, P. 1996. *Gemmologia praktyczna dla geologów*. Wrocław.
- Gunia, P. 2013. Wyniki badań gemmologicznych wczesnośredniowiecznych kamieni jubilerskich z Ostrowa Tumskiego we Wrocławiu, (w:) E. Lisowska (red.), *Wydobywanie i dystrybucja surowców kamiennych we wczesnym średniowieczu na Dolnym Śląsku*. Wrocław, 295–308.
- Hałas, A., Szymański, H. 1965. *Mikroskopy elektronowe*. Warszawa.
- Heflik, W., Parachoniak, W. 1979. Badania w świetle przechodzącym, (w:) A. Bolewski, W. Żabiński (red.), *Badania minerałów i skał*. Warszawa, 59–117.
- Holliday, V.T. 2004. *Soils in Archaeological Research*. Oxford-Nowy Jork.
- Huber, M., Mroczek, P. 2012. Kamień w architekturze Lublina na przestrzeni wieków. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego* 448: 441–450.

- Jochemczyk, L., Skoczylas, J. 1991. Petrograficzne badania materiałów wiążących z wczesnośredniowiecznej budowli Ostrowa Lednickiego. *Przegląd Geologiczny* 39(7–8): 349–351.
- Kara, M. 2006. W kwestii pochodzenia wczesnośredniowiecznych oselek z fyllitu odkrytych na ziemiach Polski północno-zachodniej – głos w dyskusji, (w:) M. Dworacznych, A.B. Kowalska, S. Moździoch, M. Rębkowski (red.), *Świat Słowian wczesnego średniowiecza*. Szczecin-Wrocław, 395–404.
- Kaźmierczyk, J., Sachanbiński, M. 1978. Studium do produkcji wyrobów z kamieni szlachetnych na Śląsku w X–XIII w. *Kwartalnik Historii Kultury Materialnej* 4: 465–495.
- Kostrzewski, B. 1939. *Gniezno w zaraniu dziejów (od VIII–XIII w.) w świetle wykopalisk*. Poznań.
- Kryza, R. 2011. Kamień w architekturze i sztuce: od Asuanu do Żagania, (w:) A. Żelaźniewicz, J. Wojewoda, W. Cieżkowski (red.), *Mezozoik i Kenozoik Dolnego Śląska*. Wrocław, 195–209.
- Kulczycka-Leciejewiczowa, A., Majerowicz, A., Prinke, A., Skoczylas, J., Wojciechowski, W. 1996. *Opis zabytków kamiennych – propozycja standaryzacji*. Warszawa.
- Lisowska, E. 2013. *Wydobycie i dystrybucja surowców kamiennych we wczesnym średniowieczu na Dolnym Śląsku*. Wrocław.
- Lisowska, E., Gunia, P. 2009. Stone raw material of early medieval stronghold – examples from the Ostrów Tumski (Wrocław– Lower Silesia, Poland), (w:) *International Meeting Geoarchaeology in Central Europe, Program and Abstracts, April 30<sup>th</sup> to May<sup>nd</sup>, 2009, in Dresden*, 33.
- Lisowska, E., Zamelska-Monczak, K., Kolenda, J., Gunia, P., Łydzba-Kopczyńska, B. 2018. Raman spectroscopy investigations of early medieval amber finds discovered in Santok and Milicz (Western Poland) – implications for its provenance. *Fontes Archaeologici Posnaniensis* 53: 223–240.
- Łaciak, D., Borowski, M.P., Łydzba-Kopczyńska, B., Baron, J., Furmanek, M. 2019. Archaeometric characterisation and origin of black coatings on prehistoric. *Chemie der Erde-Geochemistry* 79(3): 453–466.
- Łosiński, W. 2008. *Pomorze Zachodnie we wczesnym średniowieczu*. *Studia archeologiczne*. Poznań.
- Łuniewski, T. 1885. Starożytne żarna w Polsce. *Pamiętnik Fijograficzny* 5(IV): 5–10.
- Łydzba-Kopczyńska, B., Gediga, B., Chojcan, J., Sachanbiński, M. 2012. Provenance investigations of amber jewelry excavated in Lower Silesia (Poland) and dated back to Early Iron Age. *Journal of Raman Spectroscopy* 43(10): 1839–1844.
- Łydzba-Kopczyńska, B., Periz-Diaz, M., Sentandreu, E. 2018. Raman spectroscopy coupled to chemometrics to discriminate provenance and geological age of amber. *Journal of Raman Spectroscopy* 49(5): 842–851.
- Majerowicz, A., Skoczylas, J. 1983. Petroarcheologiczne badania surowców skalnych ze stanowiska 1 w Wolinie. *Materialy Zachodniopomorskie* 29: 65–73.
- Majerowicz, A., Prinke, A., Skoczylas, J. 1980. On the import of the stone raw material from Sudety Mountains and from Śląża, (w:) A. Kulczycka-Leciejewiczowa (red.) *II Międzynarodowe Seminarium Petroarcheologiczne*. Wrocław-Sobótka, 63–67.
- Manecki, A. 1979. Przygotowywanie preparatów mikroskopowych, (w:) A. Bolewski, W. Żabiński (red.), *Badania minerałów i skał*. Warszawa, 53–58.
- Manecki, A., Muszyński, M. 2008. *Przewodnik do petrografii*. Kraków.
- Marshall, D.J. 1988. *Cathodoluminescence of Geological Materials*. Boston.
- Miazga, B. 2017. *Zabytek archeologiczny jako nośnik informacji o przeszłości. Badania specjalistyczne śladów produkcji, użytkowania i depozycji artefaktów*. Wrocław.
- Michniewicz, J. 1999. Analiza petrograficzna przedmiotów kamiennych, (w:) C. Buśko, J. Piekalski (red.), *Ze studiów nad życiem codziennym w średniowiecznym mieście: parcele przy ulicy Więziennej 10–11 we Wrocławiu*. Wrocław, 136–141.
- Mitchell, J.G., Askvik, H., Resi, H.G. 1984. Potassium-argon ages of schist honestones from the Viking Age sites at Kaupang (Norway), Aggersborg (Denmark), Hedeby (West Germany) and Wolin (Poland), and their archaeological implications. *Journal of Archaeological Science* 11: 171–176.
- Muszer, A. 2000. *Zarys mikroskopii kruszców*. Wrocław.
- Nicosia, C., Stoops, G. 2017. *Archaeological Soil and Sediment Micromorphology*. Nowy Jork.
- Pankiewicz, A., Siemianowska, S., Sadowski, K. 2017. Wczesnośredniowieczna biżuteria szklana z głównych ośrodków grodowych Śląska (Wrocław, Opole, Niemcza). In *pago Silensi. Wrocławskie Studia Wczesnośredniowieczne* 3. Wrocław.
- Pazda, S., Sachanbiński, M. 1991. Problem eksploatacji, użytkowania i dystrybucji łupków kwarcytowych (kwarcowo-sercytowych) z rejonu Wzgórz Strzeelińskich jako surowca do sporządzania oselek na Śląsku w starożytności. *Studia Archeologiczne* 20: 47–73.
- Piaskowski, J. 1987a. Proposal for a standardisation of the criteria for determining technological processes in Early Iron and steel metallurgy, (w:) H. Cleer, B.G. Scott (red.), *The crafts of the blacksmith*. Belfast, 157–168.
- Piaskowski, J. 1987b. A standardisation procedure for the presentation of the results of metallographic examinations of early iron implements, (w:) H. Cleer, B.G. Scott (red.), *The crafts of the blacksmith*. Belfast, 169–178.
- Piatak, N.M., Parsons, M.B., Seal, R.R. 2015. Characteristics and environmental aspects of slag: A review. *Applied Geochemistry* 57: 236–266.

- Pleiner, R. 1987. Problems in the Standardisation of Metallographic Investigation of Archeological Iron Objects, (w:) H. Cleer, B.G. Scott (red.), *The crafts of the blacksmith*. Belfast, 179–180.
- Prinke, A., Skoczylas, J. 1980. *Neolityczne surowce kamienne w Polsce środkowo-zachodniej. Studium archeologiczno – petrograficzne*. Biblioteka Fontes Archaeologici Poznanienses 5. Poznań, 1–142.
- Prinke, A., Skoczylas, J. 1985. Badania nad prahisterycznymi surowcami kamiennymi jako przykład interdyscyplinarnej współpracy archeologii z geologią. *Prace Naukowe Uniwersytetu Śląskiego* 713: 57–72.
- Prinke, A., Skoczylas, J., 1987. Petroarcheologia i jej znaczenie dla rozwoju geologii. *Prace Geologiczno-Mineralogiczne* 10: 275–279.
- Quinn, P.S. 2013. *Ceramic Petrography: The Interpretation of Archaeological Pottery & Related Artefacts in Thin Section*. Oxford.
- Rapp, G. 2009. *Archaeomineralogy*. Berlin.
- Resi, H.G. 1990. *Die Wetz- und Schleifsteine aus Haithabu. Mit Beiträgen von Helge Askvik, David T. Moore und Gernot Schlüter*, Berichte über die Ausgrabungen in Haithabu 28, Neumünster, 9–133.
- Richter, D.K., Götze, T., Götze, J., Neuser R.D. 2003. Progress in application of cathodoluminescence (CL) in sedimentary petrology (Review Article). *Mineralogy and Petrology* 79(3/4): 127–166.
- Riederer, J. 2004. Thin Section Microscopy Applied to the Study of Archaeological Ceramics. *Hyperfine Interactions* 154: 143–158.
- Ryka, W., Maliszewska, A. 1982. *Słownik petrograficzny*. Warszawa.
- Skoczylas, J. 1990. *Użytkowanie surowców skalnych we wczesnym średniowieczu w północno-zachodniej Polsce*. Poznań.
- Słowik, G. 2014. *Podstawy mikroskopii elektronowej i jej wybrane zastosowania w charakterystyce katalizatorów nośnikowych*. Lublin.
- Sikorska, M. 2000. Od gemmologii do archeologii śladami katodoluminescencji, (w:) *Streszczenia referatów, Instytut Nauk Geologicznych Uniwersytetu Wrocławskiego, Polskie Towarzystwo Geologiczne, Oddział Wrocławski* 2, Wrocław, 53–55.
- Sikorska, M. 2005. *Badania katodoluminescencyjne minerałów. Instrumentalne Metody Badań Geologicznych* 59, Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- Smith, G.D., Clark, R.J.H. 2004. Raman microscopy in archaeological science. *Journal of Archaeological Science* 31: 1137–1160.
- Štělcl, J., Malina, J. 1970. *Anwendung der Petrographie in der Archäologie*. Brünn.
- Štělcl, J., Malina, J. 1975. *Základy petroarcheologie*. Brno.
- Szydlowski, M. 2011. Wstępna analiza kamiennych oselek z wczesnośredniowiecznego Wolina, (w:) M. Rębkowski (red.), *Wolińskie Spotkania Mediewistyczne I, Ekskluzywne życie – dostojny pochówek. W kręgu kultury elitarnej wieków średnich*, Wolin: 45–51.
- Waldhauser, J. 1981. Keltské rotační mlýny v Čechách, *Památky Archeologické* 72: 153–221.
- Webster, R. 1976. *Practical Gemmology*. Washington.
- Webster, R. Anderson, B.W. 1983. *Gems, their sources, descriptions and identification*. London-Boston.
- Wirski-Parachoniak, M. 1980. Mineral raw-materials in Celtic pottery-production of southern Poland, (w:) A. Kulczycka-Leciejewiczowa (red.), *II Międzynarodowe Seminarium Petroarcheologiczne*. Wrocław-Sobótka, 91–98.
- Wojciechowski, W. 1988. Próba lokalizacji ośrodków produkcyjnych toporów ślezańskich w świetle badań petroarcheologicznych. *Przegląd Archeologiczny* 35: 101–138.
- Wołoszyn, M. 2007. Między Gnieznem, Krakowem a Kijowem. Archeologia o wczesnośredniowiecznych relacjach polsko-ruskich i formowaniu polsko-ruskiego pogranicza, (w:) M. Dębiec, M. Wołoszyn (red.), *U źródeł Europy Środkowo-Wschodniej: pogranicze polsko-ukraińskie w perspektywie badań archeologicznych*. Rzeszów, 177–206.
- Wróbel, B., Zienkiewicz, K., Smoliński, D. J., Niedojadło, J., Świdziński M., 2005. *Podstawy mikroskopii elektronowej. Skrypt dla studentów biologii*. Toruń.
- Żak, J. 1967. *Importy skandynawskie na ziemiach zachodniosłowiańskich od IX do XI wieku*. Poznań.









# Surowce krzemionkowe – możliwości badań

Iwona Sobkowiak-Tabaka

## WPROWADZENIE

Przez setki tysięcy lat, obok materiałów organicznych, np. kości, poroża czy drewna, surowce krzemionkowe były podstawowym materiałem, z których człowiek wykonywał narzędzia. Najstarsze z nich datowane są na ok. 2,6 mln lat, a według innych źródeł nawet na 3,3 mln lat temu (Harmand i in. 2015) i wiążą się z rozwojem *Homo habilis* w Afryce (Rozmus 2020). Surowce krzemionkowe były z powodzeniem wykorzystywane do początków epoki brązu, czego dowodem są wspaniałe sztylety mierzące niejednokrotnie kilkadziesiąt centymetrów długości (Vang Petersen 2008). W miarę rozwoju metod obróbki metali – brązu, a później żelaza – ich znaczenie zmalało. Artefakty krzemienne pojawiały się sporadycznie w zespołach narzędziowych, a ich forma i kształt sprawiają wrażenie wykonanych *ad hoc*. Jednak dzięki skonstruowaniu ok. połowy XVI w. zamka skałkowego, montowanego w broni palnej, surowce krzemionkowe znów były wykorzystywane na szeroką skalę. Służyły do produkcji skałek umożliwiających krzesanie iskier zapalających proch. Szczyt produkcji tych wytworów przypadał na czas amerykańskiej wojny o niepodległość (1776-1883), kiedy to eksportowano do Ameryki ok. 30-40 mln skałek rocznie (De Latour 2009).

Współcześnie surowce krzemionkowe znajdują zastosowanie w produkcji ceramiki, szkła oraz

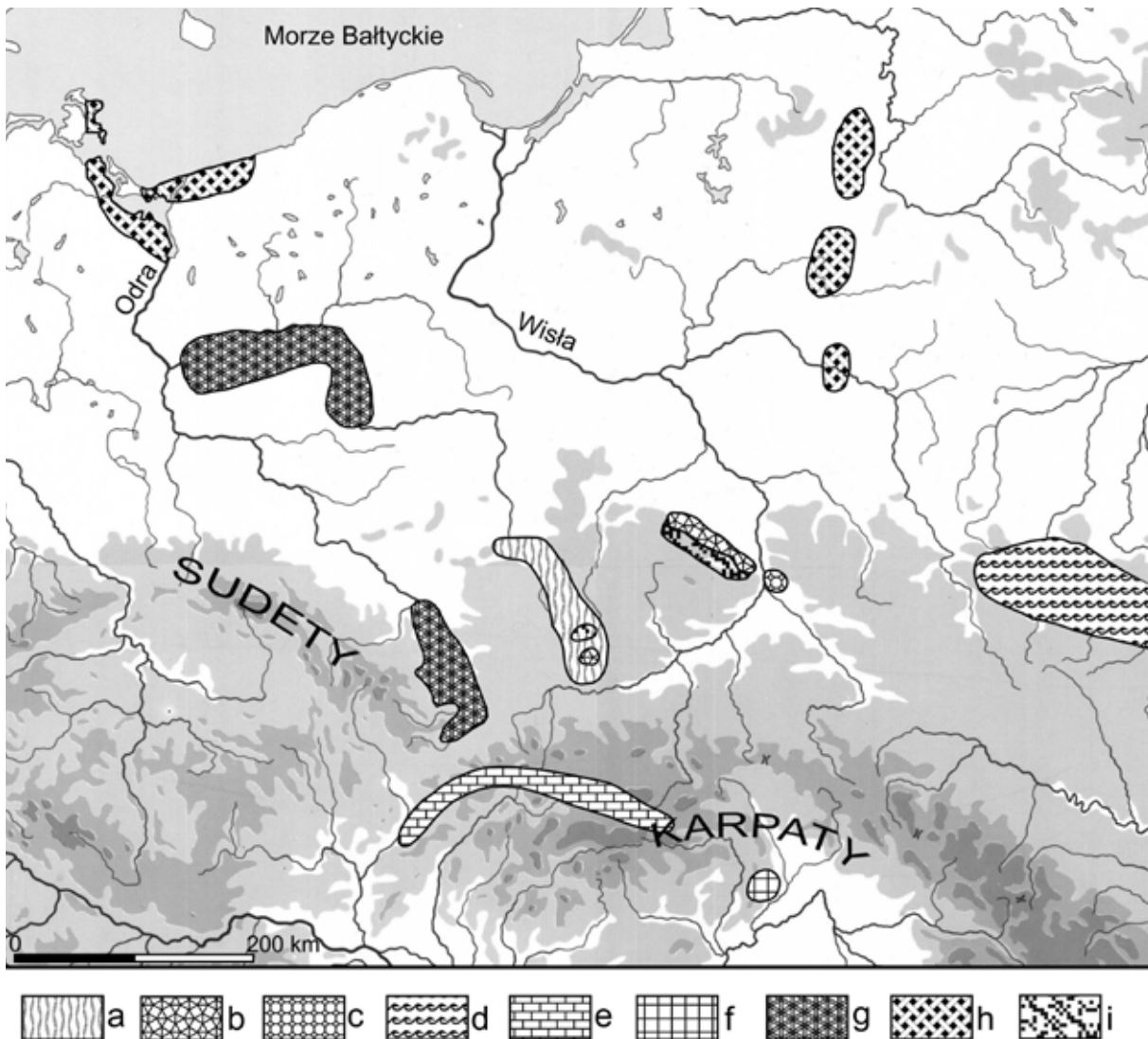
farmaceutyków i kosmetyków (Bolewski i in. 1991; Muszyński 2008: 348), a szkło wulkaniczne, czyli obsydian, wykorzystywany jest do produkcji skalpeli chirurgicznych (Nachyła 2020).

Surowcami krzemionkowymi, nazywamy takie minerały, których niemal wyłącznym składnikiem jest tlenek krzemu ( $\text{SiO}_2$ ). Możemy je podzielić na minerały grupy  $\text{SiO}_2$ , czyli kwarc i jego odmiany oraz opal i skały krzemionkowe, tj. piaski kwarcowe i pokrewne, kwarcyty, chalcedony, krzemienie, ziemia, okrzemkowa i diatomity, moler, ziemia krzemionkowa, łupki kwarcytowe (Bolewski i in. 1991). W opracowaniach i artykułach archeologicznych do wszystkich wymienionych wyżej surowców stosuje się zazwyczaj określenie krzemienie.

Krzemieniem (ang. *flint*, *firestones*; niem. *Feuerstein*; czes. *pazaupek*) w polskiej literaturze petrograficznej określa się konkretne krzemionkowe oraz inne ciała krzemionkowe występujące w obrębie skał osadowych. Rozmiary konkretów i ich kształt są zróżnicowane. Składają się z kwarcu, chalcedonu i opalu z kilkoma dodatkowymi minerałami i sporadycznymi pozostałościami organicznymi, np. spikulami gąbek (Muszyński 2008).

Kolor i inne właściwości krzemienia wynikają z jego składu mineralnego. Odcień czerwony, brązowy lub żółty jest przejawem obecności geotytu, lepidokrocytu lub hematytu. Barwy szare lub niebieskawe są wynikiem





**Ryc. 1.** Wschodnie głównych surowców krzemionkowych, użytkowanych przez społeczności pradziejowe w Polsce i jej sąsiedztwie: a – krzemień jurajski; b – krzemień czekoladowy; c – krzemień świeciechowski; d – krzemień wołyński; e – radiolaryt; f – obsydian; g – nagromadzenia krzemienia narzutowego; h – koncentracje kier glacialnych z krzemieniami wieku kredowego; i – krzemień pasiasty (na podstawie Bobrowski 2009; Sudoł-Porcyk i in. 2018; Sulgostowska 2005: ryc. 10)

oddziaływania siarczków żelaza (głównie piritów i markazytów). O obecności węglowodorów świadczą kolory od ciemnoszarego do czarnego. W skale współwystępuje zazwyczaj kilka minerałów barwiących w postaci pierwiastków śladowych.

Geneza krzemieni nie jest do końca rozpoznana. Przyjmuje się, że mogą się tworzyć w wyniku osadzania się w skałach osadowych elementów szkieletów krzemionkowych, wytrącania się krzemionki z roztworu wodnego, koncentracji minerałów krzemionkowych w wyniku przemiany skał krzemionkowych, bądź skał osadowych lub w efekcie procesów wietrzeniowych (Król 2009).

Celem niniejszego artykułu jest przybliżenie Czytelnikowi zagadnień związanych z bezwzględnym datowaniem artefaktów krzemionkowych oraz określeniem miejsca ich pochodzenia przy wykorzystaniu specjalistycznych metod geochemicznych i palinologicznych. Artykuł podejmuje także problematykę badania pozostałości organicznych występujących na powierzchni artefaktów.

## DATOWANIE

Artefakty wykonane z surowców krzemionkowych są zazwyczaj datowane na podstawie ich

cech technologicznych i typologicznych. Za klasyczną pracę w tym zakresie uznawana jest publikacja F. Bordesa z 1950 r., w której przedstawił listy typów i zasady technik obróbki artefaktów z dolnego i środkowego paleolitu. Niestety, metoda ta pozwala jedynie na bardzo ogólne (przybliżone) wskazanie wieku przedmiotów. Wiek wytworów krzemiennych, a także tych wykonanych z kwarcu, kwarcytu, piaskowca, czertu, itp., może być jednak określony na podstawie wielu bardziej dokładnych analiz chronometrycznych.

Metodą, która pozwala na bezwzględne datowanie wspomnianych artefaktów jest termoluminescencja (TL), wykorzystywana również w datowaniu osadów mineralnych, ceramiki i cegieł (Bluszcz 2000).

Początki użytkowania tej metody sięgają lat 70. XX w. Pierwotnie w analizach wykorzystywano fragmenty krzemieni, by ostatecznie używać pudru krzemienno (sproszkowanych krzemieni) (Valladas 1978). Termoluminescencja ma znaczny zasięg czasowy – od dolnego paleolitu po neolit, choć najczęściej stosowana jest w przypadku datowania stanowisk środkowopaleolitycznych, dla których oznaczenie wieku znajduje się poza zakresem datowania radiowęglowego. Opiera się ona na zjawisku powszechnej wśród niektórych minerałów (np. kwarc, skalenie) chwilowej luminescencji (emisja fal świetlnych) po ogrzaniu i określa moment ostatniej ekspozycji wytworu/osadu na światło słoneczne (Fedorowicz 2005; Richter 2007).

W przypadku artefaktów krzemiennych metoda ta ma zastosowanie jedynie do materiałów przepalonych. Jej zaletą jest to, że wskazuje bezpośrednio na aktywność ludzi, czyli użytkowanie przez nich ognisk. Oczywiście, przepalenie artefaktu wskutek naturalnych pożarów, do jakich dochodziło również w przeszłości, nie może być całkowicie wykluczone, ale nie są to sytuacje bardzo częste (por. Alpers-Afil i in. 2007). Do głównych wad tej metody należy jej niszczący charakter.

Warunkiem przydatności wybranych krzemieni/próbek do datowania TL jest ich dostateczne przegrzanie, czyli stwierdzone oddziaływanie temperatury wynoszącej przynajmniej 400°C. Stopień przegrzania krzemieni możemy wstępnie określić na podstawie cech makroskopowych takich jak zabarwienie – czerwone lub różowe, błyszcząca powierzchnia i widoczne na niej pęknięcia. W dalszej kolejności wykonywany jest test, w którym

sprawdzany jest stosunek naturalnej termoluminescencji (NTL) do krzywej blasku (NLT+), powinien on wynosić ok. 370°C. Zewnętrzna powierzchnia próbki (przynajmniej 2 mm grubości) jest usuwana za pomocą piły z ostrzem diamentowym w celu wyeliminowania promieniowania z otaczającego artefakt sedymentu, a pozostały rdzeń (1-4 g) jest kruszony w moździerzu na proszek o średnicy ziaren nieprzekraczających 160 µm.

Metody luminescencyjne zależą w dużej mierze od geologicznej natury stanowiska. W związku z tym procesy jego formowania i ewentualne zaburzenia postdepozycyjne powinny być brane pod uwagę w interpretacji otrzymanego wyniku. Dokładność datowania chronometrycznego stanowiska wynika przede wszystkim z kontekstu depozycji próbki, zależy od środowiska, w którym zalegała oraz od jakości datowanych próbek, tj. stopnia ich przegrzania. Wynik datowania podawany jest w postaci *kilo-lat-temu* (*ka*), z odchyleniem standardowym  $\pm$ , wahającym się od kilkuset do kilku tysięcy lat (Richter 2007; 2009).

Datowanie TL artefaktów krzemiennych było stosowane z powodzeniem w odniesieniu do mustierskich stanowisk z obszaru Lewantu (Richter 2007), niemieckich z górnego paleolitu, np. Geißenklösterle (Richter i Krbetschek 2007) czy z południowej Afryki, w tym słynnej Jaskini Blombos (Tribolo i in. 2006).

## METODY OKREŚLANIA POCHODZENIA SUROWCÓW KRZEMIONKOWYCH

W przypadku artefaktów ze skał krzemionkowych bardzo ważne jest rozpoznanie surowca, z jakiego zostały wykonane. Ma to podstawowe znaczenie w badaniach kontaktów społeczności pradziejowych, ich mobilności, wymiany surowców pomiędzy poszczególnymi grupami, rozpoznania zmian w dostępności do wychodni oraz określenia ewentualnych importów.

W Polsce oraz na terenach ościennych (Czechy, Niemcy, Słowacja i Ukraina) występuje kilka rodzajów surowców krzemionkowych, które były intensywnie użytkowane przez społeczności pradziejowe do wytwarzania narzędzi (ryc. 1). Możemy je ogólnie podzielić na krzemienie narzutowe, które trafiły na obszar ziem polskich wraz z łądolodem, oraz kopalne, pozyskiwane ze złóż *in situ*.





**Ryc. 2.** Krzemień narzutowy z okolic Gorzowa Wielkopolskiego. Fot. P. Bobrowski

Pierwszy z wymienionych surowców był narażony na liczne modyfikacje stanu zachowania ze względu na daleki transport ze złóż pierwotnych znajdujących się w południowej części Morza Bałtyckiego (Sulgostowska 2016).

Do niedawna opis surowców krzemionkowych występujących w Polsce ograniczał się głównie do obserwacji makroskopowych (Krukowski 1920; 1923; Samsonowicz 1923; Schild 1971; 1976; Balcer 1976; Kaczanowska i Kozłowski 1976; Kaczanowska i Lech 1977; Kozłowski i Pawlikowski 1989; Lech 1980; Pelisiak 1987; Budziszewski i Michniak 1983; Michniak 1980; Schild i Sulgostowska 1997; Kamińska-Szymczak i Szymczak 2002; Pieńkowski i Gutkowski 2004; Krajcarz i Krajcarz 2009; Přichystal 2009; 2013; Krajcarz i in. 2012), a klasyfikacja opierała się zazwyczaj na kolorze surowca, rozmiarach intruzji organicznych, przezroczystości, charakterze przełamu, kształcie bryły krzemiennej i rodzaju kory (Schild 1971; 1976).

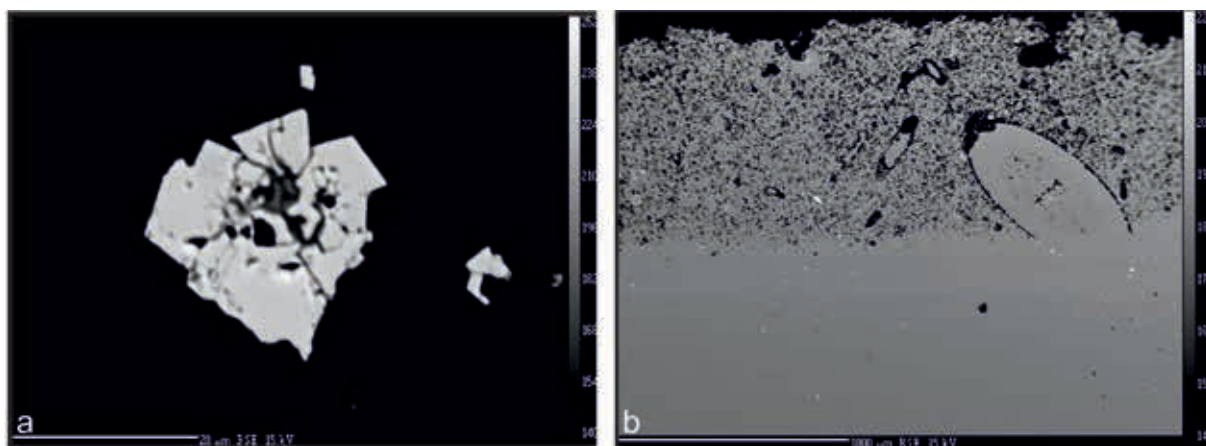
W niektórych przypadkach przeprowadzano ogólną analizę mikroskopową cienkich szlifów (płytek) z próbek krzemiennych za pomocą mikroskopu

polaryzacyjnego (por. Gunia i in., w tym tomie) (Schild 1971; Přichystal 2009; 2013) i skaningowego mikroskopu elektronowego (Kamińska-Szymczak i Szymczak 2002; Kamińska i in. 1993).

Ostatnie lata przyniosły jednak dużą zmianę w tej kwestii. Realizowanych jest wiele projektów wykorzystujących różne metody instrumentalne do określania rodzajów skał krzemionkowych, ze szczególnym uwzględnieniem dokładniejszej charakterystyki cech diagnostycznych krzemienia czekoladowego czy obsydianu (Hughes i Werra 2014; Hughes i in. 2016; Hughes i in. 2018; Kabaciński i in. 2015; Sobkowiak-Tabaka i in. 2015; Werra i in. 2015).

Ogólnie metody te możemy podzielić na inwazyjne (wymagające częściowego lub całkowitego zniszczenia próbki) i nieinwazyjne, które nie wpływają na stan zachowania artefaktu. Kluczowe jest jednak posiadanie odpowiedniej próbki, z potencjalnej lokalizacji źródłowej, aby móc porównać otrzymane wyniki z materiałem referencyjnym. Poniżej scharakteryzowane zostaną najczęściej wykorzystywane metody służące do określania pochodzenia surowców krzemionkowych.





**Ryc. 3.** Zdjęcia wykonane pod elektronowym mikroskopem skaningowym: a – agregacja pirytu z apatitem; b – igła jeżowca zastąpiona przez chalcedon (na podstawie Sobkowiak-Tabaka i in. 2016)

### METODY INWAZYJNE

Wśród metod inwazyjnych wyróżnić należy przede wszystkim instrumentalną neutronową analizę aktywacyjną (ang. *instrumental neutron activation analysis*, INNA) oraz technikę ablacji laserowej połączoną ze spektrometrią mas plazmy indukcyjnie sprzężonej (ang. *inductively coupled plasma mass spectrometry with laser sampling*, LA-ICP-MS).

Pierwsza z nich (INAA) pozwala na dokładne zbadanie, ilościowe i jakościowe, udziału głównych pierwiastków i pierwiastków śladowych. Metoda ta opiera się na przemianie jąder atomów różnych pierwiastków z danej próbki przez bombardowanie ich neutronami, w wyniku czego powstają nietrwałe izotopy radioaktywne. Izotopy te mają charakterystyczny okres połowicznego rozpadu i rozpadają się na izotopy trwałe, emitując promieniowanie gamma. W celu identyfikacji poszczególnych pierwiastków mierzy się energię dla każdego z nich. Analizie podlegają zazwyczaj próbki o wadze 10–50 mg, w formie proszku lub wiórków, co wymaga zniszczenia przynajmniej części artefaktu (Glascock i Neff 2003). Niestety, wszystkie badane w ten sposób próbki pozostają radioaktywne przez wiele lat.

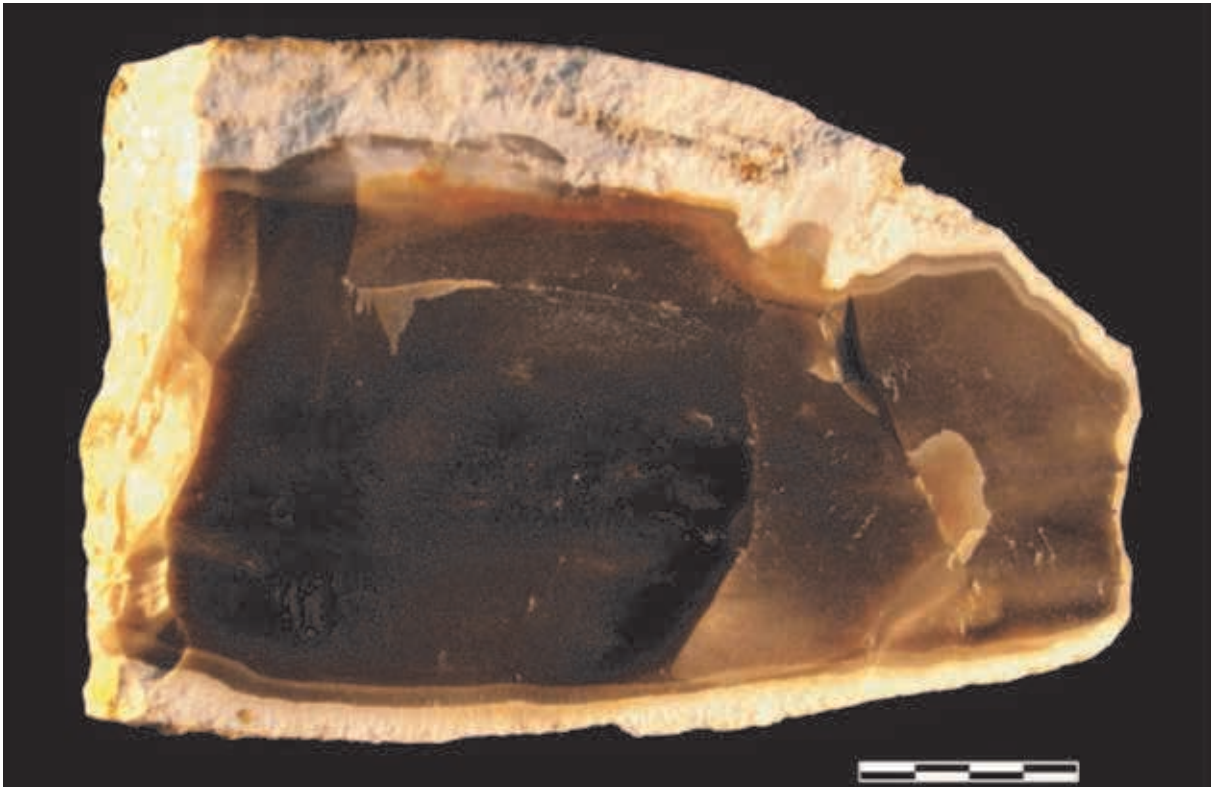
Metoda INNA została wykorzystana w badaniach krzemienia „pasiastego”, pozyskanego z okolic Pęgowa (Kabaciński i Sobkowiak-Tabaka 2016).

Druga z metod (LA-ICP-MS) – ablacja laserowa połączona ze spektrometrią mas plazmy indukcyjnie sprzężonej – jest metodą bardzo czułą diagnostycznie. Próbkę wycina się prostopadle do powierzchni zewnętrznej artefaktu, a następnie uzyskane w ten sposób

fragmenty są polerowane i myte w myjce ultradźwiękowej w celu usunięcia zanieczyszczeń. Szczegółowy opis metody został zamieszczony w artykule Moroni i Petrelli (2005). Za jej pomocą ustalono m.in. pochodzenie artefaktów społeczności kultury aszelskiej i mustierskiej ze środkowych Włoch (Moroni i Petrelli 2005) oraz wytworów społeczności kultury magdaleńskiej ze wschodniej Anglii (Pettitt i in. 2012). Ponadto analizy LA-ICP-MS skałek znajdujących się w Muzeum Archeologicznym w Krakowie wykazały, że pochodzą one z rejonu Meusnes we Francji, a nie z Żelkowa (Jura Krakowsko-Częstochowska), jak pierwotnie sądzono (Werra i in. 2019).

Krzemienie mogą być również badane przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM), zwłaszcza gdy obiekty (składniki masy krzemionkowej) przeznaczone do analizy są zbyt małe (<2 µm), do obserwacji pod mikroskopem optycznym. Analiza taka umożliwia rozpoznanie jednorodnych ziaren, niejednorodnych odłamków skalnych czy składników gleb. Obserwacja względnych zmian chemicznych powierzchni odbywa się z wykorzystaniem sondy elektronów wstecznie rozproszonych (BSE), czułych na zmiany średniej liczby atomowej (Goldberg i Macphail 2011: 362). Próby muszą być jednak przygotowane w postaci szlifów mikroskopowych albo pokryte/napylone wcześniej złotem lub węglem i osadzone w specjalnych oprawkach.

Mikroanaliza z sondą elektronową (ang. *electron probe micro analysis*, EPMA) w odniesieniu do badania składu mineralnego krzemieni zapewnia wysoką dokładność jakościową i ilościową oraz



**Ryc. 4.** Bryłka krzemienia czekoladowego. Fot. D. Werra

pomaga w identyfikacji pierwiastków dodatkowych. Podobnie jak w przypadku zastosowania SEM próbki muszą być przygotowane w postaci szlifów i analizowane w mikroprobówce elektronowej (Goldberg i Macphail 2011: 363).

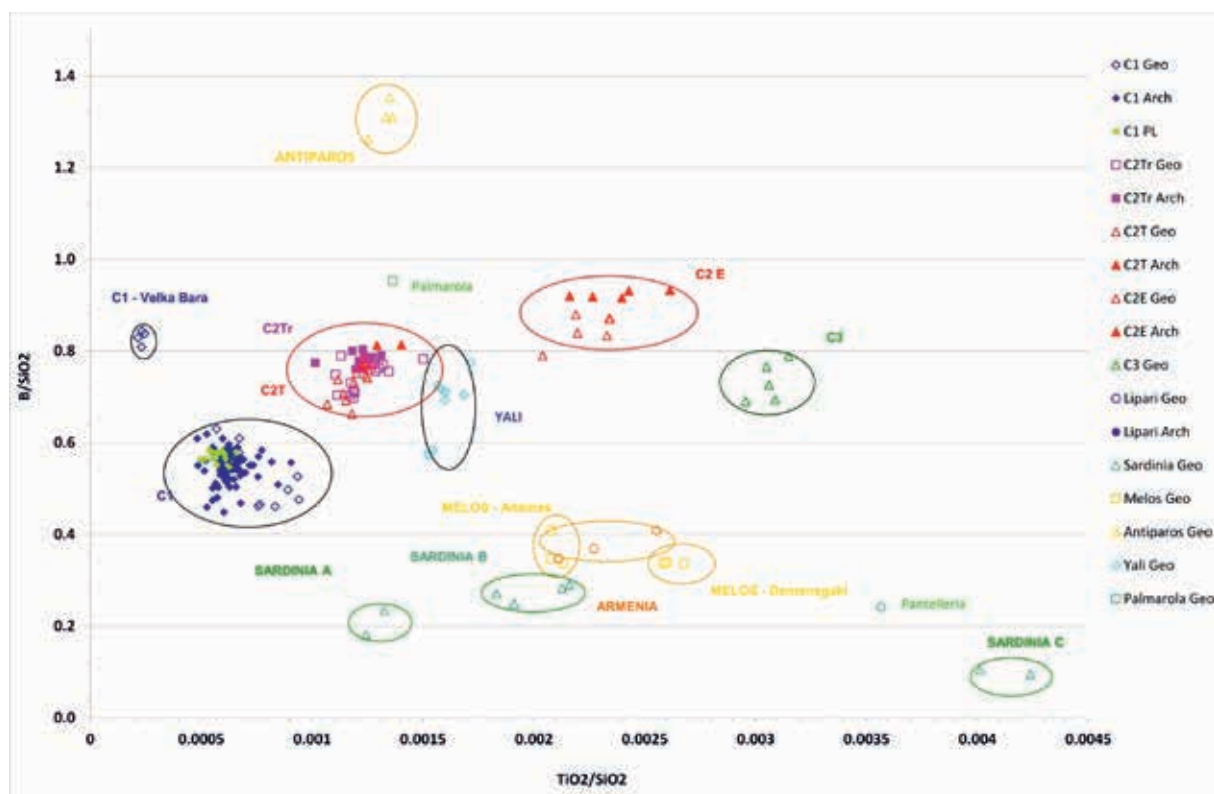
Obie z opisanych powyżej metod zostały zastosowane w badaniu pochodzenia krzemieni narzutowych z Polski (ryc. 2) i pozwoliły na rozpoznanie w ich składzie kilku minerałów akcesorycznych, takich jak kwarc, piryt (ryc. 3a), apatyt czy kalcyt. Ponadto uchwycone zostały szczątki organiczne całkowicie zastąpione przez kwarc (fosylizacja), do których należały fragmenty dinocyst (schronienia organizmów jednokomórkowych, na podstawie których można ocenić wiek skał), igły jeżowca zastąpione przez chalcedon (ryc. 3b), skrzemionkowane igły gąbek (Sobkowiak-Tabaka i in. 2016).

Do badania proveniencji artefaktów krzemienianych mogą być stosowane również analizy palinologiczne (por. Kołaczek i in., w tym tomie). Umożliwiają one oznaczenie cząsteczek materii organicznej (palinofacji) po usunięciu szkieletu skały (Gedl 1999). Węglany usuwane są za pomocą kwasu solnego, a krzemionka w wyniku zastosowania kwasu fluorowodorowego. Tak wyekstrahowane

pozostałości organiczne w zawiesinie wodnej są przesiewane na sitach nylonowych o średnicy oczek 15  $\mu\text{m}$ , a pozyskany koncentrat utrwalany jest na preparatach mikroskopowych (por. Werra i in. 2015). Badania palinologiczne w badaniu pochodzenia surowców krzemionkowych były wykonywane na Wyspach Brytyjskich (Harding i in. 2004), a ostatnio także w Polsce. Pozwoliły one na rozpoznanie zmienności palinofacji w próbkach krzemienia czekoladowego (ryc. 4) z wychodni Wierzbica „Zeł”, Polany II, Iłża „Krzemieniec” II, Seredzice, Błaziny Górne, co potwierdziło skuteczność tej metody w badaniu dystrybucji skał krzemionkowych (Werra i in. 2015).

## METODY NIEINWAZYJNE

Do metod nieinwazyjnych umożliwiających rozpoznanie obecności pierwiastków głównych i śladowych zaliczamy neutronową analizę aktywacyjną opartą na promieniowaniu natychmiastowym (ang. *prompt gamma activation analysis*, PGAA) i analizę rentgeno fluorescencyjną z dyspersją energii (ang. *energy-dispersive X-ray fluorescence analysis*, ED XRF).



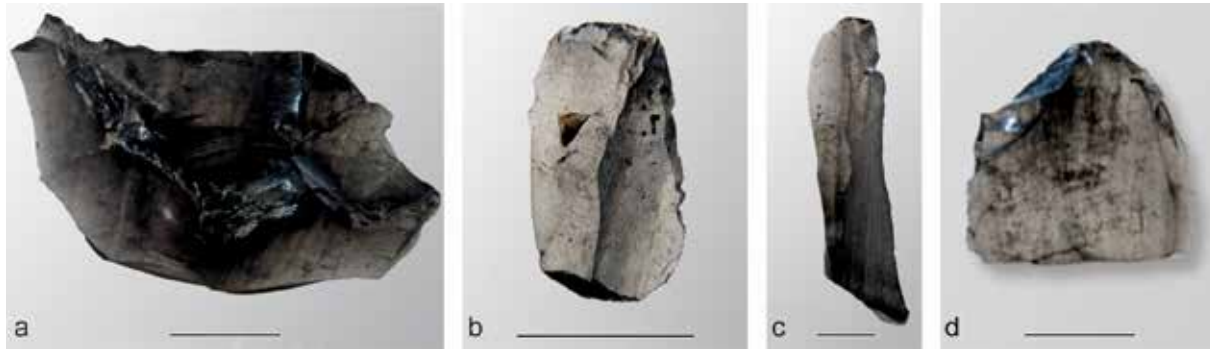
**Ryc. 5.** Klasyfikacja surowca dla późnopalaeolitycznych artefaktów obsydianowych z Polski na podstawie zawartości tlenu boru i tytanu (na podstawie Sobkowiak-Tabaka i in. 2015)

Podczas analizy PGAA wykonuje się jednocześnie napromienianie artefaktów oraz wykrywanie szybkich i opóźnionych fotonów gamma (Révay i Belgya 2004). Metoda PGAA umożliwia rozpoznanie pierwiastków głównych, takich jak H, Na, Al, Si, K, Ca, Ti, Mn i Fe oraz niektórych pierwiastków śladowych, w tym B, S, Cl, Cr, Sm i Gd, a czasem także Sc, V, Cr, Co, Ni, Cd, Nd, Sm i Eu. Koncentracje głównych składników są podane w formie tlenku. Oprócz głównych komponentów PGAA jest jedną z niewielu metod oznaczania wodoru, jak również z wysoką czułością, boru i chloru jako pierwiastków śladowych. Po umieszczeniu artefaktów w reaktorze jądrowym są one napromieniane wiązką zimnych neutronów przez określony czas (im mniejszy artefakt, tym potrzebne jest dłuższe napromienianie), aby uzyskać liczbę oznaczeń umożliwiających obliczenie stężenia większości głównych i niektórych śladowych pierwiastków (Kasztovsky i in. 2008). Porównanie otrzymanych rezultatów analizy artefaktów schyłkowopaleolitycznych wykonanych z obsydianu ze stanowiska 2 w Cichmianie (pow.

kolski) (por. ryc. 5, 6) oraz neolitycznych ze stanowiska 5 w miejscowości Rudna Wielka (pow. rzeszowski) z materiałami referencyjnymi zgromadzonymi w Centre for Energy Research Hungarian Academy of Sciences umożliwiło ustalenie źródła pochodzenia surowca i wskazanie wychodni słowackich jako miejsca, z którego pozyskiwano materiał (Sobkowiak-Tabaka i in. 2015; Kabaciński i in. 2015).

Analiza ED XRF polega na napromienieniu próbki wiązką promieni, pobudzającą elektrony na wewnętrznych powłokach wszystkich atomów obecnych w warstwie powierzchniowej. Elektrony przeskakują wówczas na wyższe powłoki, jednak wracają natychmiast na swoje pozycje wyjściowe, emitując przy tym energię, którą można zmierzyć. Dzięki temu możliwa jest identyfikacja pierwiastków obecnych w próbce. Pozwala ona na identyfikację 9 głównych i kilku pierwiastków śladowych. Podobnie jak w przypadku metody PGGA otrzymane wyniki porównywane są z materiałami referencyjnymi, a o powiązaniu artefaktu z konkretną wychodnią surowca decyduje zbieżny skład pierwiastkowy.





**Ryc. 6.** Cichmiana, stan. 2, pow. kolski. Schyłkowopaleolityczne artefakty wykonane z obsydianu: a – fragment zatępca pierwotnego; b – półtylczak mikrolityczny; c – wiór retuszowany; d – fragment wióra od rdzenia jednopiętowego (na podstawie Sobkowiak-Tabaka i in. 2015 z modyfikacjami), skala 1 cm. Fot. P. Szejnoga

Niewątpliwą zaletą tej metody jest jej niedostruacyjny charakter oraz to, że analizie mogą podlegać artefakty o średnicy 1 mm! Próbkę nie wymaga specjalnego przygotowania do badań, a czas jej wykonania wynosi kilka minut. Istotnym ograniczeniem tej metody jest zastrzeżenie, że próbka nie może być pokryta patyną, ani też zawierać żadnych fosyliów i elementów wapiennych, pochodzących z muszli morskich (ryc. 7), co jest częstym składnikiem krzemienia (Hughes i in. 2010; 2012).

Zastosowanie metody ED XRF pozwoliło na rozpoznanie pochodni obsydianów w odniesieniu do artefaktów paleolitycznych i mezolitycznych z terenu Polski (Hughes i Werra 2014; Hughes i in. 2018), wykonanych z krzemienia czekoladowego (Hughes i in. 2016) czy artefaktów, wykonanych z surowców występujących na Litwie i Białorusi (Hughes i in. 2011).

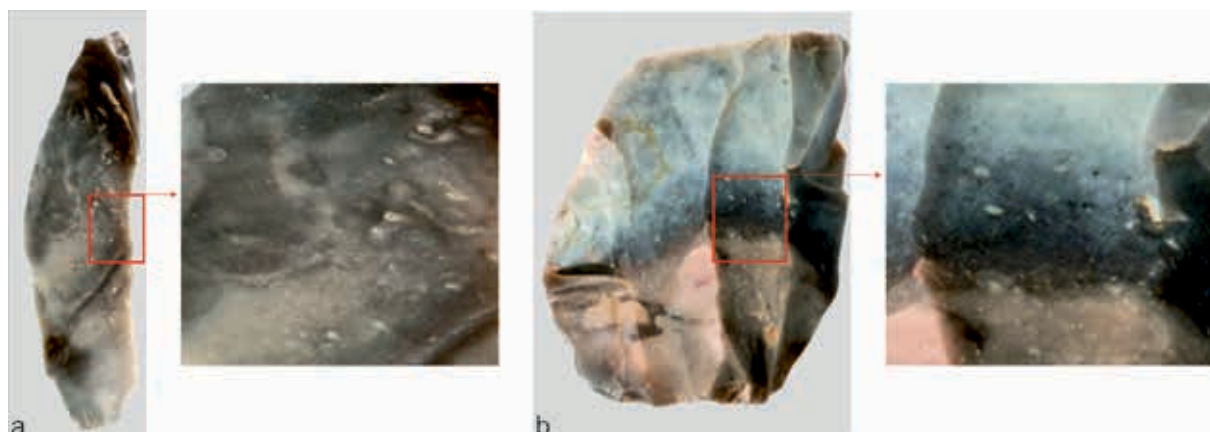
Do innych metod nieinwazyjnych należy rentgenowska analiza fluorescencyjna wzbudzana cząsteczkami naładowanymi (ang. *proton-induced X-ray emission*, PIXE). Jest ona oparta na emisji promieniowania rentgenowskiego i polega na wzbudzaniu promieniowania wiązką protonów z akceleratora cząstek naładowanych. Technika ta jest stosowana do określania składu pierwiastkowego próbki i – podobnie jak wyżej opisane metody – wymaga odniesienia otrzymanych rezultatów do bazy referencyjnej. Pozwala ona na badanie bardzo małych powierzchni artefaktów. Jest to metoda niewymagająca wysokich nakładów finansowych i jest bezpieczna dla badanych przedmiotów (Renfrew i Bahn 2002: 345).

## BADANIA POZOSTAŁOŚCI ORGANICZNYCH NA KRZEMIENIACH

W ostatnich latach coraz powszechniejsze jest traktowanie wytworów kamiennych jako potencjalnych nośników informacji o opracowywanych za ich pomocą materiałach organicznych (badania skrobi, fitolitów czy sierści lub piór zwierząt i wielu innych), co przyczynia się m.in. do lepszej znajomości pokarmu wykorzystywanego w pradziejach.

### „Płukanie pyłku”

Badania palinologiczne są podstawową analizą stosowaną w rekonstrukcji przeszłego środowiska przyrodniczego (Kończak i in., w tym tomie). Analogiczne badania możemy zastosować w odniesieniu do artefaktów wykonanych z surowców krzemionkowych i niekrzemionkowych, nazywane techniką „płukania pyłku”, ang. *pollen washes* (PW). Metoda ta została opracowana w Stanach Zjednoczonych w latach 70. XX w. Jej celem było odzyskanie i analiza pyłku osadzonego w porowatej powierzchni wytworów, takich jak moździerze, tłuczki i pojemniki na żywność, aby rozpoznać wykorzystanie roślin przez prehistoryczne społeczności południowo-zachodniej Ameryki (Miras i in. 2018). „Płukanie pyłku” pozwala na poznanie konsumpcji i użytkowania roślin przez dawne społeczności oraz zbadać funkcje artefaktów służących do przetworstwa roślin, ich pozyskiwania i przechowywania.



**Ryc. 7.** Mikrofosylia obecne w artefaktach wykonanych z krzemienia narzutowego, uniemożliwiające wykonanie analiz ED XRF: a – wiór; b – rdzeń. Fot. I. Sobkowiak-Tabaka

Dzięki tej metodzie możemy badać pozostałości organiczne (głównie w pojemnikach ceramicznych), skrobię oraz fitolity.

Procedura przygotowania próbek została opracowana przez Geiba i Smitha (2008) z modyfikacjami dokonanymi przez zespół Y. Mirasa (2018). Płukanie wykonywane jest osobno dla powierzchni użytkowych i nieużytkowych wytworu oraz z sedymentów, w którym zalegał, co pozwala na porównanie otrzymanych wyników. Powierzchnie artefaktów przemycane są za pomocą szczoteczki gorącą wodą destylowaną i 10% roztworem kwasu chlorowodorowego. W celu przyspieszenia procesu można dodać dimetylosulfotlenek (DMSO), który jest penetranem i rozpuszczalnikiem. W celu uzyskania lepszego efektu, po wstępnym myciu szczoteczka, zespół Y. Mirasa stosuje wysokociśnieniowy (od 3 do 4 barów) turbinowy pistolet natryskowy, by wnikać we wszystkie nierówności powierzchni. Pistolet wypełnia się opisanym powyżej roztworem czyszczącym. Pozyskany w ten sposób płyn wzbogaca się znanym stężeniem tabletek z zarodnikami *Lycopodium* i przesiewa przez sito o średnicy oczek 0,18 mm, a następnie odwirowuje. Po oznaczeniu objętości osadu zostaje on poddany dalszej obróbce kwasem fluorowodorowym, po czym następuje separacja grawitacyjna z ciężką cieczą (bromek cynku o ciężarze właściwym 2,0) i acetoliza. W badaniu otrzymanej zawiesiny wykorzystuje się analogiczne metody jak w przypadku analiz palinologicznych (por. też Kołaczek i in., w tym tomie).

Metoda PW została po raz pierwszy zastosowana w analizie materiałów ze stanowisk europejskich na stanowisku Abri du Maras (SE Francja), datowanym na ok. 90 tys. lat temu, na którym bytował *Homo sapiens neanderthalensis*. Badaniom poddano 8 artefaktów krzemienianych, które pozwoliły na rozpoznanie na ich powierzchni obecności tzw. niepalinomorów (ang. *non-pollen palynomorphs*, NPP – por. Kołaczek i in., w tym tomie), tj. grzybów endofitycznych żyjących w komórkach roślin. Udokumentowano obecność takich roślin zielnych jak turzyce oraz drzew – olchy czarnej, wykorzystywanych do różnych aktywności podejmowanych przez *Homo sapiens neanderthalensis* (Miras i in. 2020).

### Skrobia

Węglowodany, tłuszcze, białka, minerały i witaminy to podstawowe składniki potrzebne człowiekowi do życia.

Głównym węglowodanem w diecie człowieka jest skrobia, niezależnie od okresu, regionu czy klimatu, w jakim żył. Stąd analizy skrobi mają podstawowe znaczenie w rozpoznaniu roli diety roślinnej w pożywieniu (Barton i Torrence 2020; Henry 2020).

Ostatnie badania wskazują, że udział roślin w diecie miał ogromny wpływ na rozwój współczesnego człowieka (Van Peer i in. 2003). Nie do przecenienia jest też rola pokarmu roślinnego w diecie *Homo sapiens neanderthalensis* (Hardy i Moncel

2011), uznawanego wcześniej za wybitnego mięsozercę (Power i in. 2018).

Granulki skrobi mogą występować w wielu kontekstach – w nawarstwieńcach (strefa tropikalna i sucha), na powierzchni narzędzi i pojemników wykonanych z różnych surowców (krzemionkowe i niekrzemionkowe, metale, wypalona glina), a także jako elementy osadów organicznych, koprolitów, kamienia nazębnego czy pokarmów (Barton i Torrence 2020).

Ich maksymalny wymiar nie przekracza 50  $\mu\text{m}$ , zatem powinny być oglądane w formie przygotowanych wcześniej preparatów w świetle przechodzącym, przy powiększeniu 200 $\times$  lub większym. W tym celu artefakty są myte w myjce ultradźwiękowej, a uzyskaną ciecz odwirowuje się lub odparowuje w celu uzyskania większego stężenia rezyduów. Można również zastosować metodę wypłukiwania osadów. Na niewielkiej powierzchni artefaktu, np. o średnicy 1 cm, umieszcza się wodę, a następnie zbiera powstały płyn za pomocą pipety. Czynność tę należy wielokrotnie powtarzać, a ciecz gromadzić w tym samym pojemniku (Henry 2020).

Obserwowane granulki charakteryzują się obecnością wyraźnego ciemnego „krzyża ekstynkcji” (Fullagar 2006), zwanego też „krzyżem maltańskim” (Gott i in. 2006). Wielkość, kształt, znaczek, cechy powierzchni, koncentryczne pierścienie wzrostu i charakter krzyża pomagają w identyfikacji taksonomicznej roślin, czasami na poziomie gatunku (Hall i in. 1989).

W ostatnich latach dynamicznie rozwija się identyfikacja pozostałości skrobi na narzędziach kamiennych i krzemiennych, czego przykładem mogą być liczne publikacje dotyczące paleolitycznych i neolitycznych narzędzi służących do obróbki roślin i tłuczków, za pomocą których rozgniatały bulwy, kłącza czy korzenie roślin (np. Revedin i in. 2010; Hardy i Moncel 2011; Yang i in. 2014; Beneš i in. 2015; Skakun i in. 2017; Longo i in. 2021).

### Fitolity

W ostatnim czasie intensywnie rozwijają się także analizy pozwalające wykazać obecność fitolitów na powierzchni artefaktów krzemiennych i kamiennych.

Fitolity to twory krzemionkowe występujące wewnątrz komórek roślinnych, z reguły nieprzekraczające 50  $\mu\text{m}$ . Ich tworzenie się związane jest z wytrącaniem się krzemionki z wody pobieranej przez rośliny. Po raz pierwszy zostały opisane w 1. połowie XIX w. przez niemieckiego botanika C.G. Ehrenberga, któremu K. Darwin przesłał do oznaczenia próbki pyłu, opadłego na okręt „Beagle” w czasie jego słynnej podróży. Formacje krzemionkowe C.G. Ehrenberg nazwał fitolitaria, co można przetłumaczyć z greki jako kamienie uformowane w roślinach („*fiton*” = roślina i „*lithos*” = kamień).

Fitolity mogą być tworzone przez szczawian wapnia lub opal i gromadzić się naturalnie w środowiskach, takich jak paleogleby, jeziora i inne naturalne archiwa. Ponadto można je znaleźć na wspomnianej już powierzchni i krawędziach wytworów z surowców skalnych, np. na żarnach, narzędziach do ścinania zbóż, wewnątrz kamienia nazębnego, pozostałości organicznych na ceramice lub krzemieniach, wewnątrz ceramiki i w polepie (Polcyn i in. 2005; Cabanes 2020). Analiza fitolitów pozwala na rozpoznanie diety dawnych społeczności, kwestii związanych z udomowieniem i przetwórstwem roślin, a także takich zagadnień, jak paliwo wykorzystywane do palenia ognisk i identyfikacja upraw żniwnych (Ryan 2014).

W celu rozpoznania gatunków roślin, które zostały poddane obróbce narzędziami krzemiennymi, możemy prowadzić analizy dwiema metodami: „na sucho” bezpośrednio na krzemieniu pod mikroskopem optycznym w świetle o dużym powiększeniu (1000 $\times$ ) i pod skaningowym mikroskopem elektronowym (ryc. 8a) i „na mokro”. Druga z metod wymaga zaawansowanej obróbki laboratoryjnej, w której artefakt poddawany jest wstępnej obróbce detergentem w celu rozluźnienia osadu, a następnie zalewany kwasem solnym i gotowany w łaźni wodnej z dodatkiem kwasu azotowego. Następnie próbka, podobnie jak w przypadku metody PW, zalewana jest ciężkim płynem (bromek cynku) i odwirowywana (por. szerzej Polcyn i in. 2005; Piperno 2006). Kropla uzyskanej zawiesiny przenoszona jest na szkiełko podstawowe, a po dodaniu kropli balsamu kanadyjskiego nakładane jest szkiełko nakrywkowe. Tak przygotowany preparat analizowany jest pod mikroskopem o dużym powiększeniu (przynajmniej 500 $\times$ ), w świetle przechodzącym (ryc. 8b).

Badania fitolitów, występujących na artefaktach kamiennych, służące rozpoznaniu diety



i przetwórstwa roślinnego dla celów nieżywieniowych (wykonywanie pojemników roślinnych, mat, plecionek, sznurków, czy nawet odzieży) są wciąż dość rzadkie w Europie, z wyjątkiem prac przygotowanych przez B.L. Hardy'ego i jego współpracowników (Hardy 2009; Hardy i Moncel 2011; Hardy i in. 2001; 2013; 2020), a ostatnio także N.N. Skakun i współautorów (2019). W Polsce jedyną publikacją opisującą obecność fitolitów zbóż i traw dzikich na krzemiennych narzędziach identyfikowanych z aktywnością społeczności kultury pucharów lejkowatych ze stanowiska w Polwicy (Śląsk) jest praca B. Kufel-Diakowskiej i in. (2019).

### Dziegieć

Do często obserwowanych na powierzchni artefaktów krzemiennych pozostałości organicznych należy dziegieć (por. Krueger, w tym tomie) – efekt suchej destylacji drewna. Najczęściej spotykaną formą dziegiu w materiale archeologicznym jest substancja wytwarzana z kory brzozej lub sosnowej (Kozowyk i in. 2017). Substancja ta była wykorzystywana jako lepiszcz służące do mocowania narzędzi w oprawach organicznych (drewnianych lub kościanych/rogowych?), co zwiększało ich efektywność. Dziegieć obserwowany pod mikroskopem może przyjmować kształt małych gładkich kropli lub spękanego błota (Fullagar 2006). Najstarsze znane kamienne narzędzia z pozostałościami dziegiu pochodzą z Włoch (kamieniołom Campitello) i datowane są na ok. 200 tys. lat temu, kiedy w Europie bytował *Homo sapiens neanderthalensis* (Mazza i in. 2006). Bryłki smoły i pozostałości lepiscza wystąpiły również na stanowiskach neandertalskich z Niemiec, datowanych na ok. 120 (Pawlik i Thissen 2011) i 80 tys. lat temu (Koller i in. 2001).

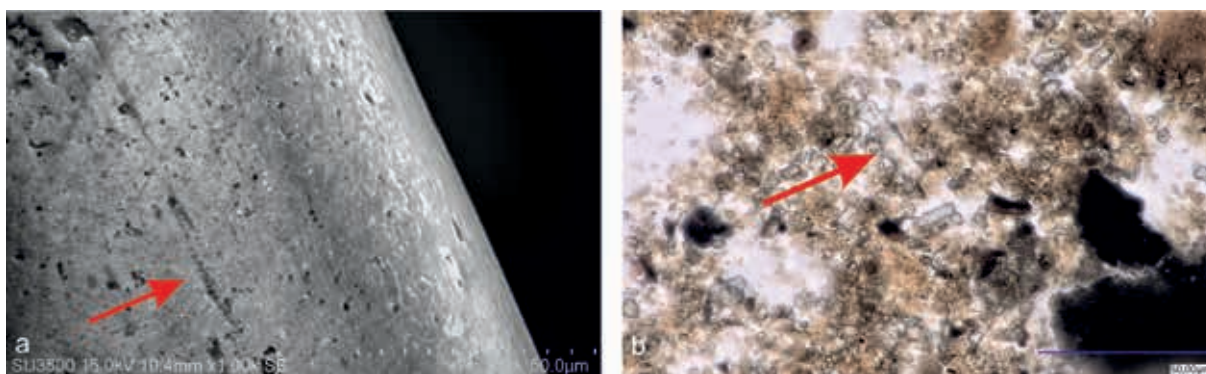
### Inne pozostałości organiczne

Do innych pozostałości możliwych do zaobserwowania na narzędziach wykonanych z surowców kamiennych należą tkanki zwierzęce, takie jak krew, kości, mięśnie, lipidy, tłuszcze, kolagen i muszle. Mają one charakterystyczne struktury komórkowe widoczne mikroskopowo, które są trudne do zaobserwowania bez specjalistycznej obróbki biochemicznej.

Krew jest tkanką łączną o kilku wyraźnie wyodrębnionych strukturach, do których należą czerwone i białe krwinki. Dojrzałe krwinki czerwone ssaków nie mają jądra, a ich wielkość może być wskaźnikiem taksonomicznym (Andrew 1965). Badania pozostałości krwi na artefaktach archeologicznych datuje się na lata 80. XX w., jednak od samego początku ich wyniki budziły kontrowersje (Smith i Willson 2005). Pierwsze badania zostały przeprowadzone na próbie ponad 100 narzędzi datowanych pomiędzy 1000 a 6000 lat temu, z czterech stanowisk z Północnej Ameryki. Analizy wykonano za pomocą plastikowych pasków „Chemstrips”, które reagowały na kontakt z hemem zawierającym żelazo, i zmieniały kolor, co miało wskazywać na obecność krwi. Artefakty te zostały poddane dalszym badaniom za pomocą roztworu o wysokiej zawartości soli, co spowodowało uformowanie kryształów z molekuł krwi. Analiza kryształów wykazała, że krew pochodziła od ludzi i zwierząt: karibu, jeleni, łosi, królików, owiec, niedźwiedzi grizzly, lwów morskich i wiewiórek. Niestety, już po publikacji (Loy 1983) okazało się, że paski zaprojektowane, by wykrywać krew w moczu, dają pozytywny wynik także w efekcie kontaktu z glebą pobraną ze stanowisk archeologicznych. Również wyniki badań kryształów nie zostały potwierdzone w następnych próbach.

Obecnie naukowcy są zgodni, że krew może występować na powierzchni narzędzi, ale dokładniejsze badania mające na celu ustalenie jej pochodzenia nie są powszechnie prowadzone ze względu na wątpliwości co do ich wiarygodności (Brown i Brown 2011).

Włosy różnych zwierząt mogą również przetrwać na artefaktach archeologicznych. Ich obecność jest rozpoznana na zabytkach archeologicznych w trakcie obserwacji pod mikroskopem optycznym w świetle odbitym przy powiększeniach rzędu 100× oraz za pomocą SEM. Struktura włosów – mikroskopijny wzór łusek kutykularnych – umożliwia często ich identyfikację gatunkową (Fullagar i in. 1992). Keratyna (cząsteczka tworząca włos, pióro, róg, kopyto, dziób i pazury) ma bładoniebieską dwójłomność w świetle spolaryzowanym poprzecznie (por. Gunia i in., w tym tomie). Cechy te są widoczne przy powiększeniach rzędu powyżej 200×. Charakter łusek, przekrój poprzeczny i struktury wewnętrzne (np. rdzeń



**Ryc. 8.** Pozostałości fitolitów: a – zdjęcie wykonane pod skaningowym mikroskopem elektronowym; b – zdjęcie preparatu wykonane pod mikroskopem optycznym w świetle przechodzącym. Fot. P. Nadobna (a), I. Sobkowiak-Tabaka (b)

włosa – medulla) niektórych włosów zwierzęcych mogą być charakterystyczne dla danego gatunku (Tóth 2017). Podobnie pióra zawierają widoczne mikroskopowo cechy, takie jak haczyki czy promyki, które są diagnostyczne dla danego taksonu (Robertson 2002).

Warto w tym miejscu wspomnieć o wynikach badań B. Hardy'ego i jego zespołu (2011; 2013; 2020), które wskazały na możliwość zaobserwowania na powierzchni artefaktów krzemiennych używanych przez *Homo sapiens* *nenaderthalensis*, sierści zwierzęcej, fragmentów piór ptasich i rybich łusek. Z kolei badania eksperymentalne przeprowadzone przez Hayesa i Rots (2019) wykazały, że podczas analizy mikroskopowej mogą być rejestrowane również szczątki drewna, włókien kolagenowych (zwierzęcych) i wiele innych szczątków (Zupancich 2016).

## PODSUMOWANIE

Jeszcze kilkanaście lat temu w badaniu proveniencji surowców krzemionkowych przeważało podejście „makroskopowe”, a badania mikroskopowe stosowane były jedynie w odniesieniu do analizy śladów powstałych na skutek użytkowania artefaktów (por. Pyżewicz, w tym tomie). Dziś analiza geochemiczna krzemieni jest szeroko stosowana w analizie źródeł surowca i wykonanych z nich przedmiotów. Niewątpliwie wpływ na to wywarł rozwój techniki, łatwiejszy dostęp do analiz i spadek ich cen. Największym chyba jednak osiągnięciem ostatnich

lat jest stosowanie całego wachlarza metod w badaniu osadów organicznych umożliwiających rekonstrukcję paleodiety, rozpoznanie technicznego wykorzystania roślin, a także gatunków zwierząt, których tusze były opracowywane za pomocą narzędzi krzemiennych.

## LITERATURA

- Alpers-Afil, N., Richter, D., Goren-Inbar, N. 2007. Phantom hearths and controlled use of fire at Gesher Benot Ya'Aqov, Israel. *Paleoanthropology* 1: 1–15.
- Andrew, W. 1965. *Comparative Hematology*. New York.
- Balcer, B. 1976. Position and stratigraphy of flint deposits, development of exploitation and importance of the Świeciechów Flint in prehistory. *Acta Archaeologica Carpathica* 16: 179–199.
- Barton, H., Torrence, R. 2020. Looking ahead, (w:) R. Torrence, H. Barton (red.), *Ancient starch research*. London-New York: Routledge, 217–223.
- Beneš, J., Vondrovský, V., Šída, P., Divišová, M., Kovačiková, L., Kovárník, J., Vavreček, P. 2015. The Rare Deposition of Neolithic (SBK) Grinding Tools and Longhouse 8 from Hrdlovka (Czech Republic): Analysis and 3D Virtual Reconstruction. *Interdisciplinaria Archaeologica. Natural Sciences in Archaeology* 6(2): 161–179.
- Bluszcz, A. 2000. *Datowanie luminescencyjne osadów czwartorzędowych – Teoria, ograniczenia, problemy interpretacyjne*. Gliwice.
- Bobrowski, P. 2009. The exploitation of local sources of flint one the Polish Plain during Final Palaeolithic, (w:) M. Street, N. Barton, T. Terberger (red.), *Humans, Environment and Chronology of the Late Glacial of North European Plain. Proceedings of Workshop 14 (Commission XXXII) of the 15-th. U.I.S.P.P Congress, Lisbon, September*. Mainz, 141–153.

- Bolewski, A., Budkiewicz, M., Wyszomirski, P. 1991. *Surowce ceramiczne*. Warszawa.
- Bordes, F. 1950. Principes d'une méthode d'étude des techniques de débitage et de la typologie du Paléolithique ancien et moyen. *L'Anthropologie* 54: 19–34.
- Brown, T., Brown, K. 2011. *Biomolecular Archaeology. An Introduction*. Chichester.
- Budziszewski, J., Michniak, R. 1983. Z badań nad występowaniem, petrograficzną naturą oraz prahistoryczną eksploatacją krzemieni pasiastych w południowym skrzydle niecki Magoń-Folwarczyska. *Wiadomości Archeologiczne* 49: 151–190.
- Cabanes, D. 2020. Phytolith Analysis in Paleoecology and Archaeology, (w:) A.G. Henry (red.), *Handbook for the Analysis of Micro-particles in Archaeological Samples*. Cham, 255–288.
- Fedorowicz, S. 2005. Korelacja dat TL i OSL próbek z czterech profili lessowych Polski SE i SW. *Przegląd Geologiczny* 53(11): 1047–1050.
- Fullagar, R. 2006. *Archaeology in Practice. A Student Guide to Archaeological Analyses*. Malden.
- Geib, P.R., Smith, S.J. 2008. Palynology and archaeological inference: bridging the gap between pollen washes and past behavior. *Journal of Archaeological Science* 35: 2085–2101.
- Gedl, P. 1999. Granica kreda-trzeciorzęd w zapisie dinocystowym. *Przegląd Geologiczny* 47(4): 391–394.
- Glascock, M.D., Neff, H. 2003. Neutron activation analysis and provenance research in archaeology. *Measurement Science and Technology* 14: 1516–1526.
- Goldberg, P., Macphail, R.I. 2011. *Practical and Theoretical Geoarchaeology*. Oxford.
- Gott, B., Barton, H., Samuel, D., Torrence, R. 2006. Biology of Starch, (w:) R. Torrence, H. Barton (red.), *Ancient starch research*. London-New York, 35–45.
- Hall, J., Higgins, S., Fullagar, R. 1989. Plant residues on stone tools, (w:) W. Beck, A. Clarke, L. Head (red.), *Plants in Australian Archaeology*. Tempus, 1. St Lucia, 136–160.
- Harding, I.C., Trippier, S., Steele, J. 2004. The provenancing of flint artefacts using palynological techniques, (w:) E.A. Walker, F. Wenban-Smith, F. Healy (red.), *Lithics in action: proceedings of Lithic Studies Society Conference Held in Cardiff, September 2000*, red. Lithic Studies Society Occasional Paper 8. Oxford, 78–88.
- Hardy, B.L. 2009. Understanding Stone Tool Function: Methods and Examples from the Aurignacian Levels at Hohle Fels. *Mitteilungen der Gesellschaft für Urgeschichte* 18: 109–121.
- Hardy, B.L., Kay, M., Marks, A.E., Monigal, K. 2001. Stone tool function at the paleolithic sites of Starosele and Buran Kaya III, Crimea: Behavioral Implications. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 98(19): 10972–10977.
- Hardy, B.L., Moncel, M.-H. 2011. Neanderthal Use of Fish, Mammals, Birds, Starchy Plants and Wood 125–250,000 years ago. *PLoS One* 6(8): e23768.
- Hardy, B.L., Moncel, M.-H., Daujeard, C., Fernandes, P., Béarez P., Descloux, E., Chacon Navarro, M.G., Puaud, S., Galotti, R. 2013. Impossible Neanderthals? Making string, throwing projectiles and catching small game during Marine Isotope Stage 4 (Abri du Maras, France). *Quaternary Science Reviews* 80: 23–40.
- Hardy, B.L., Moncel, M.-H., Kerfant, C., Lebon, M., Bellot-Gurlet, L., Mélard, N. 2020. Direct evidence of Neanderthal fibre technology and its cognitive and behavioral implications. *Scientific Reports* 10(1): 4889.
- Harmand, S. 2015. 3.3-million-year-old stone tools from Lomekwi 3, West Turkana, Kenya. *Nature* 521: 360–315.
- Henry, A.G. 2020. Starch granules as Markers of Diet and Behavior, (w:) A.G. Henry (red.), *Handbook for the Analysis of Micro-particles in Archaeological Samples*. Cham, 97–116.
- Hayes, E., Rots, V. 2019. Documenting scarce and fragmented residues on stone tools: an experimental approach using optical microscopy and SEM-EDS. *Archaeological and Anthropological Sciences* 11: 3065–3099.
- Hughes, R.E., Baltrūnas, V., Kulbickas, D. 2011. Comparison of two analytical methods for the chemical characterization of flint from Lithuania and Belarus. *Geologija* 53(2): 69–74.
- Hughes, R.E., Högborg, A., Olausson, D. 2010. Sourcing flint from Sweden and Denmark. A pilot study employing non-destructive energy dispersive X-ray Fluorescence spectrometry. *Journal of Nordic Archaeological Science* 17: 15–25.
- Hughes, R.E., Högborg, A., Olausson, D. 2012. The chemical composition of some archaeologically significant flint from Denmark and Sweden. *Archaeometry* 54(5): 779–795.
- Hughes, R.E., Werra, D.H. 2014. The source of late Mesolithic obsidian recovered from Rydno XIII/1959, Central Poland. *Archeologia Polski* 59: 31–46.
- Hughes, R.E., Werra, D.H., Siuda, R. 2016. On The Chemical Composition of 'Chocolate' Flint from Central Poland. *Archaeologia Polona* 54: 99–114.
- Hughes, R.E., Werra, D.H., Sulgostowska, Z. 2018. On the sources and uses of obsidian during the Palaeolithic and Mesolithic in Poland. *Quaternary International* 468: 84–100.
- Kabaciński, J., Sobkowiak-Tabaka, I. 2016. Newly Discovered Source of "banded Flint" in the Polish Lowland. *Archaeologia Polona* 54: 51–65.
- Kabaciński, J., Sobkowiak-Tabaka, I., Kasztovszky, Zs., Pietrzak, S., Langer, J.J., Biró, K.T., Maróti, B. 2015. Transcarpathian influences in the Early Neolithic of Poland. A case study of Kowalewko and Rudna Wielka sites. *Acta Archaeologica Carpathica* 50: 5–32.

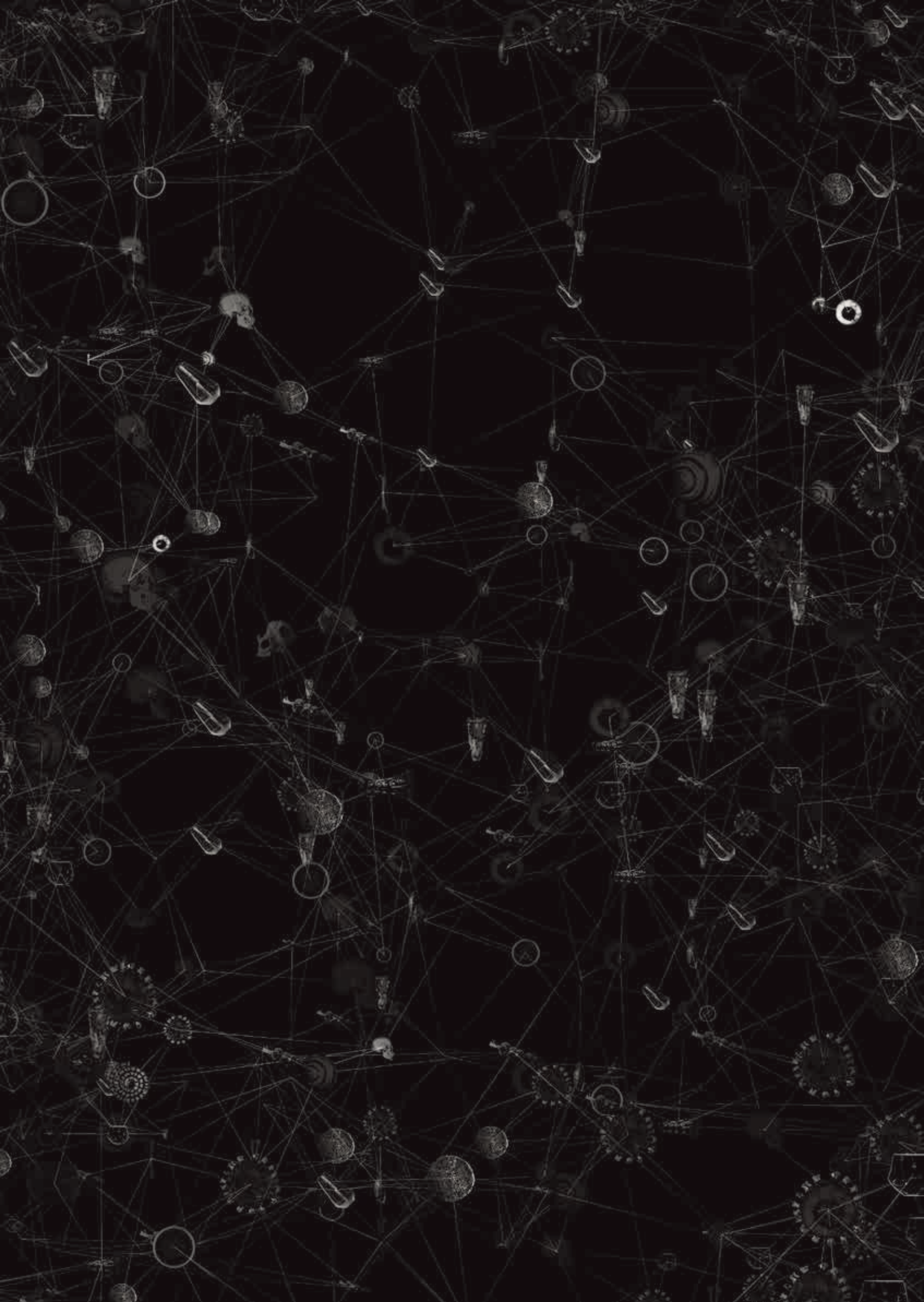


- Kaczanowska, M., Kozłowski, J. K. 1976. Studia nad surowcami krzemiennymi południowej części Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej. *Acta Archaeologica Carpathica* 16: 201–219.
- Kaczanowska, M., Lech, J. 1977. The Flint Industry of Danubian Communities North of the Carpathians. *Acta Archaeologica Carpathica* 17: 5–28.
- Kamińska, J., Mycieleska-Dowgiałło, E., Szymczak, K. 1993. Preliminary results of scanning electron microscopy studies of naturally damaged surfaces of flint artifacts from site Burdeniszki 4, Suwalki voivodship. *Studia Archeologiczne* 22: 3–11.
- Kamińska-Szymczak, J., Szymczak, K. 2002. Powierzchnie świeżych przełamów wybranych surowców krzemiennych z terenów Polski obserwowanych przy użyciu SEM, (w:) B. Matraszek, S. Sałaciński (red.), *Krzemień świeciechowski w pradziejach. Materiały z konferencji w Ryń, 22–24.05.2000, Studia nad gospodarką surowcami krzemiennymi w Pradziejach* 4, Warszawa, 297–306.
- Kasztovszky, Z., Biró, K.T., Markó, A., Dobosi, V. 2008. Cold neutron prompt gamma activation analysis – a non-destructive method for characterization of high silica content chipped stone tools and raw materials. *Archaeometry* 50(1): 12–29.
- Koller, J., Baumer, U., Mania, D. 2001. High-tech in the Middle Palaeolithic: Neandertal-manufactured pitch identified. *European Journal of Archaeology* 4: 385–397.
- Kozłowski, J.K., Pawlikowski, M. 1989. Investigations into the northern lithic raw materials in Upper Silesia, Poland. *Prace Archeologiczne* 43: 17–46.
- Kozowyk, P.R.B., Soressi, M., Pomstra, D., Langejans, G.H.J. 2017. Experimental methods for the Palaeolithic dry distillation of birch bark: implications for the origin and development of Neandertal adhesive technology. *Scientific Reports* 7(8033): 1–9.
- Krajcarz, M.T., Krajcarz, M. 2009. The outcrops of Jurassic flint raw materials from south-western margin of the Holy Cross Mountains. *Acta Archaeologica Carpathica* 44: 183–19
- Krajcarz, M.T., Krajcarz, M., Sudoł, M., Cyrek, K. 2012. From far or from near? Sources of Kraków-Częstochowa banded and chocolate silicite raw material used during the stone age in Biśnik Cave (southern Poland). *Anthropologie* 50(4): 411–425.
- Król, P. (red.). 2009. *Historia krzemienia*. Kielce.
- Krukowski, S. 1920. Pierwociny krzemieniarskie górnictwa, transportu i handlu w holocenie Polski. Wnioski z właściwości surowców i wyrobów. *Wiadomości Archeologiczne* 5: 185–206.
- Krukowski, S. 1923. Sprawozdanie z działalności państwowego konserwatora zabytków prehistorycznych na okrąg kielecki w r. 1922. *Wiadomości Archeologiczne* 8: 64–84.
- Kufel-Diakowska, B., Miazga, B., Łucejko, J., Ribechini, E., Li, W. 2019. Sickles of the Funnel Beaker culture in the light of use-wear and residue analysis. *Sprawozdania Archeologiczne* 71: 219–242.
- De Latour, R. 2009. O skałce krzemiennej słów kilka, (w:) P. Król (red.), *Historia krzemienia*. Kielce, 75–87.
- Lech, J. 1980. Geologia krzemienia jurajskiego-podkrakowskiego na tle innych skał krzemionkowych. Wprowadzenie do badań z perspektywy archeologicznej. *Acta Archaeologica Carpathica* 20: 163–228.
- Liu, L., Wang, J., Levin M.J., 2017. Usewear and residue analyses of experimental harvesting stone tools for archaeological research. *Journal of Archaeological Science: Reports* 14: 439–453.
- Longo, L., Skakun, N.N., Pantyukhina, I.E., Terekhina, V.V., Sorrentino, G. 2021. Aurignacian grinding stone from Surein I (Crimea): “trace-ing” the roots of starch-based diet. *Journal of Archaeological Science: Reports* 38: 102999.
- Loy, T. H. 1983. Prehistoric blood residues: detection on tool surfaces and identification of species of origin. *Science* 220: 1269–1271.
- Mazza, P.P.A., Martini, F., Sala, B., Magi, M., Colombi, M.P., Giachi, G., Landucci, F. 2006. A new Palaeolithic discovery: Tar-hafted stone tools in a European Mid-Pleistocene bone-bearing bed. *Journal of Archaeological Science* 33(9):1310–1318.
- Michniak, R. 1980. Petrografia i geneza ciemnych krzemieni z dolnoturońskich osadów okolic Ożarowa nad środkową Wisłą. *Archiwum Mineralogiczne* 36: 83–106.
- Miras, Y., Ejarque, A., Barbier-Pain, D., Corbinau, R., Ledger, P. i in. 2018. Advancing the analysis of past human/plant relationships: methodological improvements of artefact pollen washes. *Archaeometry* 60(5): 1106–1121.
- Miras, Y., Barbier-Pain, D., Ejarque, A., Allain, E., Allué, E. i in. 2020. Neanderthal plant use and stone tool function investigated through non-pollen palynomorphs analyses and pollen washes in the Abri du Maras, South-East France. *Journal of Archaeological Science: Reports* 33: 102569.
- Moroni, B., Petrelli, M. 2005. Geochemical characterization of flint artifacts by inductively coupled plasma mass spectrometry with laser sampling (LA-ICP-MS): Results and prospects. *Mediterranean Archaeology and Archaeometry* 5(2): 49–62.
- Muszyński, M. 2008. Skały krzemionkowe, (w:) A. Manecki, M. Muszyński (red.), *Przewodnik do petrografii*. Kraków, 330–349.
- Nachyła, O. 2020. Obsydian i szkło w chirurgii. *Szkło i ceramika* 2(2020): 22–25.
- Pawlik, A. F., Thissen, J. P. 2011. Hafted armatures and multi-component tool design at the Micoquian site of Inden-Altdorf, Germany. *Journal of Archaeological Science* 38: 1699–1708.

- Pawlikowski, M. 1989. On the necessity of standarization of petrological investigations in archaeology, (w:) J.K. Kozłowski (red.), „Northern” (erratic and Jurassic) flint of south Polish origin in the Upper Palaeolithic of Central Europe. Kraków, 7–15.
- Pelisiak, A. 1987. The flint raw material from the central part of the Polish Jura and its utilization in prehistory, (w:) K. Biró (red.), *Proceeding of the 1th International Conference on Prehistoric Flint Mining and Lithic Raw Material Identification in the Carpathian Basin*. Budapest, 123–127.
- Pettitt, P.B., Rockman, M., Chenery, S.R. 2012. The British Final Magdalenian: Society, settlement and raw material movements revealed through LA-ICP-MS trace element analysis of diagnostic artefacts. *Quaternary International* 272–273: 275–287.
- Pieńkowski, G., Gutowski, J. 2004. Geneza krzemieni górnego Oksfordu w Krzemionkach Opatowskich. *Tomy Jurajskie* 2, 29–36.
- Piperno, D.R. 2006. *Phytoliths: a comprehensive guide for archaeologists and paleoecologists*. Lanham.
- Polcyn, M., Polcyn, I., Wasylkowa, K. 2005. Zastosowanie analizy fitolitów w botanice, (w:) M. Lityńska-Zajac, K. Wasylkowa (red.), *Przewodnik do badań archeobotanicznych*. Poznań, 372–385.
- Power, R.C., Salazar-García, D.C., Rubini, M., Darlas, A., Harvati, K., Walker, M., Hublin, J.-J., Henry, A.G. 2018. Dental calculus indicates widespread plant use within the stable Neanderthal dietary niche. *Journal of Human Evolution* 119: 27–41.
- Přichystal, A. 2009. *Kamenné suroviny v pravěku východní části střední Evropy*. Brno.
- Přichystal, A. 2013. *Lithic Raw Materials in Prehistoric Times of Eastern Central Europe*. Brno.
- Renfrew, C., Bahn, P. 2002. *Archeologia. Teorie, metody, praktyka*. Warszawa.
- Revedin, A., Aranguren, B., Becattini, R., Longo, L., Marconi, M., Mariotti Lippi, M. i in. 2010. Thirty thousand-year-old evidence of plant food processing. *PNAS* 107(44): 18815–18819.
- Révay, Z., Belgya, T. 2004. Principles of PGAA method, (w:) G.L. Molnár (red.), *Handbook of Prompt Gamma Activation Analysis with Neutron Beams*. Dordrecht- Boston-New York, 1–30.
- Richter, D. 2007. Advantages and Limitations of Thermoluminescence Dating of Heated Flint from Paleolithic Sites. *Geoarchaeology: An International Journal* 22(6): 671–683.
- Richter, D., 2009. Burnt flint artifacts: A new Thermoluminescence dating technique. *Preistoria Alpina* 44: 39–43.
- Richter, D., Krbetschek M. 2007. A New Thermoluminescence Dating Technique for Heated Flint. *Archaeometry* 48(4): 695–705.
- Robertson, G. 2002. Birds of a feather stick: feather residues on stone artifacts from Deep Creek Shelter, New South Wales, (w:) S. Ulm, C. Westcott, J. Reid, et al. (red.), *Barriers, Borders, Boundaries: Proceedings of the 2001 Australian Archaeological Association Annual Conference*. Tempus, 7. St Lucia, 175–82.
- Rozmus, D., 2020. *Powrót do Laetoli. Z rozważań nad początkami człowieka i prawa*. Kraków.
- Ryan, Ph. 2014. Phytolith Studies in Archaeology. *Encyclopedia of Global Archaeology*. doi 10.1007/9781441904652\_2258 (dostęp 20.07.2020).
- Samsonowicz, J. 1923. O złożach krzemieni w utworach jurajskich północno-wschodniego zbocza Gór Świętokrzyskich. *Wiadomości Archeologiczne* 8: 17–24.
- Schild, R. 1971. Lokalizacja prahistorycznych punktów eksploatacji krzemienia czekoladowego na północno-wschodnim obrzeżeniu Gór Świętokrzyskich. *Folia Quaternaria* 39: 1–61.
- Schild, R. 1976. Flint mining and trade in Polish prehistory as seen from the perspective of the chocolate flint of central Poland. A second approach. *Acta Archaeologica Carpathica* 16: 147–177.
- Schild, R., Sulgostowska, Z. (red.) 1997. *Man and Flint. Proceedings of the VIIth International Flint Symposium, Warszawa-Ostrowiec Świętokrzyski, September 1995*. Warszawa.
- Schulz, W. 2003. *Geologischer Führer für den norddeutschen Geschiebesammler*. Schwerin.
- Skakun, N., Pantyukhina, I. Terekhina, V., Vostretso, V.Y. 2017. Use-wear and residue analysis of stone tools used by earliest farmers at the Klerk-5 site in Primorye (Russia) (preliminary results). *Cuadernos de prehistoria y arqueología de la Universidad de Granada* 27: 111–120.
- Skakun, N.N., Terekhina, V., Longo, L., Pantyukhina, I. 2019. Contemporary use-wear studies in Archaeology, (w:) Yu. A. Vinogradov, S.A. Vasiliev, K.N. Styepanova (red.), *The Past of Humankind as seen by the Petersburg Archaeologists at the Dawn of the Millenium (to the Centennial of the Russian Academic Archaeology)*. Sankt Petersburg, 157–165.
- Smith, P.R., Wilson, M.T. 2005. Blood Residues in Archaeology, (w:) D.R. Brothwell, A.M. Pollard (red.), *Handbook of Archaeological Sciences*. Chichister, 313–322.
- Sobkowiak-Tabaka, I., Kasztovszky, Z., Kabaciński, J. Biró, K., Maróti, B., Gmeling, K. 2015. Transcarpathian contacts of the Late Glacial Societies of the Polish Lowlands. *Przegląd Archeologiczny* 63: 5–28.
- Sobkowiak-Tabaka, I., Werra, D.H., Hughes, R., Siuda, R. 2016. Erratic Flint from Poland: Preliminary results of petrographic and geochemical analyses. *Archaeologia Polona* 54: 67–82.
- Sudoł-Porczyk, M., Budziszewski, J., Krajcarz, M.T., Jakubczak, M., Szubski, M. 2018. The Chocolate Flint Mines in the Udorka Valley (Częstochowa Upland) – a Preliminary Report on the Field and Lidar Surveys, (w:)

- D.H. Werra, M. Woźny (red.), *Between History and Archaeology Papers in honour of Jacek Lech*. Oxford, 89–102.
- Sulgostowska, Z. 2005. *Kontakty społeczności późnopałeolitycznych i mezolitycznych między Odrą, Dźwiną a Dnieprem. Studium dystrybucji wytworów ze skał krzemionkowych*. Warszawa.
- Sulgostowska, Z. 2016. Krzemieni kredowe – pułapka dla początkujących (i nie tylko badaczy), (w:) W. Borkowski, B. Sałacińska, S. Sałaciński (red.), *Krzemień narzutowy w pradziejach. Materiały z konferencji w "Mądralinie" w Otwocku, 18-20 października 2010*. Warszawa, 11–20.
- Tóth, M. 2017. *Hair and Fur Atlas of Central European Mammals*. Budapest.
- Tribolo, C., Mercier, N., Selo, M., Valladas, H., Loron, J.-L., Reyss, J.-L., Henshilwood, C., Sealy, J., Yates, R. 2006. TL Dating of Burnt Lithics From Blombos Cave (South Africa): Further Evidence For The Antiquity of Modern Human Behaviour. *Archaeometry* 48(2): 341–357.
- Yang, Z., Ma, Z., Li, Q., Perry, L., Huan, X., Wan, Z., Li, M., Zheng, J. 2014. Experiments with lithic tools: understanding starch residues from crop harvesting. *Archaeometry* 56(5): 828–840.
- Valladas, H. 1978. Thermoluminescence dating of burned stones from a prehistoric site. *PACT* 2: 180–184.
- Vang Petersen, P. 2008. *Flint fra Danmarks oldtid*. Vordingborg.
- Van Peer, P., Fullagar, R., Stokes, S., Bailey, R., Steenhoudt, F., Geerts, A., Vanderbeken, T., De Dapper, M., Geus, F. 2003. The Early to Middle Stone Age Transition and the Emergence of Modern Human Behaviour at site 8-B-11, Sai Island, Northern Sudan. *Journal of Human Evolution* 45: 187–193.
- Werra, D., Siuda, R., Grafka, O., Segit, T. 2015. Pierwsze próby charakterystyki geochemicznej i palinologicznej krzemienia „czekoladowego” z kopalni Wierzbica „Zeł”, pow. Radom. *Acta Universitatis Nicolai Copernici. Archeologia* 34: 249–270.
- Werra, D.H., Woźny, M., Brandl, M., Hauzenberger, Ch. 2019. History of research and flint exploitation in Żelków (South Poland) – gunflint workshop – the use and meaning of flint in modern times. *Anthropologica et Præhistorica* 128: 57–69.
- Zupancich, A., Nunziante-Cesaro, S., Blasco, R., Rosell, J., Cristiani, E., Venolitti, F. i in. 2016. Early evidence of stone tool use in bone working activities at Qesem Cave, Israel. *Scientific Reports* 6: 37686.









# Traseologia

Katarzyna Pyżewicz

---

## CZYM SĄ BADANIA TRASEOLOGICZNE?

Studia traseologiczne od lat wykorzystywane są w archeologii na potrzeby rozpoznania funkcji materiałów pradziejowych. Znakomitym źródłem do przeprowadzania analiz są materiały krzemienne, zarówno ze względu na fakt, że są to najbardziej powszechnie występujące wytwory z epoki kamienia, ale mają też duży potencjał w kontekście interpretacji powstałych na nich śladów. Na podstawie analiz traseologicznych można odpowiedzieć przede wszystkim na pytania dotyczące zastosowania narzędzi czy też ich roli wśród minionych społeczności. Obserwacje makro- i mikroskopowe pozwalają na odpowiedzi na pytania:

- Jakie elementy technik były wykorzystane przy kształtowaniu narzędzi (np. posilkowano się tłukami z poroża, drewna)?
- Jaką funkcję pełnił dany artefakt?
- Jakie działania fizyczne były podejmowane przy użyciu narzędzi (np. skrobanie, cięcie albo ruchy poprzeczne względem krawędzi pracującej)?
- Jakiego rodzaju surowców opracowywano danymi okazami (np. rośliny, skóra lub twardy/miękki materiał)?
- Czy artefakty były w oprawach, jak mogły one wyglądać, z czego były zrobione?

- Jakiego typu czynniki podepozycyjne miały wpływ na obecny obraz artefaktu, czego efektem są złamania, konkretny rodzaj patyny?

W trakcie analiz makro- i mikroskopowych narzędzi krzemiennych można przybliżyć biografię poszczególnych wytworów, od sposobu ich ukształtowania, poprzez kolejne etapy użytkowania, napraw, aż do warunków zalegania, a niekiedy też sposobów pozyskania i przechowywania (w warunkach muzealnych czy też gabinetowych). Ślady, które powstają w wyniku wymienionych czynników, różnią się między sobą, co pozwala na ich identyfikację.

## HISTORIA BADAŃ TRASEOLOGICZNYCH

Badania traseologiczne w rozpoznaniu funkcji narzędzi krzemiennych mają długą historię. Pionierami na tym polu byli Siergiej A. Semenov, który ukształtował podstawy metody, a informacje te rozpowszechnione zostały w publikacji *Prevobytnaja technika* (1957; wersja anglojęzyczna jest z 1964 r.), oraz Lawrence H. Keeley (1980), który uszczegółowił i usystematyzował rodzaje poszczególnych śladów, a także zaczął stosować analizy z wykorzystaniem mikroskopów o dużym powiększeniu. Ze względu na zróżnicowane procedury i sprzęt optyczny stosowane przez obu badaczy



wyróżniano szkoły „wschodnią” i „zachodnią”, co powiązane było z analizami traseologicznymi okazów przy zastosowaniu małych (*low-power*) i dużych powiększeń (*high-power*). W kolejnych latach nastąpił olbrzymi rozwój badań traseologicznych. Wypracowano szczegóły podstaw metodycznych oraz podjęto kolejne badania eksperymentalne w celu powiększenia bazy referencyjnej, uszczegółowiono charakterystykę śladów makro- i mikroskopowych, zastosowano coraz to lepszy sprzęt optyczny, a także zaczęto stosować analizy traseologiczne w odniesieniu do wielu, zróżnicowanych chronologicznie i regionalnie, inwentarzy krzemienionych (szerzej o definicji, historii badań i metodyce m.in. Vaughan 1985: 3-4; Juel Jensen 1988; 1994; Winiarska-Kabacińska 1998; Korobkova 1999: 11-16; Odell 2001; 2004: 136-173; Andrefsky 2005: 202-210; Rots 2010; Van Gijn 1990; 2010; 2014; Fullagar 2014; Marreiros i in. 2014c).

Z kolei w Polsce zainteresowanie badaniami traseologicznymi pojawiło się w latach 70. XX w. (m.in. Ginter i Kozłowski 1975; Schild i in. 1975; Balcer 1975; Pianowski 1977; Drobniewicz 1978; 1979; Balcer i Schild 1978a; 1978b; 1980; Bąbel i Budziszewski 1978). Natomiast ich rozkwit zaczął się od lat 90. XX w., co wiązało się z nowymi możliwościami rozwoju badań, w tym instrumentarium mikroskopowego. Do grona traseologów obecnie zaliczają się: Jolanta Małecka-Kukawka, Małgorzata Winiarska-Kabacińska, Jolanta Kamińska-Szymczak, Grzegorz Osipowicz, Bernadeta Kufel-Diakowska, Katarzyna Pyżewicz, Marcin Chłoń, Piotr Mączyński i Damian Wolski. Wymienieni badacze zajmują się przede wszystkim problematyką wykorzystania narzędzi krzemienionych od środkowego paleolitu aż do epoki brązu, które pozyskane zostały z terenów ziem polskich, ale niekiedy też i z innych rejonów (szerzej o historii i metodyce badań traseologicznych z uwzględnieniem polskich dokonań wraz z przykładami realizacji m.in. Małecka-Kukawka 2001; 2005; 2012; 2017; Osipowicz 2010; 2017; Pyżewicz 2013b; Kufel-Diakowska 2015).

Obecnie analizy traseologiczne stanowią jeden z podstawowych sposobów stosowanych w trakcie opracowywania materiałów krzemienionych. Powstały również podręczniki dla adeptów tej metody, jak np. *Use-Wear and Residue Analysis in Archaeology* (2014b), którego autorami są João Manuel Marreiros, Juan F. Gibaja Bao i Nuno

Ferreira Bicho, a w języku polskim tłumaczona przez Jolantę Małecką-Kukawka publikacja Galiny F. Korobkovej *Narzędzia w pradziejach. Podstawy badania funkcji metodą traseologiczną* (1999).

## ROLA BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

W celu ustalenia genezy zaobserwowanych śladów na artefaktach pradziejowych należy odnieść się do bazy referencyjnej. Wiąże się to z przeprowadzeniem serii eksperymentów z użyciem narzędzi krzemienionych, których scenariusze tworzone są na podstawie: studiów adekwatnych źródeł archeologicznych, informacji z doświadczeń innych badaczy, wcześniej nabytej wiedzy praktycznej, czy też z inspiracji analogiami etnograficznymi (ryc. 1) (szerzej o podstawach badań eksperymentalnych m.in. Malina 1983; Coles 1977; 1997: 308-309; Whittaker 1999: 282-283; Hurcombe 2004; Keleşerborn 2005; Shimada 2005; Outram 2008; Comis 2010; Ferguson 2010; Petersson i Narmo 2011; Marreiros i in. 2014b). Podejmowane są dwa typy testów doświadczalnych:

- eksperymenty aktualistyczne, czyli badania terenowe mające na celu przeprowadzanie symulacji konkretnych czynności lub sytuacji, które mogłyby zaistnieć w pradziejach. W tych badaniach zakłada się, że zastosowanie replik pradziejowych wytworów prowadzi do sformułowania ogólnych analogii w procesie interpretacji danych archeologicznych;
- eksperymenty laboratoryjne, czyli badania skupiające się na zagadnieniach związanych wyłącznie ze szczegółowym określeniem charakteru śladów, w aspekcie obrabianego materiału i rodzaju wykonywanej pracy.

W efekcie realizacji obu typów badań, otrzymuje się zestaw narzędzi krzemienionych pokrytych śladami różnego typu. Dzięki ich obserwacji makro- i mikroskopowej oraz porównaniem do zmian odnotowanych na artefaktach pradziejowych możliwa jest szczegółowa interpretacja zabytków. Studia doświadczalne, których efektem jest stworzenie bazy porównawczej, skupione są na kwestiach związanych ze sposobami obróbki różnego rodzaju surowców krzemienionych i materiałów organicznych (np. poroże, drewno) oraz wykonywaniem z nich narzędzi, a przede wszystkim ze strategiami ich wykorzystania w pradziejach, charakterem



**Ryc. 1.** Schemat postępowania w studiach traseologicznych

poszczególnych czynności, które mogły realizować poszczególne ugrupowania. Dodatkowe testy eksperymentalne odnoszą się do procesów podepozycyjnych wpływających na obecny obraz okazów krzemiennych.

## PROCEDURA BADAWCZA

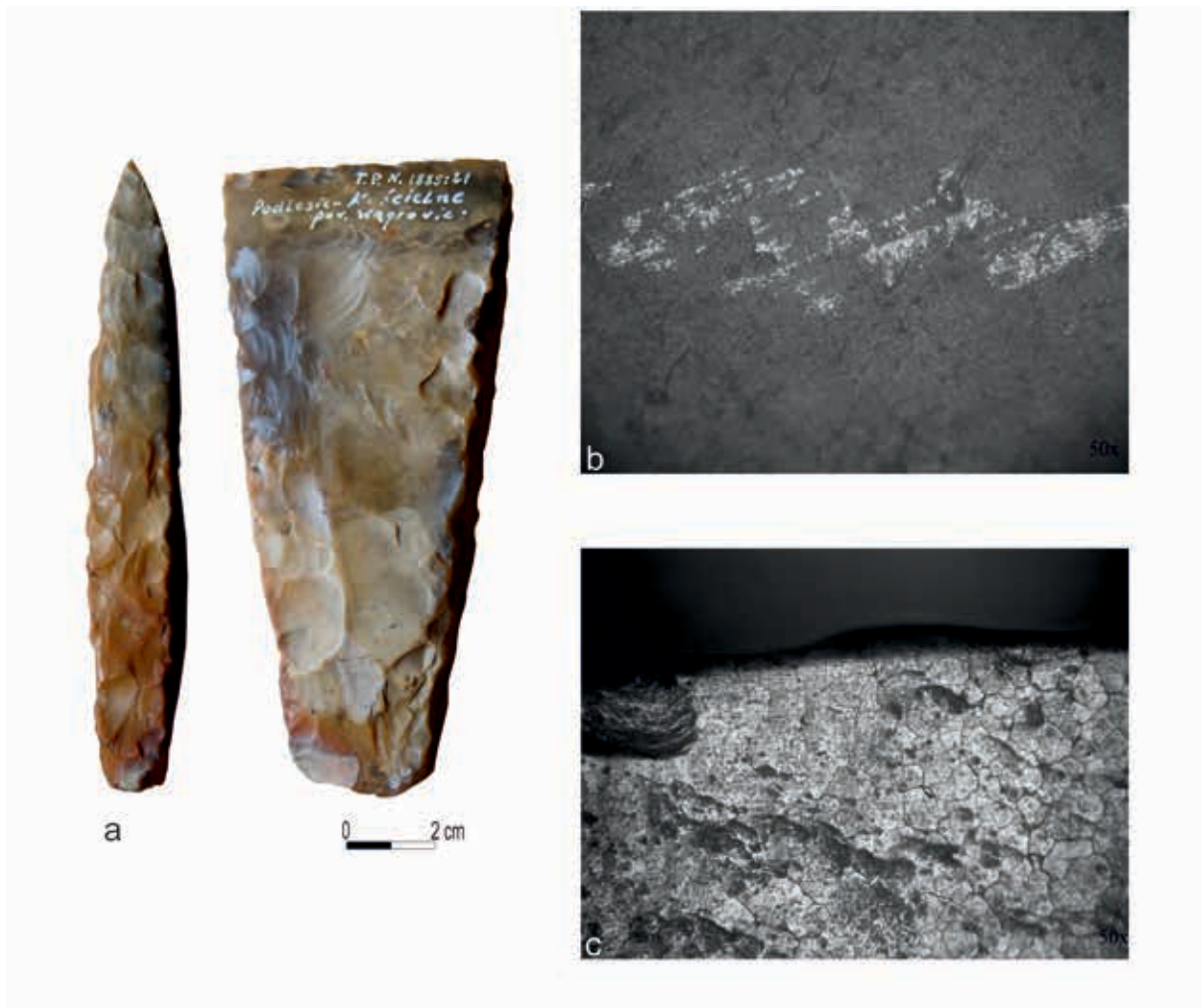
W trakcie analiz traseologicznych wykorzystywane są mikroskopy stereoskopowe, metalograficzne oraz cyfrowe, a także niekiedy skaningowe elektronowe i konfokalne. W wielu przypadkach badacze wykorzystują jednocześnie różne rodzaje sprzętu, odnosząc się do danych płynących z obserwacji przy zastosowaniu „małych” i „dużych” powiększeń (literatura w poszczególnych częściach rozdziału).

Pradziejowe materiały krzemienne przeznaczone do analiz różnią się stanem zachowania, który wynika z działalności czynników podepozycyjnych, wcześniejszym sposobem ich traktowania, przechowywania. To ma duży wpływ na jakość wyników badań traseologicznych (m.in. Plisson i Mauger 1988; Van Gijn 1990: 51-53; Levi Sala 1993; 1996; Winiarska-Kabacińska 1998; Burroni i in. 2002; Fullagar 2014; Marreiros i in. 2014c).

Ważne jest, aby w trakcie pozyskiwania podczas badań terenowych i czyszczenia artefaktów unikać narzędzi, które niszczą pierwotną formę okazów. Przykładowo, w wyniku zbyt intensywnego

użycia szpachelek albo innego sprzętu metalowego w trakcie eksploracji i czyszczenia okazów krzemiennych ich powierzchnie mogą zostać zarysowane, wyświecone, a krawędzie wykruszone i obłamane (ryc. 2b). Powoduje to zniszczenie potencjalnych śladów makro- i mikroskopowych oraz ogólnie utrudnienie analiz traseologicznych. Dlatego też zaleca się ostrożność w trakcie pozyskania i wstępnego opracowania materiałów krzemiennych.

Na stan zachowania materiałów i ich przydatność do badań traseologicznych ma również wpływ sposób przechowywania zabytków w instytucjach. Przechowywanie dużej liczby okazów krzemiennych w jednym opakowaniu powoduje, że okazy te narażone są na ciągły kontakt, obijanie się nawzajem, w efekcie czego mogą powstawać złamania i retusze podepozycyjne, „gabine-towe”. Utrudnienia w analizach mikroskopowych powodują również wcześniej podjęte prace konserwatorskie, jak np. wykonane napisy – numery inwentarzowe i nazwy stanowisk, które niejednokrotnie pokryte są lakierem. W efekcie część powierzchni krzemiennych jest niedostępna do analiz. Dobrze ukazuje to przykład siekier, które przechowywane w muzeach bardzo często mają zalakierowaną całą jedną stronę ostrza, potencjalną część pracującą (ryc. 2a). W przypadku „starych” znalezisk, zastosowane środki konserwatorskie są na tyle mocne, że nie jest możliwe ich zmycie, usunięcie. Dlatego też ważne jest, aby dane inwentarzowe



**Ryc. 2.** Przykłady zniszczeń podepozycyjnych: a – polakierowane i opisane ostrze siekiery, miejsce potencjalnego występowania śladów użytkowych; b – ślady kontaktu z metalowym narzędziem widoczne na powierzchni pradziejowego artefaktu; c – ślady użytkowe zniszczone poprzez przepalenie neolitycznego narzędzia krzemiennego. Fot. K. Pyżewicz, W. Gruźdź

umieszczać w miejscach, które nie są potencjalnymi do zachowania się śladów użytkowych lub też stosować takie lakiery czy też markery, które można na czas analiz usunąć. Podczas opracowywania materiałów krzemiennych używa się kleju do łączenia poszczególnych elementów, co jest szczególnie powszechne w realizacji metody składek i to również przysparza kolejnych problemów w identyfikacji śladów. W takich przypadkach powinno się stosować kleje całkowicie rozpuszczalne w wodzie, które nie pozostawiają trwałych śladów na artefaktach i umożliwiają rozklejenie materiałów, w celu obserwacji całych powierzchni. Także traktowanie okazów środkami chemicznymi, jak np. długotrwałe przetrzymywanie w wodnym roztworze kwasu octowego w celu oczyszczenia powierzchni z nalotów wapiennych, niszczy strukturę znamion użytkowych. Również zaznaczanie na

artefakcie elementów ołówkiem, jak np. rysowanie po graniach w celu ułatwienia wykonania dokumentacji rysunkowej, może powodować problemy z odczytem śladów. Warto zwrócić uwagę na jeszcze na jeden problem, który odnosi się głównie do materiałów odkrytych lata temu. Długotrwałe i częste dotykane artefaktów może spowodować powstawanie śladów podobnych do tych, które są np. formowane podczas trzymania narzędzi w trakcie podejmowanych aktywności przez społeczności pradziejowe.

Podsumowując, warto zwracać uwagę na sposób eksploracji i wydobywania artefaktów krzemiennych, a także ich mycia i inwentaryzacji – należy unikać inwazyjnych sprzętów i środków chemicznych. Najlepiej przechowywać okazy w mniejszych grupach w jednym opakowaniu, np. woreczkach strunowych. Idealnie byłoby wyselekcjonować



przynajmniej narzędzia formalne, ale też i produkty debitażu odznaczające się widocznymi wykruszeniami, potencjalnie o charakterze użytkowym.

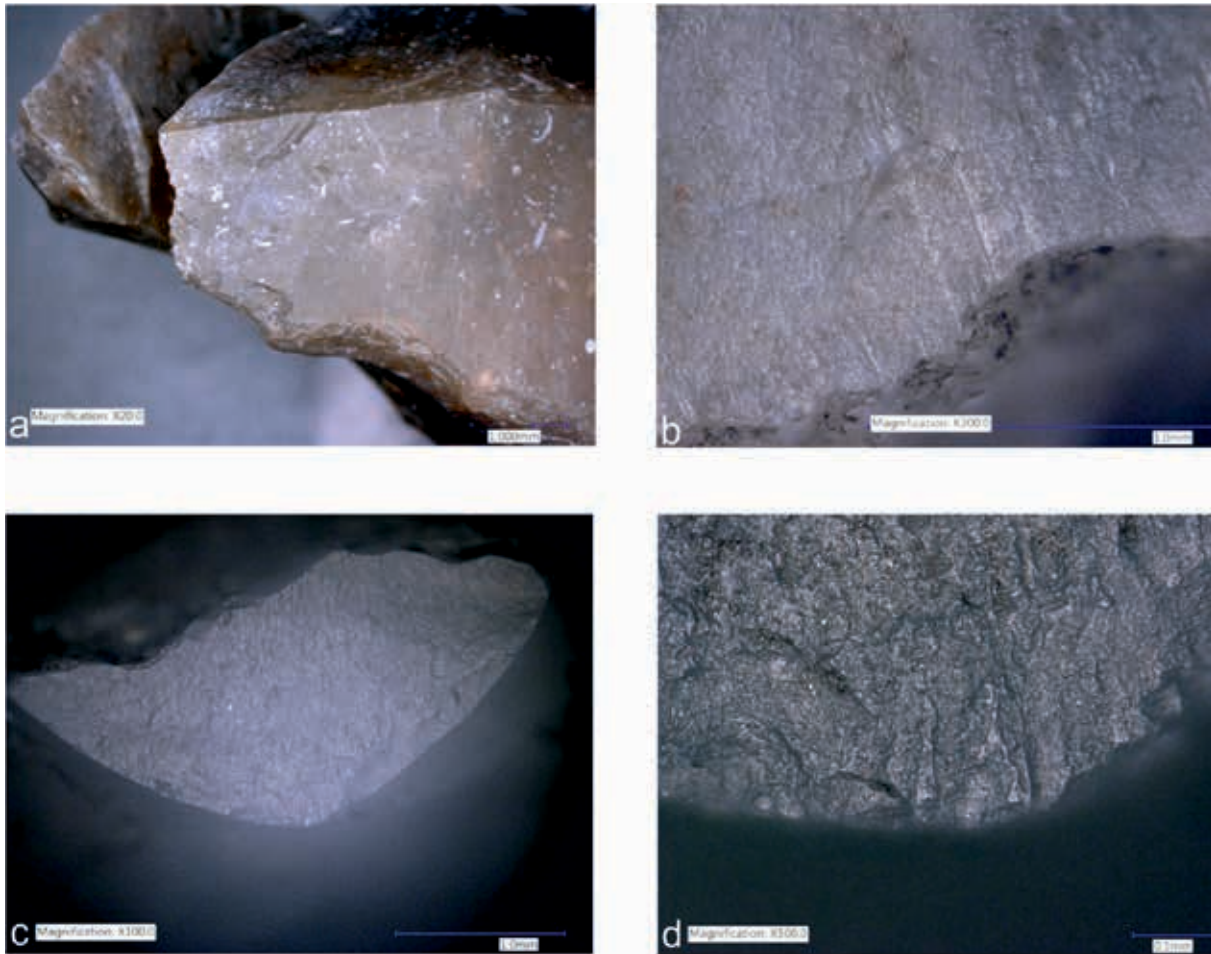
W trakcie przygotowywania materiałów krzemiennych do przekazania do analiz traseologicznych warto się wcześniej skonsultować z osobą, która będzie te analizy wykonywać. Można przekazać cały zbiór materiałów (to oczywiście jest sytuacja idealna), jednak ze względu na pracochłonność badań mikroskopowych analizy zazwyczaj podejmowane są na wyselekcjonowanej grupie artefaktów. Tego wyboru najlepiej dokonać wspólnie z traseologiem. Selekcja materiałów zależy od stanu zachowania zabytków – do analiz traseologicznych nie nadają się zabytki mocno zniszczone podepozycyjnie, co ma związek występowaniem intensywnej patyny czy też przepaleniem (ryc. 2c), oraz od stawianych pytań badawczych. Przykładowo, innego typu materiały zostaną wybrane w kontekście rozpoznania funkcji nieretuszowanych wiórów, a innego w przypadku interpretacji formalnych drapaczy czy narzędzi użytych do produkcji form krzemiennych. Należy dodać, że na podstawie oglądu makroskopowego dokonuje się pierwszego wyboru. Z kolei na następnych etapach, w trakcie wstępnych analiz mikroskopowych, odrzucane są kolejne artefakty, które ze względu na efekty działalności czynników podepozycyjnych nie są przeznaczone do szczegółowych badań. Warto też przekazać traseologowi zestaw wykonanych rysunków lub zdjęć artefaktów, co ułatwi prace dokumentacyjne związane z zaznaczeniem miejsc występowania poszczególnych śladów użytkowych, technologicznych, od oprawy, ale też punktów wykonania zdjęć mikroskopowych.

Przed przystąpieniem do analiz należy w sposób odpowiedni przygotować materiały. Okazy zabytkowe należy ostrożnie przemyć, jednak zalecana jest wstępna obserwacja powierzchni krzemiennych w celu identyfikacji potencjalnych pozostałości organicznych lub nieorganicznych, których zaleganie można wiązać z działalnością człowieka pradziejowego (szerzej o problematyce i metodyce analiz rezydów m.in. Anderson 1980; Marreiros i in. 2014c; Fullagar 2014; Langejans i Lombard 2014; Cnuts i Rots 2018). W celu oczyszczenia powierzchni krzemiennych zabytki można poddać kąpieli w ciepłej wodzie, niekiedy wraz z dodatkiem detergentu. Stosuje się też myjki ultradźwiękowe. Najważniejszy etap jest związany ze zmyciem śladów,

które powstały współcześnie. Przed obserwacją mikroskopową artefakt dobrze jest przemyć acetonem lub etanolem w celu usunięcia śladów powstałych współcześnie w wyniku kontaktu ze skórą rąk. Zazwyczaj czyszczenie zabytków jest ograniczone do niezbędnych czynności, rezygnuje się z bardziej skomplikowanych procedur i radykalnych środków, gdyż mogą one powodować niszczenie potencjalnych śladów i pozostałości (por. Keeley 1980: 10-11; Plisson i Mauger 1988; Evans i Donahue 2005; Marreiros i in. 2014c; Fullagar 2014). Jedyne w przypadku przygotowania materiałów eksperymentalnych można zastosować bardziej drażniące substancje (jak np. roztwór kwasu solnego), ze względu na to, że „świeże” pozostałości zalegające na powierzchniach krzemiennych bywają trudne do usunięcia.

Zarówno wstępne, jak i szczegółowe analizy traseologiczne zazwyczaj wykonuje się przy zastosowaniu mikroskopów stereoskopowych, metalograficznych, jak i cyfrowych (szerzej m.in. Fullagar 2014; Marreiros i in. 2014c, tam dalsza literatura dotyczące metodyki i teorii powstawania śladów). Instrumenty te powinny być dostosowane do pracy w świetle odbitym. Zakres powiększeń zazwyczaj waha się od kilkunastu do 500×, aczkolwiek powszechnie stosuje się powiększenia 50×, 100×, 200× i 300×. Wstępnie do oceny charakteru i przydatności poszczególnych artefaktów wykorzystuje się analizę przy zastosowaniu małych powiększeń. W dalszej kolejności wykonuje się szczegółowe obserwacje i interpretacje śladów:

- wykruszenia, czyli wszelkiego rodzaju negatywy o zróżnicowanej morfologii, występują wzdłuż krawędzi, niekiedy głęboko zachodzą na powierzchnie krzemienne;
- złamania, mogą być poprzeczne, skośne czy też podłużne do osi symetrii okazu, a ich szczegółowa morfologia powiązana jest z ich genezą;
- zaokrąglenia, czyli zaoblania poszczególnych wystających części, krawędzi czy też grani międzynegatywowych;
- ślady liniowe, różnego typu zarysowania oraz bruzdy, zróżnicowane pod względem szerokości, długości, głębokości oraz przekroju poprzecznego; również wyświecenia mogą odznaczać się charakterem liniowym;
- wyświecenia, czyli wybłyszczenia powierzchni krzemiennej, zróżnicowane pod względem morfologii, intensywności i rozprzestrzenienia. Należy podkreślić, że ostatni z wymienionych śladów jest jednym z najważniejszych typów.



**Ryc. 3.** Znamiona technologiczne: a-b – ślady użycia tłuka mineralnego widoczne na artefaktach schyłkowopaleolitycznych (stan. Żuławka 13); c-d – ślady użycia narzędzia z poroża/kości widoczne na piętku mezolitycznego wióra (stan. Żuławka 13). Fot. K. Pyżewicz

Wyświecenia takie powstają w wyniku dynamicznego kontaktu z innym materiałem. Stanowią jeden z głównych wyznaczników opisywanych śladów. Powstają w zależności od podejmowanej czynności czy zastosowanej oprawy i techniki uformowania i w każdym tym przypadku charakter wyświecenia jest inny. W związku z tym na podstawie analizy formy i lokalizacji wyświecenia można stwierdzić, że powstało ono w wyniku kontaktu czy też obróbki, np. skóry, mięsa, kości, poroża, drewna, roślin zielnych lub surowca mineralnego.

Ważnym elementem studiów traseologicznych jest wykonanie dokumentacji, zarówno pisemnej, rysunkowej, jak i fotograficznej, uzyskanego mikroskopowego obrazu okazów krzemiennych. Należy dodać, że poprzez publikację zdjęć mikroskopowych wykonane analizy są uwiarygodnione oraz dostarczają materiałów do porównań dla innych traseologów.

W celu interpretacji uzyskanych śladów makro- i mikroskopowych badacze odnoszą się do wyników analiz traseologicznych wytworów pozyskanych i użytych podczas badań eksperymentalnych. Równocześnie odwołują się do danych przedstawionych w literaturze przedmiotu. Na tym etapie badań podejmowana jest interpretacja zmian odnotowanych na okazach pod kątem efektów działalności czynników podepozycyjnych, zastosowanych technik obróbki, a przede wszystkim ich użycia do konkretnej czynności i zastosowania ewentualnej oprawy (por. m.in. Keeley 1980; Moss 1983; Vaughan 1985; Juel Jensen 1988; 1994; Gräslund i in. 1990; Anderson i in. 1993; Levi Sala 1993; 1996; Van Gijn 1990; 2010; Korobkova 1999; Małecka-Kukawka 2001; 2017; Rots 2010; Longo i Skakun 2008; Osipowicz 2010; 2017; Pyżewicz 2013b; Marreiros i in. 2014a; 2014b; Kufel-Diakowska 2015).

**PRZYKŁADY ANALIZ MIKROSKOPOWYCH\*****Techniki krzemieniarskie**

Badania traseologiczne zazwyczaj kojarzone są z identyfikacją śladów użycia narzędzi krzemiennych. Jednak możliwa jest również identyfikacja znamion zastosowanych technik w trakcie obróbki brył surowca krzemienno-kształtowania narzędzi. Mikroskopowe ślady powstają podczas kontaktu narzędzia do obróbki surowca krzemienno-kształtowania bryły, okazu i widoczne są na piętach, piętach czy też przy negatywach odszczepionych łusek retuszu. W związku z tym możliwe jest rozpoznanie, czy wytwórca posiłkował się tłukami, naciskaczami, pośrednikami czy też retuszerami wykonanymi z kamienia, poroża lub drewna. Jednak ze względu na krótkotrwały charakter czynności ślady te nie zawsze są możliwe do odnotowania. Przykład tego typu analiz mikroskopowych stanowią badania nad rozpoznaniem technik wśród schyłkowopaleolitycznych i mezolitycznych społeczności ze stanowisk Suchodółka 3, Żuławka 13, Wojnowo 3, Jastrzębia Góra 4 i Turowiec 3 (Gruzdź i in. 2012; Pyżewicz 2013b; 2019). Na podstawie studiów wspomnianych inwentarzy możliwe były weryfikacja i doprecyzowanie danych na temat zastosowanej technologii w odniesieniu do wybranych jednostek kulturowych. Wśród ugrupowań schyłkowopaleolitycznych i wczesnomezolitycznych wyróżniono wyłącznie ślady użycia tłuków kamiennych (ryc. 3a, b). Z kolei późnomezolityczne społeczności preferowały narzędzia wykonane z poroża bądź kości (ryc. 3c, d). Co więcej, udało się ustalić, na podstawie śladów stosowania opraw widocznych na bokach rdzeni, że w części przypadków była to technika naciskowa, gdyż w odniesieniu do danych eksperymentalnych stosowanie unieruchomienia rdzeni było ściśle związane z tym typem obróbki. Oczywiście wsparciem były też studia technologiczne oparte na morfologii form. Trzecim typem techniki, popularnym w społecznościach późnomezolitycznych, było uderzenie pośrednie, na co wskazują dane mikroskopowe połączone z danymi eksperymentalnymi i morfometrycznymi.

\* Przedstawione przykłady odnoszą się do studiów traseologicznych przeprowadzonych przez autorkę rozdziału.

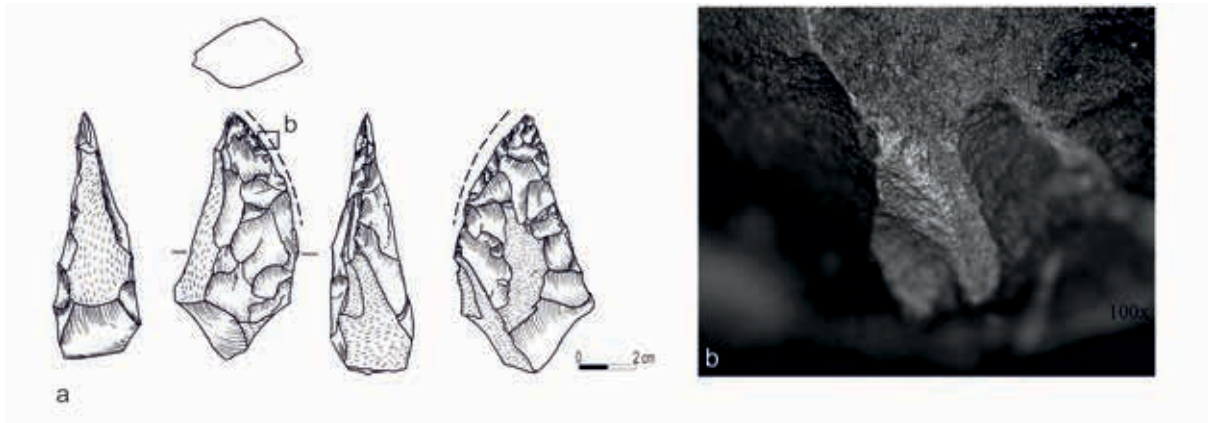
**Neandertalskie narzędzia krzemienne pod mikroskopem**

Badania traseologiczne podejmowane w odniesieniu do najstarszych dziejów społeczności są bardzo często problematyczne ze względu na zły stan zachowania okazów krzemienno-kształtowania, które często są pokryte intensywną patyną, a ich krawędzie zostały złamane czy też wykruszone w efekcie działalności czynników podepozycyjnych. Jednak takie badania są podejmowane i niejednokrotnie z sukcesem. W odniesieniu do ziem polskich narzędzia środkowopaleolityczne są najstarszymi, na jakich wykonuje się analizy traseologiczne. Przykład analiz materiałów ze stanowiska Pietraszyn 49 (Wiśniewski i in. 2019) wskazuje, że narzędzia o różnych parametrach i kształcie wykorzystywano przede wszystkim w czynnościach związanych z podziałem tuszy zwierzęcej, w tym części z kośćmi, oddzielaniem mięsa i skóry (ryc. 4). Jedynie w pojedynczych przypadkach obrabiano drewno. Analizy pokazały, że narzędzia neandertalczyków były wielofunkcyjne, wykorzystywano je do cięcia, skrobania, strugania, piłowania oraz żłobienia.

**Zróżnicowane aktywności wśród ugrupowań magdaleńskich**

Badania traseologiczne przeprowadzane na materiałach krzemienno-kształtowania mogą ukazać szerokie spektrum czynności podejmowanych przez społeczności pradziejowe na terenie konkretnego obozowiska. Można wnioskować, czy aktywności powiązane były z polowaniem, obróbką tuszy zwierzęcej, wyprawianiem skóry, wykonywaniem przedmiotów z kości, poroża lub drewna, albo czy prace skupione były na przetwarzaniu roślin zielnych. Dodatkowo określa się charakter narzędzi, jaki typ były preferowany do poszczególnych aktywności, które części krzemienne były pracującymi i czy okazy były osadzone w oprawach. Przykład takich badań stanowią analizy traseologiczne artefaktów z takich stanowisk, jak Klementowice-Kolonia, Ćmielów 95 „Mały Gawroniec” czy Podgrodzie 16 (Pyżewicz 2015a; 2015b; 2019). Na ich podstawie można wnioskować, że górnopaleolityczni łowcy-zbieracze, skupiali się na czynnościach związanych z przygotowaniem i naprawą broni myśliwskiej, złożonej





**Ryc. 4.** Ślady kontaktu z kośćmi widoczne na środkowopaleolitycznym nożu (stan. Pietraszyn 49a). Fot. K. Pyżewicz

z krzemiennych tylcowych wkładek, przetwarzaniem upolowanej zwierzyny przy zastosowaniu narzędzi wiórowych, oczyszczaniem skóry przy użyciu drapaczy (ryc. 5a-c), wykonywaniem rylcami, przekłuwaczami i wiórami przedmiotów z kości i poroża. W pojedynczych przypadkach podejmowane prace na obszarze obozowisk związane były z obróbką roślin, a także rozpaleniem ognia (ryc. 5d, e).

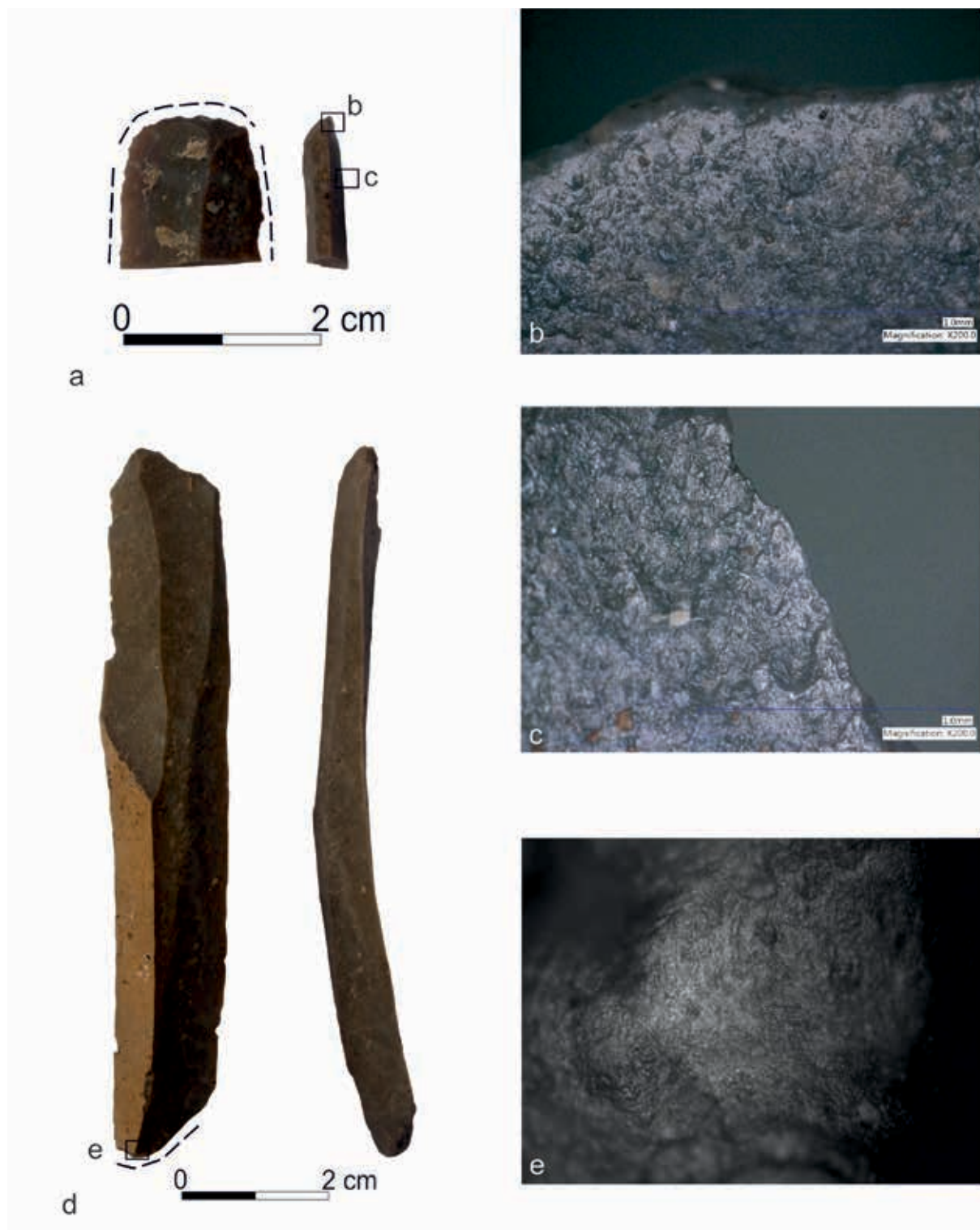
#### **Paleolityczna i mezolityczna broń myśliwska**

Jedną z powszechnych grup narzędzi funkcjonalnych stanowią krzemienne elementy wyposażenia myśliwych, które niejednokrotnie stanowią formy przewodnie poszczególnych ugrupowań epoki kamienia. Na podstawie analiz mikroskopowych można wnioskować, jak wyglądały narzędzia wykorzystywane w trakcie polowania, ale też jak były one osadzane i czy były montowane na czubkach promieni strzał lub w bocznych pazach, czy też stanowiły elementy oszczepów. Przykłady tego typu studiów odnoszą się do magdaleńskich form tylcowych, liściaków świderskich i mezolitycznych zbrojników pochodzących ze stanowisk wyżej cytowanych. Na tych okazach licznie odnotowywane są dystynktywne ślady w postaci wyłamania czubków (ryc. 6a-c), a także mikroskopowych śladów liniowych, znamion powstałych poprzez zarysowania powierzchni krzemiennych w trakcie penetracji celu (ryc. 6d, e). Magdaleńskie wkładki montowane były zapewne po kilka i były składowymi oszczepów lub strzał. Schyłkowopaleolityczne liściaki służyły jako groty i tkwiły głęboko w drzewcach strzał. Z kolei mezolityczne mikrolityczne zbrojniki

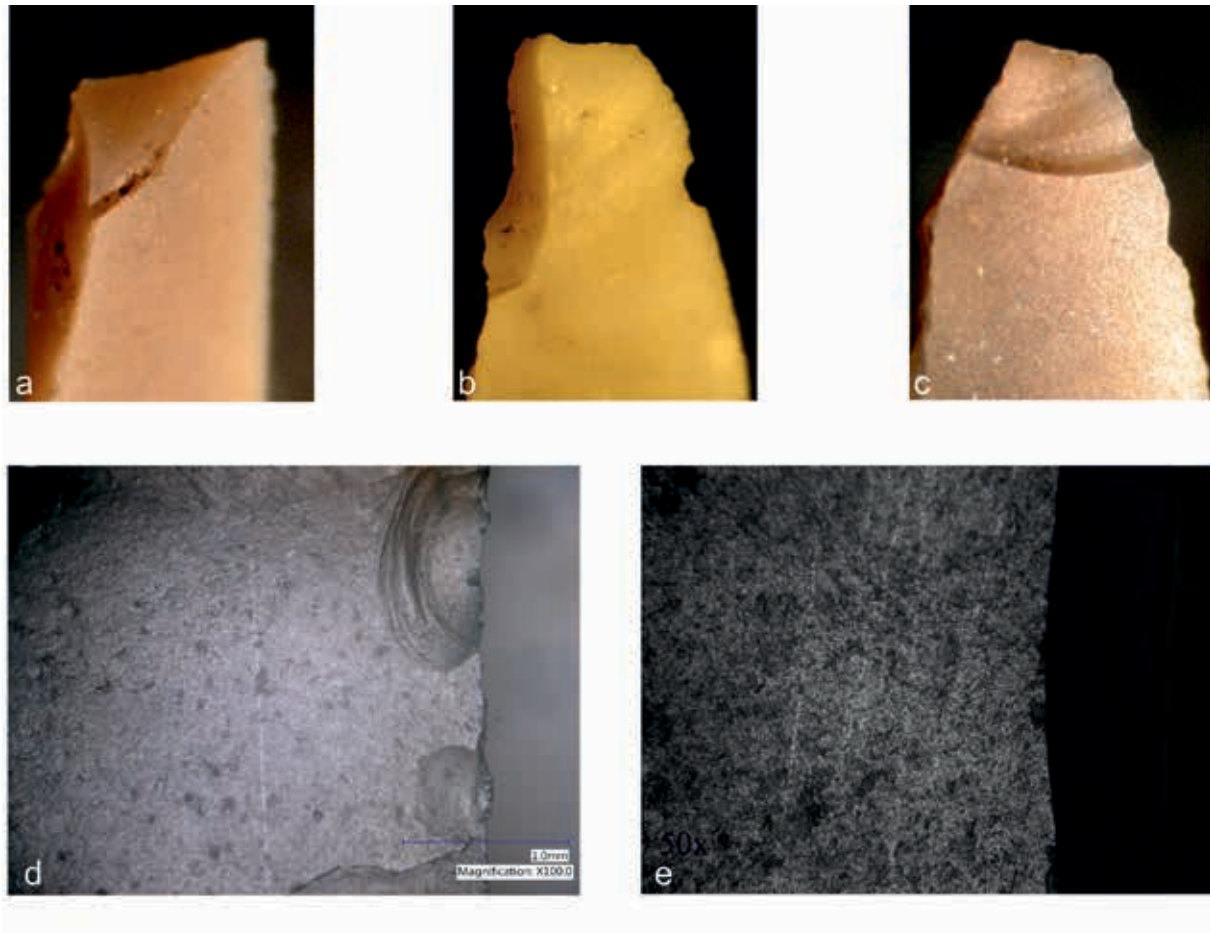
montowane były zarówno na czubkach promieni, jak i jako wkładki boczne.

#### **Materiały krzemienne jako elementy wyposażenia pochówków**

Badania traseologiczne odnoszą się do materiałów krzemiennych pozyskanych z kontekstów osadniczych, ale też grobowych. W odniesieniu do drugiego z wymienionych na podstawie analiz mikroskopowych można podejmować się interpretacji praktyk funeralnych. Wyposażenie grobowe społeczności epoki kamienia składa się m.in. z krzemiennych elementów broni myśliwskiej, siekier, wiórów, rdzeni itp., co oczywiście w dużej mierze zależy od konkretnej jednostki kulturowej. Jeden z przykładów analiz traseologicznych wyposażenia grobowego odnosi się do pochówku zbiorowego kultury amfor kulistych ze stanowiska w Koszycach (Pyżewicz 2013a). Na ich podstawie uznano, że wyłącznie pojedyncze okazy wiórów i odłupków, spośród kilkudziesięciu, odznaczają się śladami użytkowymi związanymi z mało intensywną obróbką roślin i tuszy zwierzęcej. Z kolei przebadane siekiery najpewniej były długotrwale użytkowane, o czym świadczą rozwinięte ślady opraw, a także znamiona wielokrotnego przeszlifowania ostrzy, na których jeżeli występują znamiona funkcjonalne, to należy je powiązać z pracą w drewnie (ryc. 7). Niewykluczone, że część ze śladów mogła być powiązana z praktykami funeralnymi, czyli narzędzia wykorzystano w trakcie przygotowania pochówku. Zapewne też niektóre narzędzia specjalnie naprawiono i odnowiono przed złożeniem do grobu.



**Ryc. 5.** Narzędzia magdaleńskie: a – drapacz użyty do wyprawienia skóry (stan. Ćmielów 95 „Mały Gawroniec”); b-c – ślady obróbki skóry; d – wiór użyty jako krzesak (stan. Podgrodzie 16); e – ślady rozpalania ognia. Fot. K. Pyżewicz, W. Gruzdź



**Ryc. 6.** Znamiona użycia okazów jako elementów broni łowieckiej: a-c – dystynktywne obłamania czubków mezolitycznych zbrojników (stan. Żuława 13); d, e – ślady liniowe powstałe podczas penetracji trafionego celu na: d – magdaleńskim tyłczaku (stan. Ćmielów 95 „Mały Gawroniec”); e – schyłkowopaleolitycznym liściaku (stan. Kraków-Bieżanów 15). Fot. K. Pyżewicz

### Neolityczni rolnicy i ich narzędzia do cięcia zboża

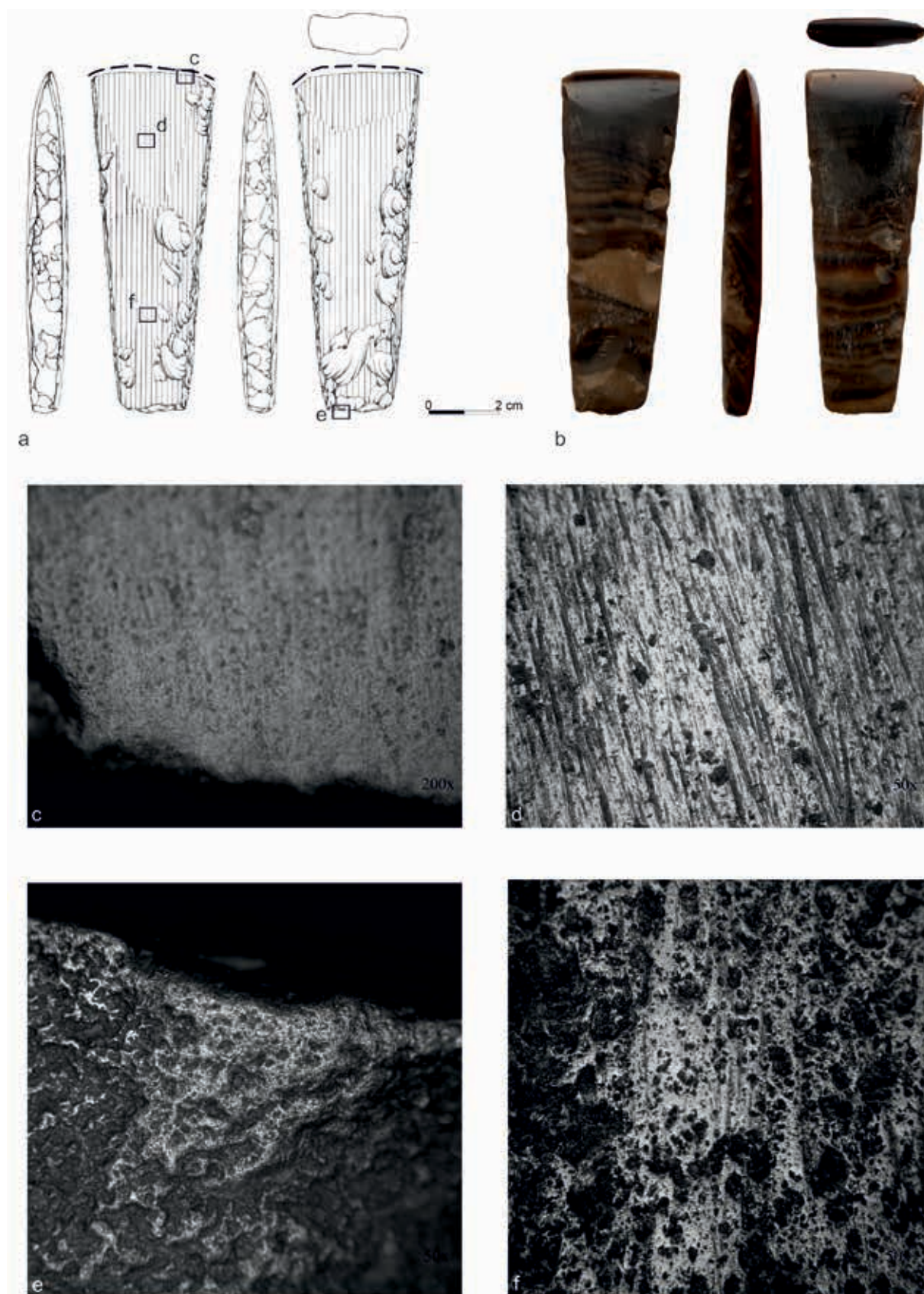
Jednymi z najbardziej dystynktywnych śladów użytkowych rozpoznawanych na narzędziach krzemiennych są te powstałe podczas cięcia zbóż (ślady te różnią się od tych powstałych w wyniku obróbki innych roślin). Wyświecenie żniwne widoczne jest gołym okiem, a powierzchnia krzemienna niejednokrotnie wygląda jakby była „polakierowana” (ryc. 8a). Mikroskopowy obraz tego typów śladów jest bardzo charakterystyczny (ryc. 8b, c). Na podstawie analiz traseologicznych do grupy neolitycznych narzędzi żniwnych klasyfikowane są przede wszystkim półtyłczaki i wióry, niejednokrotnie dodatkowo intencjonalnie retuszowane (m.in. Małecka-Kukawka 1999; 2001; Osipowicz 2010: 170 i n.; Pyżewicz 2016). Na podstawie zasięgu

śladów mikroskopowych można wnioskować, jak dane typy narzędzi były mocowane w oprawach sierpów – półtyłczaki zazwyczaj skośnie względem osi symetrii narzędzia, a formy wiórowe wzdłużnie do oprawy. Wyświecenia żniwne są odnotowywane powszechnie na okazach wiązanych z neolitem, stanowią niejako jeden z dystynktywnych elementów tego okresu.

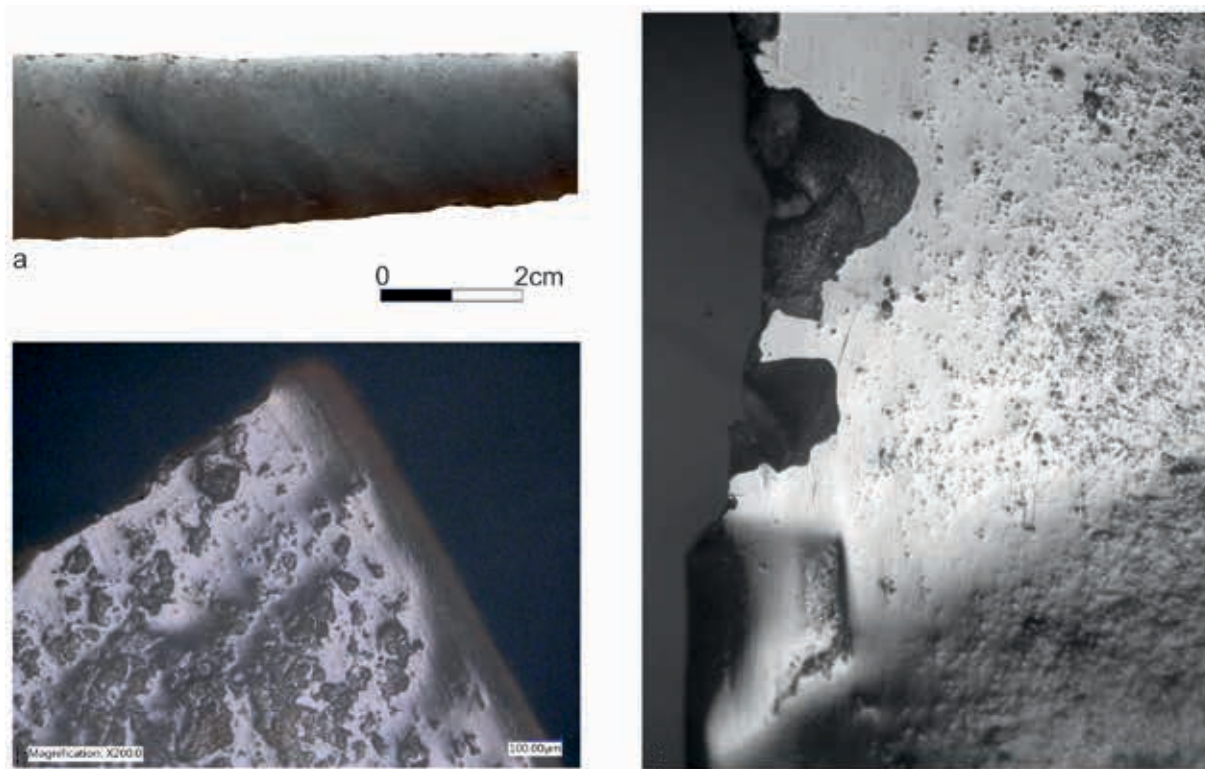
### Wczesna epoka brązu – krzemienne sztylety jako symbol prestiżu

Wśród ugrupowań wczesnobrązowych występują m.in. krzemienne formy sztyletów. Ich wykonanie związane było wysokim poziomem kompetencji i doświadczenia wytwórcy. W celu sprawdzenia





**Ryc. 7.** Element wyposażenia z neolitycznego pochówku (stan. Koszyce 3): a-b – siekiera krzemienna; c – ślady obróbki drewna; d – znamiona szlifowania okazu; e-f – ślady oprawy powstałe podczas kontaktu z surowcem roślinnym i skórą. Fot. K. Pyżewicz, W. Gruzdź



**Ryc. 8.** Oznaki użycia narzędzi do cięcia zboża: a – przykład wyświecenia żniwnego widocznego makroskopowo wzdłuż krawędzi krzemienego artefaktu; b-c – ślady cięcia zbóż na neolitycznych półtylczakach (b – Selenec 1; c – Grabie 4). Fot. K. Pyżewicz

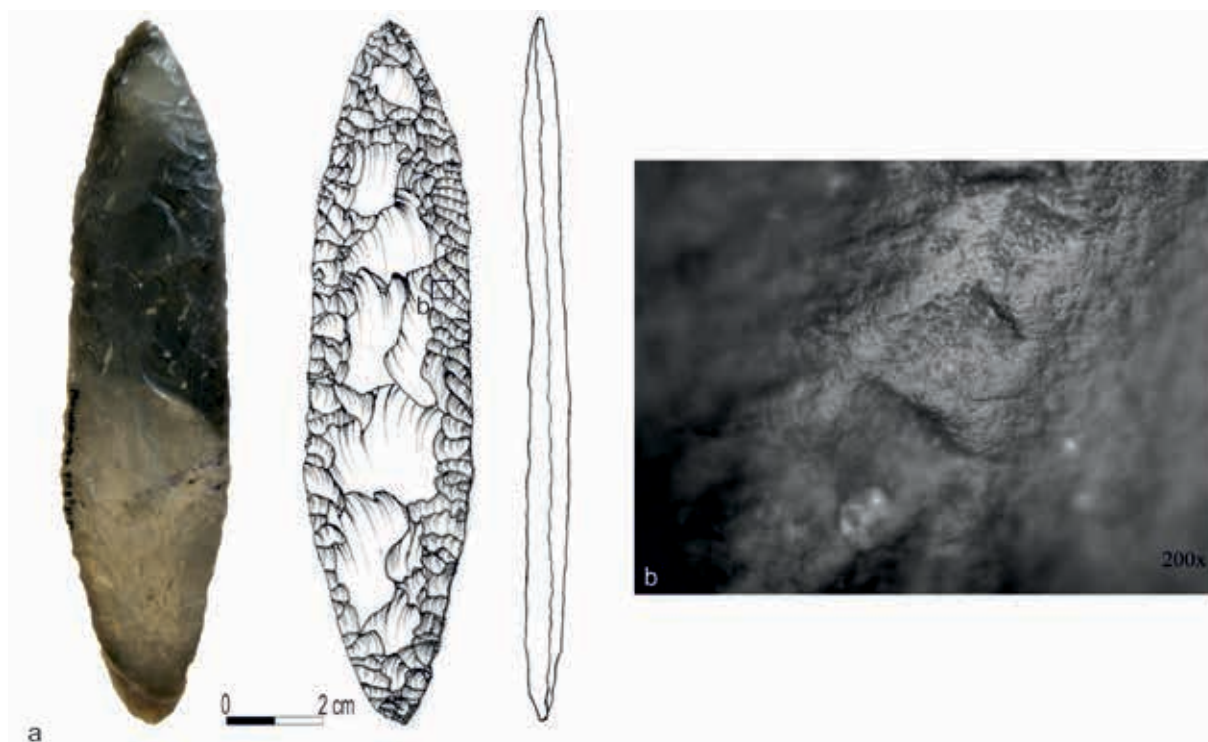
ich funkcji przeprowadzono badania traseologiczne na sztyletach pochodzących z terenów Małopolski i Wołynia (Gruzdź i in. 2015; Pyżewicz i Gruzdź 2019). Na tej podstawie ustalono, że nie odznaczają się śladami świadczącymi o ich użytkowaniu. Natomiast na ich powierzchniach odkryto intensywne znamiona oprawy i ich transportowania (ryc. 9). Wyświecenie, ale też i ślady liniowe widoczne są przede wszystkim na wystających partiach, tych częściach, które były narażone na bezpośredni kontakt z oprawą, pochwą, pojemnikiem, w którym były przetrzymywane. Co więcej, udało się ustalić, że opisywane ślady powstały w wyniku kontaktu z miękkim materiałem – skórą i roślinami, ale też i twardym surowcem, jak drewno czy kość. Na podstawie szczegółowej lokalizacji, można uznać, że części dolne sztyletów osadzone były w stałych oprawach drewnianych czy też z poroża/kości. Natomiast ostrza mogły być trzymane w pochwach wykonanych ze skóry lub roślin bądź w wymoszczonych tymi surowcami pojemnikach z innych materiałów. Z kolei widoczna intensywność śladów sugeruje ich na długotrwałe przetrzymywanie. Wszystkie te dane wskazują, że sztylety

krzemienne nie pełniły funkcji użytkowej, a raczej stanowiły symbol statusu czy też prestiżu.

### Ślady podepozycyjne

Niejednokrotnie traseolodzy stykają się z problemami dotyczącymi rozróżnienia śladów powstałych podczas intencjonalnego kontaktu od tych, które pojawiły się w sposób incydentalny czy też jako efekt czynników podepozycyjnych (jak np. w wyniku działalności wody, wiatru, pożarów czy współczesnej orki). Aby ułatwić ich rozróżnienie, przeprowadzane są testy eksperymentalne. Oczywiście wiele zmian podepozycyjnych, jak poszczególne odmiany patyn (czyli zmian powierzchni powstałych pod wpływem procesów związanych z działalnością naturalnych czynników fizycznych i chemicznych), spowodowana jest długotrwałym przebywaniem narzędzi krzemienych w różnego typu sedymentach, niejednokrotnie przez tysiące lat, co sprawia, że odtworzenie warunków zalegania w krótkim czasie jest zazwyczaj niemożliwe. Jednak można podjąć się testów eksperymentalnych dotyczących





**Ryc. 9.** Ślady świadczące o intensywnym przechowywaniu narzędzia w oprawie: a – sztylet z wczesnej epoki brązu (stan. Mirohoszcza); b – ślady oprawy. Fot i rys. K. Pyżewicz, W. Gruzdź

innych czynników. Przykład taki stanowią badania nad popularnymi, w odniesieniu do krzemiennych artefaktów z ziem polskich, czynnikami związanymi z działalnością człowieka. Przeprowadzono eksperymenty związane z deptaniem przez ludzi okazów krzemiennych, a także ich niszczeniem w trakcie orki, zarówno „pradziejowej”, jak i współczesnej. Następnie przebadano wygląd przedmiotów, które uległy wymienionym działaniom. Zaobserwowano charakter powstałych złamań, wykruszeń, a także śladów mikroskopowych (Pyżewicz i Gruzdź 2014). Na tej podstawie poszerzona została baza porównawcza – zarejestrowano dystynktywne ślady makro- i mikroskopowe, które powstały podczas wymienionych wyżej czynności (ryc. 10), co ułatwiło rozpoznanie analogicznych modyfikacji na wytworach pradziejowych.

### Badania narzędzi kościanych

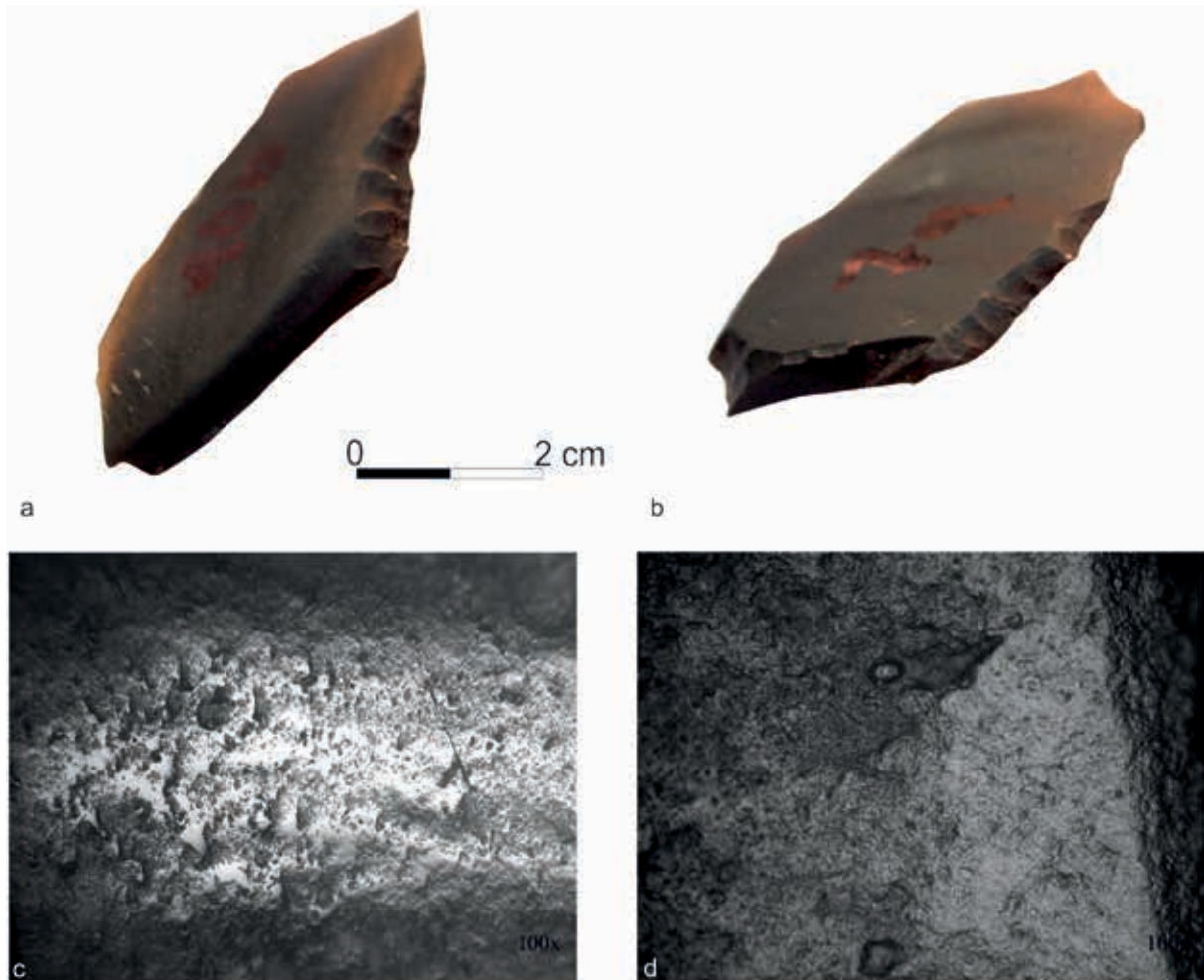
Analizy traseologiczne mogą również dotyczyć przedmiotów kościanych. Przykład taki stanowią studia zabytków ze stanowiska 6 w Kopydłowie (Lisowski i in. 2015; 2017). Na tym terenie odkryto

ślady osadnictwa ugrupowań neolitycznych – kultury ceramiki wstęgowej rytej, późnej ceramiki wstęgowej oraz pucharów lejkowatych. Przebadana mikroskopowo grupa kilkudziesięciu przedmiotów wykonana została z kości ssaków, przede wszystkim bydła, owcy/kozy, jelenia oraz świni. Są one zróżnicowane pod względem morfologicznym i funkcjonalnym. Wyróżnione zostały okazy spiczaste, tnące, rąbiące, tępe, pośredniki czy ozdoby. Można było zinterpretować ostatnie etapy procesu technologicznego. Wiemy, że w celu nadania ostatecznego kształtu przedmiotom kościowym szlifowano i skrobano ich powierzchnię, zapewne przynajmniej częściowo narzędziami krzemiennymi. Studia traseologiczne wykazały, że wykorzystywano je w pracach codziennych, głównie związanych z obróbką skóry, drewna i roślin zielnych (ryc. 11).

### PODSUMOWANIE

Badania traseologiczne stanowią relatywnie wiarygodne źródło wiedzy na temat funkcji narzędzi krzemiennych. W przeciwieństwie do posługiwania się analogiami etnograficznymi czy porównaniami



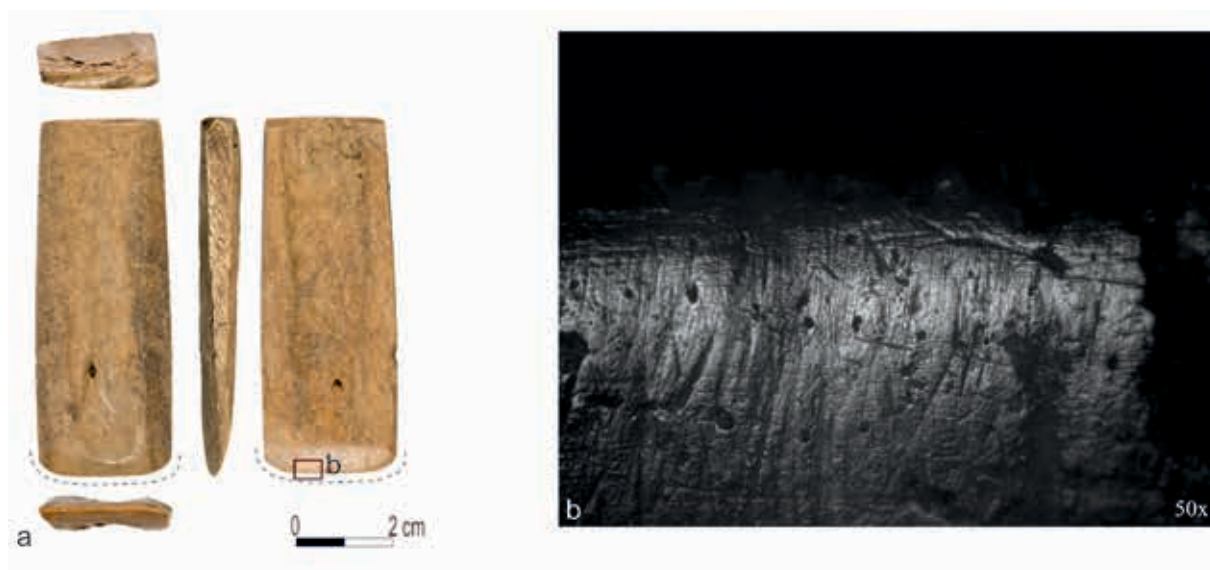


**Ryc. 10.** Zniszczenia powstałe podczas deptania i orki na eksperymentalnych okazach. a-b – retusze podepozycyjne; c-d – wyświecenia podepozycyjne. Fot. K. Pyżewicz, W. Gruzdź

do współczesnych narzędzi lub też powoływanie się na zdroworozsądkowe podejście, wyniki analiz mikroskopowych mają solidną podstawę do poprawnego wnioskowania na tematy wykorzystania badanych okazów.

Rezultaty badań traseologicznych stanowią jeden z istotnych elementów w interpretacji aktywności podejmowanych przez ugrupowania epok kamienia i wczesnego brązu. Wykorzystując dane dotyczące charakterystyki narzędzi, czyli zastosowanej technologii obróbki, surowca, z jakiego zostały wykonane, morfologii czy też typu, można podjąć się studiów dotyczących relacji między tymi elementami a zastosowaniem okazów. Poczynione w efekcie tych analiz wnioski dotyczące wyboru poszczególnych surowców, które przeznaczone były do wykonania konkretnych typów funkcjonalnych narzędzi, stanowią cenne uzupełnienie

obrazu społeczności pradziejowych. Można podjąć się odpowiedzi na pytania: Czy jakieś rodzaje krzemienia były preferowane do konkretnych czynności? Czy surowce „importowane”, czyli transportowane z dalszych rejonów, mogły mieć inne zastosowanie niż te lokalne? Kolejne pytania mogą wiązać się z aspektem technologicznym, np. czy zastosowanie takiego, a nie innego sposobu wykonania pół-surowca i nadania ostatecznego kształtu ma powiązanie z planowaną funkcją wytworu? Również można poruszyć problematykę relacji między formą, typem narzędzi a ich zastosowaniem i odpowiedzieć: Jakiego typu narzędzia preferowano np. do oczyszczania skóry czy też polowania? Czy forma okazu miała realny wpływ na ergonomię i jakość wykonywanej czynności? Pytania tego typu można mnożyć w odniesieniu do wspomnianych wyżej danych.



**Ryc. 11.** Ślady użycia dłuta kościanego do obróbki drewna (stan. Kopydłowo 6) (wg Lisowski i in. 2015)

Równocześnie analizy traseologiczne mogą obalać pewne mity dotyczące funkcji poszczególnych okazów, która niejako często narzucana jest z góry poprzez skojarzenia kształtu poszczególnych typów narzędzi ze współczesnymi formami. Takie postrzeganie może też wynikać z nazw typów narzędzi krzemiennych, np. drapacz, skrobacz, rylce itp. Jednak na podstawie wyników analiz mikroskopowych wiadomo, że np. drapacze nie zawsze były przeznaczone do skrobienia, ale też przykładowo do cięcia skóry czy roślin, a z kolei rylce powszechnie stosowano do strugania, skrobienia czy też szlifowania twardych surowców.

Podsumowując, wyniki uzyskane na podstawie studiów mikroskopowych umożliwiają lepsze rozpoznanie technik obróbki surowca i funkcji wytworów krzemiennych. Dane te pozwalają na interpretację podejmowanych czynności i obróbki surowców zarówno organicznych, jak i nieorganicznych, których pozostałości zazwyczaj brak na stanowisku. W związku z tym nasza wiedza na temat puli obrabianych typów materiałów ulega poszerzeniu. Równocześnie można wnioskować na temat wiedzy społeczności pradziejowych o środowisku, które ich otaczało, czy poszczególnych typach surowców i ich właściwościach. Badania traseologiczne umożliwiają również uchwycenie momentu opanowania przez społeczności pradziejowe nowych technik, „wynalazków”, np. identyfikacja krzemiennych krzesaków stanowi dowód na umiejętność rozpalać ognia przez konkretne społeczności.

Określenie funkcji poszczególnych artefaktów krzemiennych pochodzących z konkretnego

stanowiska pomaga ustalić, czy było to miejsce polowania na zwierzynę, prac rzeźnickich, czy też była to osada, gdzie wykonywano szereg zróżnicowanych czynności.

Dane traseologiczne można powiązać z analizami planigraficznymi i na tej podstawie podjąć się próby interpretacji sposobów planowania otaczającej przestrzeni, w tym zagospodarowywania poszczególnych partii obozowiska czy osady, określić np., gdzie było miejsce obróbki drewna lub kości czy poroża, albo ćwiartowania zwierzyny, czy też naprawy broni myśliwskiej.

Ustalenia funkcjonalne można powiązać z danymi z innych dziedzin, jak np. z zakresu archeozoologii, palinologii i archeobotaniki (por. Wliczyński, w tym tomie; Kołaczek i in., w tym tomie; Moskal-del Hoyo, w tym tomie). Dzięki temu możemy wnioskować na temat gospodarki łowieckiej, zbierackiej czy też hodowlanej i rolniczej. Przykładowo, można zinterpretować, czy były to społeczności, których gospodarka była bardziej nastawiona na produkty odzwierzęce czy też roślinne, a także jaka była preferowana dieta.

Również dane płynące z innych metod, w tym tych z zastosowaniem analiz mikroskopowych, są niezwykle przydatne. Przykładowo, analizy rezydów na powierzchniach narzędzi krzemiennych, mogą wskazać m.in. na rodzaje roślin czy też zwierząt, obrabianych przy ich zastosowaniu, a także umożliwiają uszczegółowienie stosowanych sposobów opraw czy też użytych lepiszczy. Również posiłkowanie się analizami fizyko-chemicznymi narzędzi

krzemiennych doprecyzowuje podejmowane czynności, jak np. przy użyciu jakich minerałów rozpalano ogień.

Z kolei analizy mikroskopowe narzędzi wykonanych z poroża czy kości doprecyzowują informacje na temat ich formowania przy użyciu narzędzi krzemiennych. Na podstawie tego typu studiów można odpowiedzieć na pytania dotyczące tego, w jaki sposób wyglądały poszczególne elementy łańcuchów operacji związanych z obróbką kości i poroża, jakie stosowano metody i techniki podczas kształtowania przedmiotów z tego typu surowca, jak mogły wyglądać narzędzia krzemienne służące obróbce, np. czy były to ciosaki, narzędzia żłobiące, rozczepiające, skrobiące, retuszowane na jedną lub obie strony czy mające ostrą, naturalną krawędź pracującą. Studia traseologiczne przedmiotów z kości i poroża służą również interpretacji ich funkcji, czyli do określenia, czy były to szydła, przekłuwacze, ciosła, dłuta itp. służące do obróbki m.in. drewna, roślin zielnych i skóry. W przypadku takich studiów procedura podejmowanych analiz jest analogiczna do tej odnoszącej się do badań okazów krzemiennych.

Podsumowując, w studiach traseologicznych materiałów zabytkowych tkwi bardzo duży potencjał poznawczy społeczności pradziejowych. A w powiązaniu z wynikami zastosowania innych metod mogą one ukazać dość szczegółowy obraz aktywności podejmowanych przez ówczesne ugrupowania. Należy jednak mieć na uwadze, że analizy traseologiczne, które mają być rzetelnie wykonane, wiążą się z dużym nakładem pracy badacza, związanym z wcześniejszą nauką rozpoznawania poszczególnych śladów, tworzeniem bazy referencyjnej, a także przeprowadzaniem analiz mikroskopowych materiałów pradziejowych i eksperymentalnych.

## LITERATURA

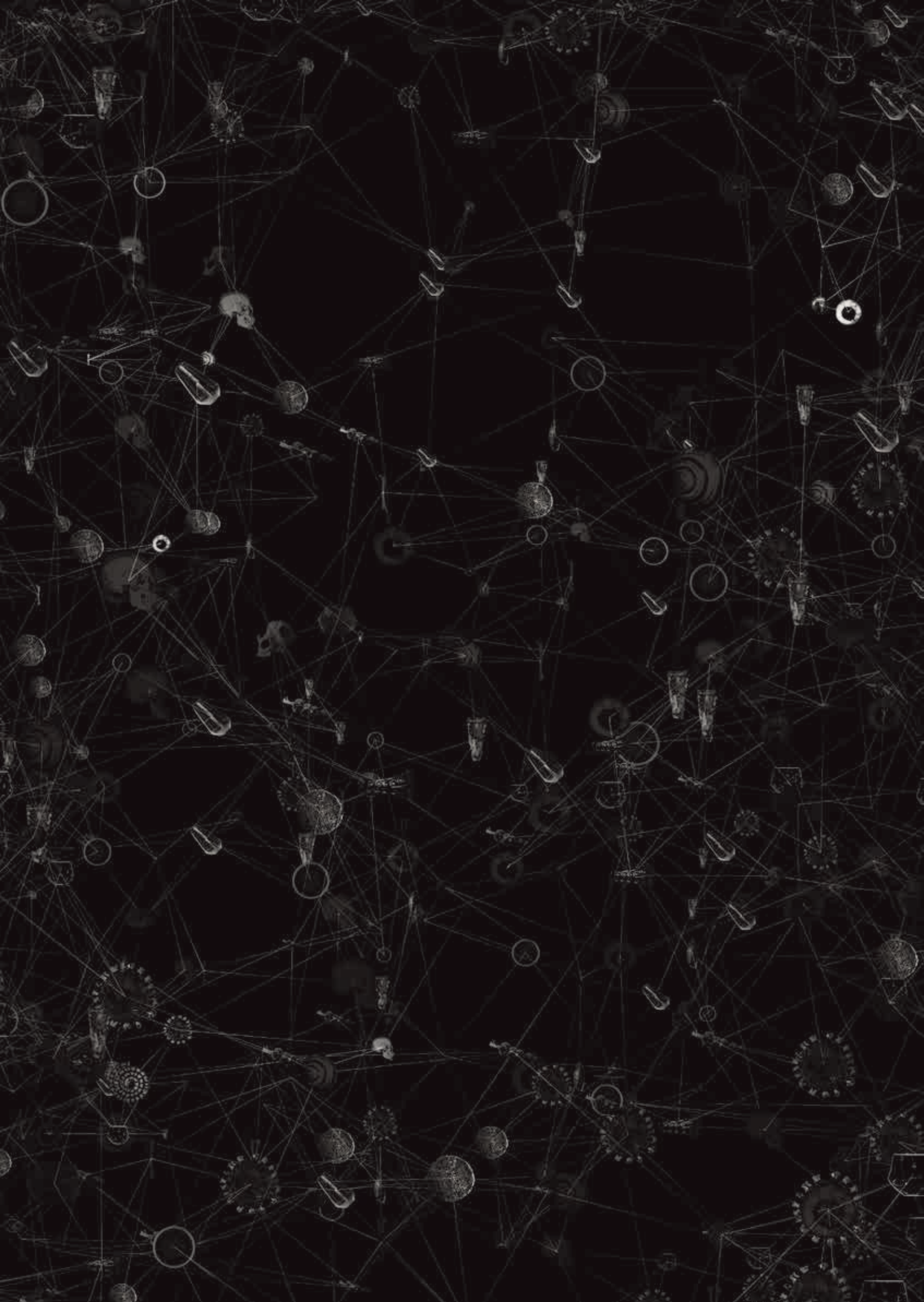
- Anderson, P.C. 1980. A Testimony of Prehistoric Tasks: Diagnostic Residues on Stone Tool Working Edges. *World Archaeology* 12(2): 181–194.
- Anderson, P.C., Beyries, S., Otte, M., Plisson, H. (red.) 1993. *Traces et fonction, les gestes retrouvés. Actes du colloque international de Liège, 8-9-10 décembre 1990*. Liège.
- Andrefsky, W. Jr. 2005. *Lithics. Macroscopic Approaches to Analysis. Second edition*. Cambridge.
- Balcer, B. 1975. *Krzemień świeciechowski w kulturze pucharów lejkowatych. Eksploatacja, obróbka i rozprzestrzenienie*. Wrocław-Warszawa-Kraków-Gdańsk.
- Balcer, B., Schild, R. 1978a. A jednak sierpy! *Z Otcłani Wieków* 44(1): 44–48.
- Balcer, B., Schild, R. 1978b. Sierpem i głowę można uciąć... *Z Otcłani Wieków* 44(2): 145–147.
- Balcer, B., Schild, R. 1980. Traces of Wear and Stone Tool Function: Do They Really Mean What They Show?, (w:) R. Schild (red.), *Unconventional Archaeology. New Approaches and Goals in Polish Archaeology*. Wrocław, 109–116.
- Bąbel, B., Budziszewski, J. 1978. Noże wielofunkcyjne! *Z Otcłani Wieków* 44(2): 139–145.
- Burroni, D., Donahue, R.E., Pollard, A.M. 2002. The Surface Alteration Features of Flint Artefacts as a Record of Environmental Processes. *Journal of Archaeological Science* 29: 1277–1287.
- Cnats, D., Rots, V. 2018. Extracting residues from stone tools for optical analysis: towards an experiment-based protocol. *Archaeological and Anthropological Sciences* 10: 1717–1736.
- Coles, J. 1977. *Archeologia eksperymentalna*. Warszawa.
- Coles, J. 1997. Experimental Archaeology, (w:) W. Brzeziński, W. Piotrowski (red.), *Proceeding of the First International Symposium on Wood Tar and Pitch*. Warszawa, 307–312.
- Comis, L. 2010. Experimental Archeology: methodology and new perspectives in Archeological Open Air Museums. *EuroREA* 7: 9–12.
- Drobniewicz, B. 1978. Analiza mikroskopowa zabytków z grobu kultury lendzielskiej (nr 1325) na stanowisku 17 w Pleszowie (Kraków – Nowa Huta). *Sprawozdania Archeologiczne* 30: 31–33.
- Drobniewicz, B. 1979. Analiza traseologiczna wyrobów krzemiennych z cmentarzyska kultury ceramiki sznurowej w Koniuszy, woj. Kraków. *Sprawozdania Archeologiczne* 31: 91–94.
- Evans, A., Donahue, R. 2005. The elemental chemistry of lithic microwear: an experiment. *Journal of Archaeological Science* 32(12): 1733–1740.
- Ferguson, J.R. (red.) 2010. *Designing Experimental Research in Archaeology. Examining Technology Through Production and Use*. Colorado.
- Fullagar, R. 2014. Residues and usewear, (w:) J. Balme, A. Patterson (red.), *Archaeology in Practice: a Student Guide to Archaeological Analyses*. Oxford, 232–263.
- Ginter, B., Kozłowski, J.K. 1975. *Technika obróbki i typologia wyrobów kamiennych paleolitu i mezolitu*. Warszawa.



- Gräslund, B., Knutsson, H., Knutsson, K., Taffinder, J. (red.) 1990. *The Interpretative Possibilities of Microwear Studies, Proceedings of the International Conference on Lithic Use-wear Analysis, 15th-17th February 1989 in Uppsala, Sweden*. Uppsala.
- Gruzdź, W., Migal, W., Pyżewicz, K. 2015. Bifacial flint daggers from the Early Bronze Age in Volhynia – Lesser Poland, (w:) C. J. Frieman, B. V. Eriksen (red.), *Flint Daggers in Prehistoric Europe*. Oxford, 116–132.
- Gruzdź, W., Pyżewicz, K., Migal, W., Przeździecki, M. 2012. Multi-aspect Analysis of Flint Materials from Suchodółka, Site 3, the Świętokrzyskie Voivodeship. *Światowit* 9(50): 245–258.
- Hurcombe, L. 2004. Experimental Archaeology, (w:) C. Renfrew, P. Bahn (red.), *Archaeology: The Key Concepts*. Londyn, 83–87.
- Juel Jensen, H. 1988. Functional Analysis of Prehistoric Flint Tools by High-Power Microscopy: A Review of West European Research. *Journal of World Prehistory* 2(2): 53–87.
- Juel Jensen, H., 1994. *Flint Tools and Plant Working: Hidden Traces of Stone Age Technology: a Use Wear Study of Some Danish Mesolithic and TRB Implements*. Århus.
- Keeley, L.H. 1980. *Experimental Determination of Stone Tool Uses. A Microwear Analysis*. Chicago.
- Keleiterborn, P. 2005. Principles of experimental research in archaeology. *EuroREA: (Re)construction and Experiment in Archaeology* 2: 120–122.
- Korobkova, G.F. 1999. *Narzędzia w pradziejach. Podstawy badania funkcji metodą traseologiczną*. Toruń.
- Kufel-Diakowska, B. 2015. *Aktywność łowców i zbieraczy. Przykład obozowisk kultury hamburskiej i kultury Federmesser*. Wrocław.
- Langejans, G.H.J., Lombard, M. 2014. About Small Things and Bigger Pictures: An Introduction to the Morphological Identification of Micro-residues on Stone Tools, (w:) J.M. Marreiros, J.F. Gibaja Bao, N.F. Bicho (red.), *Use-Wear and Residue Analysis in Archaeology*. New York, 199–219.
- Levi Sala, I. 1993. Use-Wear Traces: Process of Development and Post-depositional alterations, (w:) P.C. Anderson, S. Beyries, M. Otte, H. Plisson (red.), *Traces et fonction, les gestes retrouvés. Actes du colloque international de Liège, 8-9-10 décembre 1990*. Liège.
- Levi Sala, I. 1996. *A Study of Microscopic Polish on Flint Implements*. Oxford.
- Lisowski, M., Pyżewicz, K., Frankiewicz, M. 2015. Analiza funkcjonalno-technologiczna artefaktów wykonanych z kości, poroża i zębów, (w:) A. Marciniak, I. Sobkowiak-Tabaka, M. Bartkowiak, M. Lisowski (red.), *Kopydłowo, stanowisko 6. Osady neolityczne z pogranicza Kujaw i Wielkopolski*. Poznań-Pękwice, 245–264.
- Lisowski, M., Pyżewicz, K., Frankiewicz, M. 2017. Multi-Aspect Analysis of Neolithic Bone Tools from Kopydłowo, Site 6, Poland, *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología de la Universidad De Granada* 27: 245–267.
- Longo, L., Skakun, N. (red.), 2008. "Prehistoric Technology" 40 Years Later: Functional Studies and the Russian Legacy *Proceedings of the International Congress Verona (Italy), 20-23 April 2005*. Oxford.
- Malina, J. 1983. Archaeology and Experiment. *Norwegian Archaeological Review* 16(2): 69–85.
- Małecka-Kukawka, J. 1999. Sierpy, sierpaki, sierpce... – analiza funkcjonalna wczesnorolniczych wkładek narzędzi zniwnych z ziemi chełmińskiej, (w:) S. Kukawka (red.), *Szkice prahistoryczne. Źródła – metody – interpretacje*. Toruń, 139–157.
- Małecka-Kukawka, J. 2001. *Między formą a funkcją. Traseologia neolitycznych zabytków krzemienych z ziemi chełmińskiej*. Toruń.
- Małecka-Kukawka, J. 2005. Z historii badań traseologicznych w polskiej archeologii epoki kamienia. *Folia Praehistorica Posnaniensia* 13/14: 59–70.
- Małecka-Kukawka, J. 2012. Traseologia – badanie mikrośladów, (w:) S. Tabaczyński, A. Marciniak, D. Cyngot, A. Zalewska (red.), *Przeszłość społeczna. Próba konceptualizacji*. Poznań, 464–471.
- Małecka-Kukawka, J. 2017. *Traseologia w studiach nad pradziejowym krzemieniarstwem. Przykłady z osad i kopalń krzemienia w dorzeczu Wisły i Odry (neolit-epoka brązu-wczesna epoka żelaza)*. Toruń.
- Marreiros, J.M., Gibaja Bao, J.F., Bicho, N.F. (red.) 2014a. *Proceedings of the International Conference on Use-wear Analysis, Faro, Portugal, 10-12 October 2012*. Newcastle upon Tyne.
- Marreiros, J.M., Gibaja Bao, J.F., Bicho, N.F. 2014b. *Use-Wear and Residue Analysis in Archaeology*. New York.
- Marreiros, J.M., Mazzucco, N., Gibaja, J.F., Bicho, N. 2014c. Macro and Micro Evidences from the Past: The State of the Art of Archeological Use-Wear Studies, (w:) J.M. Marreiros, J.F. Gibaja Bao, N.F. Bicho (red.), *Use-Wear and Residue Analysis in Archaeology*. New York, 5–26.
- Moss, E. 1983. *The Functional Analysis of Flint Implements. Pincevent and Pont d'Ambon: Two Cases from the French Final Paleolithic*. Oxford.
- Odell, G.H. 2001. Stone Tool Research at the End of the Millennium: Classification, Function, and Behavior. *Journal of Archaeological Research* 9(1): 45–100.
- Odell, G.H. 2004. *Lithic Analysis*. New York.
- Osipowicz, G. 2010. *Narzędzia krzemienne w epoce kamienia na ziemi chełmińskiej. Studium traseologiczne*. Toruń.
- Osipowicz, G. 2017. *Społeczności mezolityczne Pojezierza Chełmińsko-Dobrzyńskiego. Próba modelowej analizy wieloaspektowej funkcji i organizacji przestrzennej wybranych obozowisk*. Toruń.

- Outram, A.K. 2008. Introduction to experimental Archaeology. *World Archaeology* 40(1): 1–6.
- Petersson, B., Narmo, L.E. (red.) 2011. *Experimental Archaeology. Between Enlightenment and Experience*. Lund.
- Pianowski, Z. 1977. Analiza traseologiczna wyrobów krzemiennych ze stanowiska schyłkowopaleolitycznego Wapienik 1/64, woj. Częstochowa. *Sprawozdania Archeologiczne* 29: 205–220.
- Plisson, H., Mauger, M. 1988. Chemical and mechanical alteration of microwear polishes: An experimental approach. *Helinium* 28: 3–16.
- Pyżewicz K., 2013a. Analiza traseologiczna materiałów krzemiennych, (w:) M. M. Przybyła, A. Szczepanek, P. Włodarczak (red.), *Koszyce, stanowisko 3. Przemoc i rytuał u schyłku neolitu*. Kraków-Pękowice, 179–202.
- Pyżewicz, K. 2013b. *Inwentarze krzemienne społeczności mezoalitycznych w zachodniej części Niżu Polskiego. Analiza funkcjonalna*. Zielona Góra.
- Pyżewicz, K., 2015a. Biographies of Magdalenian lithic tools from Poland. An in-depth look at two cases from the Kielecka Upland. *Anthropologie* 53(3): 519–529.
- Pyżewicz, K. 2015b. The use-wear analysis of the artefacts found at the Magdalenian site in Klementowice, (w:) T. Wiśniewski (red.), *Klementowice. A Magdalenian site in eastern Poland*. Lublin, 184–214.
- Pyżewicz, K. 2016. Microwear analyses of the selected flint artefacts, (w:) L. Domańska (red.), *Change and Continuity. Traditions of the Flint Processing from the perspective of the Tążyńska river valley*. Łódź, 193–225.
- Pyżewicz, K. (red.) 2019. *Żuławka 13, gm. Wyrzysk – pozostałości wielofazowego osadnictwa z epoki kamienia na terenie Wielkopolski*. Poznań.
- Pyżewicz, K., Gruzdz, W. 2014. Experimental research versus the popularisation of knowledge of the Stone Age. *Folia Praehistorica Posnaniensia* 19: 293–307.
- Pyżewicz, K., Gruzdz, W. 2019. Zastosowanie krzemiennych sztyletów i noży sierpowatych z wczesnej epoki brązu. Wybrane przykłady z obszaru małopolsko-wołyńskiego, (w:) M. Szmyt, P. Chachlikowski, J. Czebreszuk, M. Ignaczak, P. Makarowicz (red.), *VIR BIMARIS*
- Od kujawskiego matecznika do stepów nadczarnomorskich. Studia z dziejów międzymorza bałtycko-pontyjskiego ofiarowane Profesorowi Aleksandrowi Koško*. Poznań, 445–454.
- Rots, V. 2010. *Prehension and Hafting Traces on a Flint Tools. A Methodology*. Leuven.
- Schild, R., Marczak, M., Królik, H. 1975. *Późny mezolit. Próba wieloaspektowej analizy otwartych stanowisk piaskowych*. Wrocław-Warszawa-Kraków-Gdańsk.
- Semenov, S.A. 1957. *Pervobytnaja tehnika: opyt izučenija drevnejšich orudij i izdelij po sledam raboty*. Moskva-Leningrad.
- Semenov, S.A. 1964. *Prehistoric Technology. An Experimental study of the oldest tools and artefacts from traces of manufacture and wear*. London.
- Shimada, I. 2005. Experimental Archaeology, (w:) D.G.H. Maschner, C. Chippindale (red.), *Handbook of Archaeological Methods, vol. I*. Lanham-New York-Toronto-Oxford, 603–642.
- Van Gijn, A.L. 1990. *The wear and tear of flint. Principles of functional analysis applied to Dutch Neolithic assemblages*. Leiden.
- Van Gijn, A.L. 2010. *Flint in Focus. Lithic Biographies in the Neolithic and Bronze Age*. Leiden.
- Van Gijn, A.L. 2014. Science and interpretation in microwear studies. *Journal of Archaeological Science* 48: 166–169.
- Vaughan, P.C. 1985. *Use-Wear Analysis of Flaked Stone Tools*. Tucson.
- Whittaker, J.C. 1999. *Flintknapping. Making and understanding stone tools*. Austin.
- Winiarska-Kabacińska, M. 1998. Analiza funkcjonalna narzędzi krzemiennych, (w:) W. Śmigieński (red.), *Nauki przyrodnicze i fotografia lotnicza w archeologii*. Poznań, 175–182.
- Wiśniewski, A., Lauer, T., Chłoń, M., Pyżewicz, K., Weiss, M., Badura, J., Kalicki, T., Zarzecka-Szubińska, K. 2019. Looking for provisioning places of shaped tools of the late Neanderthals: A study of a Micoquian open-air site, Pietraszyn 49a (southwestern Poland). *Comptes Rendus Palevol* 18(3): 367–389.









# Ceramika – badania petroarcheologiczne

Piotr Gunia, Marta Krueger, Ewa Lisowska

---

## WSTĘP

Przedmiotem badań petrograficznych są często fragmenty naczyń ceramicznych o różnym przeznaczeniu oraz inne przedmioty wykonane z wypalanej gliny, takie jak: kafle piecowe, dachówki, cegły, fajki, figurki, ciężarki tkackie, pieczęcie, formy odlewnicze, tabliczki gliniane, polepa, rury ceramiczne i inne (Stoksik 2007; Reedy 2008; August i in. 2011; Quinn 2013).

Dzięki doświadczeniom wynikającym z wcześniej wykonywanych analiz mikroskopowych ceramiki w literaturze przedmiotu dość powszechnie używane są pojęcia: petrografia ceramiki (ang. *ceramics petrography*) oraz petrologii ceramiki (ang. *ceramic petrology*). W pierwszym przypadku chodzi o opisową interpretację cech petrograficznych ceramiki, a w drugim dokonywana jest szersza analiza historycznego warsztatu ceramicznego na podstawie wyników badań makro- i mikroskopowych, analizy strukturalnej, specjalistycznych badań mineralogicznych, interpretacji oznaczeń składu chemicznego, badań eksperymentalnych i innych (Quinn 2013) (ryc. 1, 2, 3).

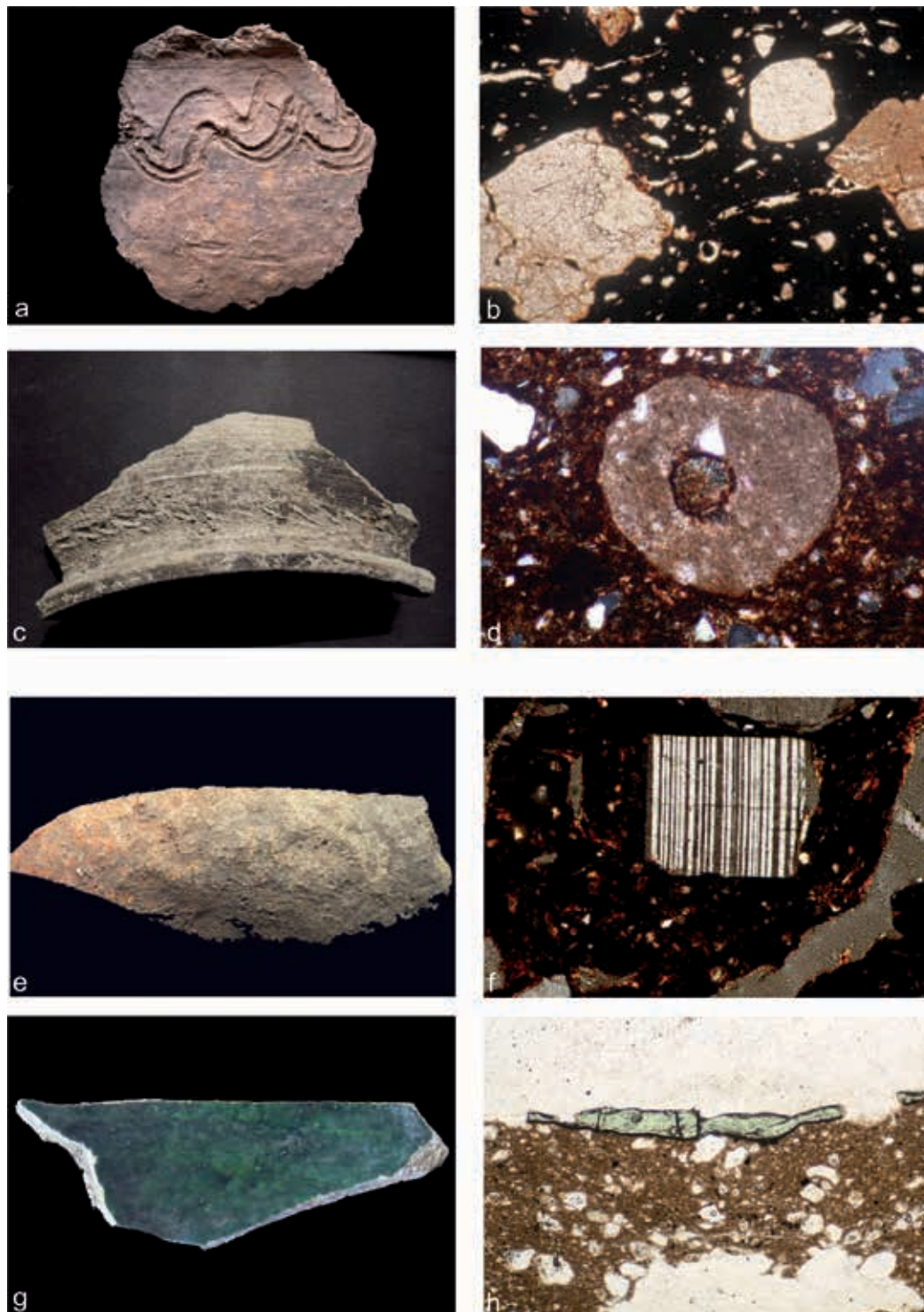
W niektórych publikacjach dotyczących analiz zabytkowej ceramiki wyróżniane są dwie procedury analityczne (Jacobs 1983; As 2004). Są tzw. badania podstawowe, „niskobudżetowe” (ang. *low-tech*)

obejmujące analizę cech makroskopowych i struktury wewnętrznej powierzchni przełamu fragmentów ceramiki widzianych w niedużym powiększeniu (ang. *fabric analysis*). Zastosowana procedura badawcza wywodzi się z kompleksowego systemu analizy ceramiki tzw. *Leiden approach*, który został stworzony w latach 60. XX w. w holenderskim ośrodku uniwersyteckim w Lejdzie przez Frankena i Kalsbeeka, a później był systematycznie udoskonalany przez badaczy związanych z tamtejszym Laboratorium Studiów Ceramologicznych (Franken i Kalsbeek 1969; As 1984; 2004; As i in. 2005; Nieuwenhuyse 2013).

Opisywane podejście składa się z trzech głównych etapów: selekcji materiałów do badań, przygotowania próbki do analizy oraz rozpoznania poszczególnych składników masy ceramicznej w powiększeniu. Preparatyka próbki polega na mechanicznym oddzieleniu niewielkiego fragmentu ceramiki, a następnie wyszlifowaniu na mokro wybranej powierzchni przełamu za pomocą papieru ściernego, najpierw o mniejszej, a później większej granulacji.

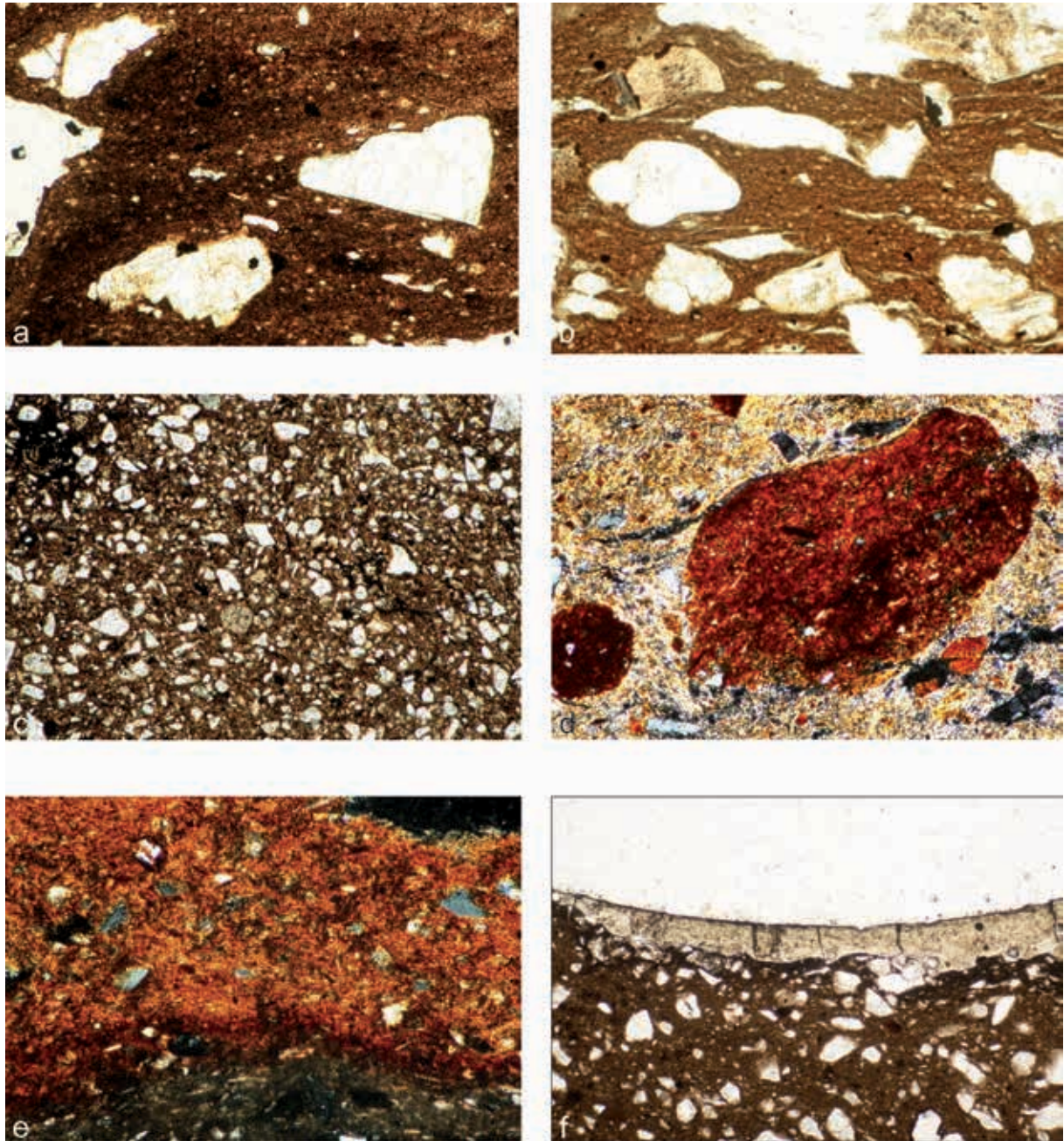
Rozpoznanie poszczególnych elementów jest wykonywane pod mikroskopem optycznym przy powiększeniu 10-80× na podstawie właściwości fizykochemicznych poszczególnych składników masy ceramicznej oraz ziaren minerałów i skał (przede wszystkim barwy, twardości, łupliwości, spójności,





**Ryc. 1.** Badania mikroskopowe ceramiki; a – powierzchnia zewnętrzna fragmentu średniowiecznej ceramiki z grodu w Tarnawie Rzepińskiej (woj. lubuskie) z falistym ornamentem grzebykowym; b – tło czerepu z obtoczonymi i ostrokrawędzistymi składnikami nieplastycznymi (Tarnawa Rzepińska, stan. 1). Mikrofotografia, pow. ok. 40×, nikole równoległe; c – powierzchnia zewnętrzna fragmentu wylewu i górnej części brzuśca średniowiecznego naczynia użytkowego z Grodziszcz (stan. 1; woj. lubuskie); d – tło czerepu średniowiecznej ceramiki z Grodziszcz (stan. 1) z zachowanym węglanowym przekrojem skamieniałości (stylak liliowca?). Mikrofotografia, pow. ok. 40×, nikole skrzyżowane; e – powierzchnia zewnętrzna fragmentu brzuśca średniowiecznego naczynia ceramicznego z Osiecznicy (stan. 1; woj. lubuskie); f – polisintetycznie (albitowo) zbliżniaczony plagioklaz w tle czerepu ceramiki z Osiecznicy (stan. 1) Mikrofotografia, pow. ok. 40×, nikole skrzyżowane; g – powierzchnia zewnętrzna późnośredniowiecznego szkliwionego kafa piecowego ze Stargardu (woj. zachodniopomorskie); h – pozostałości szkliwienia widoczne na przekroju poprzecznym kafa piecowego ze Stargardu. Mikrofotografia, pow. ok. 40×, nikole skrzyżowane. Fot. P. Gunia





**Ryc. 2.** Badania mikroskopowe ceramiki; a – gruboziarniste tło czerepu ceramiki (Grodziszczce, stan. 9, pow. świebodziński, woj. lubuskie). Mikrofotografia, światło niespolaryzowane, pow. ok. 40×; b – średnioziarniste tło czerepu ceramiki (Grzmiąca, stan. 1, pow. Wałbrzych, woj. dolnośląskie). Mikrofotografia, światło niespolaryzowane, pow. ok. 40×; c – drobnoziarniste tło czerepu ceramiki (Wicina, stan. 1, pow. Żary, woj. lubuskie). Mikrofotografia, światło niespolaryzowane, pow. ok. 40×; d – fragment szamotu (tzw. palonki) w tle czerepu ceramiki (Szadek, stan. 3, pow. kaliski, woj. wielkopolskie). Mikrofotografia, światło spolaryzowane, pow. ok. 40×; e – fragment kontaktu angoby z podstawowym tłem czerepu ceramiki (Pasym, stan. 1, woj. warmińsko-mazurskie). Mikrofotografia, światło spolaryzowane, pow. ok. 60×; f – pozostałości szkliwienia tła czerepu ceramiki z kafła piecowego (lokalizacja nieznana, znalezisko luźne, woj. zachodniopomorskie). Mikrofotografia, światło spolaryzowane, pow. ok. 60×. Fot. P. Gunia

połysku, magnetyzmu i reakcji z kwasem solnym). Ponadto każda frakcja zostaje szczegółowo scharakteryzowana z uwzględnieniem cech, takich jak ilość ziaren domieszki, jej posortowanie, granulacja, kształt ziaren oraz dystrybucja w obrębie danej próbki. W niektórych przypadkach, szczególnie gdy masa ceramiczna ma bardzo ciemną barwę, zaleca się dodatkowo wypalenie próbki przed analizą mikroskopową, w temperaturze nieprzekraczającej 750°C w celu utlenienia masy i łatwiejszego rozpoznania topników (Steiner i Jacobs 2008; As 2010: 33).

Interpretacja uzyskanych badań obejmuje tu zarówno analizę techniki wykonania naczyń (cykl „życia” naczynia – począwszy od pozyskiwanych/eksploatowanych pokładów gliny i innych surowców, sposobu przygotowania masy ceramicznej, poprzez sposób produkcji i dekoracji naczynia, wypał oraz jego wykorzystanie, a wreszcie wyłączenie z użytkowania), jak i rozbudowane badania eksperymentalne i studia etnograficzne (Annis 1985; 1988). Ponadto zainteresowania badawcze uwzględniają także: proces dystrybucji i handlu, organizacji ich produkcji i wyposażenia warsztatów ceramicznych oraz uwarunkowania społeczne i gospodarcze wytwórczości garncarskiej.

Druga procedura badawcza (ang. *high-tech*) polega na zastosowaniu bardziej zaawansowanych metod analitycznych, w tym: badań petrograficznych płytek cienkich (ang. *thin sections*) w świetle przechodzącym lub odbitym przy użyciu mikroskopu polaryzacyjnego; badań próbek metodą termicznej analizy różnicowej (ang. *differential thermal analysis*, DTA – analiza derywatograficzna) (ryc. 4), badań metodą dyfraktometrii rentgenowskiej (ang. *X-ray diffraction*, XRD) oraz badań powierzchni i punktowej analizy chemicznej na mikroskopie skanningowym (ang. *scanning electron microscopy*, SEM). Do badań składu chemicznego ceramiki wykorzystuje się różne metody analityczne, m.in.: rentgenowską analizę fluorescencyjną (ang. *X-ray fluorescence method*, XRF; zob. Krueger, w tym tomie), instrumentalną neutronową analizę aktywacyjną (ang. *instrumental neutron activation analysis*, INAA) czy indukowaną plazmą spektrometrię emisji atomowej (ang. *inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy*, ICP-AES). Obecnie do badań składu chemicznego tła ilaste go oraz drobnych fragmentów tłuczni w ceramice coraz częściej stosuje się również mikrosondę

elektronową (ang. EMPA) (por. Sobkowiak-Tabaka, w tym tomie). Do badań charakteru barwienia i składu fazowego powłok malarskich ceramiki przydatne są również metody spektrofotometrii w podczerwieni FTIR oraz badania widm wibracyjnych metodą Ramana (Daszkiewicz i Schneider 2014).

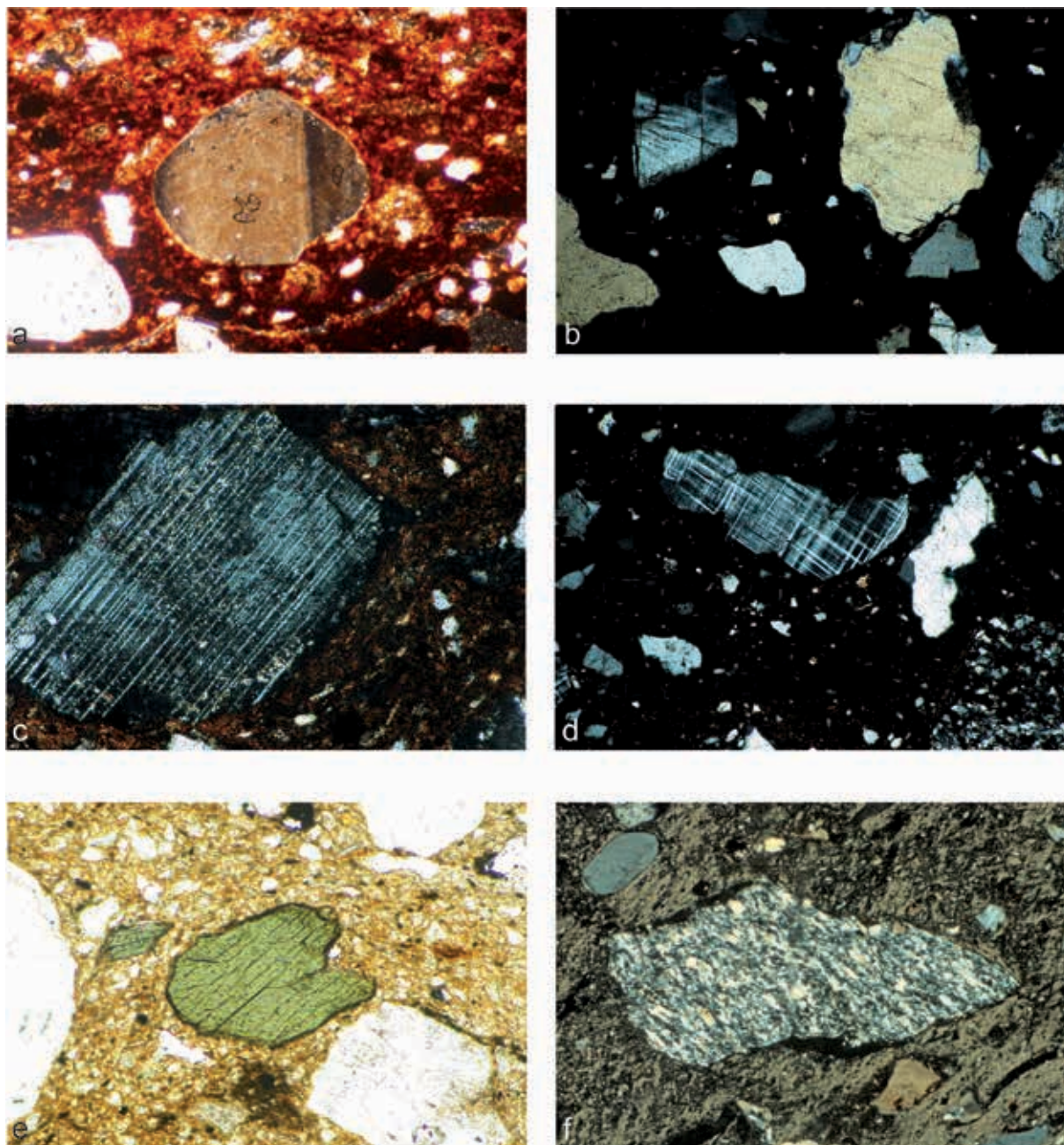
W dalszej części przedstawione zostaną zagadnienia związane z analizą petrograficzną płytek cienkich wykonanych z ceramiki (określanych także jako „cienkie szlify”), począwszy od selekcji próbek, poprzez preparatykę, zasady opisu mikroskopowego tła czerepu - przełamu. Następnie podano przykłady uzyskanych wyników badań petrograficznych ceramiki wykonanych dla niektórych stanowisk w Polsce.

### SELEKCJA I PREPARATYKA PRÓBEK DO BADAŃ PETROGRAFICZNYCH

Podczas dokonywania selekcji ceramicznych artefaktów do badań petrograficznych przyjmuje się zasadę, aby próbki były reprezentatywne dla całego zbioru. Wybór próbek do analiz powinien być każdorazowo poprzedzony rozpoznaniem całego zbioru danego materiału, zarówno pod względem typologicznym, technologicznym (np. ceramika ręcznie lepiona vs. toczona na kole), funkcjonalnym (np. naczynia: zasobowe, do gotowania, służące do serwowania posiłków, transportowe, do picia etc.), jak i stylistycznym. Należy dążyć do tego, aby wybrane materiały jak najdokładniej oddawały zróżnicowanie badanego zbioru, ale też pochodziły z dobrze rozpoznanych, bezpiecznych kontekstów archeologicznych (Peterson i Betancourt 2009).

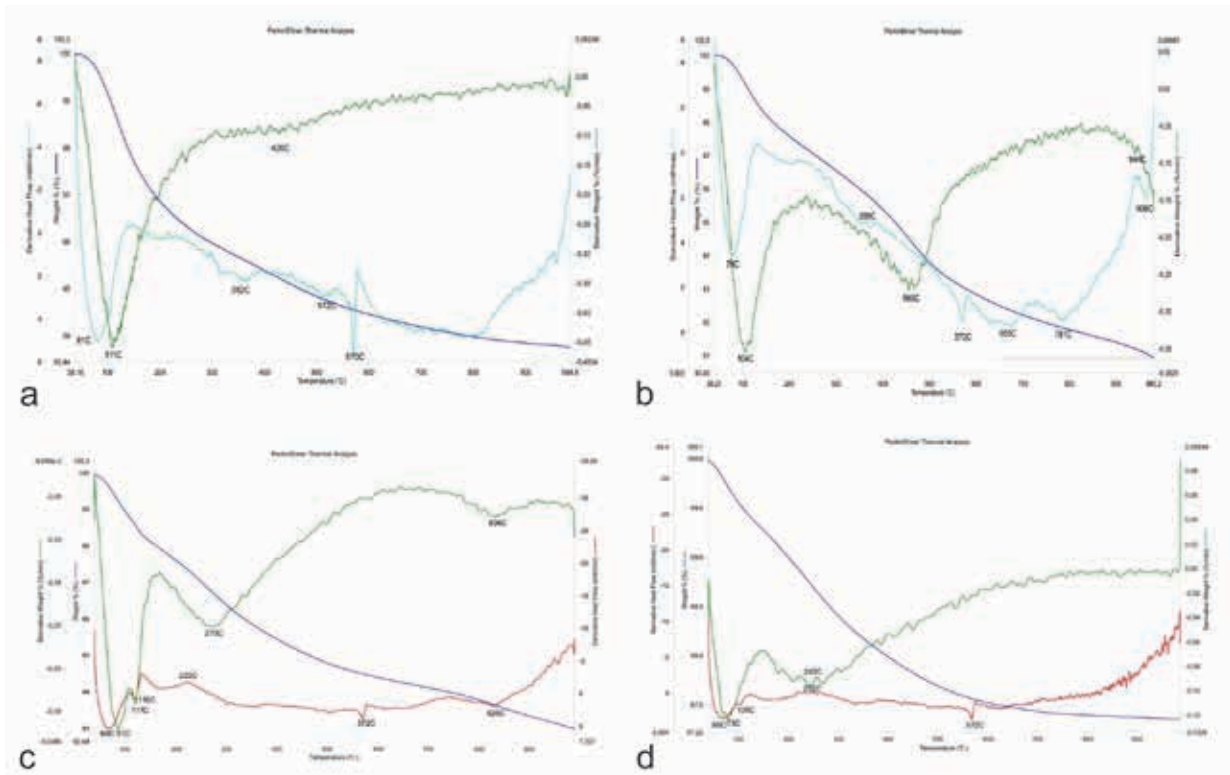
Zalecane jest przekazanie do analiz petrograficznych kilku fragmentów ceramiki z każdej interesującej badacza grupy, w taki sposób, żeby uzyskać jak najbardziej kompletny obraz danego zbioru. Zwykle sprowadza się to do wyboru takiej samej ilości fragmentów ceramiki z różnych form naczyń, typów lub z grup funkcjonalnych czy technologicznych. Ma to szczególne znaczenie w przypadku analiz ceramiki ręcznie lepionej, której skład może się różnić nawet w przypadku kilku próbek pochodzących z jednego naczynia ze względu na technikę jego wykonywania oraz wypału (Reedy 2008; As 2004; Peterson i Betancourt 2009).





**Ryc. 3.** Badania mikroskopowe ceramiki; a – obtoczone ziarno kwarcu z falistym wygaszaniem światła w tle czerepu ceramiki. (Domasław, stan. 11, pow. Wrocław, woj. dolnośląskie). Mikrofotografia, światło spolaryzowane, pow. ok. 60×; b – ostrokrawędziste ziarna kwarcu i skaleni w tle czerepu ceramiki (Mierzyn, stan. 1, pow. Międzychód, woj. wielkopolskie). Mikrofotografia, światło spolaryzowane, pow. ok. 40×; c – tabliczka plagioklazu z polisyntetycznym zbliżniaczeniem albitowym w tle czerepu ceramiki (Zielęcin, stan. 15, gm. Wielichowo, pow. Grodzisk Wlkp., woj. wielkopolskie). Mikrofotografia, światło spolaryzowane, pow. ok. 40×; d – fragment skalenia potasowego (mikroklinu) z dobrze zaznaczonymi krótkowymi zrostami bliźniaczymi w tle czerepu ceramiki (Zielęcin, stan. 15, gm. Wielichowo, pow. Grodzisk Wlkp. woj. wielkopolskie). Mikrofotografia, światło spolaryzowane, pow. ok. 40×; e – zaokrąglony fragment słupka hornblendy zwyczajnej w tle czerepu ceramiki (Milicz, stan. 1, woj. dolnośląskie). Mikrofotografia, światło niespolaryzowane, pow. ok. 40×; f – fragment łupka kwarcowo-skaleniowego w tle czerepu ceramiki. (Świebodzice, luźne znalezisko, woj. dolnośląskie). Mikrofotografia, światło spolaryzowane, pow. ok. 40×. Fot. P. Gunia





**Ryc. 4.** Przykładowe wyniki badań derywatograficznych. Termogramy próbek: a, b – Kamieniec Ząbkowicki, pow. ząbkowicki, woj. dolnośląskie; c, d – Nowy Kościół, pow. zlotoryjski, woj. dolnośląskie. Oprac. P. Gunia

Należy też pamiętać o tym, że zakres wykonywanych badań jest uzależniony od wielu czynników, począwszy od czasu, miejsca pracy, funduszy i pytań badawczych. W przypadku analiz naczyń ceramicznych czy innych artefaktów wykonanych z wypalanej gliny, procedura selekcji próbek jest podobna.

Badaniom petrograficznym ceramiki powinno towarzyszyć również rozpoznanie geologiczne terenu sąsiadującego ze stanowiskiem lub danym mikroregionem. Pomocne są także analizy makroskopowe i mineralogiczno-geochemiczne lokalnych próbek surowców ilastych, zwłaszcza w przypadku studiów nad proveniencją pewnych wytworów.

Do badań ceramiki wykorzystuje się mikroskopowe preparaty petrograficzne (nakrywane) o wielkości pola obserwacji około 20 mm × 20 mm i długości około 40 mm. Przygotowanie płytki cieniowej polega na wycięciu na sucho, za pomocą piły diamentowej, fragmentu ceramiki o wymiarach około 20 mm × 20 mm, o średnicy zależnej od grubości powierzchni przełamu. Zwykle wycinane próbki pochodzą ze strefy przejścia wylewu i górnej części brzuśca, chociaż zdarzają się również przypadki pobierania materiału ze środkowej części brzuśca

naczynia (np. z listwą plastyczną) lub z dna naczynia.

Podczas przygotowywania preparatów z ceramiki bardzo istotne jest określenie kierunku cięcia danego fragmentu naczynia. Zwykle przyjmuje się, że analizowana powierzchnia powinna być prostopadła do powierzchni wylewu i dna (prostopadła do średnicy naczynia). Cięcie równoległe do wylewu lub skośne jest rzadziej wykorzystywane, ale może być szczególnie użyteczne w pewnych określonych sytuacjach, np. podczas analizy techniki wykonywania naczyń (Woods 1985; Reedy 2008).

Proces przygotowywania płytek cieniowych do badań petrograficznych ceramiki obejmuje kilka etapów, podobnie jak w przypadku wykonywania preparatów z artefaktów kamiennych. Na początku następuje cięcie i impregnacja próbki balsamem kanadyjskim na gorąco i jej wysuszenie (od 1 do 4 godzin). Każdy wycięty fragment ceramiki przed zeszlifowaniem jest dokładnie badany w świetle odbitym w celu stwierdzenia, czy w tle jej czerepu nie znajduje się znaczna ilość szczelin lub porów mogących spowodować uszkodzenie wykonywanego preparatu (tzw. wysypianie) podczas dalszej jego obróbki. W przypadku zaobserwowania nadmiernej ilości

tych ubytków próbka musi zostać ponownie zaimpregnowana balsamem na gorąco, a jej dodatkowe suszenie może potrwać nawet do 4 godzin.

Po wyszlifowaniu i wygładzeniu zaimpregnowany fragment ceramiki zostaje naklejony na szkiełko podstawkowe za pomocą żywicy epoksydowej i następuje jego ponowne zeszlifowanie i wygładzenie do grubości około 30-40 µm. Po tym procesie pokrywa się go szkiełkiem nakrywkowym przyklejonym za pomocą balsamu kanadyjskiego. Po wykonaniu płytki cienkiej następuje jej suszenie przez co najmniej 24 godziny w temperaturze około 60-70°C.

### ZASADY OPISU PETROGRAFICZNEGO TŁA CZEREPY (PRZEŁAMU)

Podczas prowadzenia obserwacji mikroskopowej płytek cienkich w powiększeniu można zaobserwować pewne elementy strukturalno-teksturalne typowe dla wyrobów ceramicznych. Z geologicznego punktu widzenia obserwowane tło przypomina wyglądem skały klastyczne, takie jak: zlepiénce czy piaskowce, lecz odmienna niż w geologii jest terminologia służąca do opisu produktów wypału surowców ilastych.

Zwykle opis petrograficzny rozpoczyna się od przekazania informacji na temat cech makroskopowych badanej ceramiki uzyskanych podczas obserwacji obu powierzchni fragmentu naczynia makroskopowo (Pawlikowski 2020; Daszkiewicz i in. 2007). Do najważniejszych parametrów oceny makroskopowej należą: barwa (zmiennosc) i stopień wygładzenia obu powierzchni, obecność lub brak ornamentu, jego wzór i sposób wykonania (np. grzebykowy, kłuty, malowany itp.). Następnie podaje się informacje dotyczące cech teksturalnych powierzchni przełamu skorupy (np. obecności angoby czy śladów i rodzaju malatury, grafitowania, czernienia, lateralnej zmienności barwy itp.). Dużą pomoc w prawidłowej ocenie cech teksturalnych przełamu może przynieść skanowanie powierzchni płytki cienkiej w rozdzielczości co najmniej 1600 × 1600 pikseli. Uzyskany w ten sposób obraz można dodatkowo powiększyć za pomocą programów graficznych i dzięki temu otrzymać

wiele cennych informacji na temat szczegółów teksturalnych przekroju skorupy.

Do podstawowych terminów używanych do opisu zabytkowej ceramiki zarówno pradziejowej, jak i nowożytniej należy: tło czerepu (ang. *sherd background*), określane także jako przełam. Jest to pojęcie ogólne oznaczające zarówno tło ilaste, jak i znajdujące się w nim rozmaite komponenty stanowiące swoiste „linie papilarne” lokalnego warsztatu garncarskiego (Stoltman 1989; 2001).

Najczęściej wymienianymi elementami struktury tła czerepu są tzw. składniki schudzające masy garncarskiej. Z technologicznego punktu widzenia mają one zapobiegać nadmiernemu skurczeniu masy ilastej podczas wypału i zapobiegać pękaniu naczyń podczas ich silnego nagrzewania. W petrograficznej terminologii opisowej w odniesieniu do tych elementów używane są zwykle określenia: składniki nieplastyczne (ang. *non-plastic components*) lub/i tłuczeń (ang. *temper*). To drugie pojęcie wskazuje raczej na intencjonalne pochodzenie tych domieszek, przygotowanych specjalnie przez garncarza w celu uzyskania odpowiednich parametrów technologicznych wypalanych naczyń. W niektórych publikacjach termin ten jest jednak stosowany wyłącznie do charakterystyki ostrokrawędzistych fragmentów składników nieplastycznych.

Składniki nieplastyczne masy ceramicznej mogą być jednakowej lub różnej wielkości oraz zwykle są rozmieszczone w rozmaity sposób. W celu opisowej charakterystyki tych cech używane są zwykle pojęcia: struktura i tekstura. Terminy te odpowiadają geologicznej nomenklaturze stosowanej do opisu klastycznych skał osadowych. Pierwszy z nich jest parametrem opisu: wielkości bezwzględnych rozmiarów ziaren lub fragmentów tłuczenia, ich kształtu, wzajemnych stosunków i stopnia zaawansowania zmian wtórnych. W badaniach ceramologicznych pojęcie tekstury jest parametrem deskryptywnym obejmującym: orientację składników nieplastycznych (lub szklistych żyłek) i stopień wypełnienia przez nie przestrzeni.

Podobny znaczeniowo termin więźba stanowi odrębne określenie cech strukturalno-teksturalnych wynikających z połączenia opisów cech struktury i tekstury. Nie mniej jednak termin ten nie przyjął się na stałe w terminologii petrologicznej i jest raczej spotykany w pracach z geologii strukturalnej.

Podczas wykonywania opisu mikroskopowego poszczególnych składników nieplastycznych bierze

się pod uwagę ich cechy morfologiczne oraz własności optyczne. Szczegółowe informacje na ten temat można znaleźć w specjalistycznej literaturze petrograficznej (Borkowska i Smulikowski 1973; Manecki i Muszyński 2008).

Do odrębnych cech petrograficznych, raczej nie spotykanych podczas opisywania skał, należą: charakterystyka zawartości domieszki w tle ilastym oraz opisy „egzotycznych” elementów czerepu masy ceramicznej, takich jak szamot, pozostałości organiczne czy ślady malowania, grafitowania, angobowania lub szkliwienia powierzchni naczyń.

Termin matriks (ang. *matrix*) oznacza składniki nieplastyczne o wielkości znacznie mniejszej niż przeciętna wielkość poszczególnych fragmentów tłuczni. Jej zawartość określa się uznaniowo z podaniem głównych jej komponentów (np. kwarcowo-skaleniowa). Z kolei, szamot – inaczej „palonka” (ang. *grog*) to fragmenty wcześniej wypalanej ceramiki dodawanej do masy garncarskiej w celu jej schudzenia. Obecne w tle czerepu pozostałości organiczne (ang. *organic remnants*) mogą reprezentować zwęglone domieszki roślinno-zwierzęce (np. pędy roślin zielnych, fragmenty węgla drzewnego, słoma, włosie lub sierść zwierząt). Czasem opisywane są natomiast wyniki oznaczeń taksonomicznych mikro- i makrofauny znajdującej się w ilastej części masy (Riederer 2004; Quinn 2009; 2013).

Dla rozpoznania cech dawnego warsztatu garncarskiego dość ważne są również ilościowe oznaczenia składu mineralnego tła czerepu, tzw. analiza modalna. Zwykle wykonuje się ją metodami: planimetryczną bądź komputerowej analizy obrazu. Często przeprowadzana jest też ilościowa ocena wielkości składników nieplastycznych, czyli tzw. analiza uziarnienia (granulometryczna). Wykorzystując uzyskane rezultaty badań uziarnienia, można np. określić procentowy udział intencjonalnie przygotowywanego tłuczni znajdującego w masie garncarskiej. Podobnie oznaczony ilościowo skład mineralny tłuczni może wskazywać na preferencje w doborze skalnych składników schudzających (np. skały lokalne, głązy narzutowe i inne). Wyniki oznaczeń ilościowych przedstawiane są w rozmaity sposób np. za pomocą diagramów słupkowych, kołowych, histogramów czy tzw. krzywych kumulacyjnych.

Podczas badań mikroskopowych ceramiki szkliwionej można też określić obecność lub brak warstwy podścielającej szklistą powłokę, np. kafli piecowych lub naczyń użytkowych, lub grubość

i zmienność zabarwienia warstwy szkliwa. W przypadku wyrobów angobowanych cechy strukturalne powłok angoby zawierają wiele cennych informacji na temat zastosowanych technik zdobienia i „poprawiania” walorów estetycznych naczyń przed ich wypałem.

## MOŻLIWOŚCI I OGRANICZENIA ANALIZY PETROGRAFICZNEJ

Przedmiotem analiz, zarówno w przypadku metod *low-tech*, jak i *high-tech*, są zwykle dwa główne elementy: masa ilasta wykorzystana do wytworzenia naczynia; dodatki schudzające (zarówno domieszka mineralna, jak i organiczna), muszle, szamot i inne, które zostały dodane do masy ceramicznej. Jednakże bardzo często możliwe jest uzyskanie informacji także na temat sposobu wykonywania danego naczynia (ręcznie lepienie lub toczona na kole), oraz temperatury wypału i jego rodzaju, zabiegów związanych z ostatnim etapem produkcji naczyń (np. stosowania szkliwienia naczyń, ich angobowania czy istnienia tzw. self-slipu) czy przygotowaniem samej masy garncarskiej (np. poprzez jej wyszlamowanie). Celem badań jest możliwie najbardziej szczegółowe rozpoznanie i charakterystyka wspomnianych komponentów, a przede wszystkim dokonanie identyfikacji poszczególnych ziaren minerałów i/lub okruchów skalnych, jak również określenie wielkości i ilości poszczególnych frakcji, jej posortowanie, granulacja, kształt ziaren oraz ich dystrybucja w obrębie danej próbki (Daszkiewicz 2014). Na tym etapie określa się również strukturę i skład tła ceramiki (czyli tzw. matriksu / tła ilastego), w którym znajdują się ziarna domieszek lub pozostałości po nich (np. w przypadku wypalenia domieszki organicznej widoczne są zwykle jedynie negatywy po pierwotniej dodanej substancji schudzającej). Dzięki tym badaniom możliwe staje się zrozumienie procesów technologicznych związanych z tworzeniem naczyń i przedmiotów ceramicznych, a tym samym funkcjonowaniem dawnych warsztatów garncarskich.

Należy też zauważyć, że badania nad technologią wykonania naczyń pozwalają nie tylko zrozumieć, w jaki sposób tworzone pewne przedmioty, ale dają często odpowiedź na pytanie: dlaczego wykonywano je właśnie w taki sposób? Dzięki temu umożliwiają dostrzeżenie pewnych szerszych



trendów i procesów, jak np. istnienie specjalizacji w wytwórczości garncarskiej, określenie pewnych preferencji w doborze materiałów (surowców glinianych), funkcjonowanie trendów czy wzorców w tym zakresie. Często oparta na wynikach badań petrograficznych analiza technologiczna tych przedmiotów pozwala na określenie funkcji badanych naczyń (choć często wymaga to jednak bardziej zintegrowanych badań), ich proveniencji czy nawet umożliwia badanie procesów akulturacji (zob. poniższe przykłady, a także Krueger i Moreno Megias 2021). Z drugiej strony analizy petrograficzne mają też swoje ograniczenia, wynikające przede wszystkim z samej specyfiki materiału, jakim jest ceramika pradziejowa. Warto mieć to na uwadze, aby uniknąć pewnych pułapek interpretacyjnych podczas oceny rezultatów badań czy nawet wyboru materiałów do analizy.

Trzeba również odnotować, że ceramika jest jednym z najbardziej przetworzonych materiałów pradziejowych. Istnieje bowiem wiele czynników, które przekładają się na skład („wygląd”) próbki, np. wykorzystane surowce (zarówno glina, jak i topniki), warunki i temperatura wypału, techniki wykonania naczyń czy nawet jego forma. Jedną z podstawowych trudności może być rozróżnienie komponentów istniejących w pierwotnej glinie od składników celowo do niej dodanych. Ma to zwłaszcza znaczenie w badaniach nad proveniencją wytworów glinianych. Należy pamiętać, że bardzo rzadko pierwotnie pozyskana glina służyła do produkcji naczyń. Zwykle podlegała ona licznym zabiegom (np. była magazynowana, przemrażana, dołowana, ugniatana, szlamowana etc.) zanim została użyta do formowania naczyń. Domieszka także jest przeważnie przetwarzana, zanim zostanie wykorzystana (np. rozdrabniania, rozbijana, podgrzewana, sortowana pod względem wielkości itp.). Ponadto sam proces wypału znacząco zmienia właściwości, a często i skład masy ceramicznej (Shepard 1956; Rye 1976; 1981).

Domieszka organiczna w masie ceramicznej pod wpływem wypału ulega często utlenieniu, pozostawiając jedynie puste przestrzenie – pory. Podobnie, część minerałów ulega destrukcji lub przekształca się w inne związki, np. kwarc w krystobalit (Reedy 2008). Świadomość modyfikacji, jakim podlega masa garncarska i znajdująca się w niej domieszka, ma istotne znaczenie zwłaszcza przy badaniu kwestii, takich jak wymiana pewnych towarów (zagadnienie importów) czy istnienie naśladownictwa

form i zdobień naczyń. Ponadto zwłaszcza naczynia ręcznie lepiące charakteryzują się bardzo nierównomiernym rozmieszczeniem składników w masie glinianej. Oznacza to, że analizując kilka próbek pochodzących z tego samego naczynia, można uzyskać zupełnie odmienne rezultaty. Warto mieć to na uwadze przy selekcji próbek i wybierać materiały pochodzące z podobnych części naczyń.

W przypadku analizy cech makroskopowych jej podstawowym ograniczeniem jest stosunkowo niewielki zakres rozpoznania składników i samej masy ceramicznej. Pozwala ona na dość ogólną charakterystykę komponentów analizowanej próbki, natomiast identyfikacja skał (zwłaszcza metamorficznych) jest utrudniona lub wręcz niemożliwa. Oprócz tego drobne frakcje znajdujące się w obrębie matriks są dość trudne do wiarygodnej interpretacji. Jednak metoda ta, ze względu na swoją prostotę, możliwość wykorzystania powszechnie dostępnego sprzętu i niską cenę, świetnie służy do wstępnego rozpoznania dużej liczby próbek ze zbioru i ich kategoryzacji ze względu na cechy strukturalne (ang. *fabric group*). Pozwala ona wychwycić zróżnicowanie między poszczególnymi kategoriami zabytków i sformułować hipotezy robocze, które mogą być później zweryfikowane za pomocą bardziej dokładnych i zaawansowanych narzędzi. Poza tym może być także wykonywana w warunkach terenowych, w czasie trwających jeszcze prac wykopaliskowych (As 2004). W ostatnim okresie pojawiają się także mobilne laboratoria, które pozwalają wykonywać próbki i same oznaczenia także w trakcie prac terenowych (Goren 2014).

Największą zaletą analizy mikroskopowej płytek cienkich (szlifów) jest jej ogromny potencjał poznawczy, który umożliwia szczegółowe rozpoznanie jakościowe i ilościowe wszystkich komponentów masy ceramicznej. Oprócz identyfikacji ziaren poszczególnych skał czy minerałów możliwe jest też określenie rodzaju zastosowanej domieszki organicznej (pędy roślin, fragmenty węgla drzewnego, słoma, włosie i sierść zwierząt). Odrębnie opisywane są również wyniki oznaczeń taksonomicznych mikro- i makrofauny znajdującej się w tle ilastym (Riederer 2004; Quinn 2009; 2013). Oprócz charakterystyki fragmentu naczynia oceniane są również zabiegi technologiczne związane z tworzeniem naczyń – takich jak np. glazurowanie, pokrywanie slipem, zróżnicowanie sposobów dekoracji, malowania ceramiki. Pozwala także wnioskować

o porowatości ceramiki, temperaturze wypału, jego charakterze oraz stopniu witrifikacji (Reedy 2008; Quinn 2013).

### **BADANIA ARCHEOMETRYCZNE CERAMIKI – PRZYKŁADY**

Badania archeometryczne, eksperymentalne oraz petrografia ceramiki zostały wykorzystane, aby wyjaśnić problem tzw. ceramiki grafitowanej w kulturze łużyckiej (Łaciak 2017: 31-66; Łaciak i Stoksik 2010). Ten rodzaj ceramiki stosunkowo często pojawia się na stanowiskach sepulkralnych z wczesnej epoki żelaza. Od lat trwa również dyskusja dotycząca genezy ciemnego metalicznego połysku na naczyniach, który najczęściej przypisywano grafitowaniu powierzchni. Badania zainicjowane przez D. Łaciak rzuciły nowe światło na sam proces tzw. grafitowania. Dla zastawów ceramiki kultury łużyckiej z Dolnego Śląska wykonano całe spektrum badań petrograficznych, derywatograficznych, które uzupełniono przez dyfrakcję rentgenowską i spektroskopię ramanowską. Dla porównania wykonano eksperymentalnie naczynia, których powierzchnię następnie czerniono substancją organiczną. Wyniki tych analiz wskazały, że do opracowania powierzchni naczyń „grafitowanych” wykorzystywano nie tylko substancję mineralną, ale w dużej mierze również organiczną, co dawało podobny efekt wizualny (Łaciak i in. 2019).

W przypadku ceramiki neolitycznej niezwykle ciekawe wyniki badań petrograficznych przeprowadzono dla materiałów kultury ceramiki wstęgowej kłutej. Analiza w świetle przechodzącym i odbitym składu masy garncarskiej, uzupełniona o badania mikroskopem skaningowym, pozwoliła wydzielić w naczyniach minerał staurolit, który celowo dodawano do gliny celem poprawy parametrów technicznych wyrobów (Borowski i in. 2015). Steatyt pozyskiwano najprawdopodobniej z jednej z kilku wychodni na Przedgórzu Sudeckim, które sąsiadowały ze stanowiskami kultury ceramiki wstęgowej kłutej. Zabieg celowego dodawania do domieszki steatytu jest rozpoznawany stosunkowo rzadko, a badania petrograficzne ceramiki z dolnośląskich stanowisk neolitycznych po raz pierwszy ujawniły obecność takiego komponentu.

Do unikatowych badań wykorzystujących mikroskopię elektronową (SEM) należą analizy ceramiki kultury wstęgowej rytej, które wykonano dla kilkunastu stanowisk z południowo-wschodniej Polski (Moskal del-Hoyo i in. 2017). Dzięki zastosowanej metodzie analizy mikroskopowej anatomii roślin dodawanych jako domieszka do wczesnoneolitycznej ceramiki możliwe było uzyskanie informacji o konkretnych gatunkach zbóż (pszenica płaskórka, pszenica samopsza oraz dzikie odmiany jęczmienia) i wiechlinowatych obecnych w masie ceramicznej. Identyfikacja taka nie byłaby możliwa, obserwując standardowe cechy morfologii roślin nawet przy użyciu mikroskopu stereoskopowego. Co więcej, obecność wspomnianej roślinności w masie ceramicznej wskazuje na bliskie powiązania najstarszych faz pierwszych kultur rolniczych w Polsce z zespołami bałkańskimi Starčevo–Körös–Criș (Moskal del-Hoyo i in. 2017: 339).

Badania petrograficzne z powodzeniem mogą być stosowane w analizach ceramiki budowlanej. Przeprowadzono je m.in. dla rur ceramicznych i cegieł pochodzących z badań średniowiecznego Wrocławia, wykazując lokalne podobieństwa i różnice w doborze odpowiedniego materiału, a także oszacowano temperaturę ich wypału (August i in. 2011). Stosunkowo najwięcej analiz ceramiki budowlanej (często wraz z zaprawami) przeprowadzono dla średniowiecznych zamków oraz kościołów (Bartz 2014; Buśko i Michniewicz 2006; Witkowska 2017; Witkowska i Łukaszewicz 2016). W badaniach tych próbuje się ustalić nie tylko technologię przygotowania budulca, ale także pochodzenie z jednego lub kilku warsztatów, a w przypadku zapraw ich kompozycję chemiczną. W badaniach zapraw istotne zmiany ich składu mogą być związane także z ustaleniem czasu ich aplikacji, warunków powstania i użytych komponentów (Bartz i Filar 2010; Michalska 2014a; 2014b). Dla niektórych zapraw przeprowadzono również z powodzeniem próby datowań AMS węgla znajdującego się w ich wnętrzu (Michalska 2014c).

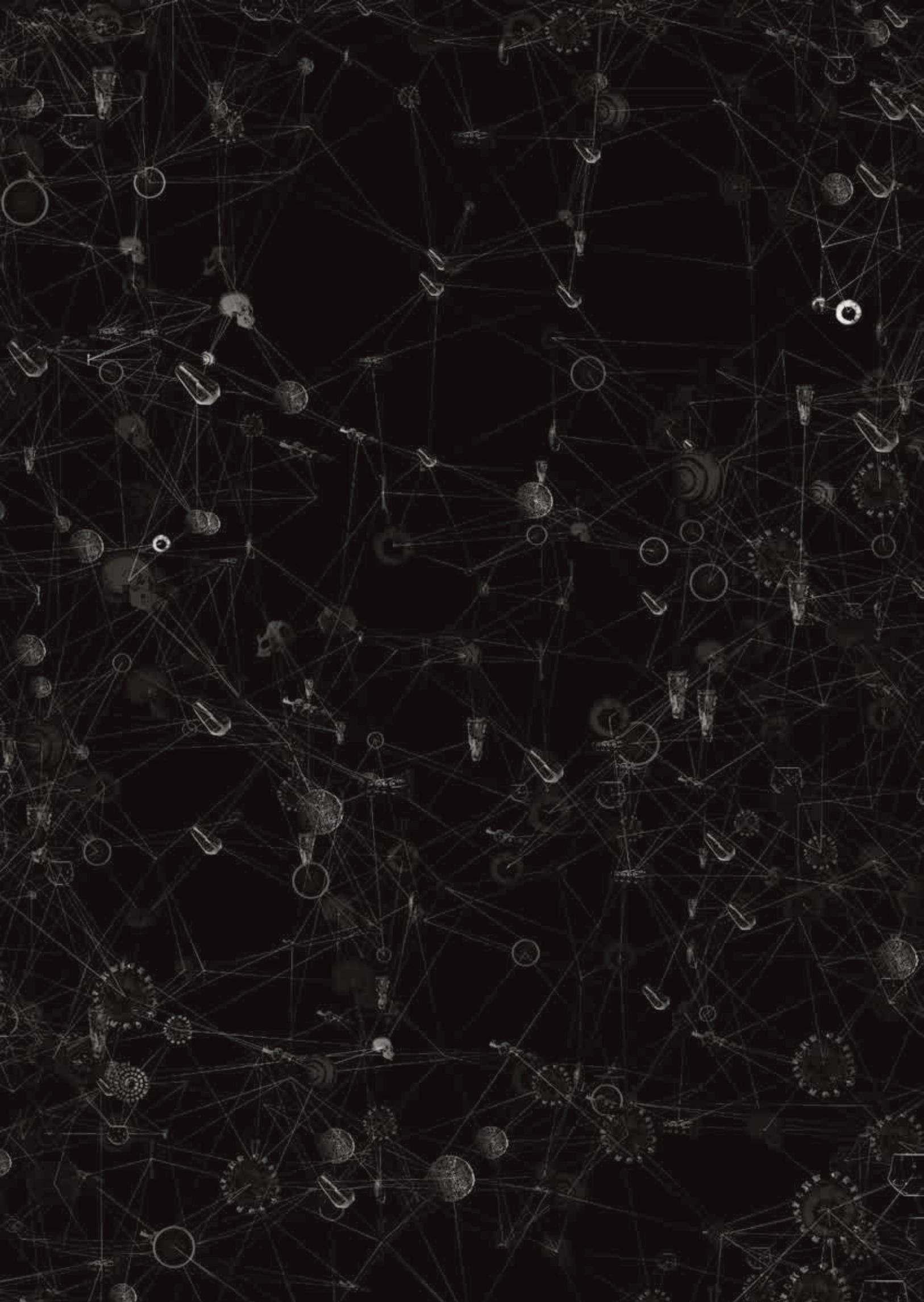
Badania petrograficzne ceramiki na podstawie analiz mikroskopowe należą do wciąż rozwijanych dziedzin archeometrii. Jest to metoda perspektywiczna, dająca badaczom szerokie pole manewru zarówno w zakresie doboru analiz uzupełniających, jak i możliwości interpretacji wyników, a także eksperymentalnego testowania nowych technologii.

## LITERATURA

- Annis, M.B. 1985. Resistance and change: pottery making in Sardinia. *World Archaeology* 17: 240–55.
- Annis, M.B. 1988. Modes of production and the use of space in potters workshops in Sardinia: a changing picture. *Newsletter of the Department of Pottery Technology* 6: 47–78.
- As, A. van, 1984. Reconstructing the potter's craft, (w:) S.E. van der Leeuw, A.C. Pritchard (red.), *The dimensions of pottery*. Amsterdam, 131–64.
- As, A. van, 2004. Leiden studies in pottery technology. *Leiden Journal of Pottery Studies* 20: 8211–8222.
- As, A. van, 2010. How and why? The Neolithic pottery from Teleor 003, Teleor 008 and Magura-Bran, Teleorman River Valley, Southern Romania. *Buletinul Muzeului Județean Teleorman* 2: 29–43.
- As, A. van, Jacobs, L., Thissen L. 2005. Vădastra pottery from Teleor 003, Teleorman River Valley, Southern Romania: a preliminary report. *Leiden Journal of Archeological Ceramic Studies* 21: 61–68.
- August, C., Chudziak, J., Gunia, P. 2011. Temperatura wypału ceramiki budowlanej z późnośredniowiecznego Wrocławia w świetle badań fazowych, (w:) A. Michalak, A. Jaszewska (red.), *Ogień – żywioł ujarzmiony i nieujarzmiony*. Zielona Góra, 393–405.
- Bartz, W. 2014. Characterization of the bricks from the Medieval castle in Wrocław (SW Poland) and identification of the construction phases by petrographic analyses. *Mineralogia – Special Papers* 42: 123.
- Bartz, W., Filar, T. 2010. Mineralogical characterization of rendering mortars from decorative details of a baroque building in Kozuchów (SW Poland). *Materials Characterization* 61: 105–115.
- Borkowska, M., Smulikowski, K. 1973. *Minerały skałotwórcze*. Warszawa.
- Borowski, M., Furmanek, M., Czarniak, K., Gunia, P. 2015. Steatite-tempered pottery of the Stroke Ornamented Ware culture from Silesia (SW Poland): a Neolithic innovation in ceramic technology. *Journal of Archaeological Science* 57: 207–222.
- Buśko, C., Michniewicz, J. 2006. Application of petrographical comparative analysis in dating of spatial development of the castle Wleń. *Przegląd Archeologiczny* 54: 183–211.
- Daszkiewicz, M. 2014. Ancient pottery in the laboratory – principles of archaeoceramological investigations of provenance and technology. *Novensia* 25: 177–198.
- Daszkiewicz, M., Schneider, G. 2014. Analysis of chemical composition of ancient ceramics. *Novensia* 25: 199–206.
- Daszkiewicz, M., Schneider, G., Haeser, J., Bobryk, E., Baranowski, M. 2007. Possibilities and Limitations of Macroscopic Determination of Pottery Fabrics in the Field, (w:) K.T. Biró, V. Szilágyi, A. Kreiter (red.), *Vessels: Inside and Outside. Proceedings of the Conference EMAC '07, 9th European Meeting on Ancient Ceramics 24–27 October 2007*. Budapest, 29–36.
- Franken, H.J., Kalsbeek, J. 1969. *Excavations at Tell Deir 'Alla I. A stratigraphical and analytical study of the Early Iron Age pottery*. Leiden.
- Goren, Y. 2014. The operation of a portable petrographic thin-section laboratory for field studies. *New York Microscopical Society Newsletter* 2014: 1–17.
- Jacobs, L. 1983. A summary of the research methods, *Newsletter, Department of Pottery Technology* 1: 34–35.
- Krueger, M., Moreno Megias, V. 2021. La Transición Bronce Pleno–Orientalizante en Setefilla (Lora Del Río, Sevilla): datos arqueométricos de una secuencia estratigráfica. *Estudios Arqueológicos de Oeiras* 29: 25–32.
- Łaciak, D. 2017. *Nadodrzańska ceramika malowana. Społeczno-kulturowe konteksty wytwórczości we wczesnej epoce żelaza*. Wrocław.
- Łaciak, D., Stoksik, H. 2010. Problematyka ceramiki malowanej i „gratowanej” z wczesnej epoki żelaza w świetle badań fizykochemicznych. *Przegląd Archeologiczny* 58: 105–146.
- Łaciak, D., Borowski, M., Łydzba-Kopczyńska, B., Baron, J., Furmanek, M. 2019. Archaeometric characterization and origin of black coatings on prehistoric pottery. *Geochemistry International* 79: 453–466.
- Manecki, A., Muszyński, M. (red.) 2008. *Przewodnik do petrografii*. Kraków.
- Michalska, D. 2014a. Mortar in archaeometric research, (w:) D. Michalska, M. Szczepaniak (red.), *Geosciences in Archaeometry. Methods and case studies*. Poznań, 119–126.
- Michalska, D. 2014b. Organic components in mortars, (w:) D. Michalska, M. Szczepaniak (red.), *Geosciences in Archaeometry. Methods and case studies*. Poznań, 127–138.
- Michalska, D. 2014c. Radiocarbon dating of mortars, (w:) D. Michalska, M. Szczepaniak (red.), *Geosciences in Archaeometry. Methods and case studies*. Poznań, 139–152.
- Moskal del-Hoyo, M., Rauba-Bukowska, A., Lityńska-Zajac, M., Mueller-Bieniek, A., Czekaj-Zastawny A. 2017. Plant materials used as temper in the oldest Neolithic pottery from south-eastern Poland. *Vegetation History and Archaeobotany* 26: 329–344.
- Nieuwenhuys, O.P. 2013. The social uses of decorated ceramics in Late Neolithic Upper Mesopotamia, (w:) O.P. Nieuwenhuys, R. Bernbeck, P.M.M.G. Akkermans, J. Rogasch (red.), *Interpreting the Late Neolithic of Upper Mesopotamia, Papers on Archaeology of the Leiden Museum of Antiquities* no. 9. Brepols, 135–145.
- Peterson, S.E., Betancourt, P.P. 2009. *Thin-section petrography of ceramic materials* 2. Philadelphia.
- Pawlikowski, M. 2020. *Ceramologia archeologiczna*. Krosno.
- Quinn, P.S. 2009. *Interpreting silent artefacts. Petrographic approaches to Archaeological Ceramics*. Oxford.



- Quinn, P.S. 2013. *Ceramic petrography: the interpretation of archaeological pottery & related artefacts in thin section*. Oxford.
- Reedy, C.L. 2008. *Thin-section petrography of stone and ceramic cultural materials*. London: Archetype: 264–264.
- Riederer, J. 2004. Thin section microscopy applied to the study of archaeological ceramics. *Hyperfine Interactions* 154(1): 143–158.
- Rye, O. 1976. Keeping your temper under control: Material and the Manufacture of Papuan Pottery. *Archaeology and Physical Anthropology in Oceania* 11(2): 106–137.
- Rye, O. 1981. *Pottery Technology: Principles and Reconstruction*. Washington.
- Shepard, A.O. 1956. *Ceramics for the Archaeologist*. Washington.
- Steiner, M.L., Jacobs, L. 2008. The Iron Age Pottery of al-Lehun, Jordan: Fabrics and Technology. *Leiden Journal of Pottery Studies* 24: 133–41.
- Stienstra, P. 1986. Systematic macroscopic description of the texture and composition of ancient pottery – some basic methods. *Newsletter Department of Pottery Technology* 4: 29–48.
- Steiner, M.L., Jacobs, L. 2008. The Iron Age Pottery of Al-Lehun, Jordan: Fabrics and Technology. *Leiden Journal of Pottery Studies* 24: 133–40.
- Stoksik, H. 2007. *Technologia warsztatu ceramicznego średniowiecznego Śląska w świetle badań specjalistycznych i eksperymentalnych*. Wrocław.
- Stoltman, J.B. 1989. A quantitative approach to the petrographic analysis of ceramic thin sections. *American Antiquity* 54(1): 147–160.
- Stoltman, J.B. 2001. *The role of petrography in the study of archaeological ceramics*. In *Earth sciences and archaeology*. Boston, 297–326.
- Witkowska, K. 2017. Badania nad średniowiecznymi materiałami budowlanymi z zamku w Radzynie Chełmińskim. *Zabytkoznawstwo i Konserwatorstwo* 48: 37–56.
- Witkowska, K., Łukaszewicz, J. 2016. Comparative Studies on Masonry Bricks and Bedding Mortars of the Fortress Masonry of the Teutonic Order State in Prussia: Malbork, Toruń and Radzyń Chełmiński Castles, (w:) J.J. Hughes, T. Howind (red.), *Science and Art: A Future for Stone: Proceedings of the 13th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone*. Paisley, 621–629.
- Woods, A. 1985. An introductory note on the use of tangential thin sections for distinguishing between wheel-thrown and coil ring-built vessels. *Bulletin of the Experimental Firing Group* 3: 100–114.









# Ceramika – badania osadów organicznych wnętrza naczyń

Marta Krueger

---

## WPROWADZENIE

Badania nad pozostałościami substancji organicznych mają długą historię, a ich rozwój jest nierozzerwalnie związany z formowaniem się dyscyplin takich jak archeologia biomolekularna czy archeometria (Brown i Brown 2011: 3-4; Barnard i Eerkens 2017). Nadrzędnym celem tych studiów jest rozpoznanie związków organicznych zachowanych na artefaktach (np. ceramice, narzędziach kościanych i kamiennych) i ekofaktach (np. kościach, zębach, drewnie i porożu), wykorzystując metody zaczerpnięte z nauk, takich jak biologia, genetyka, chemia czy fizyka. Grupa związków możliwych do zidentyfikowania jest szeroka i obejmuje kilka podstawowych grup: lipidy (tłuszcze, woski i sterole), proteiny (np. kazeina, gliadyna, hemoglobina, kolagen i hordeina), węglowodany, aDNA czy alkaloidy (np. kofeina, kokaina, efedryna, nikotyna i kapsaicyna) (Evershed i Heron 1991; Barnard i Eerkens 2017; Barker i in. 2018; Barker i in. 2012; Smith i in. 2018; Echeverria i in. 2014; Reber i Kerr 2012; Valamoti i Garnier 2013). Przedmiotem analiz są zarówno pozostałości organiczne widoczne makroskopowo, i one są głównie identyfikowane przy wykorzystaniu technik mikroskopowych, jak i frakcje niewidoczne „gołym okiem” rozpoznawane na poziomie molekularnym dzięki technikom spektroskopowym

i chromatograficznym. Potencjał poznawczy oferowany przez współczesne laboratoria jest więc ogromny i daje szansę na rozpoznanie wielu kwestii związanych z dietą, praktykami kulinarnymi, technologiami, wymianą handlową, specjalizacją, gospodarką, medycyną, kosmetyką czy kwestiami społecznymi, a nawet chronologią, by wymienić tylko kilka (Evershed 2008; Oudemans 2007; Steele 2013).

Jednakże wielość substancji możliwych do rozpoznania wiąże się także z istnieniem bardzo wielu metod analitycznych i procedur badawczych, które muszą być uwzględnione już na etapie formułowania celów badawczych danego projektu. Każda z substancji jest zwykle identyfikowana przy wykorzystaniu nieco innych procedur badawczych, a ich wybór jest zwykle uwarunkowany rodzajem „poszukiwanych” związków chemicznych. Celem tego rozdziału jest więc nie tylko pokazanie możliwości konkretnych metod, ale i ich ograniczeń, a także podstawowych trudności interpretacyjnych związanych z ich wykorzystaniem. Dodatkowo krótko zostaną omówione procedury związane z selekcją materiałów do analiz oraz zaprezentowane przykładowe kryteria wyboru próbek ze względu na konkretne pytania badawcze. Ze względu na złożoność poruszanej tematyki prezentowany rozdział skupia się przede wszystkim na materiale masowym, jakim jest ceramika, i omawia najczęściej stosowane metody analiz związków organicznych zachowanych

na naczyniach. Analizy lipidów zostają najszerzej omówione ze względu na zdecydowanie największą zdolność lipidów do przetrwania na tym rodzaju artefaktów oraz szerokie rozpowszechnienie tych badań na gruncie archeologii.

### KRÓTKA HISTORIA BADAŃ

Najwcześniejsze badania osadów organicznych koncentrowały się na dobrze widocznych pozostałościach zachowanych nie tylko na naczyniach ceramicznych, ale także na wielu różnych przedmiotach, np. narzędziach kościanych, tekstyliach, kościach, ceglach, biżuterii etc. (Evershed 1993: 75; Gangl 1936; Lucas i Harris 1962; von Stokar 1938). Identyfikacja poszczególnych związków była dokonywana na podstawie ich właściwości fizycznych i polegała na mierzeniu punktu topnienia i rozpuszczalności. Dobrym przykładem takich badań są studia nad dziegiem podjęte przez Karla Freiherra von Reichenbacha w latach 1830-1833. Z kolei prekursorem badań nazarów z galijsko-rzymskich naczyń był Marcellin Berthelot. W 1906 r. dokonał on rozdzielania i identyfikacji kwasu palmitynowego, oleinowego i stearynowego za pomocą filtracji przez sączek, po uprzednim dodaniu alkoholu i alkaliów (Berthelot 1906: 128-129). W 1933 r. Grüss zidentyfikował ślady spalonego mleka i przetworów mlecznych z nazarów na naczyniach halsztackich (Grüss 1933). Oznaczenie chemicznego składu masy bitumicznego pochodzącej z wykopalisk Wooleya w Ur została wykonana przez dwóch badaczy – Hackforda (Hackford i in. 1931) i Forbesa (1936).

Przełomowy moment w rozwoju metod analizy osadów organicznych z naczyń ceramicznych przyniosła aplikacja spektrometrii masowej i chromatografii gazowej/cieczowej. Pierwsze próby wykonania oznaczeń substancji organicznych niewidocznych bezpośrednio na powierzchni naczyń zostały wykonane przez zespół badawczy kierowany przez Jacquesa Condamina w 1976 r. (Condamin i in. 1976). Stworzony został wtedy protokół analityczny, który z pewnymi modyfikacjami funkcjonuje do dzisiaj (zob. poniżej). Obejmował on kilka etapów: przygotowanie próbki, jej rozkruszenie na proszek, ekstrakcję poprzez dodanie metanolu do próbki, odparowanie oraz zmydlenie ekstraktu, ponowne odparowanie i kolejne rozpuszczenie w chloroformie (Condamin i in. 1976). Otrzymany ekstrakt

został następnie poddany analizie przy wykorzystaniu chromatografu gazowego i spektrometru masowego, a wyniki porównano z próbką współczesnej oliwy z oliwek. Wkrótce podobne studia zostały podjęte przez innych badaczy, m.in. przez Millsa i White'a w 1977 r. (analiza żywicy z kartagińskiego statku), Rottländera i Hartke'a w 1982 r. (analiza galo-rzymskiej ceramiki z Noreia) czy Millsa w 1982 r. (badania żywicy z bizantyjskich naczyń zasobowych) (Mills i White 1989: 24; Rottländer i Hartke 1982; Evans i Hills 1982).

Intensywny rozwój badań nad osadami organicznymi nastąpił w latach 80. i 90. XX w., kiedy to wypracowana została dokładna procedura analityczna oraz podjęto liczne badania eksperymentalne analizujące sposób zachowywania się konkretnych produktów oraz wpływ czynników środowiskowych na ich degradację. Głównym przedmiotem zainteresowania stały się lipidy, które występowały w wielu kontekstach archeologicznych i wykazywały relatywnie wysoką odporność na działanie czynników podepozycyjnych. Analizy koncentrowały się zarówno na próbkach naczyń ceramicznych czy kościach, ale także glebie, koprolitach czy fragmentach zachowanych tkanek ludzkich (Evershed 1993; Knights i in. 1983; Pepe i in. 1989; Pepe i Dizabo 1990). Ważny wkład stanowiły badania Richarda Eversheda i jego zespołu z ośrodka w Bristolu, który rozpoczął intensywne prace nad udoskonaleniem metod analitycznych i dzięki zastosowaniu wysokotemperaturowej chromatografii gazowej (HT-GC) i wysokotemperaturowej chromatografii gazowej sprzężonej ze spektrometrią masową (HT-GC/MS) możliwa stała się analiza ekstraktu lipidowego bez jego chemicznej degradacji, a przede wszystkim oznaczeniem bardzo dużej ilości związków organicznych podczas pojedynczej analizy (Evershed i in. 1990).

### METODY I MOŻLIWOŚCI ANALITYCZNE

Badania pozostałości organicznych są tematem bardzo szerokim i złożonym nie tylko ze względu na ilość możliwych do rozpoznania związków, ale też wielość stosowanych narzędzi analitycznych. Pozostałości organiczne klasyfikuje się zwykle jako „nagary” – residua widoczne makroskopowo na powierzchni przedmiotów (ryc. 1) oraz pozostałości niewidoczne „gołym okiem” – zaabsorbowane przez



**Ryc. 1.** Fragment naczynia kultury pucharów lejkowatych z nagarem odkryty na stan. 11 w Nowej Wsi. Fot. A. Kurzawska

ścianki danego przedmiotu (Oudemans 2007). Innym stosowanym podziałem jest uwzględnienie typu stosowanych metod, w którym wydziela się metody mikroskopowe oraz metody molekularne (Barnard i Eerkens 2017).

Metody mikroskopowe koncentrują się na nagarach (ryc. 1), czyli dobrze widocznych na powierzchni naczynia resztkach pożywienia. Ślady te mają zwykle formę zwęglonych, przypalonych pozostałości organicznych bądź też utrwalaonych na skutek działania warunków bagiennych (sfosylizowanych) (Oudemans i Kubiak-Martens 2014; Kubiak-Martens 1999).

Analizie podlegają zwykle szczątki roślinne zachowane w formie zwęglonych ziaren czy tkanek albo miękiszu roślinnego. Badania widocznych pozostałości organicznych dokonywane są zwykle na gruncie archeobotanicznym i obejmują analizę mikroskopową śladów przy wykorzystaniu mikroskopii optycznej, a sama identyfikacja opiera się na porównaniu wyników z materiałami z kolekcji porównawczej (np. BIAx Consult) albo literaturą. Próbkę mogą być również analizowane, wykorzystując SEM (ang. *scanning electron microscopy*), często uzupełniony

analizami izotopowymi (przede wszystkim izotopów C, N, O czy Sr), spektroskopię RAMAN (przy wykorzystaniu np. mikroskopu RAMAN), analizę ELISA (a. immunoenzymosorpcyjna – służąca do wykrywania konkretnych grup przeciwciał i/lub antygenów przy wykorzystaniu określonych enzymów) czy spektroskopię NMR (ang. *nuclear magnetic resonance* – magnetyczny rezonans jądrowy) (Brown i Brown 2011; Barnard i Eerkens 2017). Uzupełnieniem tych analiz są dane pozyskane z badań archeobotanicznych warstw kulturowych czy wypełnisk obiektów (np. siania na sucho lub mokro). Jednakże rozpoznanie wykorzystywanych produktów roślinnych jest utrudnione, gdyż morfologia tkanek roślinnych ulega często zniszczeniu bądź znacznej modyfikacji na skutek rozdrabniania i rozcierania poprzedzającego gotowanie, a także samej obróbki termicznej (Raemaekers i in. 2013).

Analizy molekularne koncentrują się na mikroszczątkach (biomolekułach) badanych głównie za pomocą technik spektroskopowych (np. RAMAN), spektrometrycznych, chromatograficznych i izotopowych bądź połączeniu kilku tych metod (sprzężenie chromatografii gazowej ze spektrometrią



mas czy chromatografii cieczowej ze spektrometrią mas, DTMS – spektrometrii opartej na pirolizie) (Heron i Evershed 1993; Chartes i in. 1993; Evershed 2008; Oudemans i Boon 1991; Steele 2013; Craig i in. 2000; 2005; Brown i Brown 2011).

Pomimo znacznej liczby dostępnych metod molekularnych, które są ciągle udoskonalane i wzbogacane o nowe narzędzia analityczne, sam proces identyfikacji poszczególnych grup związków jest procesem niezwykle złożonym i trudnym. Wynika to przede wszystkim z zachowania samych substancji organicznych oraz ich znacznej degradacji zachodzącej nawet przed ich samą depozycją (Evershed 2008a; 2008b; Steele 2013; Oudemans 2007). Przedmiotem badań są przecież nie oryginalne produkty, a jedynie ich pozostałości, które ulegają znacznej transformacji i rozpadowi w wyniku m.in. procesów podepozycyjnych i często w nich nie przypominają pierwotnej grupy związków chemicznych. Rozpoznanie więc konkretnych substancji dokonywane jest na podstawie identyfikacji tzw. biomarkerów – związków lub grup związków uznawanych za charakterystyczne dla danych produktów. Za jeden z biomarkerów uznaje się np. występowanie w znacznej ilości kwasu rycynolowego świadczącego o użytkowaniu oleju rycynowego (Gunstone 2004: 3). Biomarkery stanowią więc swoiste „odciski palców”, które umożliwiają rozpoznanie konkretnych produktów (Evershed 1993; 2008a; Evershed i in. 1999). Sygnały otrzymane w wyniku analiz próbek zestawia się z oznaczeniami współczesnych substancji zgrupowanych w tak zwane biblioteki (kolekcje porównawcze) (Evershed 1993; 2008a; 2008b). Kluczowe jednak jest znaczenie kontekstu archeologicznego i paleośrodowiskowego, z których pochodzą badane materiały. Umożliwia to zawężenie grupy pasujących związków oraz weryfikację i interpretację wyników. W przypadku studiów nad tłuszczami zwierzęcymi z terenu Europy Środkowej, wśród rozważanych grup gatunków będzie fauna typowa dla tego terenu (Evershed 1993; 2008a). Z kolei podejmując badania nad wykorzystaniem mleka przez społeczności subsaharyjskie, wśród rozważanych gatunków należy uwzględnić nie tylko bydło, ale także wielbłądy (Dunne i in. 2012; Barnard i in. 2007).

Większość studiów koncentruje się na wybranej, konkretnej grupie związków, i to do nich dopiero dobiera się konkretne narzędzia badawcze. Przykładowo, badając pozostałości związane

z wykorzystaniem zasobów morza, będą potrzebne nieco inne analizy niż fauny śródlądowej (Evershed i in. 2008; Cramp i Evershed 2013). Ma to tym istotniejsze znaczenie, że uzyskanie bardzo kompleksowego obrazu wykorzystywanych produktów żywnościowych wymaga często odrębnych analiz, które są zwykle bardzo kosztowne i są realizowane w różnych ośrodkach badawczych.

Kluczowe znaczenie ma więc także uzyskanie możliwie szerokiego spektrum informacji odnośnie do produktów, których obecności można się spodziewać w analizowanym materiale – np. poprzez studia archeobotaniczne czy archeozoologiczne. W tym sensie analizy osadów organicznych można uznać za jedne z bardziej inter- i transdyscyplinarnych studiów. Świadomość istnienia ograniczeń analiz pozostałości organicznych pozwala też uniknąć rozczarowań, które mogą pojawiać się na etapie interpretacji uzyskanych wyników. Oczekiwania badaczy powinny współgrać z wiedzą na temat możliwości danych metod.

Ponieważ badania są zwykle poświęcone jednej wybranej grupie składników pokarmowych bądź produktów (np. diegiciu, alkoholu), zostaną one pokrótce omówione właśnie w odniesieniu do poszczególnych grup związków chemicznych, zachowywanych, przetrwałych na naczyniach ceramicznych.

## Proteiny

Proteiny (białka) stanowią niezwykle złożoną grupę związków organicznych o ogromnym potencjale informacyjnym w badaniach ceramicznych, umożliwiającym określenie bardzo szerokiego spektrum wykorzystywanych i przetwarzanych pokarmów i substancji (Hendy i in. 2018). Oprócz identyfikacji produktów zwierzęcych umożliwia także określenie gatunków roślin, a także mieszaniny wielu różnych pokarmów, które często nie są możliwe do rozpoznania np. na gruncie analizy lipidowej. Ponadto badania białek dają szansę określenia części wykorzystywanych tkanek, a nie tylko samych gatunków (Craig i in. 2005). Wśród stosowanych metod rozpoznania protein najczęściej stosuje się metody immunologiczne, ELISA, a także metody proteomiczne (elektroforeza dwuwymiarowa, rzadziej elektroforeza jednowymiarowa połączona ze spektrometrią mas, wysokosprawną chromatografią

cieczową) (Craig i Collins 2002; Craig i in. 2005; Pavelka i in. 2016). Zwłaszcza techniki wypracowane na gruncie proteomiki wydają się mieć największy potencjał badawczy, głównie w przypadku fragmentów czy zdenaturowanych protein (Craig i in. 2000; 2005; Brown i Brown 2011; Barker i in. 2012; Barker i in. 2018; Marlar i in. 2000). Pomimo niezwykłych możliwości analiz podstawowymi trudnościami jest stan zachowania analizowanych biomolekuł, które ulegają szybkiej degradacji w środowisku wilgotnym i ciepłym, uniemożliwiając ich ekstrakcję i identyfikację zwłaszcza na powierzchni naczyń ceramicznych (Barker i in. 2018). Analizy protein są stosunkowo kosztowne, a ich słaby stan zachowania sprawia, że nie są one masowo przeprowadzane. Jednym z przykładów pilotażowych badań nad zachowaniem pozostałości protein na powierzchni naczyń ceramicznych, były analizy alfa kazeiny charakterystycznej dla mleka krowiego. Ślady tych protein zidentyfikowano na zestawie naczyń ze stanowiska Cladh Hallan, a oznaczenia kazeiny poprzedzały rozbudowane studia eksperymentalne i etnograficzne nad wybranymi inwentarzami ceramicznymi (Craig i in. 2000).

### **Analiza DNA z powierzchni naczyń ceramicznych**

Jedną z najprężniej rozwijających się gałęzi badań nad pozostałościami organicznymi są obecnie analizy aDNA uzyskanego z naczyń ceramicznych (Brown i Brown 2011). Jednakże podobnie jak w przypadku analiz protein, stan zachowania tych frakcji jest niezadowalający. Sporo trudności metodycznych sprawia także pozyskiwanie i ekstrakcja DNA z powierzchni naczynia (Raghavan 2012). Sam proces analityczny jest zbliżony do analiz kołowego DNA pozyskanego z innych materiałów organicznych i został już szczegółowo omówiony w tej publikacji (zob. Chyleński, w tym tomie).

### **Węglowodany**

Węglowodany są niezwykle trudnymi związkami do analiz na gruncie archeologii biomolekularnej ze względu na swoją podatność na degradację i hydrofilowość, która czyni je jednymi z najsłabiej zachowujących się substancji. Przedmiotem studiów

są przede wszystkim skrobie (ang. *starch grains*), które zachowują się zdecydowanie lepiej niż pozostałe cukry. Związki te stanowią istotne biomarkery wykorzystywane do oznaczenia poszczególnych gatunków roślin na gruncie archeobotaniki. Szczątki widoczne w postaci zwęglonych pozostałości roślinnych są zwykle analizowane przy wykorzystaniu mikroskopii elektronowej (SEM) uzupełnionej również przez spektrometrię mas (ang. *direct temperature mass spectrometry*, DTMS), chromatografię gazową ze spektrometrią mas. Natomiast zastosowanie spektroskopii osłabionego całkowitego odbicia w podczerwieni z mikrospektroskopią w podczerwieni z transformacją Fouriera (ATR – FTIR) pozwala identyfikować nie tylko skrobię, ale także pozostałości wielu innych produktów (Raemaekers i in. 2013; Oudemans i Kubiak-Martens 2012; 2014). Dobrym przykładem wykorzystania zintegrowanych technik analitycznych są studia nad nagarami z holenderskiego stanowiska Mienakker, w wyniku których udało się rozpoznać zarówno produkty roślinne, takie jak pszenica płaskurka, resztki zielonych warzyw, jak i pozostałości tkanek i tłuszczu zwierzęcych (rybie ości). Wydaje się, że analizowane naczynia służyły przede wszystkim do gotowania, o czym świadczą również ślady zaobserwowane na ich powierzchni (Oudemans i Kubiak-Martens 2012).

### **Alkaloidy**

Alkaloidy stanowią złożoną grupę związków chemicznych, których detekcja jest wykonywana w oparciu o metody chromatograficzne i spektrometryczne lub ich kombinacje (np. GC/MS; GC-EI-MS; HPLC-ESI-MS, FTICR). Najczęściej badania koncentrują się na kilku najbardziej rozpowszechnionych produktach, takich jak nikotyna, kawa, opium czy kakao i polegają na rozpoznaniu charakterystycznych dla nich biomarkerów. Wskaźnikiem obecności kawy są ślady kofeiny i metyloksantyny, podczas gdy pozostałości teobrominy wiążą się z wykorzystywaniem kakao (Reber i Kerr 2012; Washburn i in. 2014). Z kolei za wyznacznik przetwarzania opium uznaje się zawartość papaweryny, tebainy oraz produktów rozpadu noskapiiny (Smith i in. 2018).

Studia nad wykorzystaniem kakao cieszą się szczególnym zainteresowaniem wśród badaczy Mezoameryki. Dzięki zastosowaniu półościowej

metody (SQT), a także wysokosprawnej chromatografii cieczowej (HPLC) udało się zidentyfikować pozostałości teobrominy na naczyniach ze stanowiska Chocóla z Gwatemali. Dystrybucja naczyń z resztkami kakao w obrębie analizowanej osady zdaje się sugerować, że dostęp do tego produktu nie był w żaden sposób limitowany i uwarunkowany klasowo. Kakao było wykorzystywane zarówno przez grupę rolników, jak i elitę. Wydaje się też, że drzewo kakaowca było intensywnie uprawiane w całym regionie już we wczesnym okresie preklasycznym (Kaplan i in. 2017).

### **Alkohole, wina, piwa i inne napoje fermentujące**

Identyfikacja napojów alkoholowych, takich jak wina czy piwa, jest złożonym procesem analitycznym. Najczęściej kwas winowy oraz kwas syringowy uznaje się za biomarkery świadczące o obecności wina (zwłaszcza czerwonego) w danym naczyniu (Zhang i in. 2018; Teodor i in. 2014; McGovern i Michel 1996; Pollard i in. 2007: 149; Stern i in. 2008). Jednakże kwas winowy jest obecny także w innych produktach, np. w winogronach, i jego znaczenie jako wyznacznik wina jest ostatnio kwestionowany (Guasch-Jané i in. 2004). Zdecydowanie lepszym markerem wydaje się więc współwystępowanie kilku związków razem, takich jak kwas winowy z kwasem bursztynowym, kwasem jabłkowym, kwasem cytrynowym i kwasem fumarowym (Valamoti i Garnier 2013; Drieu i in. 2020).

Ślady świadczące o wykorzystaniu piwa czy innych napojów fermentujących nie zawsze są jednoznaczne. Najczęściej występowanie ergosterolu uznaje się za dowód zachodzącej fermentacji, ale jej obecność może wiązać się również z przygotowywaniem zakwasu chlebowego (Issakson i in. 2010). Wydaje się, że bardziej miarodajne jest oznaczenie archeobotaniczne nagarów (na podstawie morfologii skrobi) na ściankach naczyń (Samuel 1996). Metody zostały wykorzystane do rozpoznania pozostałości piwa z naczyń pochodzących z Tell el Farha (Kubiak-Martens i Langer 2008).

Obecność wina stwierdzono, przykładowo, na naczyniach z Dikili Tash w północnej Grecji, a także potwierdzono wykorzystanie rzymskich amfor w celu przechowywania i transportu tego produktu (Pecci i in. 2017). Badania osadów organicznych

z naczyń z celtyckiego stanowiska Vix-Mont Lassois we wschodniej Francji udowodniły także istnienie intensywnych kontaktów i wymiany handlowej pomiędzy Imperium Rzymskim a światem celtyckim już w okresie VII-V w. p.n.e. (Rageot i in. 2019).

### **Dziegieć i inne substancje smoliste**

Dziegieć, podobnie jak inne substancje smoliste, pozostawia wyraźny makroskopowo osad na powierzchni naczynia ceramicznego. Identyfikacja rodzaju surowców będących źródłem tych pozostałości opiera się na licznych analizach mikroskopowych i chemicznych. Wśród najczęściej stosowanych metod wymienia się FTIR, czyli spektrofotometrię w podczerwieni, badania chromatograficzne cienkowarstwowe (TLC), pomiary temperatury topnienia, badania mikroskopowe przy wykorzystaniu polaryzacyjnego mikroskopu optycznego czy rezonans paramagnetyczny (EPR) z użyciem spektrometru PDP (Pietrzak 2010; Pietrzak i in. 2012). Wykorzystanie oceny mikroskopowej oraz specjalistycznych analiz fizykochemicznych umożliwia rozpoznanie szeregu składników danej mieszaniny, a także określenie sposobu jej otrzymania (procesu technologicznego) oraz jej przeznaczenia (np. uszczelnianie naczynia, funkcje gospodarcze etc.) (Pietrzak 2015; Dobrzańska i in. 2005). Jednakże w badaniach substancji smolistych wykorzystuje się też chromatografię gazową i spektrometrię masową, które umożliwiają wykrycie biomarkerów dziegciu w postaci triterpenoidów (np. lupeolu czy betuliny) (Charters i in. 1993; Roffet-Salque i Evershed 2015). Ślady dziegciu brzoźowego służącego prawdopodobnie jako lepiszcze odkryto na naczyniach kultury ceramiki wstęgowej rytej (KCWR) i kultury pucharów lejkowatych (KPL) z neolitycznego stanowiska Kopydłowo 6 (Pietrzak 2015; Roffet-Salque i Evershed 2015).

### **Lipidy**

Najbardziej rozpowszechnionymi obecnie analizami są badania pozostałości lipidów, które zachowują się stosunkowo dobrze ze względu na swój hydrofobowy charakter. Ponadto lipidy zabarbowane przez ścianki naczyń ceramicznych są



dodatkowo chronione przed działalnością bakterii, promieni słonecznych oraz innych czynników (Heron i Evershed 1993; Evershed 1993; Evershed i in. 1999; Craig i Collins 2002). Nie oznacza to jednak, że nie podlegają procesom degradacji, ale proces ten następuje wolniej i daje szansę na rozpoznanie wielu produktów przetwarzanych w naczyniach ceramicznych.

Badania pozwalają określić rodzaj lipidów, takich jak tłuszcze, oleje, woski, żywice czy bituminy, a także dokonać rozróżnienia pomiędzy poszczególnymi typami analizowanych tłuszczów zwierzęcych (Evershed 2008; Copley i in. 2003). Kategorie te są zwykle ogólne, bez określania klasyfikacji gatunkowej zwierzęcia, od którego pochodzą. Wydzielone grupy obejmują tłuszcze mięsne pochodzące od przeżuwaczy (czyli kozy, owcy, bydła), tłuszcze mięsne pochodzące od świń (wieprzowina), tłuszcze mleczne (świadczące o obecności mleka i/lub jego przetworów), tłuszcze pochodzące od zwierząt morskich (mięczaki, morskie ryby i ssaki), woski (wosk pszczeli i/lub miód), tłuszcze roślinne (zwykle trudno określić źródło pochodzenia, poza kilkoma gatunkami), woski roślinne (rzadko możliwa identyfikacja gatunkowa), żywice (rodzaj dziegiu zwykle jest możliwy do rozpoznania), napoje fermentujące, bituminy (Roffet-Salque i in. 2017).

## METODY ANALIZY LIPIDÓW

Najbardziej rozpowszechnionymi metodami obrazowania w przypadku analiz osadów organicznych jest chromatografia gazowa (GC) i chromatografia gazowa sprzężona ze spektrometrią mas (GC/MS), a także chromatografia gazowa ze spalaniem i spektrometrią mas stosunków izotopowych (GC-C-IRMS). W jej wyniku dokonywana jest ekstrakcja pozostałości mieszaniny lipidów, ich kwantyfikacja i identyfikacja na podstawie składu izotopowego.

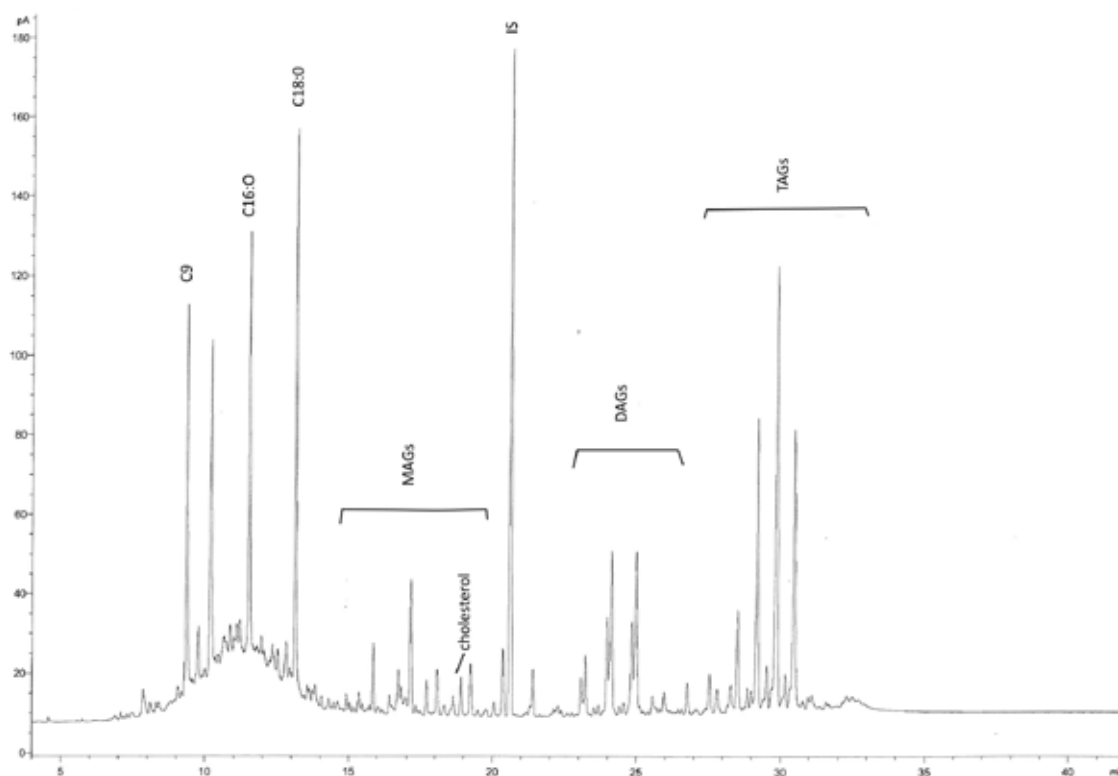
Chromatografia gazowa jest techniką separacyjną, której celem jest rozdzielenie poszczególnych frakcji składników danej mieszaniny, a także ich późniejsza identyfikacja. Jest ona czułą techniką, o dużej rozdzielczości pozwalającej na analizę szerokiego spektrum frakcji zarówno pod względem ilościowym, jak i jakościowym przy wykorzystaniu odpowiedniej kolumny z różnymi fazami i programami temperaturowymi (Pollard i in. 2007: 142).

Możliwa jest detekcja nawet bardzo niewielkiej ilości mieszaniny (mikrogramy, a nawet pikogramy). Rozpoznanie niektórych składników dokonywane jest na podstawie interpretacji graficznego obrazu czasu retencji poszczególnych molekuł (chromatogramów) w postaci tzw. pików, które są zestawiane ze standardowym obrazem (Evershed i in. 1999; Evershed 2008a; 2008b) (ryc. 2). Jednakże pełna charakterystyka danej mieszaniny lipidów wymaga zastosowania bardziej precyzyjnego obrazowania w postaci chromatografii gazowej sprzężonej ze spektrometrią mas, która pozwala na rozpoznanie poszczególnych molekuł na podstawie ich masy cząsteczkowej jonu. Spektrometria masowa jest bardziej czuła niż sama chromatografia i daje szansę na detekcję złożonych mieszanin chemicznych występujących w niezwykle małych ilościach (nawet femtogramów).

Badanie obejmuje wprowadzenie analizowanego ekstraktu w fazę gazową, a następnie przy pomocy gazu nośnego (zwykle helu lub argonu) przechodzi przez odpowiednią kolumnę i jest w niej rozdzielana na poszczególne składniki. Na wyjściu podłączony jest detektor MS, który służy wykrywaniu właśnie wyodrębnionych związków i ich jakościowej charakterystyce za pomocą widm masowych (Evershed i in. 1999; Copley i in. 2003). Interpretacja poszczególnych widm jest dokonywana na podstawie znanych związków organicznych pochodzących zarówno z wcześniejszych badań eksperymentalnych, jak i specjalnych bibliotek (np. NIST czy NBS) (Evershed i in. 1999).

W przypadku najbardziej zaawansowanej techniki, jaką jest chromatografia gazowa – spalanie – izotopowa spektrometria masowa (GC-C-IRMS), istotną różnicą jest wprowadzenie pieca do spalania, który jest podłączony do chromatografu gazowego z jednej strony, a z drugiej do spektrometru masowego IR. Analizowane składniki po przejściu przez kolumnę chromatograficzną są kierowane do pieca, w którym znajduje się tlenek miedzi II (CuO) i platyna. W wyniku spalania powstaje woda, która jest usuwana, a dwutlenek węgla przechodzi w strumieniu gazu do detektora spektrometrii mas (Evershed i in. 1999).

Przedmiotem szczegółowego izotopowego rozpoznania są główne kwasy tłuszczowe (C:16 – palmitynowy i C:18 – stearynowy). Określenie stosunku poszczególnych izotopów stabilnych węgla  $\delta^{13}\text{C}$  tych związków zostaje zobrazowane na wykresie



**Ryc. 2.** Fragment chromatogramu ekstraktu lipidowego z naczynia neolitycznego kultury Vinča o cechach typowych dla tłuszczu zwierzęcych. Oznaczenia FFA n – wolne kwasy tłuszczowe o n liczbie atomów węgla; IS – standardowy wzorzec (n-tetratriakontan); MAGs – monoglicerydy; DAGs – diglicerydy; TAGs – triglicerydy

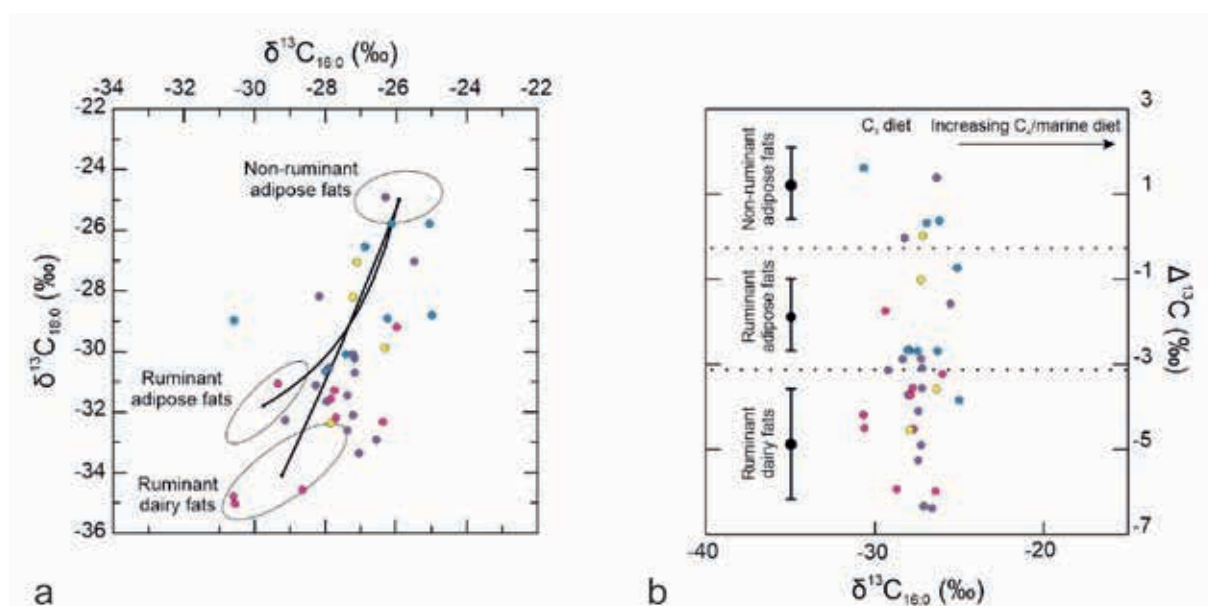
rozrzutu (punktowym)  $\delta C_{16:0}$  do  $\delta C_{18:0}$  zestawione ze współczesnymi referencjami, co pozwalała na rozróżnienie różnych zdegradowanych tłuszczu (ryc. 3) (Evershed i in. 1999; Salque i in. 2013).

### PROCEDURA ANALITYCZNA OZNACZEŃ LIPIDOWYCH

Procedura analityczna osadów organicznych zaabsorbowanych przez ścianki naczyń obejmuje oczyszczenie powierzchni naczynia z egzogennych zanieczyszczeń za pomocą wiertła, a następnie odłupanie młoteczkiem i dłutem niewielkiego fragmentu ceramiki o wadze ok. 2 g. Następnie ułamek naczynia jest rozcierany w moździerzu na proszek, przesypyany do probówki szklanej, do której zostaje dodany wzorzec wewnętrzny (20 mg n-tetratriakontanu). Całkowity ekstrakt lipidowy (ang. *total lipid extract*) jest pozyskiwany poprzez dodanie mieszaniny metanolu i chloroformu w stosunku 1:2,

a następnie roztwór ten zostaje oddzielony od proszku ceramicznego.

W kolejnym kroku ok. 1/4 roztworu zostaje derywatyzowana poprzez dodanie N, O-bis-(trimetylosililo) trifluoroacetamidu (BSTFA, Sigma) i osuszona pod delikatnym strumieniem azotu. Później otrzymany roztwór zostaje rozpuszczony w heksanie i jego część poddana analizie w wysokotemperaturowym chromatografie gazowym (HTGC). Pozostała część roztworu zostaje zmydlona przy wykorzystaniu wodorotlenku sodu (5% v/v), rozpuszczona w chloroformie i podgrzana do 70°C przez jedną godzinę i odparowana pod strumieniem azotu. Finalny krok jest związany z procesem przygotowania estrów metylowych kwasów tłuszczowych (FAME). Do ekstraktu lipidowego zostaje dodany BF<sub>3</sub>-metanol (14% w/v; 100 ml; Sigma-Aldrich, Gillingham, UK), który następnie zostaje podgrzany. Sam ekstrakt lipidowy rozpuszcza się w chloroformie, a później odparowuje pod strumieniem azotu i przechowuje w lodówce. Przed



**Ryc. 3.** a – wartości  $\delta^{13}\text{C}$  dla kwasu stearynowego (C:18) i palmitynowego (C:16) otrzymanego z ekstraktu lipidowego z wybranych naczyń kultury Vinča. Trzy eliptyczne pola odnoszą się do wartości (na poziomie ufności  $P = 0,684$ ) dla zwierząt chowanych wyłącznie dla paszy bogatej w C3 w Wielkiej Brytanii (Copley i in. 2003). Każdy punkt oznacza jedno zanalizowane naczynie. Tym samym kolorem zaznaczono naczynia pochodzące z tych samych stanowisk; b – wartości  $\Delta^{13}\text{C}$  tych samych naczyń ceramicznych. Zakresy przedstawiają średnią  $\pm 1$  odchylenia standardowego dla zbiorczej bazy danych obejmującej kolekcję referencyjną współczesnych tłuszczów zwierzęcych dla Wielkiej Brytanii (zwierzęta żywione w oparciu o rośliny C3), Afryki, Kazachstanu, Szwajcarii i Bliskiego Wschodu (Dunne i in. 2012)

samą analizą w aparaturze GC i GC-C-IRMS, roztwór zostaje rozpuszczony w heksanie (Copley i in. 2003; Evershed 1993; 1998; Šoberl i in. 2008; Salque i in. 2013).

## SELEKCJA PRÓBEK

Najważniejszym etapem badań osadów organicznych z naczyń ceramicznych jest selekcja próbek, dlatego też powinna być poprzedzona wnikliwą analizą inwentarza ceramicznego, wytyczeniem celów badań, a także refleksją nad możliwościami i ograniczeniami wybranych metod analitycznych. Jasne sprecyzowanie celów, ale także oczekiwań względem uzyskanych wyników oraz omówienie wszelkich wątpliwości z wybranym laboratorium pozwala na optymalizację wyników, a także osiągnięcie obopólnej satysfakcji z przeprowadzonych badań i poczucia dobrej inwestycji finansowej.

Ogólne wytyczne dotyczące wyboru próbek są uniwersalne bez względu na charakter badań i ich cel. Fragmenty naczyń ceramicznych powinny spełniać kilka warunków, przede wszystkim muszą

pochodzić z dobrze rozpoznanych, spójnych i „bezpiecznych” kontekstów archeologicznych, najlepiej z głębszych warstw archeologicznych. Ułamki ceramiki nie powinny być poddawane żadnym zabiegom konserwatorskim. Dopuszcza się jednak analizę fragmentów, które były myte wodą w trakcie wykopalisk. Natomiast wszelkie inne zabiegi – czyszczenie z użyciem różnych detergentów, kwasów czy też pokrywanie naczyń żywicami czy innymi substancjami dyskwalifikują dany fragment do analizy. Próbkę powinna pochodzić z naczynia o rozpoznanej formie, najlepiej też, gdyby można było uzyskać maksymalnie dużo informacji o samym naczyniu – technologii jego wykonania, domieszcze, dekoracji etc. Analiza osadów organicznych jest techniką niszczącą, należy więc przed samym badaniem wykonać kompleksową dokumentację danego fragmentu, także rysunkową i fotograficzną. Idealna waga próbki powinna być nie mniejsza niż 10 g, ale do samej analizy wystarczy 1,5-2 g. Jednak im większy fragment, tym lepiej, gdyż możliwe jest pobranie kolejnej podpróbki, a także bardziej precyzyjny wybór miejsca, z którego dany fragment może zostać odłamany. Pozostała



po analizie część może zostać zwrócona do muzeum lub innej jednostki, które udostępniały materiały do studiów. Wybrany ułamek nie powinien nosić śladów kleju (klejenia), żywicy ani też numeru inwentarzowego. Badania eksperymentalne wykazały, że największa koncentracja lipidów występuje właśnie w górnej i środkowej części naczyń (Charters i in. 1993). Na ich zachowanie ma także wpływ forma naczynia, jego wielkość, a także sposób użytkowania (np. rodzaj stosowanych praktyk kulinarnych). Preferowane są górne części naczyń (ale nie same krawędzie wylewów) w przypadku naczyń średniej wielkości (waz, mis, garnków etc.) lub górne części brzuśca w przypadku naczyń o dużych rozmiarach (wazy, amfory i puchary). Jeżeli naczynie jest płytsze – np. talerz lub patelnia – można również pobrać fragment z dolnej części brzuśca bądź ewentualnie z dna. Istnieje wiele czynników, które mogą wpłynąć na możliwość oznaczenia lipidów w naczyniach. Proces gotowania czy podgrzewania pokarmów rzutuje na poziom zachowanych tłuszczów, które głębiej wnikają w strukturę naczynia (Evershed i Charters 1995; Evershed 2008a; 2008b; Raven i in. 1997). Z tego też względu często zaleca się wybór do analiz właśnie fragmentów naczyń wykorzystywanych do gotowania (tzw. *cooking pot*). Osobnym problemem na gruncie archeologii jest jednak identyfikacja tych naczyń wśród inwentarza ceramicznego. Często naczynia te mylnie są łączone z tzw. ceramiką kuchenną czy też tzw. grubej roboty. Badania eksperymentalne dowodzą, że naczynia konwencjonalnie łączone z termicznym przetwarzaniem żywności zwykle nie nadawały się do tego celu (Skibo 1992; Woods 1986; Henrickson i McDonalds 1983; Rye 1981). Dlatego też obecnie zaleca się ostrożność w wyborze tylko naczyń do gotowania jako podstawowego materiału analitycznego do badań osadów organicznych i proponuje się bardziej kompleksowe próbkowanie całego zbioru ceramicznego (Bartkowiak i Sobkowiak-Tabaka 2015). Natomiast zbyt wysoka temperatura (powyżej 300°C) doprowadza do całkowitego zniszczenia wszelkich pozostałości organicznych. Dlatego też naczynia, które uległy wtórnemu wypaleniu, np. w procesie pożaru danego domostwa, nie nadają się do analizy (Copley i in. 2005).

Pomimo licznych badań eksperymentalnych nie udało się też w pełni zrozumieć związku między poszczególnymi cechami naczyń ceramicznych (takimi jak temperatura wypału ceramiki, porowatością,

grubością ścianek czy traktowaniem powierzchni) a zachowaniem lipidów (Evershed 2008a; 2008b). Wydaje się, że wbrew panującej wcześniej opinii wygładzanie, a nawet polerowanie powierzchni naczynia nie wpływa negatywnie na proces przetrwania związków organicznych. Wysoka porowatość nie jest też cechą wpływającą dodatnio na ten proces (Evershed 2008b; Copley i in. 2005; Bartkowiak i Sobkowiak-Tabaka 2015; Krueger i in. 2020). Podobnie istnienie dekoracji malowanej na naczyniu nie dyskwalifikuje danego fragmentu z analizy, chociaż nie jest ono zawsze zalecane (Krueger i in., w przygotowaniu). Fragmenty naczyń mogą pochodzić zarówno z kontekstów osadowych, jak i funeralnych, chociaż analizy tych ostatnich są rzadziej praktykowane, głównie ze względu na dodatkowe trudności interpretacyjne i większe możliwości kontaminacji (Evershed 2008a; 2008b; Roffet-Salque i in. 2017).

Przy selekcji naczyń ceramicznych należy ograniczyć ich dotykanie dłońmi (im mniej, tym lepiej). Po jedzeniu, a przed pobraniem próbki, należy dokładnie umyć ręce mydłem, aby uniknąć potencjalnej kontaminacji. Współczesne zanieczyszczenia są zwykle wyraźnie czytelne na chromatogramach, w postaci śladów cholesterolu, skwalenu czy plastyfikatorów, ale zakłócają pozostałe „pradziejowe” sygnały i zmniejszają ich czytelność (Evershed 1993; Stern i in. 2000). Nie należy używać żadnych rękawiczek, które też mogą stanowić źródło zanieczyszczenia. Wybrany fragment zaleca się zapakować w folię aluminiową, która powinna zostać opisana na zewnętrznej stronie nieścieralnym markerem. Woreczki strunowe czy inne torebki foliowe nie są rekomendowane, gdyż mogą powodować kontaminację próbki. Naczynia ze śladami użytkowania, takimi jak np. warstwa sadzy na powierzchni garnka czy zwęglone resztki pożywienia, powinny być wybrane do analizy w pierwszej kolejności. Obecność śladów nie jest jednak konieczna, ponieważ analizie podlegają głównie lipidy zaabsorbowane przez pory naczynia.

Oprócz wspomnianych kryteriów chemicznych próbki powinny też spełniać wymogi archeologiczne w celu optymalizacji rezultatów analiz organicznych. Ilość próbek jest uzależniona od założeń badawczych i możliwości finansowych danego projektu. Przyjmuje się, że liczba próbek nie powinna być mniejsza niż 30-50 fragmentów z jednego stanowiska, ze względu na możliwości oznaczenia

pozostałości organicznych na średnim poziomie 30% (Copley i in. 2005). Jednakże im większa liczba próbek, tym bardziej reprezentatywne rezultaty pod względem statystycznym. Z tego samego względu tak ważny jest wybór dobrych materiałów analitycznych, który nawet przy negatywnym wyniku oznaczeń również pozwoli na interpretację wyników. Badania pozostałości organicznych zaabsorbowanych przez ścianki naczyń koncentrują się głównie na kilku podstawowych zagadnieniach, takich jak paleodieta, funkcja naczyń czy przetwórstwo wybranych produktów, np. mleka, miodu czy dziegciu (Evershed i in. 2008; Salque i in. 2013; Roffet-Salque i in. 2015; 2017). Oznaczenie konkretnych produktów pozwala jednak na wnioskowanie o wielu bardziej złożonych kwestiach społecznych, kulturowych czy gospodarczych, np. preferencjach kulturowych co do spożywanych produktów, zmianach w diecie wynikających z akulturacji czy migracji nowej populacji, wykorzystaniu wtórnych produktów odzwierzęcych (ang. *secondary products*), praktykach gospodarczych, istnieniu pastoralizmu. Trzeba jednak podkreślić, że analizy osadów organicznych nie mogą być wykonywane w oderwaniu od innych prowadzonych studiów, lecz powinny być z nimi ściśle zespolone. Przykładowo, badania nad dietą czy praktykami kulinarnymi danej społeczności powinny obejmować także kompleksowe rozpoznaniu archeozoologiczne materiałów zwierzęcych (ang. *kill-off pattern*), badania archeobotaniczne, a także być uzupełnione badaniami izotopów C, N, Sr. Bardziej holistyczne podejście do danego problemu i wykorzystanie kilku komplementarnych analiz, pozwala uzyskać bardziej pełny i szczegółowy obraz danego zagadnienia oraz uniknąć ograniczeń każdej z metod stosowanych niezależnie i oddzielnie (Evershed 2008a; Evershed i in. 2008; Roffet-Salque i in. 2017; Gerbault i in. 2013).

Wszelkie badania osadów organicznych z naczyń ceramicznych powinny być poprzedzone dokładnym rozpoznaniem danego inwentarza ceramicznego pod względem morfologicznym, technologicznym, stylistycznym, a przede wszystkim funkcjonalnym. Wstępne przypisanie konkretnych typów naczyń do podstawowych kategorii funkcjonalnych, takich jak np. naczynia do gotowania, zasobowe do produktów suchych, do przechowywania płynów, transportowe, stołowe (służące do podawania posiłków) czy płynów, daje szersze możliwości interpretacji wyników badań osadów organicznych



**Ryc. 4.** Naczynie sitowate służące do przetwarzania mleka. Kopydłowo, stan. 6. Kultura ceramiki wstęgowej rytej (za: Bartkowiak i Sobkowiak-Tabaka 2015). Fot. M. Gembicki

(Bartkowiak i Sobkowiak-Tabaka 2015; Krueger i in. 2020; Oudemans 2007; Budja i Ogrinc 2018). Dominującą większość inwentarza tworzą jednak naczynia o trudnej do jednoznacznego określenia funkcji, które służyły prawdopodobnie więcej niż tylko jednemu celowi (naczynia wielofunkcyjne). Wykorzystanie analiz osadów organicznych w tym przypadku pozwoli określić ich przeznaczenie, a także prześledzić wewnętrzne zróżnicowanie w obrębie tej kategorii naczyń. Selekcja materiału powinna być zawsze starannie przemyślana i zaplanowana i stanowić kompromis między kryteriami chemiczno-archeologicznymi a danym zbiorem ceramicznym (dostępnym materiałem). Najbardziej

adekwatną procedurą wydaje się być wybór kilku/kilkunastu fragmentów pochodzących z tych samych typów naczyń, np. 10 próbek amfor, 10 próbek mis dwustożkowatych, 10 waz, 10 płytkich mis. Uzyskane wyniki badań umożliwią nie tylko obserwację, jakie produkty były wykorzystywane w danych naczyniach, ale także prześledzenie istnienia potencjalnych preferencji w sposobie użytkowania danego naczynia czy nawet specjalizacji w tej kwestii. Dobrym przykładem pokazującym, że pewne naczynia mogły być wykorzystywane w ściśle określonym celu są naczynia sitowate służące tylko do przetwarzania mleka (Salque i in. 2013) (ryc. 4).

Analizy osadów organicznych mogą też opierać się jedynie na selekcji jednego typu materiału, by dokonać identyfikacji danego produktu lub podnieść kwestię ich wyspecjalizowanych funkcji. Wtedy wybrane próbki powinny być możliwie zbliżone do siebie, nie tylko pod względem formy, ale też rozmiarów i sposobu wykonania.

### **OGRANICZENIA BADAŃ OSADÓW ORGANICZNYCH**

Podstawowe ograniczenia opisanych metod są związane przede wszystkim z procesem degradacji, jakim podlegają poszczególne związki organiczne. Niszczący wpływ wielu czynników, takich jak np. woda, promienie słoneczne, temperatura, działanie bakterii, rozpoczyna się jeszcze przed samą depozycją naczyń w glebie, już na etapie przygotowywania pożywienia czy czyszczenia naczyń i znacząco utrudnia identyfikację danych produktów. Kolejnym utrudnieniem jest złożony charakter badanych pozostałości, które są zwykle mieszaniną wielu bardzo zróżnicowanych związków i produktów. Wbrew obiegowej opinii szczegółowe rozpoznanie diety czy rekonstrukcja konkretnych przepisów czy kompletna lista składników użytych do przygotowania danej potrawy nie jest możliwa do odtworzenia. Jak już wspomniano wcześniej, zdecydowana większość technik analitycznych pozwala na rozpoznanie dosyć ogólnych kategorii produktów i ich klasyfikacje gatunkowe są zwykle niemożliwe do zrekonstruowania lub wymagają bardzo wyspecjalizowanej aparatury.

Potencjał wielu metod jest ogromny, ale interpretacja wyników wymaga ścisłej współpracy między specjalistami wykonującymi analizy a archeologami.

Identyfikacja danej substancji lub ich zbioru jest jedynie połowiczną informacją, jaką można otrzymać w wyniku tych badań. Rozpoznanie śladów danych produktów nie musi być związane z ich konsumpcją przez daną społeczność, lecz może świadczyć o podejmowaniu różnych działań związanych z np. z uszczelnianiem naczynia czy też jego naprawą. Obecność wosku pszczelego dosyć powszechnie uważana jest za dowód wykorzystywania miodu. Jednakże nie musi świadczyć o przechowywaniu miodu w danym naczyniu. Wosk pszczeli mógł być zaaplikowany na ścianki naczyń w celu ich uszczelnienia i zabezpieczenia przed szkodnikami (Šoberl i in. 2008; Roffet-Salque i in. 2015; Bartkowiak i Sobkowiak-Tabaka 2015). Naczynie mogło też służyć jako ul. Podobnie problematycznie przedstawia się kwestia interpretacji śladów tłuszczów mlecznych, a także wiele innych grup zidentyfikowanych związków. Ocena wyników wymaga więc ich zintegrowania z informacjami odnośnie do formy, technologii wykonania naczynia, jego kontekstu oraz z danymi paleobotanicznymi czy faunistycznymi. Pomocne są również dane o dystrybucji tłuszczu w obrębie naczynia oraz ich koncentracji, a także stanie zachowania pozostałych substancji organicznych.

Obecność danego produktu nie świadczy jednocześnie o przeznaczeniu danego naczynia, a reprezentuje jedynie jeden epizod z jego użytkowania. Trzeba jednak zaznaczyć, że powtarzalność przetwarzania danej substancji, np. gotowania mleka w jednym naczyniu, zwiększa szansę na detekcję tych produktów. Trudności w interpretacji wyników pojawiają się zwłaszcza w przypadku występowania oznaczeń mieszaniny kilku produktów. Nie można wykluczyć, że substancje te stanowią nie ślady przygotowania danej potrawy, a po prostu dwa różne epizody wykorzystywania danego naczynia. Wiele naczyń nie miało jednego ściśle sprecyzowanego przeznaczenia i mogło służyć wielu celom jednocześnie. Poza tym nie wszystkie materiały spełniają wymogi analizy osadów organicznych. Fragmenty naczyń pochodzące ze starszych badań, o niepewnej chronologii czy nieznannej historii magazynowania i konserwacji lepiej wykluczyć z badań. Ponadto ułamki naczyń pochodzące z większych zrekonstruowanych przy wykorzystaniu kleju form mogą dawać fałszywe sygnały podczas analizy.

Wszelkie analizy pozostałości osadów organicznych mają wyjątkowy charakter interdyscyplinarny i zarówno interpretacja wyników, jak i selekcja



materiałów do badań powinny opierać się na dialogu między wszystkimi stronami zaangażowanymi w dany projekt badawczy.

### WYKORZYSTANIE POZOSTAŁOŚCI LIPIDÓW W BADANIACH RADIOWĘGLOWYCH

Pozostałości substancji organicznych w postaci lipidów dają również szansę na przeprowadzenie oznaczeń  $C^{14}$ , a tym samym ustalenie chronologii bezwzględnej. Naczynia ceramiczne zawierają węgiel zachowany zarówno w masie ceramicznej (glinie), domieszcze dodanej do masy plastycznej, jak i pochodzący z procesu wypału w piecu, a także z pozostałości organicznych przyrządzanych w naczyniu oraz pochodzący z procesów podepozycyjnych (ze środowiska, w którym zalegało naczynie) (Gabasio i Evin 1986; Salque i in. 2013). Jednakże to właśnie węgiel zachowany w resztkach organicznych jest uznawany za najlepszy materiał do analizy ze względu na stosunkowo krótką ścieżkę metaboliczną węgla, a także krótki epizod związany z wykorzystywaniem naczynia. Poza tym oznaczenie wykonywane jest z węgla pochodzącego z kwasów tłuszczowych zaabsorbowanych przez ścianki naczynia, które są relatywnie odporne na działanie czynników depozycyjnych i są obciążone niewielkim ryzykiem kontaminacji substancji egzogennych (Stott i in. 2001; 2003; Salque i in. 2013). Wyizolowanie pojedynczych „czystych chemicznie” substancji do badań jest dokonywane poprzez specjalnie udoskonaloną kapilarną chromatografię gazową (pcGC) kwasów palmitynowego i stearynowego, a oznaczanie  $C^{14}$  jest uzyskiwane dzięki akceleratorowej spektrometrii mas (AMS) (Casanova i in. 2020). Datowanie lipidów z naczyń ceramicznych umożliwia określenie chronologii danych obiektów na stanowisku, naczyń ceramicznych czy wykorzystywania konkretnych produktów spożywczych lub innych substancji, a także weryfikację chronologii uzyskanej z innych źródeł. Rezultaty badań radiowęglowych próbek z neolitycznej ceramiki z kilku wybranych regionów – Centralnej Turcji, północnych Niemiec, Francji, Wielkiej Brytanii i Polski, a także stanowisk Sahary (Casanova i in. 2020) zweryfikowane datami uzyskanymi dzięki analizie innych materiałów potwierdziły miarodajność analiz  $C^{14}$  lipidów (Casanova i in. 2020).

### PODSUMOWANIE

Badania pozostałości organicznych na naczyniach ceramicznych obejmuje analizę szerokiego spektrum związków organicznych przede wszystkim lipidów, protein, węglowodanów, aDNA, alkaloidów przy wykorzystaniu zaawansowanych i nowoczesnych metod. Przedmiot analiz stanowią pozostałości widoczne makroskopowo na powierzchni ceramiki w postaci rezydów czy też nagarów oraz substancje niedostrzegalne makroskopowo. Metody umożliwiające dokonanie oznaczeń poszczególnych produktów i substancji stanowią bardzo zróżnicowaną grupę i bazują na różnego typu sprzęcie analitycznym. Wśród najbardziej rozpowszechnionych technik analitycznych wymienia się spektroskopię masową, chromatografię gazową, chromatografię cieczową, spektrometrię bazującą na pirolizie, spektrofotometrię, badania izotopowe, a także kombinacje tych metod. Zwykle wybór danej metody analitycznej jest warunkowany rodzajem poszukiwanego związku organicznego, gdyż nie istnieje jedna uniwersalna procedura badawcza umożliwiająca oznaczanie wszystkich znanych produktów.

Pomimo wielości dostępnych narzędzi analitycznych, istotną przeszkodę w badaniach stanowi przede wszystkim zachowanie danych pozostałości organicznych, które ulegają degradacji jeszcze przed ich zdeponowaniem w ziemi. Z tego względu najbardziej rozpowszechnionymi obecnie studiami są badania lipidów, które wykazują zdecydowanie największą zdolność do przetrwania w różnych warunkach środowiskowych. Lipidy tworzą szeroką klasę związków organicznych obejmujących tłuszcze, oleje, woski, żywice czy bituminy, a dzięki zastosowaniu chromatografii gazowej ze spalaniem i spektrometrią mas stosunków izotopowych możliwe jest także dokonanie rozróżnienia pomiędzy poszczególnymi typami analizowanych tłuszczów zwierzęcych (Evershed 2008; Copley i in. 2003).

Każdorazowy wybór metod analitycznych powinien być dostosowany do rodzaju poszukiwanej substancji, warunków środowiskowych, celów danego projektu oraz jego możliwości finansowych. Znajomość i zrozumienie możliwości i ograniczeń danych metod jest kluczowa dla selekcji próbek ceramicznych i interpretacji rezultatów, a tym samym przeprowadzenia satysfakcjonujących badań. Warto nadmienić, że najbardziej optymalne efekty

uzyskuje się dzięki zespoleniu wyników oznaczeń z rezultatami kompleksowych analiz materiałów archeobotanicznych i archeozoologicznych, a także badań izotopowych.

## LITERATURA

- Barker, A. 2010. Archaeological protein residues: new data for conservation science. *Ethnobiology Letters* 1: 58–65.
- Barker, A., Venables, B., Stevens, S.M., Seeley, K.W., Wang, P., Wolverton, S. 2012. An optimized approach for protein residue extraction and identification from ceramics after cooking. *Journal of Archaeological Method and Theory* 19(3): 407–439.
- Barker, A., Dombrosky, J., Venables, B., Wolverton, S. 2018. Taphonomy and negative results: An integrated approach to ceramic-bound protein residue analysis. *Journal of Archaeological Science* 94: 32–43.
- Barnard, H., Ambrose, S.H., Beehr, D.E., Forster, M.D., Lanehart, R.E., Malainey, M.E., Yohe Li, R.M. 2007. Mixed results of seven methods for organic residue analysis applied to one vessel with the residue of a known food-stuff. *Journal of Archaeological Science* 34(1): 28–37.
- Barnard, H., Eerkens, J.W. 2017. Assessing vessel function by organic residue analysis, (w:) A.M.W. Hunt (red.), *The Oxford handbook of archaeological ceramic analysis*. Oxford, 625–650.
- Bartkowiak, M., Sobkowiak-Tabaka, I. 2015. Analiza zbioru ceramiki neolitycznej, (w:) A. Marciniak, I. Sobkowiak-Tabaka, M. Bartkowiak, M. Lisowski (red.), *Kopydłowo, stanowisko 6. Osady neolityczne z pogranicza Kujaw i Wielkopolski* (Ocalone Dziedzictwo Archeologiczne 6). Poznań-Pętkowice, 67–131.
- Berstan, R., Stott, A.W., Minnitt, S., Ramsey, C.B., Hedges, R.E.M., Evershed, R.P. 2008. Direct dating of pottery from its organic residues: new precision using compound-specific carbon isotopes. *Antiquity* 82(317): 702–713.
- Berthelot, M. 1906. *Traité pratique de l'analyse des gaz*. Paris.
- Brown, T.A., Brown, K. 2011. *Biomolecular archaeology: an introduction*. Oxford.
- Budja, M., Ogrinc, N. 2018. Archaeology of Lipids—Discovering Organic Food Residues in Prehistoric Vessels, w: K. Mateja, Miškec, A., Lazar, T., Nemeček, N., [...] (red.), *Preteklost pod mikroskopom: naravoslovne raziskave v muzeju*. Ljubljana, 145–153.
- Casanova, E., Knowles, T.D., Bayliss, A., Dunne, J., Barański, M.Z., Denaire, A., [...] Evershed, R.P. 2020. Accurate compound-specific  $^{14}\text{C}$  dating of archaeological pottery vessels. *Nature* 580(7804): 506–510.
- Charters, S., Evershed, R.P., Blinkhorn, P.W., Denham, V. 1995. Evidence for the mixing of fats and waxes in archaeological ceramics. *Archaeometry* 37(1): 113–127.
- Charters, S., Evershed, R.P., Goad, L.J., Heron, C., Blinkhorn, P. 1993. Identification of an adhesive used to repair a Roman jar. *Archaeometry* 35: 91–101.
- Condamine, J., Formenti, F., Metais, M.O., Michel, M., Blond, P. 1976. The application of gas chromatography to the tracing of oil in ancient amphorae. *Archaeometry* 18: 195–201.
- Copley, M.S., Berstan, R., Dudd, S.N., Docherty, G., Mukherjee, A.J., Straker, V., Payne, S., Evershed, R.P. 2003. Direct chemical evidence for widespread dairying in Prehistoric Britain. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 100(4): 1524–1529.
- Copley, M.S., Hansel, F.A., Sadr, K., Evershed, R.P. 2004. Organic residue evidence for the processing of marine animal products in pottery vessels from the pre-colonial archaeological site of Kasteelberg D east, South Africa. *South African Journal of Science* 100(5–6): 279–283.
- Copley, M.S.R., Berstan, S.N., Dudd, G., Docherty, A.J., Mukherjee, V., Straker, S., Payne, S., Evershed, R.P. 2003. Direct chemical evidence for widespread dairying in Prehistoric Britain. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 100(4): 1524–1529.
- Copley, M.S., Berstan, R., Straker, V., Payne, S., Evershed, R.P. 2005. Dairying in antiquity I, Evidence from absorbed lipid residues dating to the British Iron Age. *Journal of Archaeological Science* 32: 485–503.
- Correa-Ascencio, M., Evershed, R. P. 2014. High throughput screening of organic residues in archaeological potsherds using direct acidified methanol extraction. *Analytical Methods* 6 (5): 1330–1340.
- Craig, O., Mulville, J., Pearson, M.P., Sokol, R., Gelsthorpe, K., Stacey, R., Collins, M. 2000. Detecting milk proteins in ancient pots. *Nature* 408(6810): 312–312.
- Craig, O.E., Taylor, G., Mulville, J., Collins, M.J., Parker Pearson, M. 2005. The identification of prehistoric dairying activities in the Western Isles of Scotland: an integrated biomolecular approach. *Journal of Archaeological Science* 32: 91–103.
- Craig, O.E., Forster, M., Andersen, S.H., Koch, E., Crombe, P., Milner, N.J., Stern, B., Bailey, G.N., Heron, C.P. 2007. Molecular and isotopic demonstration of the processing of aquatic products in northern European prehistoric pottery. *Archaeometry* 49: 135–152.
- Craig, O.E., Collins, M. J. 2002. The removal of protein from mineral surfaces: implications for residue analysis of archaeological materials. *Journal of Archaeological Science* 29(10): 1077–1082.
- Cramp, L., Evershed, R.P. 2013. Reconstructing aquatic resource exploitation in human Prehistory using lipid biomarkers and stable isotopes, (w:) T.E. Cerling (red.), *Treatise on geochemistry: archaeology and anthropology*. Oxford, 319–339.

- Dobrzańska, H., Langer J.J., Pietrzak, S., Szmoniewski, B.S. 2005. Naczynie z dziegiem z wczesnośredniowiecznej osady w Igołomi, pow. Kraków, (w:) K. Wasylkowa, M. Lityńska-Zajac, A. Bieniek (red.), *Roślinne ślady człowieka*. Botanical Guidebooks 28. Kraków, 231–246.
- Drieu, L., Rageot, M., Wales, N., Stern, B., Lundy, J., Zerrer, M., [...] & Craig, O.E. 2020. Is it possible to identify ancient wine production using biomolecular approaches? *STAR: Science & Technology of Archaeological Research* 6(1): 16–29.
- Dunne, J., Evershed, R.P., Salque, M., Cramp, L., Bruni, S., Ryan, K., Biagetti, S., di Lernia, S. 2012. First dairying in green Saharan Africa in the fifth millennium BC. *Nature* 48 6(7403): 390–394.
- Echeverría, J., Planella, M.T., Niemeyer, H.M. 2014. Nicotine in residues of smoking pipes and other artifacts of the smoking complex from an Early Ceramic period archaeological site in central Chile. *Journal of Archaeological Science* 44: 55–60.
- Eusebio, M.S. 2019. State of Organic Residue Analysis in Southeast Asia: Plant Biomolecules as Archaeobotanical Evidence. *Advancing Southeast Asian Archaeology* 2: 61–70.
- Evans, K., Heron, C. 1993. Glue, disinfectant and chewing gum: natural products chemistry in archaeology. *Chemistry & Industry* 12: 446–449.
- Evans, J., Hills, H.E. 1982. Dietetic information by chemical analysis of Danish Neolithic pot sherds: a progress report, (w:) A. Aspinall, S.E. Warren (red.), *Proceedings of the 22nd Symposium on Archaeometry*. Bradford, 224–228.
- Evershed, R.P. 1993. Biomolecular archaeology and lipids. *World Archaeology* 25(1): 74–93.
- Evershed, R.P. 2008a. Organic residue analysis in archaeology: the archaeological biomarker revolution. *Archaeometry* 50(6): 895–924.
- Evershed, R.P. 2008b. Experimental approaches to the interpretation of absorbed organic residues in archaeological ceramics. *World Archaeology* 40(1): 26–47.
- Evershed, R.P., Heron, C., Goad, L.J. 1990. Analysis of organic residues of archaeological origin by high-temperature gas chromatography and gas chromatography-mass spectrometry. *Analyst* 115(10): 1339–1342.
- Evershed, R.P., Heron, C., Goad, L.J. 1991. Epicuticular wax components preserved in potsherds as chemical indicators of leafy vegetables in ancient diets. *Antiquity* 65(248): 540–544.
- Evershed, R.P., Arnot, K.I., Collister, J., Eglinton, G., Charters, S. 1994. Application of isotope ratio monitoring gas chromatography-mass spectrometry to the analysis of organic residues of archaeological origin. *The Analyst* 119: 909–914.
- Evershed, R.P., Payne, S., Sherratt, A.G., Copley, M.S., Coolidge, J., Urem-Kotsu, D., [...] Burton, M.M. 2008. Earliest date for milk use in the Near East and southeastern Europe linked to cattle herding. *Nature* 455(7212): 528–531.
- Evershed, R.P., Copley, M.S., Dickson, L., Hansel, F.A. 2008. Experimental evidence for the processing of marine animal products and other commodities containing polyunsaturated fatty acids in pottery vessels. *Archaeometry* 50(1): 110–113.
- Evershed, R.P., Dudd, S.N., Anderson-Stojanovic, V.R., Gebhard, E.R. 2003. New chemical evidence for the use of combed ware pottery vessels as beehives in Ancient Greece. *Journal of Archaeological Science* 30(1): 1–12.
- Evershed, R.P., Dudd, S.N., Copley, M.S., Berstan, R., Stott, A. W., Mottram, H., Buckley, S.A. Crossman, Z. 2002. Chemistry of archaeological animal fats. *Accounts of Chemical Research* 35(8): 660–668.
- Evershed, R.P., Dudd, S.N., Charters, S., Mottram, H., Stott, A.W., Raven, A., [...] Bland, H.A. 1999. Lipids as carriers of anthropogenic signals from prehistory. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences* 354(1379): 19–31.
- Evershed, R.P., Charters, S. 1995. Simulating the degradation of animal fats in archaeological ceramics, (w:) J.O. Grimalt, C. Dorronsoro (red.), *Organic geochemistry: developments and applications to energy, climate, environment and human history*. San Sebastian, 697–698.
- Evershed, R.P., Payne, S., Sherratt, A.G., Copley, M.S., Coolidge, J., Urem-Kotsu, D., Kotsakis, K., Ozdogan, M., Ozdogan, A.E., Nieuwenhuys, O., Akkermans, P., Bailey, D., Andeescu, R.R., Campbell, S., Farid, S., Hodder, I., Yalman, N., Ozbasaran, M., Bicaici, E., Garfinkel, Y., Levy, T., Burton, M.M. 2008. Earliest date for milk use in the Near East and southeastern Europe linked to cattle herding. *Nature* 455(7212): 528–531.
- Evershed, R.P., Vaughan, S.J., Dudd, S.N., Soles, J.S. 1997. Fuel for thought? Beeswax in lamps and conical cups from late Minoan Crete. *Antiquity* 71(274): 979–985.
- Farrell, T.F.G., Jordan, P., Taché, K., Lucquin, A., Gibbs, K., Jorge, A., Britton, K., Craig, O.E., Knecht, R. 2014. Specialized processing of aquatic resources in prehistoric Alaskan pottery? A lipid-residue analysis of ceramic sherds from the Thule-Period site of Nunalleq, Alaska. *Arctic Anthropology* 51(1): 86–100.
- Forbes, R.J. 1936. Note on a lump of asphalt from Ur. *Journal of Institution of Petroleum Technologists* 22: 180.
- Gabasio, M., Evin, J., Arnal, G.B., Andrieux, P. 1986. Origins of carbon in potsherds. *Radiocarbon* 28(2A): 711–718.
- Gangl, J. 1936. Report giving the results of examination of various materials from Maadi, (w:) O. Menghin, M. Ame (red.), *The Excavations of the Egyptian University in the Neolithic Site at Maadi*, Second Preliminary Report (Season 1932). Cairo.
- Garnier, N., Richardin, P., Cheynier, V., Regert, M. 2003. Characterization of thermally assisted hydrolysis and methylation products of polyphenols from modern and archaeological vine derivatives using gas

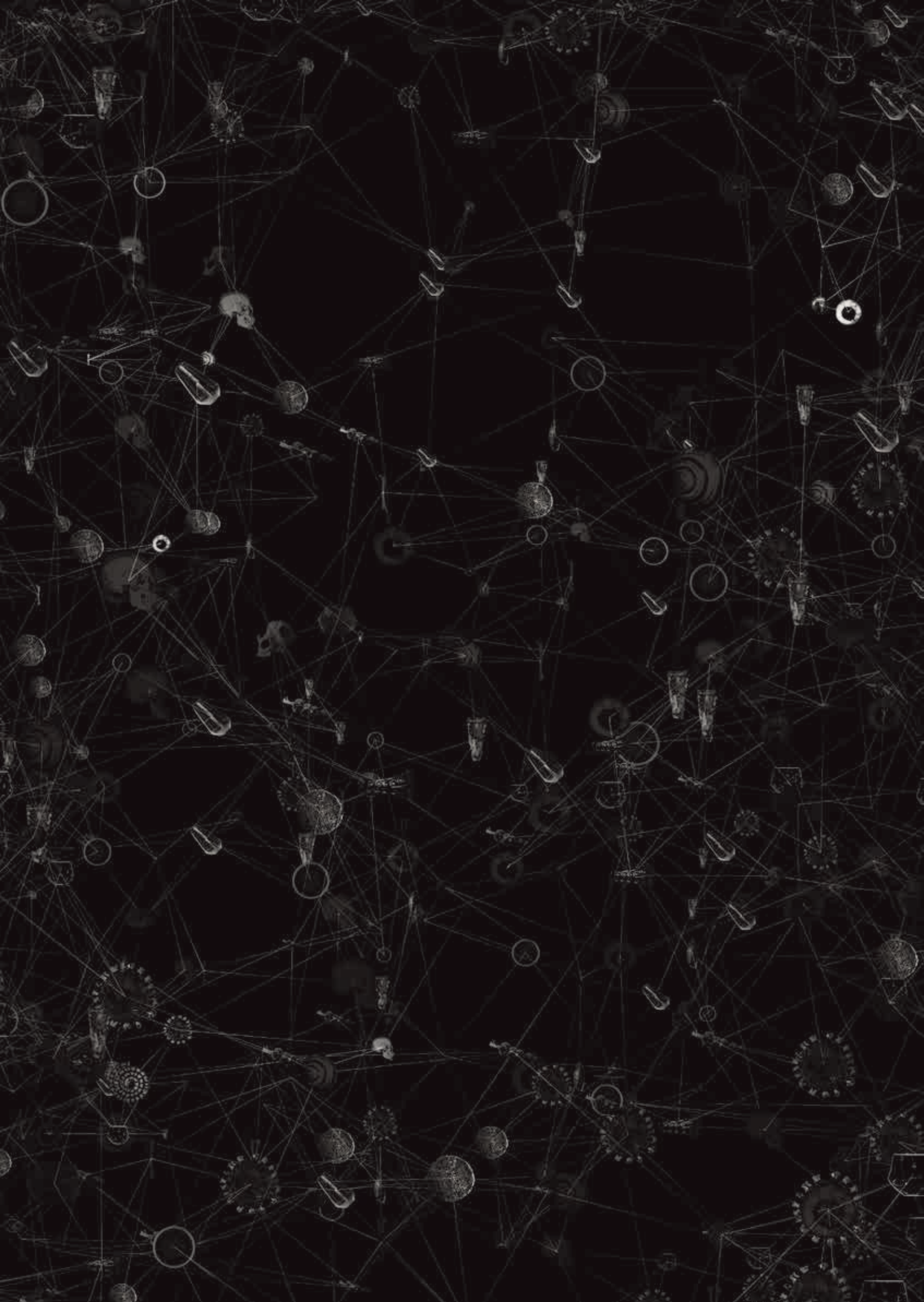


- chromatography–mass spectrometry. *Analytica Chimica Acta* 493(2): 137–157.
- Garnier, N., Valamoti, S.M. 2016. Prehistoric wine-making at Dikili Tash (Northern Greece): Integrating residue analysis and archaeobotany. *Journal of Archaeological Science* 74: 195–206.
- Gerbault, P., Roffet-Salque, M., Evershed, R.P., Thomas, M.G. 2013. How long have adult humans been consuming milk?. *IUBMB life* 65(12): 983–990.
- Grüss, J. 1933. Über Milchreste aus der Hallsattzeit und andere Funde. *Forschungen und Fortschritte* 9: 105–106.
- Guasch-Jané, M.R., Ibern-Gómez, M., Andrés-Lacueva, C., Jáuregui, O., Lamuela-Raventós, R.M. 2004. Liquid chromatography with mass spectrometry in tandem mode applied for the identification of wine markers in residues from ancient Egyptian vessels. *Analytical Chemistry* 76(6): 1672–1677.
- Gunstone, F.D. 2004. *The chemistry of oils and fats: sources, composition, properties and uses*. Oxford.
- Hackford, J.E., Lawson, S., Spielmann, P.E. 1931. On an Asphalt Ring from Ur of the Chaldees. *Journal of Institution of Petroleum Technologists*: 738–740.
- Hansel, F.A., Evershed, R.P. 2009. Formation of dihydroxy acids from Z-monounsaturated alkenoic acids and their use as biomarkers for the processing of marine commodities in archaeological pottery vessels. *Tetrahedron Letters* 50(40): 5562–5564.
- Hendy, J., Colanese, A.C., Franz, I., Fernandes, R., Fischer, R., Orton, D., [...] Rosenstock, E. 2018. Ancient proteins from ceramic vessels at Çatalhöyük West reveal the hidden cuisine of early farmers. *Nature Communications* 9(1): 1–10.
- Henrickson, E.F., McDonald, M.M. 1983. Ceramic form and function: an ethnographic search and an archeological application. *American Anthropologist* 85(3): 630–643.
- Heron, C., Evershed, R.P. 1993. The analysis of organic residues and the study of pottery use. *Archaeological Method and Theory* 5: 247–284.
- Isaksson, S., Karlsson, C., Eriksson, T. 2010. Ergosterol (5, 7, 22-ergostatrien-3 $\beta$ -ol) as a potential biomarker for alcohol fermentation in lipid residues from prehistoric pottery. *Journal of Archaeological Science* 37(12): 3263–3268.
- Kaplan, J., Paredes Umaña, F., Hurst, W.J., Sun, D., Stanley, B., Barba Pingarrón, L., Obregon Cardona, M. 2017. Cacao residues in vessels from Chocó, an early Maya polity in the southern Guatemalan piedmont, determined by semi-quantitative testing and high-performance liquid chromatography. *Journal of Archaeological Science: Reports* 13: 526–534.
- Knights, B.A., Dickson, C.A., Dickson, J.H., Breeze, D.J. 1983. Evidence concerning the Roman military diet at Bearsden, Scotland, in the 2nd century AD. *Journal of Archaeological Science* 10(2): 139–152.
- Krueger, M., Bajcev, O., Whelton, H., Evershed, R. 2020. Organic residue analysis and the use of pottery from the Neolithic settlements of Drenovac and Motel Slatina, (w:) S. Peric (red.), *The Neolithic in the Middle Morava Valley* 3. Belgrade.
- Kubiak-Martens, L. 1999. The plant food component of the diet at the Late Mesolithic (Ertebølle) settlement at Tybrind Vig, Denmark. *Vegetation History and Archaeobotany* 8: 117–127.
- Kubiak-Martens, L., Brinkkemper, O., Oudemans, T.F. 2015. What's for dinner? Processed food in the coastal area of the northern Netherlands in the Late Neolithic. *Vegetation History and Archaeobotany* 24(1): 47–62.
- Kubiak-Martens, L., Langer, J.J. 2008. Predynastic beer brewing as suggested by botanical and physiochemical evidence from Tell el-Farkha, Eastern Delta, (w:) B. Midant-Reynes, Y. Tristant with the collaborations of J. Rowland, S. Hendrickx (red.), *Egypt at its Origins* 2. *Orientalia Lovaniensia Analecta* 172, 427–441.
- Lucas, A., Harris, J.R. 1962. *Ancient Egyptian Materials and Industries*. London.
- Marlar, R.A., Leonard, B.L., Billman, B.R., Lambert, P.M., Marlar, J.E. 2000. Biochemical evidence of cannibalism at a prehistoric Puebloan site in southwestern Colorado. *Nature* 407(6800): 74–78.
- McGovern, P.E., Michel, R.H. 1996. The analytical and archaeological challenge of detecting ancient wine: two cases from the Ancient Near East, (w:) P.E. McGovern, S.J. Fleming, S.H. Katz (red.), *The Origins and Ancient History of Wine*. Langhorne, 57–65.
- Mills, J., White, R. 1989. The identity of the resins from the late Bronze Age Shipwreck at Ulu Burun (Kas). *Archaeometry* 31: 37–44.
- Mitchell, P.D., Stern, E., Tepper, Y. 2008. Dysentery in the crusader kingdom of Jerusalem: an ELISA analysis of two medieval latrines in the city of Acre (Israel). *Journal of Archaeological Science* 35(7): 1849–1853.
- Mottram, H.R., Dudd, S.N., Lawrence, G.J., Stott, A.W., Evershed, R.P. 1999. New chromatographic, mass spectrometric and stable isotope approaches to the classification of degraded animal fats preserved in archaeological pottery. *Journal of Chromatography A* 833(2): 209–221.
- Mukherjee, A.J., Copley, M.S., Berstan, R., Clark, K.A., Evershed, R.P. 2005. Interpretation of  $\delta^{13}\text{C}$  values of fatty acids in relation to animal husbandry, food processing and consumption in prehistory, (w:) J. Mulville, A. Outram (red.), *The zooarchaeology of milk and fats*. Oxford, 77–93.
- Oudemans, T.M.F. 2007. Applying organic Residue Analysis in Ceramic Studies in Archaeology – A Functional Approach. *Leiden Journal of Pottery Studies* 23: 5–20.
- Oudemans, T.F.M., Boon, J.J. 1991. Molecular archaeology: Analysis of charred (food) remains from prehistoric pottery by pyrolysis—gas chromatography/mass

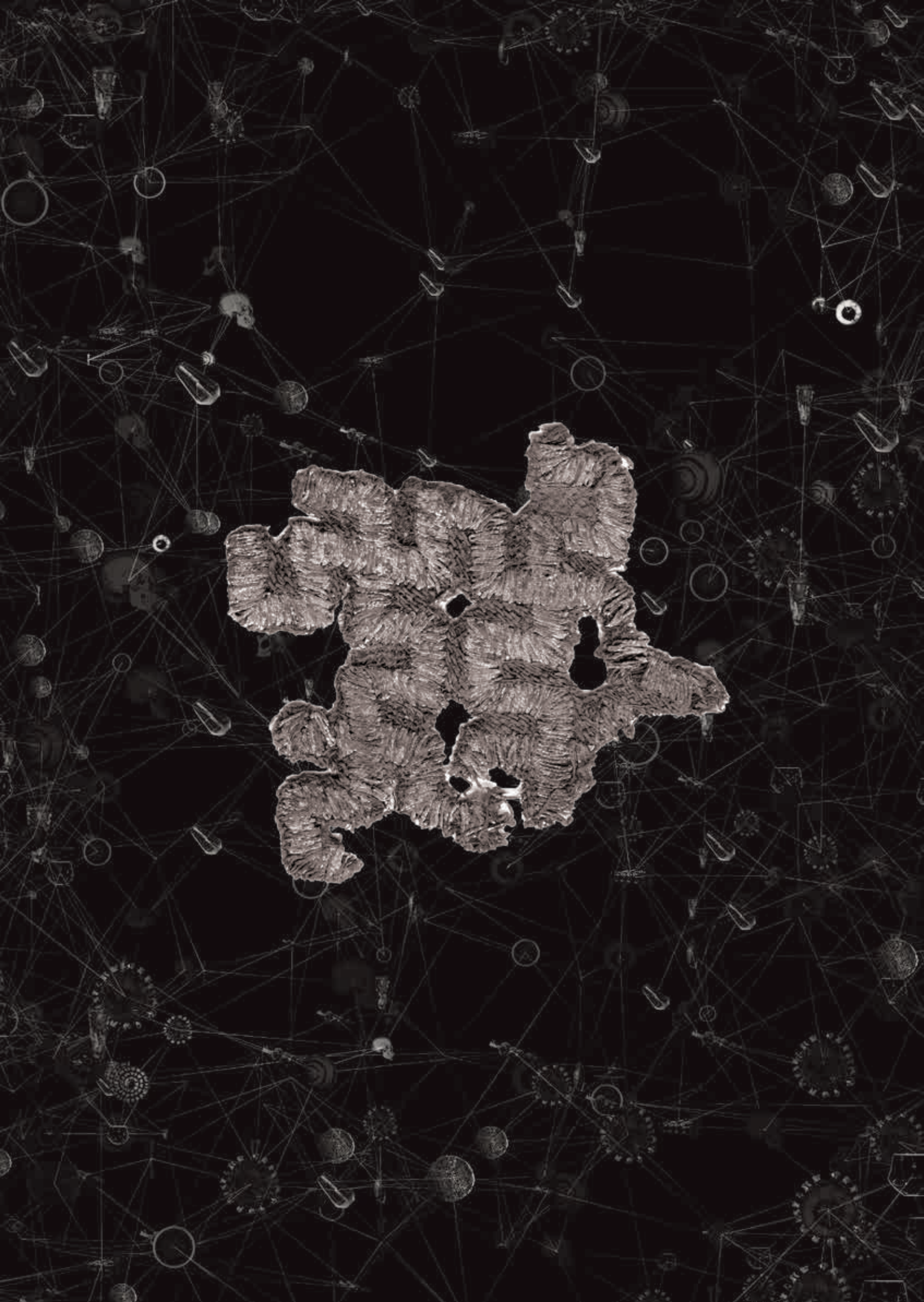
- spectrometry. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 20: 197–227.
- Oudemans, T.F.M., Kubiak-Martens, L. 2014. Mixed food dishes in corded ware ceramics. Botanical and chemical study of charred organic residues. A mosaic of habitation at Zeewijk (the Netherlands). Late Neolithic behavioural variability in a dynamic landscape. *Nederlandse Archeologische Rapporten* 47: 143–165.
- Oudemans, T.F.M., Kubiak-Martens, L. 2012. Botanical and chemical characterisation of charred organic residues in ceramics, (w:) B. Smit, O. Brinkkemper, J.P. Kleijne, R.C.G.M. Lauwerier, E.M. Theunissen (red.), *A Kaleidoscope of Gathering at Keinsmerbrug (the Netherlands). Late Neolithic Behavioural Variability in a Dynamic Landscape*, Amersfoort. *Nederlandse Archeologische Rapporten* 43, 107–130.
- Oudemans, T., Eijkel, G.B., Boon, J. 2007. Identifying biomolecular origins of solid organic residues preserved in Iron Age Pottery using DTMS and MVA. *Journal of Archaeological Science* 34(2): 173–193.
- Oudemans, T.F.M., Kubiak-Martens, L. 2013. Broad-spectrum cooking: botanical and chemical evidence in Late Neolithic Pottery. A matter of life and death at Mienakker (the Netherlands): late Neolithic behavioural variability in a dynamic landscape. (*Nederlandse Archeologische Rapporten* 45) Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed. Amersfoort, 119–146.
- Palumbo, M., Tushingham, S., Anderson, U., McNutt, C.H. 2011. *The Biomolecular Archaeology of the Black Drink: Alkaloid Residue Analysis of Ilex vomitoria on Experimental Vessels and Applications for Prehistoric Specimens. Paper presented at the 2011 Southeastern Archaeological Conference*. Jacksonville, Florida.
- Pavelka, J., Smejda, L., Hynek, R., Hrdlickova Kuckova, S. 2016. Immunological detection of denatured proteins as a method for rapid identification of food residues on archaeological pottery. *Journal of Archaeological Science* 73: 25–35.
- Pecci, A., Giorgi, G., Salvini, L., Ontiveros, M.Á.C. 2013. Identifying wine markers in ceramics and plasters using gas chromatography-mass spectrometry. Experimental and archaeological materials. *Journal of Archaeological Science* 40(1): 109–115.
- Pepe, C., Dizabo, P., Scribe P., Dagaut, J., Filiaux, J., Saliot, A. 1989. Les marqueurs biogéochimiques. Application à l'archéométrie. *Revue d'Archéométrie* 13.
- Pepe, C., Dizabo, P. 1990. Étude d'une fosse du 13<sup>ème</sup> siècle par les marqueurs biogéochimiques: chantier archéologique du Louvre (Paris). *Archéo Sciences. Revue d'Archéométrie* 14(1): 23–28.
- Pietrzak, S. 2010. *Zastosowanie i technologie wytwarzania dziegiu przez społeczeństwa międzyrzecza Dniepru i Łaby od VI do II tysiąclecia BC*. Poznań.
- Pietrzak, S. 2015. Badania archeometryczne substancji organicznych z fragmentów naczyń ceramicznych, (w:) A. Marciniak, I. Sobkowiak-Tabaka, M. Bartkowiak, M. Lisowski (red.), *Kopydłowo, stanowisko 6. Osady neolityczne z pogranicza Kujaw i Wielkopolski (Ocalone Dziedzictwo Archeologiczne 6)*. Poznań-Pękowo, 143–156.
- Pietrzak, S., Langer, J.J. 2012. Badania archeometryczne substancji smolistycznych na stanowisku 6 w Marwicach, (w:) A. Różański, S. Pietrzak (red.), *Studia i materiały nad najdawniejszymi dziejami Równiny Gorzowskiej. Wczesne Średniowiecze (Poznańskie Studia Archeologiczne V)*, Poznań, 70–116.
- Pollard, A.M., Batt, C.M., Stern, B., Young, S.M., Young, S.M.M. 2007. *Analytical chemistry in archaeology*. Cambridge.
- Raemaekers, D.C., Kubiak-Martens, L., Oudemans, T.F. 2013. New food in old pots—charred organic residues in Early Neolithic ceramic vessels from Swifterbant, the Netherlands (4300–4000 cal BC). *Archäologisches Korrespondenzblatt* 43(3): 315–334.
- Rageot, M., Pêche-Quilichini, K., Py, V., Filippi, J.J., Fernandez, X., Regert, M. 2015. Exploitation of Beehive Products, Plant Exudates and Tars in Corsica During the Early Iron Age. *Archaeometry* 58(2): 315–332.
- Rageot, M., Mötsch, A., Schorer, B., Bardel, D., Winkler, A., Sacchetti, F., [...] Spiteri, C. 2019. New insights into Early Celtic consumption practices: Organic residue analyses of local and imported pottery from Vix-Mont Lassois. *PloS One* 14(6): 1–19.
- Raven, A.M., Van Bergen, P.F., Stott, A.W., Dudd, S.N., Evershed, R.P. 1997. Formation of long-chain ketones in archaeological pottery vessels by pyrolysis of acyl lipids. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 40: 267–285.
- Reber, E.A., Kerr, M.T. 2012. The persistence of caffeine in experimentally produced black drink residues. *Journal of Archaeological Science* 39(7): 2312–2319.
- Regert, M., Colinart, S., Degrand, L., Decavallas, O. 2001. Chemical alteration and use of beeswax through time: accelerated ageing tests and analysis of archaeological samples from various environmental contexts. *Archaeometry* 43(4): 549–569.
- Roffet-Salque, M., Evershed, R. 2015. Shifting pottery use and animal management at Kopydłowo (Poland) traced through lipid residue analyses of pottery vessels, (w:) A. Marciniak, I. Sobkowiak-Tabaka, M. Bartkowiak, M. Lisowski (red.), *Kopydłowo, stanowisko 6. Osady neolityczne z pogranicza Kujaw i Wielkopolski (Ocalone Dziedzictwo Archeologiczne 6)*. Poznań-Pękowo, 133–143.
- Roffet-Salque, M., Dunne, J., Altoft, D.T., Casanova, E., Cramp, L.J., Smyth, J., [...], Evershed, R.P. 2017. From the inside out: Upscaling organic residue analyses of archaeological ceramics. *Journal of Archaeological Science: Reports* 16: 627–640.
- Roffet-Salque, M., Regert, M., Evershed, R.P., Outram, A.K., Cramp, L.J.E., Decavallas, O., Dunne, J., Gerbault, P., Mileto, S., Mirabaud, S., Pääkkönen, M., Smyth, J., Šoberl, L., Whelton, H. L., Alday-Ruiz, A., Asplund, H., Bartkowiak, M., Bayer-Niemeier, E., Belhouchet, L.,

- Bernardini, F., Budja, M., Cooney, G., Cubas, M., Danaher, E.M., Diniz, M., Domboróczy, L., Fabri, C., González-Urquijo, J.E., Guilaine, J., Hachi, S., Hartwell B.N., Hofmann, D., Hohle, I., Ibáñez, J.J., Karul, N., Kherbouche, F., Kiely, J., Kotsakis, K., Lueth, F., Mallory, J.P., Manen, C., Marciniak, A., Maurice-Chabard, B., Mc Gonigle, M.A., Mulazzani, S., Özdoğan, M., Perić, O.S., Perić, S.R., Petrasch, J., Pétrequin, A.M., Pétrequin, P., Poensgen, U., Joshua Pollard, C., Poplin, F., Radi, G., Stadler, P., Stäuble, H., Tasić, N., Urem-Kotsou, D., Vuković, J.B., Walsh, F., Whittle, A., Wolfram, S., Zapata-Peña, L., Zoughlami, J. 2015. Widespread exploitation of the honeybee by early Neolithic farmers. *Nature* 527: 226–230.
- Rottländer, R.C.A., Hartke, I. 1982. New result of food identification by fat analysis, (w:) A. Aspinall and S. E. Warren (red.), *Proceedings of the 22nd Symposium on Archaeometry*. Bradford, 218–221.
- Rye, O.S. 1981. *Pottery technology: principles and reconstruction*. Washington.
- Salque, M., Bogucki, P.I., Pyzel, J., Sobkowiak-Tabaka, I., Grygiel, R., Szmyt, M., Evershed, R.P. 2013. Earliest evidence for cheese making in the sixth millennium BC in northern Europe. *Nature* 493(7433): 522–525.
- Samuel, D. 1996. Archaeology of ancient Egyptian beer. *Journal of the American Society of Brewing Chemists* 54(1): 3–12.
- Skibo, J.M. 1992. *Pottery Function: A Use-Alteration Perspective*. New York.
- Skibo, J.M. 2013. *Understanding Pottery Function*. New York.
- Šoberl, L., Gašparič, A.Ž., Budja, M., Evershed, R.P. 2008. Early herding practices revealed through organic residue analysis of pottery from the early Neolithic rock shelter of Mala Triglavca, Slovenia. *Documenta Praehistorica* 35: 253–260.
- Smith, R.K., Stacey, R.J., Bergström, E., Thomas-Oates, J. 2018. Detection of opium alkaloids in a Cypriot base-ring juglet. *Analyst* 143(21): 5127–5136.
- Steele, V. J. 2013. Organic residues in archaeology: the highs and lows of recent research, (w:) R.A. Armitage, J.H. Burton (red.), *Archaeological Chemistry VIII*. New Orleans, 89–108.
- Stern, B., Heron, C., Serpico, M., Bourriau, J. 2000. A comparison of methods for establishing fatty acid concentration gradients across potsherds: a case study using Late Bronze Age Canaanite amphorae. *Archaeometry* 42(2): 399–414.
- Stern, B., Heron, C., Tellefsen, T., Serpico, M. 2008. New investigations into the Uluburun resin cargo. *Journal of Archaeological Science* 35: 2188–2203.
- Stokar, W., von 1938. Prehistoric organic remains. *Antiquity* 12: 82–6.
- Taché, K., Jaffe, Y., Craig, O.E., Lucquin, A., Zhou, J., Wang, H., ... & Flad, R.K. 2021. What do “barbarians” eat? Integrating ceramic use-wear and residue analysis in the study of food and society at the margins of Bronze Age China. *Plos one* 16(4), e0250819.
- Teodor, E.D., Badea, G.I., Alecu, A., Calu, L., Radu, G.L. 2014. Interdisciplinary study on pottery experimentally impregnated with wine. *Chemical Papers* 68(8): 1022–1029.
- Tite, M.S. 2008. Ceramic production, provenance and use – a review. *Archaeometry* 50(2): 216–231.
- Valamoti, S.M., Garnier, N. 2013. Prehistoric wine-making at Dikili Tash (Nouthern Greece): Integrating residue analysis and archaeobotany. *Journal of Archaeological Science* 74: 195–206.
- Washburn, D.K., Washburn, W.N., Shipkova, P.A., Pelley-mounter, M.A. 2014. Chemical analysis of cacao residues in archaeological ceramics from North America: considerations of contamination, sample size and systematic controls. *Journal of Archaeological Science* 50: 191–207.
- Whelton, H.L., Roffet-Salque, M., Kotsakis, K., Urem-Kotsou, D., Evershed, R.P. 2018. Strong bias towards carcass product processing at Neolithic settlements in northern Greece revealed through absorbed lipid residues of archaeological pottery. *Quaternary International* 496: 127–139.
- Woods, A.J. 1986. Form, fabric, and function: Some observations on the cooking pot in antiquity, (w:) *Technology and style: proceedings of a symposium on ceramic history and archaeology at the 87th annual meeting of the American Ceramic Society, 6 May 1985, Cincinnati 2*. Westerville, 157–172.
- Zhang, T., Xu, S., Li, Y., Wen, R., Yang, G. 2018. Orthogonal optimization of extraction and analysis for red wine residues in simulated and archaeological materials using LC/MS and HPLC methods. *Microchemical Journal* 142: 175–180.









# Tekstylia

Maria Cybulska, Anna Drązkowska

---

## TEKSTYLIA ARCHEOLOGICZNE

Tekstylia archeologiczne obejmują różne wyroby wykonane technikami włókienniczymi. Zaliczamy do nich tkaniny, kobierce oraz wyroby nietkane: liny, sznurki, filce, a także koronki, sprang i dzianiny. Są to m.in. fragmenty odzieży oraz tasemek, wstążek i koronek, którymi ją ozdabiano, a także tkaniny techniczne oraz dekoracyjne używane jako obicia, poduszki i inne akcesoria i elementy wystroju wnętrz. Pozyskiwane są z różnych stanowisk archeologicznych o zróżnicowanej chronologii i funkcji: piasków pustyni, bagien, morza, grodzisk, cmentarzysk, nawarstwień średniowiecznych i nowożytnych miast, głębokich latryn oraz z ciemnych i niebezpiecznych krypt, czasami zalanych wodą.

Znaleziska archeologiczne związane z tekstyliami to nie tylko ich formy bezpośrednie, lecz także pośrednie świadectwa ich obecności na badanym terenie. Należą do nich narzędzia do wyrobu tekstyliów, takie jak ciężarki tkackie, przęsłiki, grzebienie tkackie, świadczące o istnieniu lokalnej produkcji włókienniczej i o jej technologicznym poziomie. (Broudy 1979). Plomby tekstylne to z kolei świadectwa handlu tekstyliami. (Kocińska i Maik 2004).

Do pośrednich form tekstyliów należą także odciski na naczyniach glinianych, które mogły powstać przypadkowo lub zrobione były w celu

nadania powierzchni dekoracyjnej faktury (Sikorski 2002/2003; Kaczmarek 2015).

Interesującymi formami pośrednimi tekstyliów są także pseudomorfy, czyli rodzaj matrycy powstałej z produktów korozji metali, które w środowisku archeologicznym były w bezpośrednim kontakcie z tekstyliami (Vollmer 1974; Cybulska i Maik 2007).

## ZNACZENIE BADAŃ

Od lat obserwujemy systematyczny wzrost zainteresowania naukowców zabytkowymi tekstyliami. Godne uwagi jest to, że badania nad nimi stały się nie tylko domeną historyków sztuki, konserwatorów zabytków czy włókienników, lecz że także archeolodzy podejmują się tego trudnego zadania. Prace nad tekstyliami archeologicznymi prowadzone w różnych ośrodkach naukowych w Polsce przedstawił w jednym ze swych artykułów J. Maik (Maik 2019). Autor zaprezentował tam wybór publikacji na ten temat. Zagadnienia, którymi zajmują się polscy badacze tekstyliów, wskazują na dużą różnorodność podejmowanych tematów, co oznacza, że tekstylia mają ogromny potencjał naukowy o szerokim zakresie poznawczym. Można m.in. określić ich charakterystykę technologiczno-surowcową, analizować kierunki rozwoju produkcji tekstyliów, obserwować momenty przełomowe stanowiące



wyznaczniki postępu technicznego, a także doszukiwać się cech, które pomogą określić, czy mamy do czynienia z wyrobem rodzimej produkcji, czy z importem. Można również podejmować próby rekonstrukcji procesu ich wytwarzania. Pozyskiwany tekstylny materiał zabytkowy umożliwia również analizowanie krojów, wzorów, technik szycia odzieży i sposobów jej ozdabiania. Poza tym, jeśli sięgniemy głębiej, opierając się na informacjach natury formalnej dostarczanej dzięki szczegółowej analizie tekstyliów, i jednocześnie wyjdziemy poza jej schemat, możemy poznawać zwyczaje, upodobania estetyczne, zmieniającą się modę, rytuały i ob-rzędy pogrzebowe.

W celu poszerzenia wiedzy na temat tekstyliów konieczna jest jednak współpraca archeologów z przedstawicielami innych dyscyplin nauki, m.in. chemikami, inżynierami włókiennictwa, historykami sztuki, mikrobiologami i konserwatorami zabytków. Dowodem na to, że taka współpraca od lat jest prowadzona i coraz bardziej się rozwija, są powstające publikacje (Kamińska i Nahlik 1958; Biesaga i in. 2004; Cybulska i Maik 2007; Cybulska i in. 2011; Miazga i in. 2018; Miazga 2020; Karbowska-Berent i in. 2020; Śliwka-Kaszyńska 2020).

### **DEGRADACJA TEKSTYLIÓW, SPECYFIKA I WARUNKI**

Mimo że tekstylia mogą zachować się w tak wielu odmiennych środowiskach, to w porównaniu z innymi artefaktami odnajdywane są stosunkowo rzadko. Ma na to wpływ ich delikatna struktura i surowce, głównie pochodzenia organicznego, z których były wytwarzane. Czynniki determinującymi procesy degradacyjne i wpływającymi na tempo ich zachodzenia są m.in.: miejsce, głębokość i warunki zalegania, rodzaj gleby, jej właściwości i skład chemiczny, a także jej struktura, czyli stan fizyczny budowy wewnętrznej gleby, na który składa się sposób powiązania i układ tworzywa glebowego oraz jego kształt i wielkość (Kabała 2015: 115-122). Poza tym istotnymi czynnikami są także: temperatura, poziom wilgoci, dostępność tlenu, rodzaj i ilość mikroorganizmów (Cybulska i in. 2008: 68-70), czas zalegania oraz intensywność działania zwierząt i roślin (Drązkowska 2008: 20-23; 2014: 71-73; Drązkowska 2015). Na stan zachowania tekstyliów poza czynnikami środowiskowymi

duży wpływ mają rodzaj włókna, z którego zostały wykonane, oraz ich struktura. Przeważnie odnajdywane są wyroby z włókien proteinowych – wełniane i jedwabne, a bawełniane, lniane i konopne należą do rzadszych znalezisk, czasami pozostają po nich jedynie pojedyncze włókna.

Bardzo niekorzystne dla stanu zachowania tkanin są zwłaszcza piaszczyste, przepuszczalne podłoże i zmienne warunki atmosferyczne: intensywne opady, wysokie temperatury lub przemarzanie podłoża. Dlatego w naszym klimacie tekstylia najlepiej zachowują się w kryptach, ponieważ na małej, odizolowanej od czynników zewnętrznych powierzchni, schowanej pod posadzką kościołów, powstaje i utrzymuje się specyficzny mikroklimat ze stałą temperaturą i ograniczonym dostępem powietrza. W tej wyjątkowej przestrzeni pozbawionej wyżej wspomnianych czynników destrukcyjnych tekstylia rzeczywiście mają większe szanse na przetrwanie. Należy jednak pamiętać, że nie jest to dla nich idealne i neutralne środowisko. W podziemnych pomieszczeniach niejednokrotnie panują ekstremalnie trudne warunki, zwłaszcza gdy są one zamurowane, a poziom wilgotności przez rozkład złożonych w nich ciał sięga około 90% (Drązkowska 2020: 120). W takich warunkach zachodzą zaawansowane procesy gnilne prowadzące do całkowitej degradacji tkanek miękkich, a czasami nawet i szkieletów. Deterioracji ulegają równocześnie tkaniny okrywające martwe ciała, a do ich szybkiego rozkładu przyczyniają się inicjujące procesy gnilne bakterie, grzyby i owady. Wysoka wilgotność przyspiesza i wzmacnia biodegradację tekstyliów (Hryszko 2001: 56; 2017: 40; Cybulska i in. 2008: 68-70). Odzież wełniana, lniana i bawełniana rozkłada się przeważnie wraz z ciałem. Czasami jej niewielkie fragmenty pozostają przyklejone do kości. Najbardziej odporne na te wyjątkowo niekorzystne warunki są jedwabie, dlatego w kryptach najczęściej odnajdujemy tekstylia jedwabne: odzież, tasiemki, koronki, wstążki, sznureczki, guziki, pasy oraz obicia trumien i szkaplerze. Jedwabie zachowują się nierzadko w dużych fragmentach lub odnajdujemy całe uszyte z nich stroje. Często są bardzo zniszczone, odbarwione, pokryte plamami, które wniknęły głęboko pomiędzy włókna, sklejając je w twarde grudki. Na ich powierzchni występują zabrudzenia pochodzenia organicznego, przyklejone szczątki roślin, piasek, kurz i wyściółka z trumny. Tkaniny są porozdzierane, mają postrzępione krawędzie, liczne przetarcia

i dziury. Badania prowadzone w kryptach wykazały jednak, że jeśli jest w nich niski poziom wilgotności, stała temperatura i przepływ powietrza, to rozkład gnilny ciał może zostać powstrzymany lub bardzo spowolniony, co może doprowadzić do ich naturalnej mumifikacji. Na strupieszalnych, wysuszonych szczątkach oprócz ubiorów jedwabnych i wełnianych zachowuje się nawet lniana i bawełniana bieliza, a także lniane szaty liturgiczne. Na uwagę zasługuje również to, że w takich warunkach tkaniny zachowują swoje intensywne kolory.

### EKSPLORACJA TEKSTYLIOW

Eksploracja tekstyliów jest niejednokrotnie zadaniem trudnym, ma na to wpływ ich delikatna struktura i zazwyczaj bardzo duży poziom zniszczeń, ponieważ straciły one swoją elastyczność i odporność na czynniki mechaniczne. Jak już wyżej opisano, stan zachowania wyrobów tekstylnych uzależniony jest od wielu zmiennych czynników i dlatego na różnych stanowiskach zakres i charakter zniszczeń jest odmienny. W trakcie wykopalisk po odkryciu tekstyliów należy natychmiast zadbać o ich szybkie wydobywanie i zapakowanie oraz przygotowanie do transportu. Podczas ich wydobywania należy zachować szczególną ostrożność. Włókna mogą się kruszyć, rozpadać na drobne części, czasami procesy gnilne są tak bardzo zaawansowane, że tkaniny rozpadają się w rękach. W podłożu bardzo wilgotnym błoto może oblepiać powierzchnię tekstyliów, przez co stają się one mało widoczne i mogą zostać niezauważone przez archeologów. Czasami zdarza się, że ich fragmenty ściśle przylegają do powierzchni innych przedmiotów lub szczątków ludzkich. Mogą być do nich przyklejone, mogą także być zespolone z podłożem gęstą siecią korzeni, która je przerasta. Na stanowisku nie należy jednak na siłę ich odspajać. Jeśli to możliwe, trzeba wydobyć je w całości z obiektem, do którego są przyklejone, i zapakować razem. Korzenie natomiast powinno się delikatnie odcinać nożyczkami a w miejscu eksploracji nie wolno usuwać ich spośród splotów, dopóki nie zostaną przeprowadzone badania mikroskopowe, ponieważ korzenie mogą stabilizować i utrzymywać konstrukcje zniszczonych tkanin. Do eksploracji tekstyliów i ich przenoszenia pomocne są różnego rodzaju szpatułki, płaskie łopatkę używane przez protetyków lub konserwatorów zabytków.

Podczas eksploracji tekstyliów trzeba pamiętać, że wszystkie obiekty wydobywane z ziemi mają w sobie wilgoć, a jej poziom jest zróżnicowany i uzależniony od wielu czynników, przede wszystkim determinuje go środowisko zalegania. Dlatego nie można dopuścić, aby tekstylia utraciły wilgoć, znajdująca się w nich woda uległa odparowaniu. Przesuszone włókna tracą spójność, kruszą się i rozpadają na drobne części, a w skrajnych sytuacjach ulegając całkowitej i nieodwracalnej degradacji, zmieniają się w pył.

W celu zabezpieczenia wyrobów włókienniczych natychmiast po wydobywaniu należy zapakować je w worki, najlepiej w kilka grubych worków strunowych, o wielkości wyraźnie większej niż wkładany do nich obiekt, tak aby mogły być w nich płasko rozłożone i aby nie przylegały ciasno do krawędzi worków. Jeśli przypuszczamy, że tekstylia są bardzo zniszczone i bezpośredni kontakt z workami może być dla nich niekorzystny, można włożyć je najpierw do pojemnika z tworzywa, którego ścianki bezpiecznie odizolują obiekt, i dopiero wówczas można pojemnik dodatkowo osłonić workami.

W celu utrzymania stałego poziomu wilgoci nie można tekstyliów bezpośrednio zawijać w mokrą ligninę, ponieważ oblepi ona włókna i będzie trudna do usunięcia, co w znacznym stopniu utrudni analizy mikroskopowe i pogłębi degradację obiektów. Nie należy również bezpośrednio po wydobywaniu przystępować do oczyszczania wyrobów tekstylnych, obmywać je wodą czy wręcz zanurzać w pojemnikach z wodą, ponieważ nie znając poziomu zniszczeń, można doprowadzić do ich całkowitego rozpułnięcia w cieczy. Należy również zachować wielką ostrożność, oczyszczając tekstylia pędzelkami, ponieważ mogą rozpaść się pod jego dotknięciem lub ulec deformacji.

Czasami jednak, gdy obiekty są bardzo zdegradowane i mogą nie przetrwać transportu, pojawia się konieczność dokładnego zadokumentowania ich *in situ*. Można to zrobić przy użyciu aparatów fotograficznych lub małych przenośnych mikroskopów cyfrowych, do których można podłączyć również telefon komórkowy i użyć jego aparatu do wykonania zdjęcia.

Aby zabezpieczyć rozpadające się wyroby włókiennicze i umożliwić ich wydobywanie, można je poddać impregnacji kompozycją Paraloidu B-72, poliglikolu etylenowego 400 (PEG 400) w metanolu i toluenie (Grupa 2007: 215). Impregnat ten powinno

się stosować tylko wtedy, gdy jesteśmy pewni, że obiekt bez tego zabiegu się rozpadnie.

Archeolodzy czasami znajdują pozostałości tekstyliów na przedmiotach metalowych, takich jak klamerki stanowiące części ubiorów. Zabezpieczając przedmioty metalowe żywicami, tworzy się na ich powierzchni warstwę uniemożliwiającą późniejsze analizy fizykochemiczne i utrudniającą obserwacje i analizy mikroskopowe zachowanych na nich tekstyliów. Wskazane więc jest, aby poddać je analizie przed zastosowaniem zabiegów konserwatorskich.

Bardzo ważne jest, aby odnalezione zabytki dobrze opisać, tak by oprócz standardowych informacji, zawsze zamieszczanych na metryczkach, znalazł się dokładny opis miejsca ich znalezienia i cały kontekst archeologiczny. Należy również odnotować, w sąsiedztwie jakich przedmiotów je odnaleziono, oraz z jakich surowców te artefakty wykonano. Wiedza na ten temat pomoże w zrozumieniu i w dokładnym określeniu procesów degradacyjnych zachodzących w obiektach zabytkowych oraz pomoże w identyfikacji funkcji odnalezionych wyrobów włókienniczych. W przypadku odkrycia fragmentów tekstyliów w sąsiedztwie lub bezpośrednio na szkieletcie informacje na temat ich położenia pomogą w rozpoznaniu części odzieży, z jakich one pochodziły.

Oczywiście nie sposób jest opisać wszystkie sytuacje, z jakimi mogą spotkać się archeolodzy, gdy podczas wykopalisk odnajdą wyroby włókiennicze, ponieważ każde stanowisko ma swoją odmienną specyfikę i indywidualny charakter. Pierwszy kontakt z tekstyliami na stanowisku może być dla archeologów trudny, jednak nabyte doświadczenie pozwala profesjonalnie zabezpieczyć obiekty. Jeśli archeolog nie ma wiedzy konserwatorskiej, ważna jest współpraca z konserwatorem zabytków i specjalistami w dziedzinie analizy tekstyliów. Podczas eksploracji tekstyliów, a później przy ich opracowywaniu, należy pamiętać o tym, że te obiekty są skażone mikrobiologicznie, ich powierzchnię pokrywają grzyby pleśniowe i bakterie, które mogą być chorobotwórcze, co potwierdzają prowadzone badania (Walczak i in. 2015). Dlatego należy stosować środki ochrony osobistej i poddawać obiekty dezynfekcji.

Archeolodzy i konserwatorzy używają różnych metod i środków, takich jak m.in. gazowanie w komorze próżniowej przy użyciu tlenu etylenu,

działanie oparami, napyłanie lub pędzlowanie 0,5% roztworem PCMC w alkoholu etylowym (Strzelczyk i Karbowska-Berent 2004: 187-196). Nie zawsze jednak mamy dostęp do komory, a używając dezynfektanta w postaci roztworu PCMC, trzeba zachować dużą ostrożność, ponieważ jest to środek wysoce toksyczny i w dużych stężeniach ma właściwości rakotwórcze. Należy nakładać go, używając szczelnych masek z filtrami, a po zakończeniu czynności wietrzyć pomieszczenie. Dlatego bezpieczniejsze jest użycie samego wysokoprocentowego alkoholu. Szczególną ostrożność należy zachować zwłaszcza przy badaniach tekstyliów pozyskiwanych z krypt grobowych.

## METODY MIKROSKOPOWE W BADANIU TEKSTYLIÓW

Badania tekstyliów prowadzono od czasów tworzenia pierwszych muzeów i zbiorów, a więc od połowy XIX w. Pierwsi badacze używali mało skomplikowanych narzędzi, jak lupy i proste mikroskopy optyczne. Jeszcze w latach 60. XX w. naukowcy wyznaczający sploty tkanin posługiwali się metodą wypruwania kolejnych nitok z pobranych próbek, co niestety prowadziło do ich destrukcji (Cybulska i in. 2016a). Obecnie, dzięki wykorzystaniu mikroskopów połączonych z rejestratorami obrazów, które wyświetlane są na ekranie komputera, oraz dzięki zastosowaniu grafiki komputerowej, a w szczególności metod analizy obrazów, możliwe jest wyznaczanie w zasadzie wszystkich podstawowych parametrów struktury włókien, nitok i tkanin oraz innych wyrobów włókienniczych, w sposób w zasadzie nienaruszający ich struktury (Cybulska 1999: 369-373; Cybulska i Pancer 2004: 124-129).

Metody wyznaczania parametrów strukturalnych tekstyliów na podstawie ich mikroskopowych obrazów stały się popularne w latach 80. i 90. XX w. Były przeznaczone głównie dla tekstyliów przemysłowych o stosunkowo prostej strukturze. Obecnie metody analizy obrazów stały się standardem w badaniach nad strukturą różnego typu tekstyliów i mogą być z powodzeniem stosowane w przypadku tekstyliów zabytkowych, a także znacznie trudniejszych ze względu na wysoki stopień deterioracji tekstyliów archeologicznych. Umożliwiają one identyfikację i wyznaczenie





**Ryc. 1.** Zdjęcia tkanin archeologicznych z Czermna wykonane za pomocą przenośnego mikroskopu cyfrowego. Rozdzielczość obrazu 2592 × 1944. Widoczny brak głębi ostrości i refleksy światła wynikające z rodzaju oświetlenia. Fot. M. Cybulska

liczbowych charakterystyk każdego rodzaju tekstyliów: od surowca, czyli włókien, przez parametry strukturalne nitek, aż po gotowe wyroby, jak tkaniny, dzianiny, filce itp. Obserwacje mikroskopowe umożliwiają także oszacowanie stopnia zniszczenia tkanin i intensywność ich zabrudzeń, co jest konieczne, gdy podejmowane są zabiegi konserwatorskie.

Do dokumentacji tekstyliów *in situ* lub jako mikroskop podręczny służyć mogą popularne przenośne mikroskopy cyfrowe. Oferują one stosunkowo duże powiększenia, jednak ich główną wadą jest bardzo mała głębia ostrości, stosunkowo niska rozdzielczość obrazu i, co chyba najważniejsze, sposób podświetlania obiektu. Mimo to mogą być bardzo praktyczne we wstępnych analizach obiektu (ryc. 1).





**Ryc. 2.** Zdjęcie jedwabnej tkaniny archeologicznej wykonane kamerą cyfrową Nikon DS-Fi3, przy użyciu mikroskopu stereoskopowego Nikon SMZ. Wykorzystano technikę EDF, która daje bardzo dobrą głębię ostrości, dzięki której widoczne są wszystkie warstwy materiału. Fot. J. Maik dzięki uprzejmości firmy Nikon w czasie pokazu sprzętu

Producenci oferują jednak nowoczesne rozwiązania, które eliminują w zasadzie wszystkie wady mikroskopów optycznych. Zdjęcia na ryc. 2 wykonano kamerą cyfrową Nikon DS-Fi3, przy użyciu mikroskopu stereoskopowego Nikon SMZ. Wykorzystano technikę EDF (ang. *extended depth of focus*), która służy do wykonania zdjęć z dużą

głębią ostrości, większą niż głębia ostrości obiektywu mikroskopu. Ważną rzeczą przy rejestracji obrazów mikroskopowych jest właściwe oświetlenie obiektu, szczególnie w przypadku tekstyliów. Wygląd ich powierzchni jest wypadkową trzech głównych czynników tworzących ich fakturę: struktura wynikająca z technologii (tkanina, dzianina

itp.), struktura samych nitek oraz rodzaj i własności włókien. W celu wydobywania faktury czy wzmocnienia koloru stosowane są filtry polaryzacyjne, UV i IR. Ważny jest również kierunek padania światła. Wbudowane oświetlenie, zwłaszcza w małych cyfrowych mikroskopach, daje najczęściej niepożądane efekty w postaci odbicia światła od obiektu, przez co jego struktura staje się nieczytelna. Obecnie najczęściej stosuje się zewnętrzne oświetlacze o szerokich możliwościach, jeśli chodzi o regulację mocy, kąta padania i szerokości wiązki światła. W zależności od potrzeb mogą dostarczać silnego, skupionego strumienia światła bądź światła rozproszonego, w tym również światła spolaryzowanego lub o ograniczonym widmie, co pozwala na uwypuklenie interesujących nas cech badanego obiektu, np. ułożenia włókien na powierzchni nitki lub splotu tkaniny. Składają się z jednostki bazowej, do której podłączone mogą być światłowodowe oświetlacze pierścieniowe, dające miękkie, rozproszone światło lub oświetlenie punktowe w formie giętkich tzw. gęsiach szyjek, generujące wiązkę światła o małym kącie, pozwalające na dowolne ustawienie kąta i intensywności oświetlenia badanego obiektu.

Do celów dokumentacji, a także analizy struktury nitek i płaskich wyrobów włókienniczych (tkaniny, dzianiny) stosowane mogą być skanery o dobrej głębi ostrości i o wysokiej rozdzielczości optycznej (min. 1200 dpi). Ich zaletą jest równomierne oświetlenie obiektu, brak odbić światła na powierzchni wyrobu, a także, w przypadku dobrych skanerów, zadowalająca głębia ostrości i często wbudowane filtry UV i IR. Dużą zaletą jest brak konieczności skalowania obiektu: przy rozdzielczości 1200 dpi otrzymujemy cyfrowy obraz obiektu, na którym 1 mm odpowiada dokładnie 48 pikseli (ryc. 3).

Współczesne aparaty fotograficzne z matrycami o wysokiej rozdzielczości obrazu i obiektywami z funkcją makro pozwalają otrzymać dużo większą rozdzielczość dpi, jednak obiekt fotografowany musi być razem ze skalą, pozwalającą na późniejsze analizy strukturalne. W przypadku fotografii z ryc. 4 1 mm odpowiada 150 pikselom. Obiektywy makro mają najczęściej wbudowane własne oświetlacze, dające równomierne oświetlenie obiektu (ryc. 4).

Mikroskopy optyczne są podstawowym narzędziem w badaniu tekstyliów archeologicznych. Ostatnie rozwiązania koncepcyjne i techniczne wykorzystywane w konfokalnej skaningowej mikroskopii optycznej znacznie zwiększają ich możliwości.

Dzięki wysokiej rozdzielczości oraz wielokrotnie większej niż w mikroskopii optycznej głębi ostrości i skali powiększenia obrazu mikroskopia elektronowa pozwala na doskonałe odwzorowanie badanych próbek tekstylnych. Jest niezastąpioną metodą identyfikacji rodzaju i stopnia uszkodzenia poszczególnych włókien w tekstyliach, pozwala również na uzyskanie wyraźnego obrazu powierzchni tekstyliów w określonym (w zależności od zastosowanego powiększenia) obszarze skanowania, przy zachowaniu nienaruszonej struktury obserwowanego fragmentu próbki.

Technika SEM (skaningowy mikroskop elektronowy) jest od wielu lat wykorzystywana do analizy struktury włókien, tekstyliów i kompozytów, w tym tekstyliów archeologicznych. Gdy SEM jest używany w połączeniu ze spektroskopią dyspersji energii (EDS) lub spektroskopią fotoelektronów rentgenowskich (XPS), analiza dostarcza również danych jakościowych i ilościowych do analizy chemicznej próbki. Jest to szczególnie przydatne w badaniu nieorganicznych komponentów tekstyliów jak – przykładowo – nitki metalowe (Cybulska i in. 2008: 67-73).

Ostatnią metodą, którą przedstawiamy, jest mikrotomografia rentgenowska (micro-CT). Choć nie jest to metoda *stricto* mikroskopowa, jej celem jest jednak obrazowanie obiektów, a ściślej rzecz ujmując, ich wewnętrznej struktury, co w przypadku tekstylnych znalezisk archeologicznych, jest szczególnie istotne. Micro-CT wykorzystuje promieniowanie rentgenowskie do oglądania wnętrza obiektu, warstwa po warstwie.

Skanery micro-CT rejestrują serię płaskich obrazów rentgenowskich 2D, na podstawie których można następnie tworzyć modele 3D. Dzięki promieniom rentgenowskim można widzieć przez obiekt, ale można także zobaczyć wnętrze obiektu, analizować jego wewnętrzne cechy. Metoda micro-CT jest podobna do obrazowania w szpitalnej tomografii komputerowej, ale ze znacznie zwiększoną rozdzielczością (1 piksel na 100 nanometrów). Badanie jest niedestrukcyjne: skanowana próbka nie jest zmieniana ani niszczone podczas badania lub w trakcie przygotowania do badania (Payne 2012: 17-29; Tuniz i Zanini 2018). Dzięki tej metodzie można uzyskać trójwymiarową wizualizację wewnętrznej geometrii tkaniny, a także złożonych obiektów tekstylnych, jak hafty wypukłe wykonywane na podkładach. Pozwala też zidentyfikować bliżej nieokreślone obiekty znajdujące się wewnątrz skłębionych, trudnych do rozdzielenia warstw tekstyliów.





**Ryc. 3.** Skan fragmentu haftu z Kruszwicy (Cybulska i Orlińska-Mianowska 2016: 31-40) w rozdzielczości 2400 dpi i detal ze skanu obejmujący prostokąt o szer. 8,3 mm. Dobra głębia ostrości, brak refleksów świetlnych. Fot. M. Cybulska





**Ryc. 4.** Haft z Gródka nad Bugiem (Cybulska i in. 2018: 735-799). U góry skan tkaniny, u dołu detal awersu i rewersu haftu, wykonane aparatem fotograficznym Canon Eos M6 z obiektywem makro z własnym podświetleniem. Wyraźnie widoczne szczegóły haftu kładzionego gubionego na rewersie pętelki uformowane przez nitkę złotą oplataną. Fot. M. Cybulska

## BADANIA TEKSTYLIÓW ARCHEOLOGICZNYCH

### Analiza włókien

Włókna są podstawowym komponentem tekstyliów. To z nich przędzie się nitki, z których powstają wyroby włókiennicze, takie jak tkaniny, dzianiny, plecionki. Bezpośrednio z włókien powstają także filce.

W archeologii spotykamy w zasadzie jedynie włókna naturalne, pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego. Włókna pochodzenia zwierzęcego to wełna i jedwab. Spektrum włókien roślinnych, z którymi spotkać możemy się w tekstyliach archeologicznych, jest znacznie szersze. Obejmuje zarówno tak znane włókna, jak lniane, konopne i bawełniane, ale także mniej popularne – z pokrzywy, bambusa, łyka wierzbowego itp. Każdy rodzaj włókna ma swoją charakterystyczną budowę w sensie grubości, długości, charakterystycznej powierzchni i przekroju poprzecznego, a także wewnętrznej struktury (Żyliński 1958; Houck 2009).

Do identyfikacji rodzaju włókien używa się wielu metod. Najprostsze, polegające na paleniu lub działaniu na włókna różnymi odczynnikami chemicznymi, są przede wszystkim niszczące, a poza tym pozwalają jedynie odróżnić włókna roślinne od zwierzęcych, ale już nie rozróżniają między sobą różnych typów tych włókien (Polska Norma PN 72/P 04604). W przypadku włókien proteinowych rozróżnienie pomiędzy wełną i jedwabiem jest możliwe dzięki obserwacji mikroskopowej ze względu na różną średnicę i długość włókien – włókna jedwabiu są gładkie, cieńsze i w porównaniu z włóknami wełny niemal nieskończenie długie. Jednak identyfikacja różnego rodzaju włókien roślinnych nie jest taka prosta. Służyć może do tego test Herzoga, wykorzystujący także obserwację mikroskopową, który pozwala na analizę orientacji fibryli w kolejnych warstwach włókna, która jest inna dla lnu czy pokrzywy (Haugan i Holst 2013; Lukešová i in. 2017).

Pomocą w identyfikacji rodzaju włókien może być także mikroskopowe badanie przekroju poprzecznego włókien i nitek. Jest to możliwe przy użyciu nawet mikroskopu optycznego. Wymaga to jednak odpowiedniego przygotowania próbki: zatopienia jej w utwardzalnej żywicy i cięcia plasterków za pomocą specjalnych tarcz. Na ryc. 5a widoczny jest przekrój poprzeczny współczesnej

przędzy wykonanej z mieszanki bawełniano-poliestrowej. Włókna bawełny mają przekrój poprzeczny w kształcie ziarna fasoli, poliestrowe zaś okrągły.

Aby zidentyfikować surowce, można jednak wykorzystać bardziej wyrafinowane metody. Jedną z nich jest SEM, dzięki któremu możemy analizować morfologię powierzchni włókien, nitek i tkanin. Mikroskopia skaningowa jest obecnie standardową metodą badania włókien w celu ich identyfikacji i oceny ich kondycji. Liczne publikacje dotyczą zarówno włókien z wykopalisk archeologicznych, jak i współczesnych włókien wykorzystywanych w przemyśle (Rast-Eicher 2016; Greaves 1995).

### WYBRANE PRZYKŁADY BADAŃ NAD WŁÓKNAMI Z TEKSTYLIÓW ARCHEOLOGICZNYCH Z TERENU POLSKI

Metodę SEM zastosowano do analizy włókien z tekstylnych znalezisk z okresu rzymskiego i średniowiecza. Badania wykonano przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego JSM-5200LV JEOL z wykorzystaniem półprzewodnikowego detektora elektronów rozproszonych wstecznie, umożliwiającego obserwację próbki bez wstępnego przygotowania (próbki nie były pokryte złotem). Zastosowana metoda nie jest niszcząca, umożliwia ponowne przebadanie tej samej próbki inną metodą (Cybulska i in. 2008: 67-73). Wykorzystano ją do identyfikacji surowca ozdobnego plecionego sznurka pokazanego na ryc. 6a, który został znaleziony na cmentarzu wielbarskim, pochodzącym z późnego okresu rzymskiego (III w.) w grobie 269, inw. 1534. Za pomocą mikroskopu optycznego włókna były trudne do zidentyfikowania ze względu na ich bardzo małą średnicę i na pierwszy rzut oka wyglądały jak jedwab. Jednak analiza SEM pozwoliła scharakteryzować materiał jako len ze względu na typowe dla lnu „kolanka”, które są wyraźnie widoczne na obrazie włókna (Cybulska i in. 2008) (ryc. 5c, 6c).

Na ryc. 6b można zobaczyć obraz SEM średniowiecznej tkaniny jedwabnej tkanej na krosienku tabliczkowym oraz włókna jedwabiu, z którego została zrobiona (ryc. 6d). Porównanie obu włókien pozwala stwierdzić, że włókno lniane jest równie delikatne jak jedwabne. Świadczy o wysokiej jakości odzieży lnianej z okresu rzymskiego.

Kolejne dwa zdjęcia na ryc. 7 przedstawiają włókna wełniane z ubrań z okresu rzymskiego



(ryc. 7a) i ze średniowiecza (ryc. 7b). Widoczne są także przekroje poprzeczne włókien, których analiza pokazuje, że średniowieczna wełna (XV w.) była znacznie grubsza niż ta z II w. Potwierdza to fakt, że w okresie rzymskim produkcja wełny była na bardzo wysokim poziomie (Maik 1988).

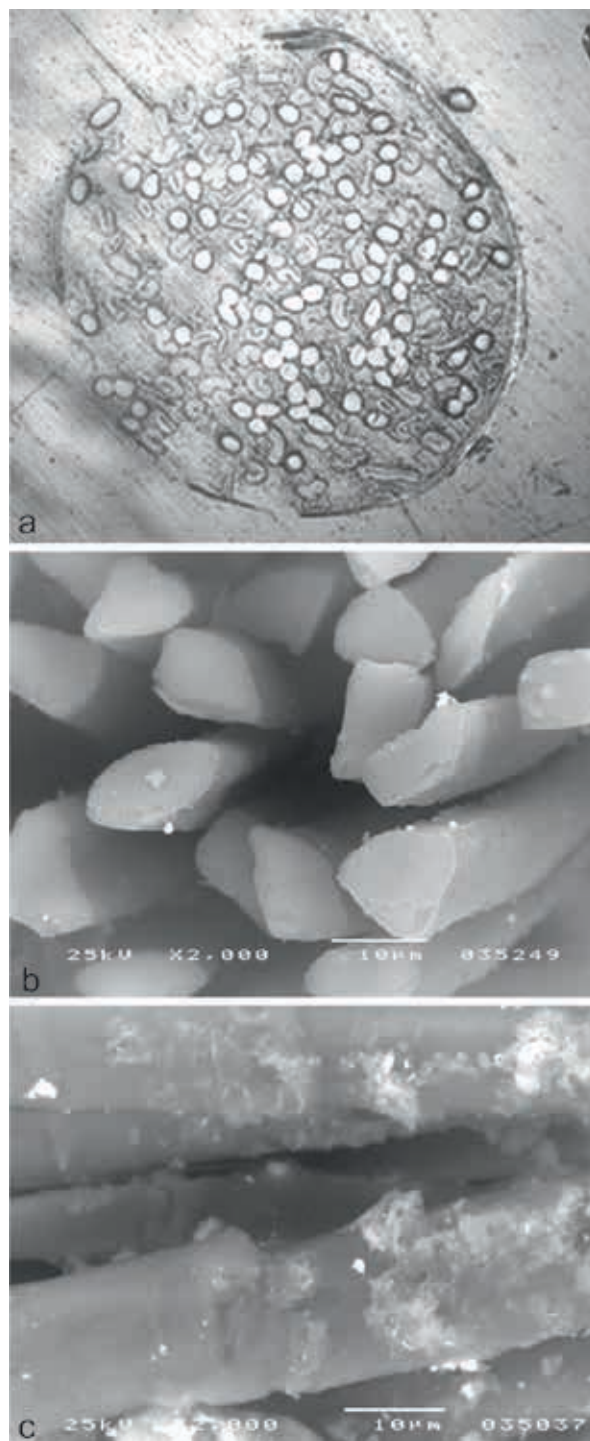
Mikroskopia elektronowa pozwala nam także badać stopień degradacji włókien. Na ryc. 8 widoczne są zdjęcia włókien lnu i jedwabiu pochodzących z tkanin znalezionych podczas badań wykopaliskowych prowadzonych w 1976 r. na cmentarzystku w Cermnie. W grobie nr 5 znaleziono resztki stroju dziewczynki zmarłej w wieku około 10 lat (Infans II), na który składały się pozostałości tkanin datowanych na XII/XIII w., które przetrwały w nieprzyjnym środowisku w bezpośrednim kontakcie z przedmiotami metalowymi (Cybulska i in. 2016a: 519-531). Analiza mikroskopowa pozwoliła zidentyfikować zarówno tkaniny jedwabne, jak i lniane. Na zdjęciach SEM widać wysoki stopień degradacji włókien. Na zdjęciu u góry widoczne są włókna jedwabiu, z których część pozbawiona jest serycyny, tak że wyraźnie widoczne są nitki fibroiny. Fotografia u dołu (ryc. 8) prezentuje włókna łykowe, prawdopodobnie lniane, o popękanych i pokruszonych ściankach.

### Analiza nitek

Nitki, które możemy zidentyfikować w tekstyliach archeologicznych, mają średnicę rzędu 0,1-1 mm. Z punktu widzenia analizy i identyfikacji znalezisk istotne ich parametry, jak budowa, grubość i jej równomierność, kierunek i wielkość skrętu, mogą być oszacowane w niedestrukcyjny sposób, za pomocą wspomnianych metod analizy obrazów (Cybulska 1999: 369-373).

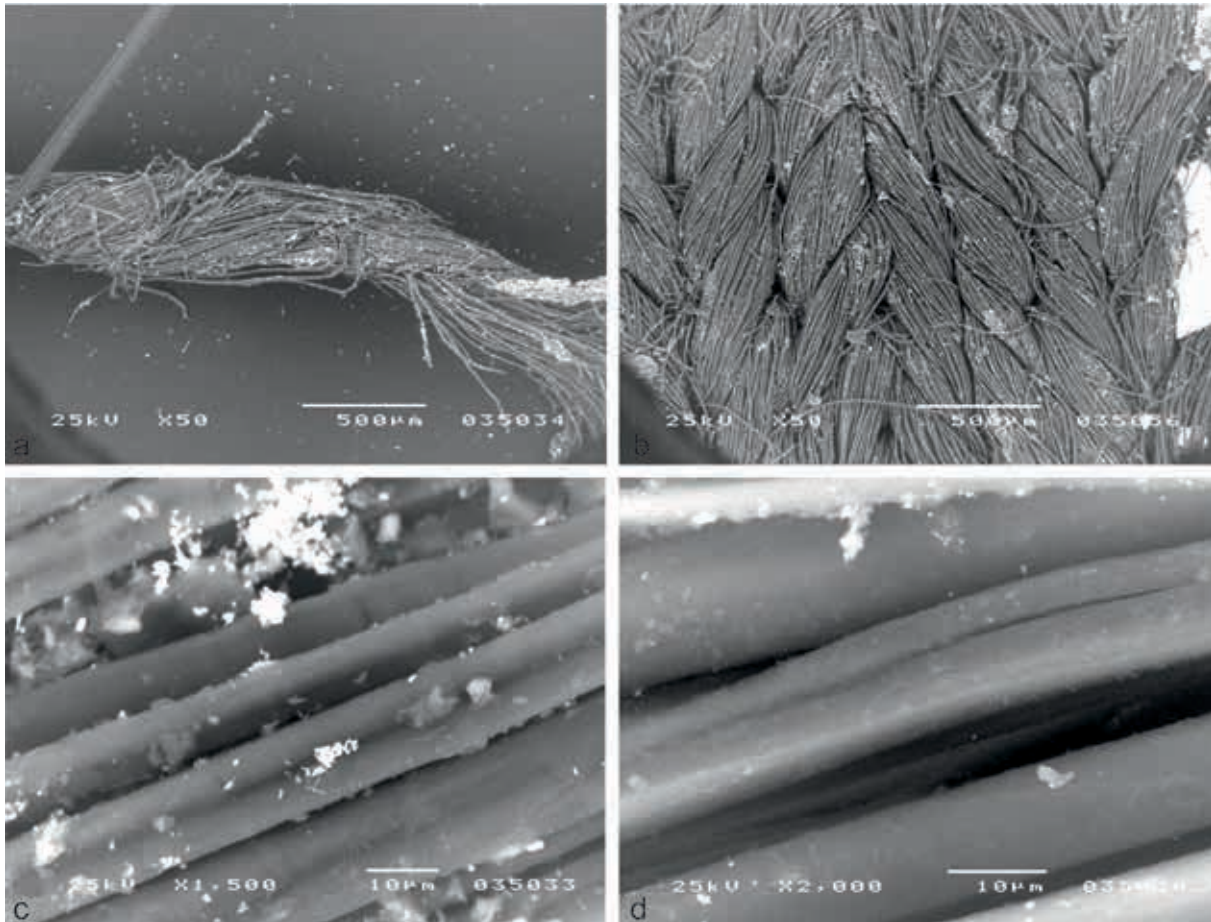
W praktyce parametry te możemy oszacować nie tylko na podstawie zdjęć mikroskopowych, ale także skanów i fotografii makro w wysokiej rozdzielczości, edytując fotografie w dowolnym programie graficznym, pozwalającym mierzyć te wielkości w pikselach, wykorzystując prostą zasadę proporcji. Detal tkaniny z ryc. 3 obejmuje dokładnie 8,3 mm.

Ważnym i często spotykanym w archeologicznych tekstyliach rodzajem nitek są nitki metalowe. Mogą one mieć różną formę: płaskiej nitki metalowej (lamelka); metalowego filamentu (nitka



**Ryc. 5.** Charakterystyka włókien: a – mikroskop optyczny: przekrój poprzeczny przędzy mieszankowej, widoczne włókna bawełny i poliestru; b – SEM: przekrój poprzeczny jedwabiu; c – SEM: charakterystyczne kolanko występujące na włóknach łykowych. Fot. M. Cybulska (a), J. Sielski (b i c)

drukowa) prostego lub w formie sprężynki (bajorek); nitki metalowej oplatanie (ryc. 9).



**Ryc. 6.** Technika SEM w badaniu tekstyliów archeologicznych: po prawej – sznureczek i włókna lnu, z którego został zrobiony; po lewej – jedwabna tkanina wykonana na krosienku tabliczkowym i włókna jedwabiu, materiał archeologiczny z terenu Mazowsza (Cybulska i in. 2008: 67-73)

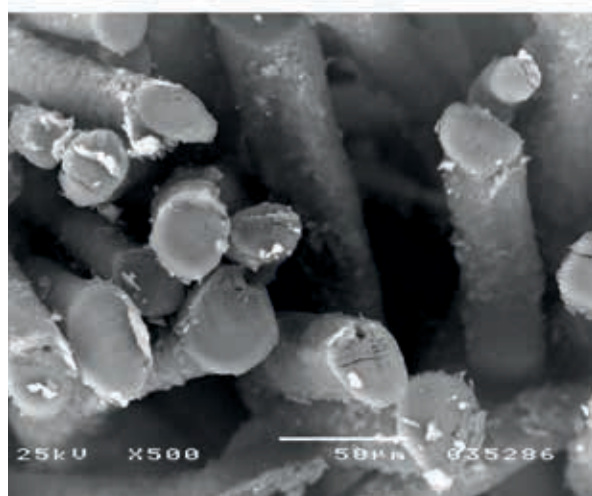
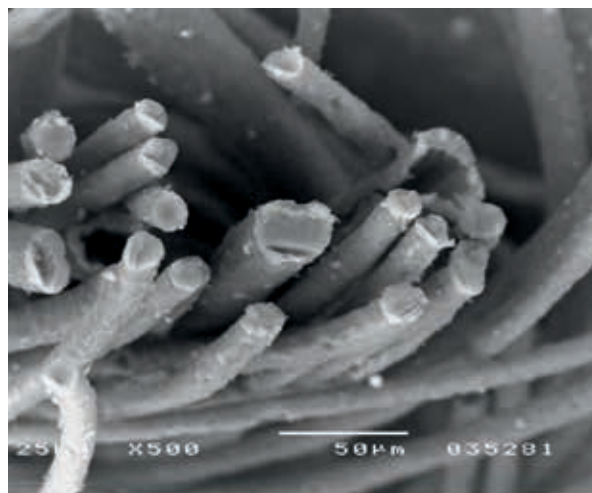
W przypadku nitek o złożonej budowie, jak nitka metalowa oplataną, analiza polega na identyfikacji wszystkich komponentów, zarówno włókiennego rdzenia, jak i metalowego paska, którym jest on owinięty. Charakterystyka rdzenia to podanie parametrów nitki, która go tworzy: surowca, grubości, skrętu. Charakterystyka metalowego opłotu, oprócz standardowych danych, jak szerokość blaszki, kierunek oplatania (S/Z) i liczba opłotów na jednostkę długości nitki, wymaga także charakterystyki samej blaszki: składu stopu metali, z jakiego została zrobiona, metody złączenia lub srebrzenia oraz metody produkcji samej blaszki: czy była cięta z arkusza blachy, czy wykonana z płaszczzonego drutu, młotkowana czy rolowana.

Znakomitym do tego narzędziem jest mikroskop elektronowy SEM z analizatorem składu pierwiastkowego EDS lub XPS. Oglądając na ekranie komputera mikroskopowy obraz blaszki, możemy dokładnie wskazać miejsca, w których ma być wykonana

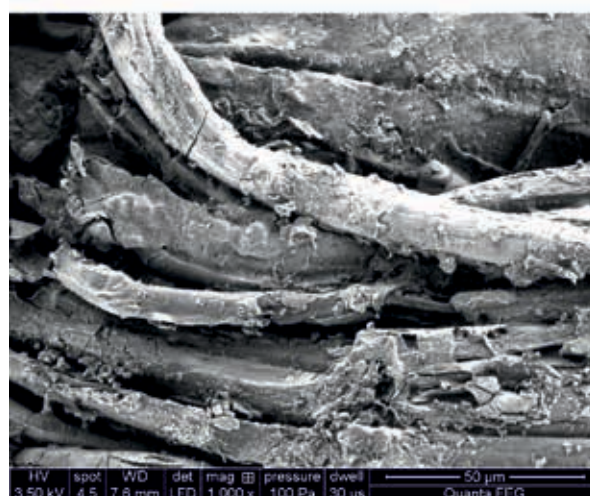
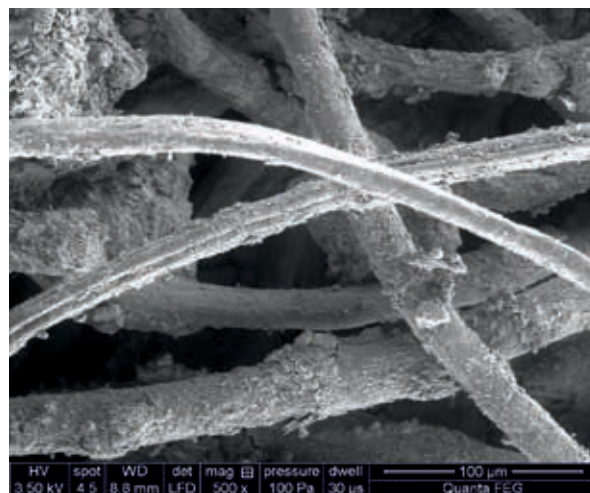
analiza. Jej wyniki wraz z charakterystyką obrazu mikroskopowego pozwalają zidentyfikować technikę wykonania blaszki stanowiącej opłot.

Tego typu badania są już standardem w analizie tekstyliów archeologicznych wykonanych z udziałem nitek metalowych. Fotografije na ryc. 10 pokazują fragmenty nitek metalowych z wczesnośredniowiecznych tkanin z bazyliki kolegiackiej św. Piotra i Pawła w Kruszwicy (u góry) oraz z Gródka nad Bugiem (u dołu). Zostały one poddane analizie SEM EDS. Jej wyniki wykazały, że nitki widoczne po lewej stronie wykonane są z blaszki złotej, a te po prawej ze złożonej blaszki srebrnej. Na podstawie tych fotografii można zmierzyć bardzo dokładnie szerokość, a nawet grubość blaszki, a także ocenić stopień ich zniszczenia (Cybulska i in. 2018: 735-799; Cybulska i Orlińska-Mianowska 2016: 31-40). W przypadku nitek złożonych (ryc. 10 po prawej) stwierdzono obecność złota po jednej stronie srebrnej blaszki,





**Ryc. 7.** Technika SEM w badaniu tekstyliów archeologicznych: u góry włókna wełny z okresu rzymskiego, u dołu wełna średniowieczna (Cybulska i in. 2008: 67-73)



**Ryc. 8.** Degradacja włókien: u góry włókna jedwabiu pozabawione jest serycyny, z widocznymi nitkami fibroiny; u dołu włókna łykowe o popękanych i pokruszonych ściankach. SEM. (Cybulska i in. 2016a: 519-531)

co wskazuje, że zostały wykonane w wyniku cięcia srebrnej blaszki złożonej po jednej stronie. O cięciu świadczą także ostre krawędzie.

### Analiza tkanin i innych płaskich wyrobów tekstylnych

W przypadku złożonych obiektów tekstylnych, takich jak tkaniny, hafty itp., analiza mikroskopowa umożliwia przede wszystkim identyfikację struktury, która wynika bezpośrednio z zastosowanej metody wytwarzania i techniki – rodzaju splotu czy ściegu hafciarskiego. W przypadku tkanin o złożonej strukturze, takich jak aksamity lub lampasy, dodatkowo mniej czytelną ze względu na

biodeteriorację, najlepiej wykonać taką analizę po obu stronach tkaniny. Po identyfikacji typu tkaniny kolejny etap to estymacja jej parametrów strukturalnych. Metody analizy obrazów pozwalają, po określeniu liczby osnów i wątków, na wyznaczenie liczności nitek osnowy/osnów i wątku/wątków w tkaninie i analogicznie liczności kolumnienek i rządów w dzianinach. Inne parametry to wypełnienie tkaniny oraz wrobienie nitek, jednak są one rzadko wyznaczane w archeologii, choć niosą ze sobą ważne informacje (Cybulska i in. 2016a: 519-531; Cybulska 2010: 100-105). Jak to już było wspomniane, do wyznaczenia tych parametrów nie są konieczne obrazy mikroskopowe, wystarczają skany i fotografie makro o dużej rozdzielczości (ryc. 3, 4).

Do badania struktury złożonych obiektów tekstylnych, takich jak współczesne wyroby techniczne:





**Ryc. 9.** Różne typy nitki metalowych: u góry filament metalowy (nitka drutowa)- mikroskop cyfrowy, oraz płaska nitka metalowa (lamelka)- aparat fotograficzny z obiektywem makro; u dołu nitka metalowa oplatana i bajorek – skany. Fot. M. Cybulska

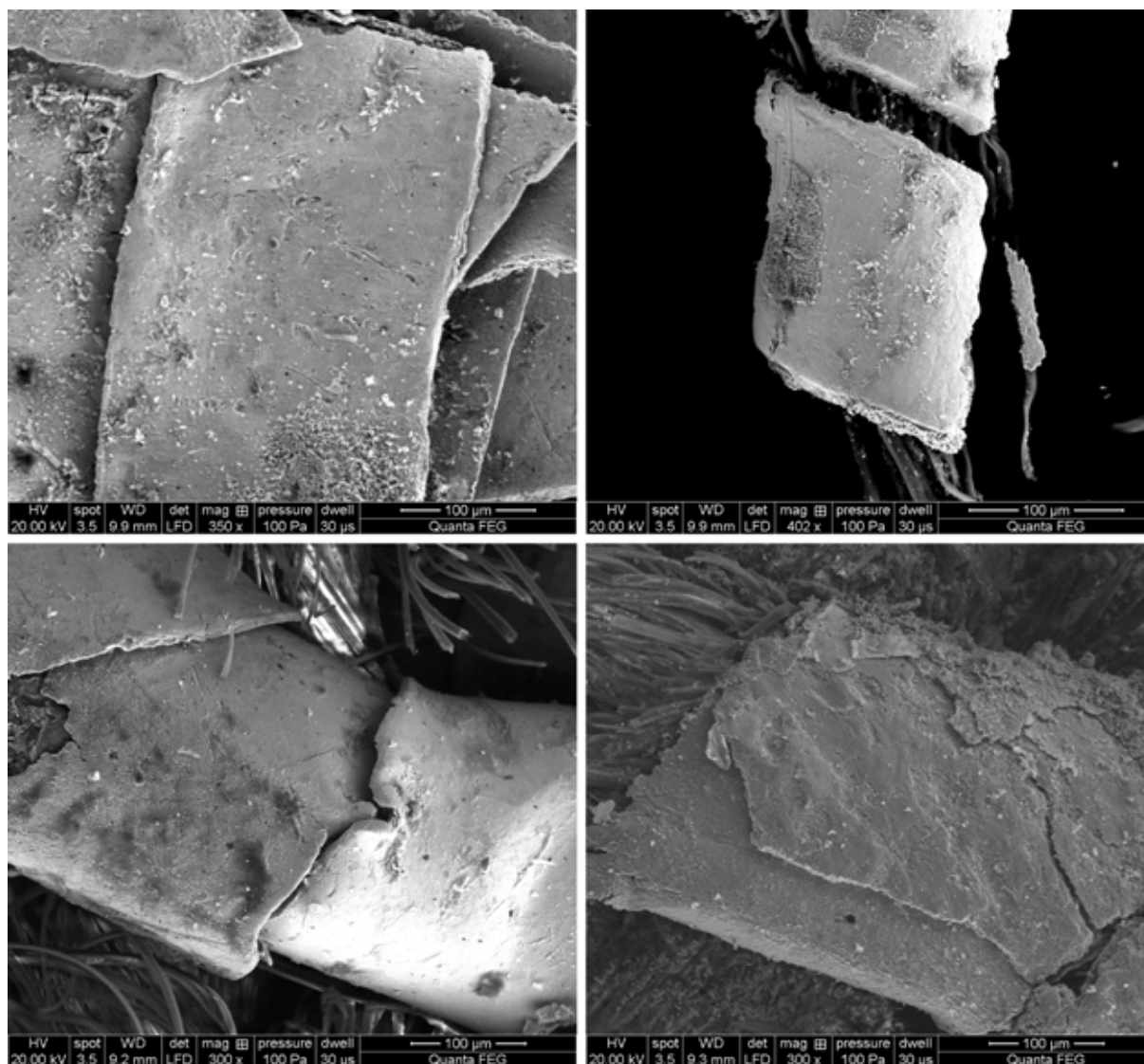
tkaniny dystansowe czy kompozyty, stosowane są także metody mikrotomografii rentgenowskiej (micro-CT). Obecnie są one także wykorzystywane w archeologii do badania papirusów, ceramiki, drewna czy nawet szczątków ludzkich (Tuniz i Zanini 2018).

Ograniczenia w zastosowaniu tej metody do badania tekstyliów archeologicznych mają kilka przyczyn. Z jednej strony strukturę wyizolowanego obiektu tekstylnego można przeanalizować mniej kosztownymi metodami, z drugiej zaś micro-CT nie może być stosowana do tekstyliów zachowanych na innych obiektach, np. na metalowych klamrach czy na naczyniach ze względu na skrajnie różną ich charakterystykę, jeśli chodzi o współczynnik absorpcji energii, powodującą, że tekstylia w kontakcie z tymi przedmiotami przestają być widoczne. Jednak metoda ta doskonale sprawdza się do badania tekstyliów, gdy wiemy lub przypuszczamy, że między ich warstwami znajdują się inne obiekty, a próba ich manipulowaniem grozi destrukcją tekstyliów. Taka sytuacja zdarzyła się w przypadku fragmentów płótna lnianego z XVII w. znalezionej w miejscu pochówku w okolicach Rawy Mazowieckiej. Tkanina przetrwała przymocowana do jakiegoś

przedmiotu – monety lub guzika (ryc. 11a, b). Próba wydobycia go oznaczałaby całkowite zniszczenie tkaniny, obiekt poddano więc badaniu micro-CT, które wykazało, że pomiędzy warstwami lnianego płótna znajduje się moneta – grosz Zygmunta III Wazy z 1533 r. (ryc. 11c) (Cybulska i Maik 2007: 185–189).

## PODSUMOWANIE

Tekstylia, ze względu na swoją złożoną strukturę, są specyficznym rodzajem obiektów. Ich podstawowym komponentem są różnego rodzaju włókna o grubości od kilku mikrometrów w przypadku cienkich włókien jedwabiu hodowlanego do kilkudziesięciu mikrometrów w przypadku jedwabiu dzikiego czy wełny. Nitki wykonane z tych włókien mają grubość rzędu od 0,1 mm do 1 mm, a z nich dopiero powstają wyroby wykonywane różnymi technikami – tkaniny, dzianiny, hafty, plecionki i koronki. Na ich ostateczny wygląd i własności wpływają wszystkie komponenty i etapy ich wytwarzania. Na każdym z tych etapów w wyniku



**Ryc. 10.** Technika SEM EDS w badaniu nitki metalowych. Fragment nitki z tkanin z bazyliki kolegiackiej św. Piotra i Pawła w Kruszwicy (u góry) oraz z Gródka nad Bugiem (u dołu). Po lewej stronie nitki z blaszki złotej, po prawej ze złożonej blaszki srebrnej. Fot. M. Cybulska, S. Kuberski (u góry), J. Sielski (u dołu)

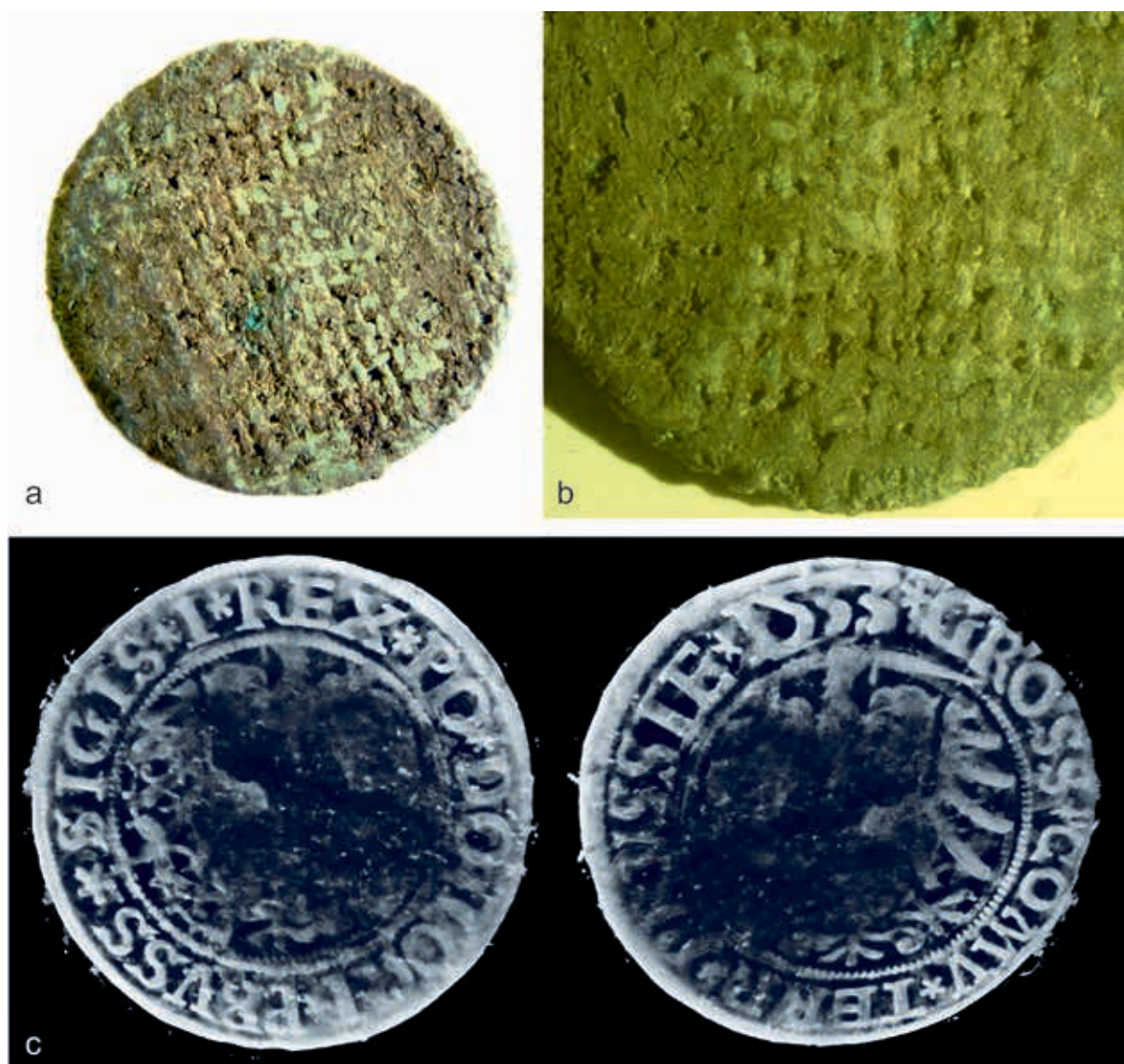
stosowanych procesów technologicznych końcowy wyrób ma nadawane własności, których identyfikacja umożliwia określenie okresu i miejsca jego powstania, a także ocenę poziomu i jakości jego wykonania. Z tego wynika także możliwość analizy porównawczej, poszukiwania obiektów analogicznych i ostatecznie pochodzenia wyrobu.

Większość technik mikroskopowych umożliwia obrazowanie próbek w ich oryginalnej kondycji, bez specjalnego przygotowania. Należą do nich zarówno mikroskopia optyczna, skanowanie, makrofotografia, jak i SEM i micro-CT. W ich przypadku „obraz” badanych próbek jest rejestrowany w sposób niezmieniający ich stanu. Pozwala to na

ich zachowanie w celu archiwizacji lub ponownego przetestowania w późniejszym terminie lub za pomocą innej metody.

Przy wyborze próbki czy też punktu pomiarowego na próbce należy pamiętać o celu badania. Do oszacowania parametrów strukturalnych zawsze wybieramy miejsca, w których obiekt w jak najmniejszym stopniu uległ biodeterioracji i deformacji. Oczywiście sytuacja jest inna, gdy analizujemy sam proces degradacji tekstyliów. Zawsze jednak należy pamiętać, że pomiary należy powtarzać w kilku miejscach, a do celów dokumentacji i w analizie porównawczej posługiwać się ocenami statystycznymi analizowanych parametrów.





**Ryc. 11.** Tkanina lniana z Rawy Mazowieckiej: a – skan tkaniny; b – obraz z mikroskopu optycznego; c – obraz awersu i rewersu monety znajdującej się między warstwami tkaniny, micro-CT. Fot. M. Cybulska (a i b), M. Barburski (c)

Ze względu na rząd wielkości komponentów tekstyliów oraz złożoność ich struktury w zasadzie żadna z istotnych ich cech, poza ornamentyką, nie może być oceniona na podstawie oglądu „gołym okiem”. Dlatego metody mikroskopowe są pierwszym i podstawowym krokiem w analizie tekstyliów archeologicznych. Obecnie trudno wyobrazić sobie jakiegokolwiek badania tekstyliów archeologicznych bez zastosowania którejś z przedstawionych metod. Mimo często bardzo wysokich cen sprzętu w coraz większym stopniu dostępne są nie tylko mikroskopy optyczne, ale i nowoczesne narzędzia typu SEM EDS czy micro-CT,

oferujące nie tylko obrazowanie próbki, ale także jej specjalistyczną analizę. Wspominana przez nas współpraca pomiędzy archeologami i specjalistami z dziedziny inżynierii materiałowej i chemicznej otwiera dla archeologii bardzo szerokie możliwości badawcze.

Mimo dużych możliwości mikroskopii jej metody nie zawsze są wystarczające do identyfikacji typu włókien. Badania mikroskopowe są często uzupełniane przez metody spektroskopii, która pozwala na identyfikację surowca poprzez porównanie widma badanej próbki z widmem wzorca. (Cybulska i in. 2008). Możliwe są także bardziej szczegółowe



badania, pozwalające określić nie tylko typ włókien, ale także miejsce i sposób ich hodowli. Dla przykładu, możliwe jest określenie, czy mamy do czynienia z jedwabiem dzikim czy też hodowanym, poprzez badanie DNA (Pääbo i in. 1989). Analiza izotopów strontu pozwala z kolei na określenie obszaru pochodzenia materiału. (Frei i in. 2009; Ryan i in. 2021).

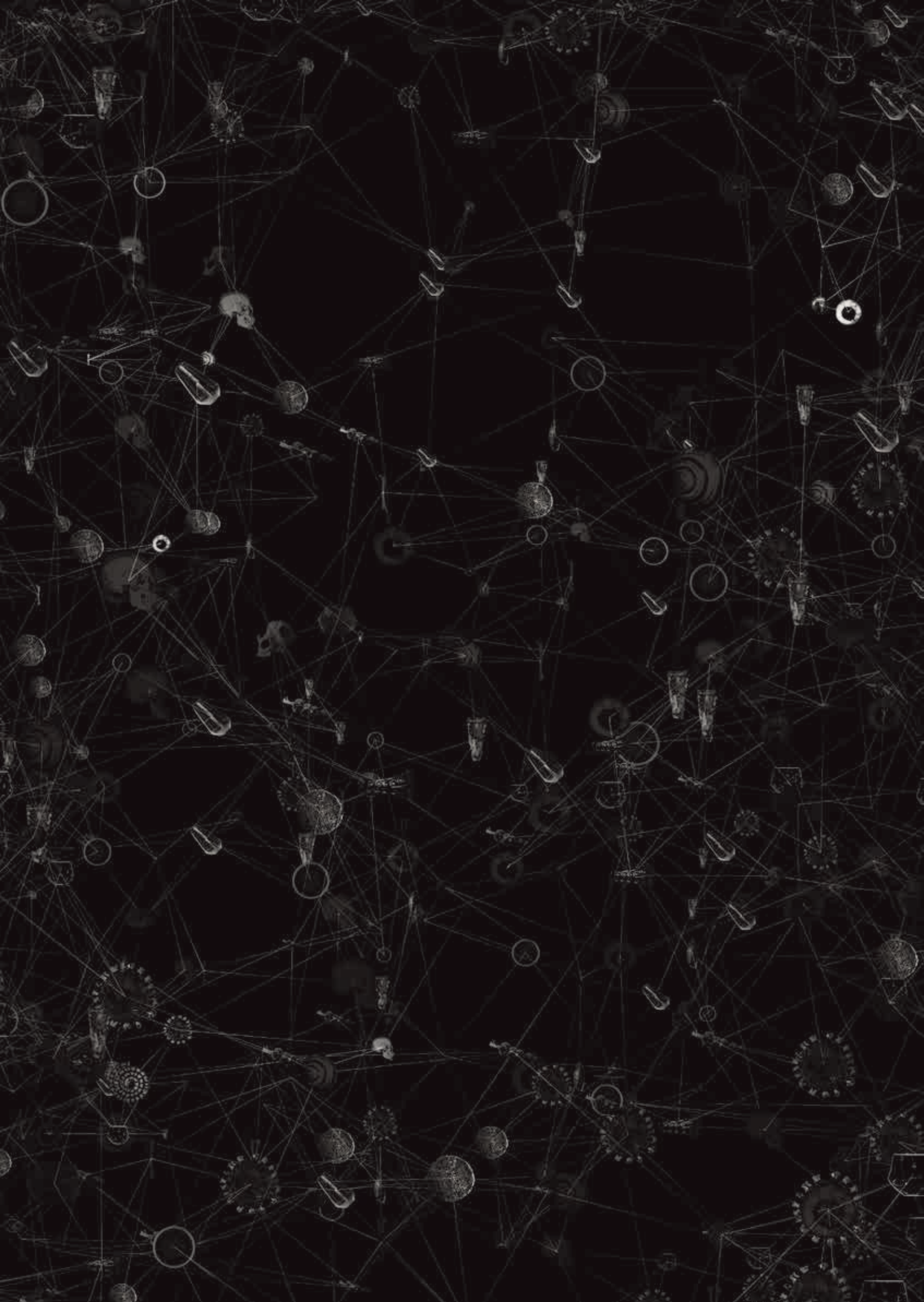
Postęp w naukach ścisłych i szybki rozwój metod badawczych to duża szansa dla archeologii. Zastosowanie nowoczesnych metod, mimo że najczęściej bardzo kosztowne, stwarza jednak możliwości współpracy pomiędzy naukowcami z różnych dziedzin, z obopólną korzyścią.

## LITERATURA

- Biesaga, M., Donten, M., Maik, J., Wach, A. 2004. Zastosowanie chromatografii cieczowej w badaniach barwników tkanin zabytkowych. *Kwartalnik Historii Kultury Materialnej* 52(3): 33–339.
- Broudy, E. 1979. *The Book of Looms. History of the Handloom from Ancient Times to the Present*. Providence.
- Cybulska, M. 1999. Assessing yarn structure with image analysis methods. *Textile Research Journal* 69(5): 369–373.
- Cybulska, M., Pancer, R. 2004. Analysis of woven fabrics using image analysis. *Proceedings of the VI International Conference ArchTex 2004*. Kraków, 124–129.
- Cybulska, M., Kowalska-Pietrzak, A., Kuberski, S., Maik, J., Orlińska-Mianowska, E. 2011. Piętnastowieczna preteksta z herbem Korzbok z Archikolegiaty Łęczyckiej w Tumie, (w:) M. Żemigala (red.), *850 lat w służbie Bogu i ludziom. Archikolegiata Łęczycka w Tumie, Materiały z sesji naukowej w Łęczycy dnia 21 maja 2011 roku*. Łęczycza, 81–90.
- Cybulska M., Florczak, T., Maik J. 2010. Virtual reconstruction of archaeological textiles, (w:) E. Andersson Strand, M. Gleba, U. Mannering, Ch. Munkholt, M. Ringgaard (red.), *North European Symposium for Archaeological Textiles X*, Ancient Textiles Series Oxford, 5: 36–40.
- Cybulska, M., Maik, J. 2007. Archaeological Textiles – A Need for New Methods of Analysis and Reconstruction. *Fibres & Textiles in Eastern Europe* 15(5–6): 185–189.
- Cybulska, M., Jedraszek-Bomba, A., Kuberski, S., Wrzosek, H. 2008. Methods of Chemical and Physicochemical analysis in the identification of archaeological and historical textiles. *Fibres & Textiles in Eastern Europe* 16(5): 67–73.
- Cybulska, M. 2010. Reconstruction of Archaeological Textiles. *Fibres & Textiles in Eastern Europe* 18(3): 100–105.
- Cybulska, M., Orlińska-Mianowska, E. 2016. Fragmenty dwóch tkanin z depozytu Muzeum Narodowego w Warszawie znalezionych w kolegiacie w Kruszwicy w 1960 roku. *Studia Źródłoznawcze* 54: 31–40.
- Cybulska, M., Maik, J., Sielski, J. 2016a. Textiles from the cemetery in Czeremno, site 3, (w:) M. Florek, M. Wołoszyn (red.), *The early medieval settlement complex at Czeremno in the light of results from past research (up to 2010). Material evidence*. Kraków-Leipzig-Rzeszów-Warszawa, 519–531.
- Cybulska, M., Orlińska-Mianowska, E., Stanilewicz, K. 2016b. Nowoczesne metody analizy i wizualizacji tekstyliów zabytkowych dla potrzeb dokumentacji, rekonstrukcji i konserwacji, (w:) A. Nadolska Styczyńska (red.), *Snuć nieć jak opowieść. Tkaniny w kulturach świata. Toruńskie studia o sztuce orientu* 5. Toruń, 274–292.
- Cybulska, M., Marciniak, M., Sielski, J. 2018. Textile finds from Gródek upon the Bug river. An analysis of materials, manufacturing techniques and origin, (w:) M. Wołoszyn (red.), *The Early Medieval Settlement Complex at Gródek Upon the Bug River in the Light of Results from Past Research (1952-1955): Material Evidence, Tom 4. U źródeł Europy Środkowo-Wschodniej, Frühzeit Ostmitteleuropas*. Leipzig, 735–799.
- Drażkowska, A. 2008. *Odzież grobowa w Rzeczypospolitej w XVII i XVIII wieku*. Toruń.
- Drażkowska, A. 2014. *Odzież i insygnia grobowe biskupów przemyskich obrządku łacińskiego*. Toruń.
- Drażkowska, A. 2015. Przyczyny i rodzaje zniszczeń XVII- i XVIII-wiecznych tkanin z badań archeologicznych w Gniewie. *Pomorania Antiqua* 24: 527–536.
- Drażkowska, A. 2020. Pochówki z krypt bazyliki i krużganków klasztoru. Analiza i próba identyfikacji, (w:) A. Drażkowska (red.), *Krypty grobowe kościoła pw. św. Franciszka z Asyżu w Krakowie w świetle badań interdyscyplinarnych. Archeologia – Historia – Kostiumologia* 1. Toruń, 118–129.
- Frei, K.M., Skals, I., Gleba, M., Lyngstrøm, H. 2009. The Huldremose Iron Age textiles, Denmark: An attempt to define their provenance applying the strontium isotope system. *Journal of Archaeological Science* 36(9): 1965–1971.
- Greaves, R. 1995. *Microscopy of Textile Fibres*, Royal Microscopical Society Microscopy Handbooks. New York.
- Grupa, M. 2007. Konserwacja jedwabnych tkanin i rekonstrukcja szat. *Prace i Materiały Muzeum Archeologicznego i Etnograficznego w Łodzi, Seria Numizmatyczna i Konserwatorska* 13: 207–218.
- Haugan, E., Holst, B. 2013. Determining the fibrillar orientation of bast fibres with polarized light microscopy: the modified Herzog test (red plate test) explained. *Journal of Microscopy* 252(2): 159–168.
- Houck, M.M. (red.) 2009. *Identification of Textile Fibers*. Cambridge-New Delhi.

- Hryszko, H. 2001. Fibrylizacja – metoda uzupełniania ubytków i konsolidacji tkanin masy z włókien naturalnych. *Ochrona Zabytków* 54(1): 56–62.
- Hryszko, H. 2017. *Tkaniny z grobu królowej Jadwigi*. Warszawa.
- Iwiński, J. 1952. Częściowa mineralizacja tkaniny wykopaliskowej z XIII wieku. *Studia Wczesnośredniowieczne* 1: 83–84.
- Kabała, C. 2015. Struktura gleby. (w:) A. Mocek (red.), *Gleboznawstwo*. Warszawa, 115–122.
- Kaczmarek, M. 2015. Sznur czy tekstylia? Analiza tekstylina ornamentu odciskanego na ceramice funeralnej społeczności niżowych III tysiąclecia przed Chr. *Fontes Archaeologici Posnanienses* 51: 263–281.
- Kamińska, J., Nahlik, A. 1958. *Włókiennictwo gdańskie w X–XIII wieku*. Łódź.
- Karbowska-Berent, J., Szulc, J., Ruman, T., Drązkowska, A., Gutarowska, B., Jarmiło, J. 2020. Charakterystyka zniszczeń tkanin jedwabnych, (w:) A. Drązkowska (red.), *Krypty grobowe kościoła pw. św. Franciszka z Asyżu w Krakowie w świetle badań interdyscyplinarnych. Antropologia – Archeobotanika – Mikrobiologia – Konserwacja zabytków* 2. Toruń, 157–170.
- Kocińska, M.K., Maik, J. 2004. *Średniowieczne i nowożytnie plomby tekstylne z wykopalisk w Gdańsku*. Łódź.
- Lukešová, H., Salvador Palaub, A., Holst, B. 2017. Identifying plant fibre textiles from Norwegian Merovingian Period and Viking Age graves: The Late Iron Age Collection of the University Museum of Bergen. *Journal of Archaeological Science: Reports* 13: 281–285.
- Maik, J. 1988. *Wyroby włókiennicze na Pomorzu z okresu rzymskiego i ze średniowiecza*. Wrocław-Warszawa-Kraków-Gdańsk-Łódź.
- Maik, J. 2019. 70 years of Polish research on archaeological textiles. *Przegląd Archeologiczny* 67: 73–87.
- Miazga, B., Grupa, M., Grupa, D. 2018. Wyniki nieniszczących badań mikroskopowych i spektralnych galonów grobowych z Torunia i Gdańska. *Wiadomości Archeologiczne* 69: 67–78.
- Miazga, B. 2020. Studia archeometryczne wybranych tasemek i koronek, (w:) A. Drązkowska (red.), *Krypty grobowe kościoła pw. św. Franciszka z Asyżu w Krakowie w świetle badań interdyscyplinarnych. Antropologia – Archeobotanika – Mikrobiologia – Konserwacja zabytków* 2. Toruń, 186–204.
- Payne, E.M. 2012. Imaging Techniques in Conservation. *Journal of Conservation and Museum Studies* 10(2): 17–29.
- Pääbo, S., Higuchi, R.G., Wilson, A.C., 1989. Ancient DNA and the polymerase chain reaction. *Journal of Biological Chemistry* 264(17): 9709–9712.
- Rast-Eicher, A. 2016. *Fibres: microscopy of archaeological textiles and furs*. Budapest.
- Ryan, S.E., Dabrowski, V., Dapigny, A. 2021. Strontium isotope evidence for a trade network between southeastern Arabia and India during Antiquity. *Scientific Reports* 11(1): 303.
- Sikorski, A. 2002/2003. Analiza odcisków tkanin na IX–XI-wiecznej ceramice naczyniowej z Góry, gm. Pobiedziska, woj. Wielkopolskie, stan.1. *Folia Praehistorica Posnaniensis* 10/11: 244–254.
- Strzelczyk, A.B., Karbowska-Berent, J. 2004. *Drobnoustroje i owady niszczące zabytki oraz ich zwalczanie*. Toruń.
- Śliwka-Kaszyńska, M. 2020. Izolacja i identyfikacja naturalnych substancji barwiących obecnych w tkaninach grobowych, (w:) A. Drązkowska (red.), *Krypty grobowe kościoła pw. św. Franciszka z Asyżu w Krakowie w świetle badań interdyscyplinarnych. Antropologia – Archeobotanika – Mikrobiologia – Konserwacja zabytków* 2. Toruń, 407–421.
- Tuniz C., Zanini, F. 2018 Microcomputerized Tomography (MicroCT) in Archaeology, (w:) C. Smith C. (red.), *Encyclopedia of Global Archaeology*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-51726-1\\_675-2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-51726-1_675-2), dostęp: 20.01.2021.
- Vollmer, J. 1974. Textile pseudomorphs on Chinese bronzes, (w:) I. Emory (red.), *Roundtable on Museum Textiles*. Washington, 170–174.
- Walczak, M., Drązkowska, A., Burkowska-But, A., Swiontek-Brzezinska M. 2015. Zagrożenie mikrobiologiczne w kryptach grobowych, (w:) A. Drązkowska (red.), *Kultura funeralna elit Rzeczypospolitej od XVI do XVIII wieku na terenie Korony i Wielkiego Księstwa Litewskiego Próba analizy interdyscyplinarnej*. Toruń, 327–343.
- Żyliński, T. 1958. *Nauka o włóknie*. Warszawa.









# Archeometalurgia

Marcin Biborski, Mateusz Biborski

---

## WSTĘP

Od przeszło kilku dekad w badaniach specjalistycznych nad zabytkami archeologicznymi pojawił się termin archeometria. Pojęcie to ma w najnowszym obiegu naukowym bardzo szerokie znaczenie. W jego zakres wchodzi m.in. takie specjalności badawcze (dyscypliny naukowe), jak archeozoologia, archeobotanika, antropologia fizyczna, archeopetrografia, a także archeometalurgia. Wszystkie te specjalności naukowe mają w swoim założeniu pogłębienie i doprecyzowanie naszej wiedzy o prehistorii, a to m.in. dzięki zastosowaniu nowych metod badawczych, wykorzystujących nowe, coraz bardziej nowoczesne instrumentarium. Mamy tu na myśli m.in. rozwój mikroskopii świetlnej, a przede wszystkim mikroskopii elektronowej, zwanej także mikroskopią skaningową (por. Gunia i in., w tym tomie). Do tego dochodzą jeszcze szeroko stosowane różnego typu urządzenia, jak: spektrografy do nieniszczących badań składu chemicznego zabytków, twardościomierze i całe zestawy urządzeń, które w razie potrzeby ułatwiają przygotowywanie preparatów badawczych. Kluczowe znaczenie ma tu zwłaszcza odpowiednia preparatyka materiałów do badań, pozwala ona bowiem na uzyskiwanie wiarygodnych wyników, na podstawie których można przeprowadzić właściwą interpretację.

W badaniach nad zabytkami archeologicznymi wykonanymi z żelaza oraz ze stopów metali kolorowych, takich jak brązy, mosiądze, srebro i złoto, a także wyroby z cyny i ołowiu, jak już wyżej wspomniano, stosowana jest niezwykle przydatna archeometalurgia. W jej zakresie mamy najogólniej do czynienia z badaniami koncentrującymi się wokół dwóch podstawowych zagadnień, tj. próby odtworzenia czy też identyfikacji procesów technologii wykonywania starożytnych wyrobów metalowych oraz badania materiałoznawcze. Niekiedy mogą one też wskazywać na pochodzenie badanych wyrobów.

Do ich realizacji stosowane są przede wszystkim nowoczesne, metalograficzne mikroskopy świetlne, sterowane elektroniką i wyposażane w cyfrowe detektory, z których obraz może być zapisany w pamięci oraz poddany obróbce graficznej. W odróżnieniu od mikroskopów biologicznych, w których światło przechodzi przez badany preparat, w mikroskopie metalograficznym obserwacje próbki metalowej prowadzi się w świetle odbitym od jej powierzchni. Ponadto w badaniach wykorzystywana jest spektroskopia promieniowania elektromagnetycznego, jak np. fourierowska, ramanowska czy najczęściej stosowana rentgenowska spektroskopia fluorescencyjna (XRF) (por. Krueger, w tym tomie), pozwalająca na jakościową i ilościową analizę składu pierwiastkowego badanych materiałów zabytkowych.

Oprócz nowoczesnych mikroskopów świetlnych, m.in. w badaniach technologiczno-materiałowych archeologicznych zabytków metalowych, niezastąpionym instrumentem badawczym stał się skaninowy mikroskop elektronowy (ang. *scanning electron microscope*, SEM), który poza obrazowaniem, o dużej głębi ostrości i wysokim kontraście, równocześnie pozwala na przeprowadzenie analizy chemicznej (EDS), z użyciem wzorców, lub bezwzorcowo (por. Gunia i in., w tym tomie).

Niewątpliwie w ramach szeroko pojętej archeometalurgii mogą być też stosowane badania defektoskopowe z użyciem metody radiologicznej (rentgenowskiej), magnetycznej czy ultradźwiękowej.

W ramach badań archeometalurgicznych można wyróżnić dwa podstawowe kierunki, tj. archeometalurgię żelaza i archeometalurgię metali kolorowych, który to podział wynika ze zróżnicowanych warunkowań fizyko-chemicznych wyżej wspomnianych metali. Tego rodzaju zadania badawcze realizuje m.in. wyposażone w nowoczesny sprzęt i aparaturę badawczą, Laboratorium Archeometalurgii i Konserwacji Zabytków, Instytutu Archeologii Uniwersytetu Jagiellońskiego.

Dla archeologa zajmującego się zwłaszcza epoką żelaza, a bliżej precyzując okresami, kiedy nastąpiło upowszechnienie używania tego metalu, do najistotniejszych pytań, na które chciałby znaleźć odpowiedź w pracach archeometalurgicznych, należą dwa zagadnienia. Jedno z nich dotyczy zróżnicowania technologii produkcji zabytków żelaznych, drugie natomiast możliwości identyfikacji ośrodków produkcji tych przedmiotów na podstawie kryteriów technologiczno-surowcowych (Kaczanowski 2006: 132). Jeszcze innym ważnym zagadnieniem są próby określenia potencjałów produkcyjnych, znaczenia gospodarczo-społecznego oraz kwestie dotyczące wymiany handlowej i kontaktów interkulturowych.

Prekursorami tychże badań w II poł. XX w. w Polsce byli m.in. M. Radwan, W. Różański, J. Piaskowski oraz później ich następcy, jak Z. Kędzierski, J. Stępiński, M. Biborski, P. Kaczanowski i G. Żabiński, a także specjaliści od starożytnego hutnictwa, jak K. Bielenin, S. Woyda, S. Pazda, I. Suliga oraz S. Orzechowski. Ich prace koncentrowały się na materiałach pochodzących ze świętokrzyskiego ośrodka metalurgicznego, mazowieckiego czy dolnośląskiego, ale także uwzględniały zabytki pochodzące z cmentarzysk i osad z epoki żelaza. Ponadto niektórzy ze wspomnianych badaczy

analizowali także i opracowywali zabytki z innych terenów Europy.

Spoza Polski nie sposób pominąć także wielu badaczy zajmujących się starożytną metalurgią, którzy przyczynili się do rozwoju archeometalurgii, takich jak E. Schürmann, R.F. Tylecote, H.H. Coghlan, R. Pleiner, J.F. Healy, R. Wyss, J. Ypey, D. Sim, R. Thomsen, V.F. Buchwald, D.A. Scott i ostatnio J. Lang.

## MIKROSKOPOWA TECHNIKA BADAŃ METALOGRAFICZNYCH

Mikroskopowe badania metalograficzne zabytków mają na celu zbadanie mikrostruktury metali przy użyciu mikroskopu świetlnego (dawnej zwanego optycznym) w powiększeniach rzędu od około 50 nawet, do ponad 1000-krotnych. Aby można było strukturę metalu zbadać, należy najpierw pobrać odpowiednią próbkę, a następnie wykonać tzw. szlif, czyli zgląd metalograficzny. W tym celu pobraną próbkę zatapia się w odpowiednim tworzywie sztucznym. Po jego zastygnięciu przy zastosowaniu odpowiednich polerek poddaje się je mechanicznemu szlifowaniu i polerowaniu. W procesie tym używane są tarcze diamentowe oraz pasty lub zawiesiny diamentowe, tlenek aluminium, a także koloid silikonowy, często wykorzystywany w końcowych fazach polerowania. Należy przy tym pamiętać, że w przypadku obserwacji w mikroskopie świetlnym tworzywo sztuczne użyte do zatapiania próbek może być różnego rodzaju i nieprzewodzące elektryczności, natomiast w przypadku obserwacji w mikroskopie elektronowym próbka musi być zatopiona w materiale przewodzącym, zwykle na bazie węgla, tak aby elektrony mogły być odprowadzane ze zglądu i nie powodowały świecenia uniemożliwiającego obserwację próbki.

Z uwagi na ograniczenie w zakresie głębi ostrości, które następuje stopniowo przy coraz większych powiększeniach, powierzchnie preparatów muszą być wypolerowane aż do lustrzanego połysku. Na tak przygotowanej powierzchni trudno jest obserwować składniki struktury, wobec czego konieczne staje się wytrawienie zglądu odpowiednimi odczynnikami. Pozwalają one na ujawnienie zróżnicowanej, ziarnistej struktury metalu użytego do wyrobu zabytku. Najczęściej stosowanym odczynnikiem trawiącym żelazne próbki jest „Nital”, będący 3-4% roztworem kwasu azotowego w alkoholu etylowym. Stosuje



się go także w celu ujawnienia obszarów, zwłaszcza o podwyższonym udziale fosforu (tzw. odczynnik Oberhoffer). Natomiast w przypadku zgładów metalograficznych pobranych z metali kolorowych trawiące odczynniki dla ujawniania struktury próbek są inne. I tak np. dla miedzi i jej stopów stosuje się odpowiednie mieszaniny roztworów, które zawierają kwas solny + chlorek żelazowy + alkohol etylowy. W przemyśle wykorzystuje się także polerowanie i wytrawianie próbek metodą elektrolityczną, do obserwacji zarówno w mikroskopach świetlnych, ale także w mikroskopach transmisyjnych (TEM), zwłaszcza przy bardzo cienkich zgładach, np. foliach.

Wspomniane odczynniki trawią przede wszystkim granice ziarna metalu. Powierzchnia poszczególnych ziaren tej samej fazy może się różnie wytrawić, niekiedy silniej lub słabiej, co jest uzależnione od ich orientacji krystalograficznej. W przypadku stopów, które składają się z różnych faz, zwykle obserwuje się silniejsze wytrawienie jednej z nich, co daje w efekcie możliwość ich rozróżnienia pod mikroskopem świetlnym. Po przeprowadzonych badaniach zgłady metalograficzne traktuje się jak zabytki, z których zostały pobrane. Muszą być skatalogowane i dostępne w przyszłości do dalszych badań. W tym celu przechowuje się je w odpowiednich naczyniach, tzw. ekssikatorach, wypełnionych żelem krzemionkowym lub też chlorkiem wapnia, które mają za zadanie pochłaniać wilgoć i chronić preparaty przed korozją.

Do podstawowych badań archeometalograficznych należą także badania twardości składników strukturalnych zabytków metalowych, zarówno żelaznych, jak i wykonanych z metali kolorowych. Przeprowadza się je przy zastosowaniu odpowiednich urządzeń i metod, takich jak metoda Brinella, Rockwella czy Vickersa. Uzyskany wynik w przypadku tej ostatniej poprzedzony jest dużymi literami alfabetu HV (H – twardość, V – Vickers). Metoda ta ze względu na swoją uniwersalność jest stosowana szczególnie często w badaniach nad zabytkami archeologicznymi. Używa się w tym celu specjalnego twardościomierza, np. dla zabytków żelaznych, zwykle przy stałym obciążeniu 10kG. Urządzenie to wgniata w powierzchnię próbki specjalnie ukształtowany diament w postaci piramidki czworokątnej, o kącie wierzchołkowym między przeciwległymi ściankami, równym 136°. Twardość Vickersa mierzona jest stosunkiem siły działającej do powierzchni odcisku o następującym wzorze:

$$HV = \frac{P}{F} = \frac{2P \cot \frac{\alpha}{2}}{d^2} \left[ \frac{kG}{mm^2} \right]$$

$$HV = 1,8544 \frac{P}{d^2} \left[ \frac{kG}{mm^2} \right]$$

Gdzie:

P – obciążenie [kG]

F – powierzchnia odcisku [mm<sup>2</sup>]

d – przekątna odcisku [mm]

α – kąt rozwarcia

Nowoczesne twardościomierze oprócz części optyczno-mechanicznej, z konstrukcją wgłębnika do precyzyjnego ustalenia punktu pomiarowego, mają możliwość automatycznej transmisji wyników bezpośrednio do komputera.

Tego typu badania umożliwiają odpowiedź na pytania, czy struktury np. ostrza miecza, noża oraz innych wyrobów skrawających były dodatkowo utwardzane. Pozwalają też m.in. określić twardość żelaza fosforowego, bardzo często używanego wśród różnych wyrobów żelaznych z okresu rzymskiego. Ma to w tym przypadku niezmiernie istotne znaczenie, żelazo fosforowe ma bowiem podobną twardość jak stal średniowęgłowa. Należy w tym miejscu wskazać, że ważnym uzupełnieniem badań archeometalurgicznych są też inne, bardzo często stosowane badania (jako ich uzupełnienie), jak np. wspomniane analizy rentgenograficzne, defektoskopowe, a nawet traseologiczne.

W ramach prowadzonych badań nad starożytną metalurgią nie sposób pominąć bardzo ważnego etapu, jakim jest analiza wtrąceń niemetalicznych, zwykle w postaci zróżnicowanych żużli. Obserwacje w miejscach ich rozmieszczenia, a nawet ich kształty w badanych wyrobach, mogą być pomocne np. przy identyfikacji technologii wykonania zabytków. Poza tym analizy składu chemicznego mogą być także pomocne w kwestiach identyfikacji związanych z pochodzeniem surowca, np. dotyczących złóż rud darniowych, rud miedzi itp.

## ARCHEOMETALURGIA W BADANIACH ZABYTEKÓW ŻELAZNYCH

W cyklu rozwojowym społeczeństw pradziejowych metody starożytnego hutnictwa i technik kowalskich, tj. pozyskiwania surowca i wykonywania z niego przedmiotów, były stale ulepszane i rozwijane.

Można je rekonstruować m.in. wykorzystując badania metalograficzne. Wskazują one na daleko idące zróżnicowania technologii, np. przy wykonywaniu mieczy używanych przez świat celtycki i rzymski oraz ludy pozostające pod wpływem tych kultur.

Początki używania i rozpowszechniania żelaza datowane są rozmaicie w różnych częściach świata. Początek epoki żelaza określa na danym obszarze opanowanie dwóch podstawowych umiejętności. Pierwsza z nich to poznanie procesu wytopienia żelaza, a druga – jego kształtowanie poprzez obróbkę plastyczną (kucie). W starożytności na terenie Cesarstwa Rzymskiego, a także na obszarze europejskiego Barbaricum pozyskiwanie surowca żelaznego polegało na redukcji rozdrobnionej rudy żelaza zmieszanej z węglem drzewnym w procesie metalurgicznym prowadzonym w piecu dymarskim. Technika jego otrzymywania była związana z ówczesnym typem pieca. W Europie przyjmuje się, że były to różnego rodzaju piece do jednorazowego lub wielokrotnego użytku (Pliniusz, NH XXXIV, 144). Wytapianie przebiegało zawsze według tych samych zasad fizyko-chemicznych, bez względu na konstrukcję pieca (Radwan 1961: 779; Bielenin 1992: 79; 2002: 13). Ponieważ proces prowadzony był przy stosunkowo niskiej temperaturze, tj. znacznie poniżej 1530°C, a więc w temperaturze topnienia żelaza, w jego wyniku otrzymywano porowaty i niewielki kawałek metalu, silnie zanieczyszczony żużlami i daleko odbiegający od naszych współczesnych wyobrażeń o żelazie. W zależności od rodzaju użytej rudy oraz miejsca położenia wsadu do pieca dymarskiego w stosunku do otworów wlotowych powietrza, w pewnych jego fragmentach powstać mogło żelazo, w innych stal (nawęglone żelazo) lub surówka. Surówka to półprodukt powstały w wyniku redukcji rudy w piecu, który ma bardzo wysoką zawartość węgla i liczne zanieczyszczenia pochodzące z procesu hutniczego i jest bardzo kruchy. Otrzymana w ten sposób bryła metalu nagrzana do wysokiej temperatury dawała się stopniowo kształtować poprzez kucie na gorąco. W trakcie kucia półpłynne żużle wyciskane były z gąbczastej bryły żelaza, co poprawiało jej zwartość i umożliwiało uzyskanie własności wytrzymałościowych, niespotykanych wśród innych znanych dotąd metali, zwłaszcza miedzi oraz jej stopów (brązu i mosiądzu). W trakcie kucia zauważono, że mniejsze fragmenty metalu można łączyć ze sobą poprzez skuwanie (zgrzewanie ogniowe).

Innym zaobserwowanym zjawiskiem było utwardzanie uzyskanego metalu przez hartowanie, w wyniku najpierw rozgrzania, a następnie odpowiednio szybkiego studzenia. Ponieważ niekontrolowany proces wytapiania żelaza dawał w rezultacie metal o dużej niejednorodności chemicznej, przenosiła się ona również na wykonane z niego przedmioty. Zaskakującym zjawiskiem dla dawnych kowali było też zapewne to, że przedmioty wykonane z różnych wytopów lub różnych fragmentów jednego wytopu wykazywały odmienne własności. Jedne z nich były twarde, sprężyste, czasem kruche (stal), inne natomiast miękkie, ulegające łatwo odkształceniu (żelazo). Musiało to nieuchronnie doprowadzić do kolejnego kroku na drodze postępu technologicznego, którym stała się prawdopodobnie umiejętność wyróżniania w obrębie uzyskanego surowca żelaznego obszarów twardych i miękkich. Umiejętność ta pozwoliła na selekcję materiału w zależności od przeznaczenia wyrobów. Z obserwacji, iż duży stopień przekucia materiału prowadzi do poprawy jego własności, w sensie jednorodności chemicznej i zmniejszenia zanieczyszczenia żużlem, a także z umiejętności wstępnego oddzielania materiału twardego od miękkiego zrodzić się mogła nowa technologia wytwarzania polegająca na otrzymywaniu wyrobu końcowego poprzez łączenie (zgrzewanie ogniowe) wstępnie odkutych i ukształtowanych elementów, wykonanych z takich samych lub różnych materiałów, tj. żelaza i stali. Rozwój technologii wytwarzania przedmiotów z tych metali warunkowany był także umiejętnością zastosowania techniki zgrzewania ogniowego. Uzyskanie dobrych jakościowo zgrzein między łączonymi materiałami stawało się możliwe w miarę poznawania sposobów upłynniania zgorzeliny tworzącej się na powierzchni rozgrzanego żelaza. Dodawanie dostępnych powszechnie minerałów, jak np. piasku –  $\text{SiO}_2$ , wchodzących w związki z tlenkami żelaza, prowadziło do powstawania płynnych żużli już przy temperaturze kucia, co ułatwiało ich wypływanie podczas zgrzewania. W zależności od zawartości węgla w łupce, temperatura kucia wahała się od 650°C do 1250°C, przy czym im większa jest jego zawartość, tym niższa jest temperatura kucia i gorsze upłynnianie żużla (por. Pleiner 2006: 53–54).

Ten podstawowy zasób doświadczeń zdobywanych stopniowo w starożytności pozwalał na otrzymywanie coraz to lepszych wyrobów z żelaza lub stali, których jakość znacznie przewyższała

dotychczas używane narzędzia i broń wykonane ze stopów miedzi, tj. brązu i mosiądzu oraz powodowała ich stopniowe zastępowanie. Przy badaniach starożytnych wyrobów z żelaza i stali zawsze pojawiają się pytania o surowiec. Jaka była mikrostruktura materiału wyjściowego, z którego wykonano dany przedmiot. Jaka była forma handlowa surowca i skąd mógł on pochodzić.

### METALOGRAFICZNE BADANIA SUROWCOWE

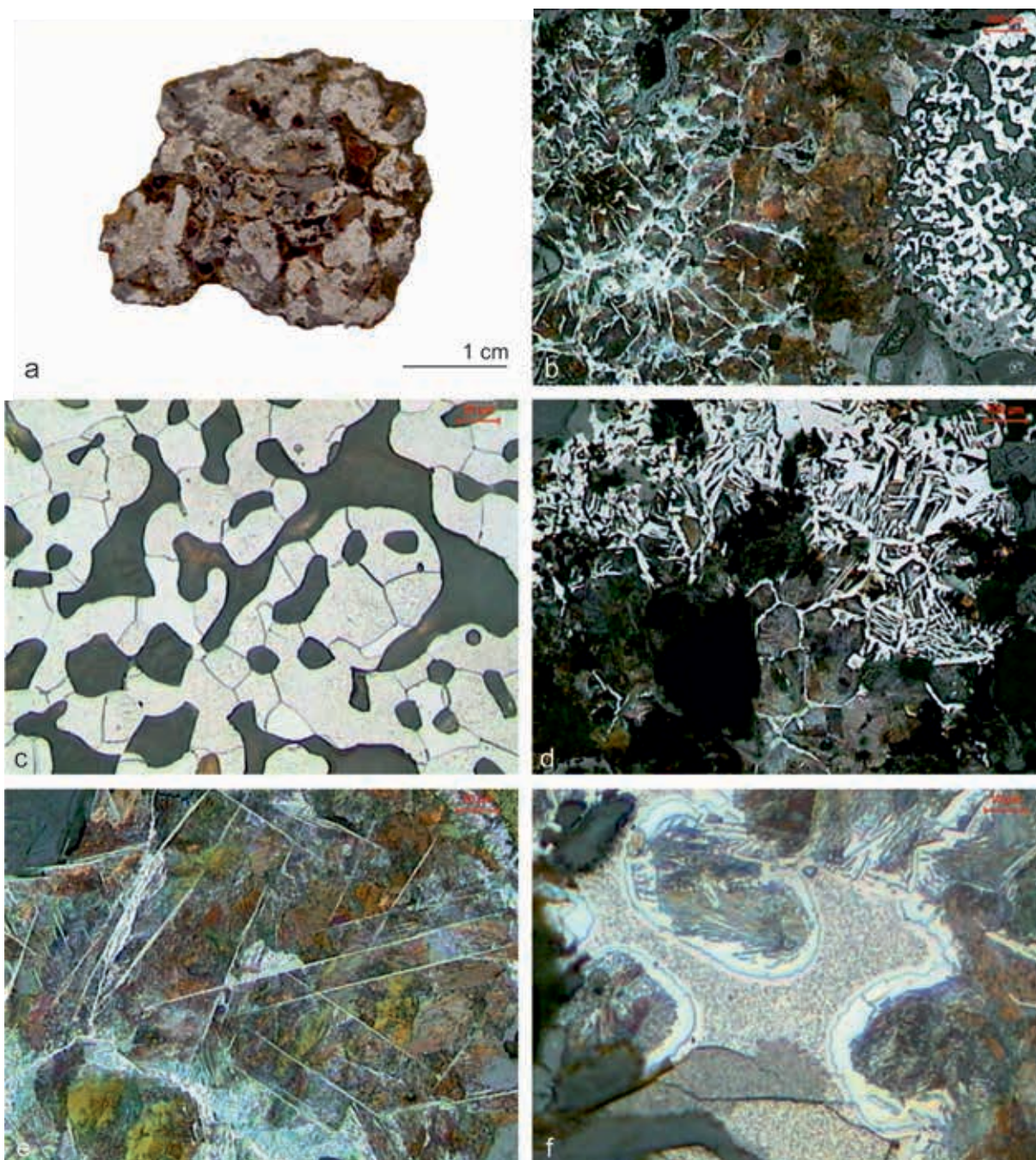
Dobrym przykładem mogą być tutaj przeprowadzone m.in. porównawcze badania żelaznego surowca z okresu rzymskiego, w postaci grąpi (ryc. 1) (materiału odpadowego powstałego w wyniku przekuwania łupki dymarskiej, zawierającego fragmenty żelaza) znalezionych na terenie Polski oraz dwóch różnych surowców pochodzących z prowincji Cesarstwa Rzymskiego. Jeden z nich to żelazny płaskownik wydobyty z zatopionego rzymskiego statku handlowego w rejonie Saintes-Maries-de-la-Mer (Francja), u ujścia Rodanu do Morza Śródziemnego, a drugi to żelazne kęsisko z Risan (Czarnogóra), jedno z dwóch znalezionych na terenie dawnego rzymskiego emporium handlowego *Risinium*, leżącego nad Zatoką Kotorską (Biborski i Stępiński 2014).

Z dotychczasowych badań metaloznawczych starożytnych wyrobów oraz przeprowadzonych wytopów doświadczalnych wiadomo, że w okresie rzymskim na terenie Europy otrzymywane w piecach dymarskich żelazo nie przechodziło przez stan ciekły, a jego nawęglenie było bardzo nierównomierne, występujące w zakresie od 0,1 do ok. 1,2% C, tj. od żelaza do stali nadeutektoidalnej (Radwan 1963: 46-80; Tylecote 1976: 53-58; Bielenin 1983: 158-159; 1992: 55-87; Pleiner 2000: 131-137 i 245-247; Kędzierski i Stępiński 2006: 192-193; Buchwald 2005: 63-69). Takie też nawęglenie występuje w badanym grąpiu ze stanowiska nr 9 na Łysej Górze (ryc. 1) oraz w płaskowniku z rejonu Saintes-Maries-de-la-Mer (ryc. 2, 4). Charakterystyka metalu dymarskiego byłaby jednak niepełna, gdybyśmy nie powiedzieli, że podczas procesu redukcyjnego w piecu dymarskim mogły też lokalnie tworzyć się obszary fazy ciekłej, które zwykle wysoko się nawęglają. Powstawaniu takich obszarów sprzyjał tworzący się w materiale

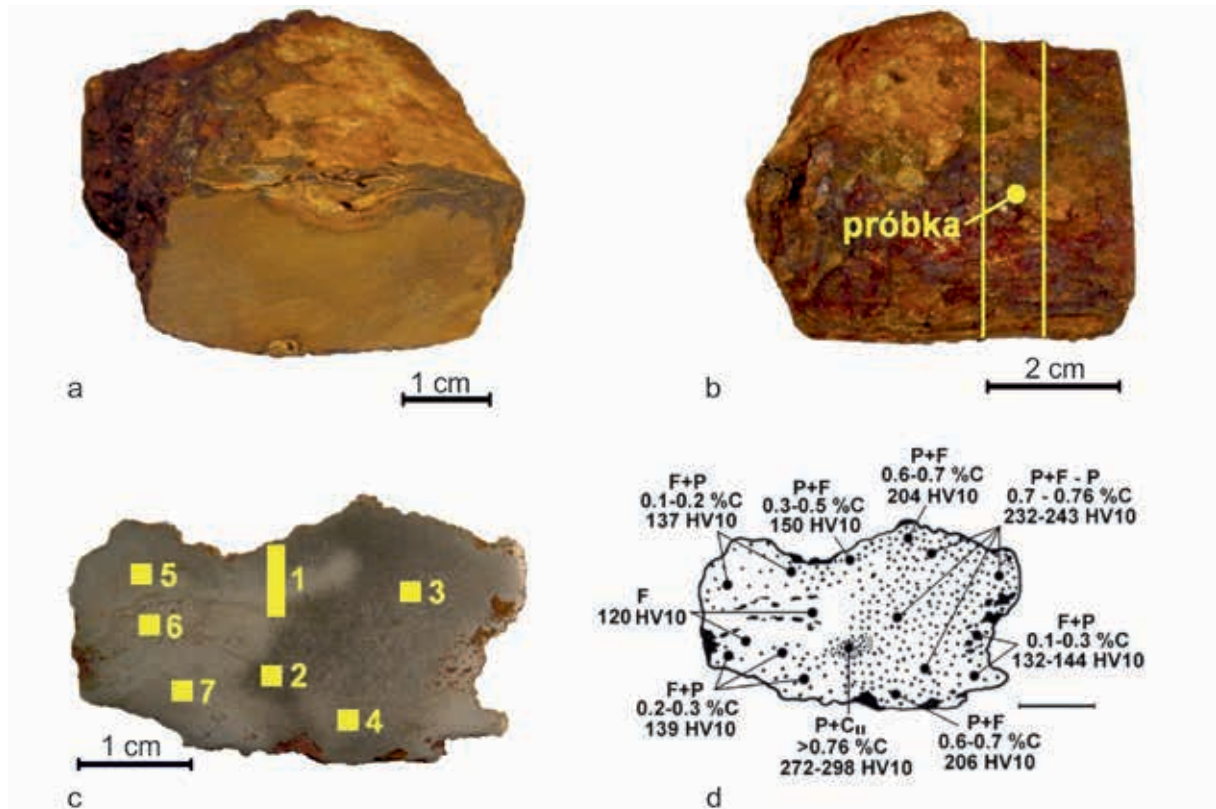
wsadowym do pieca dymarskiego fosforek żelaza, który stykając się z nowo powstającymi cząstkami żelaza, powodował ich topienie już przy temperaturze 1050°C (Stępiński 2012: 126-131). Dobrym przykładem takiego obszaru, wysoko nawęglonego, który wcześniej był ciekły w dymarce, jest badany grąp nr 2 ze stanowiska 9 na Łysej Górze. Trzeba też dodać, że w okresie rzymskim większość metalu otrzymywanego w procesie dymarskim była żelazem lub stalą, nisko nawęgloną w zakresie 0,1-0,3% C, które zawierały też często fosfor (Sim 1998: 2; Tylecote 1976: 56).

Z powyższych rozważań widać jednoznacznie, że na tym tle mikrostruktura żelaza z Risan wygląda zupełnie inaczej, mamy tu bowiem do czynienia z metalem wysokowęglowym, o równomierным rozmieszczeniu węgla, który przeszedł przez stan ciekły (ryc. 3, 5d). Wobec odmiennej mikrostruktury, zarówno kęsiska, jak i jego kształtu odbiegającego od znanych rzymskich półwyrobów (Buchwald 2005: 103; Pleiner 2006: 39-43) należy badane kęsisko z Risan uznać za surowiec importowany z terenów azjatyckich, najprawdopodobniej z Indii, gdzie wytwarzanie wysokowęglowej stali tyglowej, tzw. Wootzu oraz jej eksport na zachód było poświadczane już w starożytności (Belaiew 1918: 417, 435; Coghlan 1956: 156-161; Piaskowski 1974: 239-256 i 263-303; Wadsworth i Sherby 1980: 37-42; Prakash 1991: 361-364; Williams 2012: 24-31). Dodatkowo przemawia też za tym przypuszczeniem miejsce znalezienia obu kęsisk. Risan było bowiem emporium handlowym działającym na wybrzeżu Adriatyku od czasów hellenistycznych, aż po wczesne Bizancjum. Wydaje się więc bardzo prawdopodobne, że Rzymianie znali i sprowadzali stal wysokowęglową, w miarę równomierne nawęgloną, na teren cesarstwa. Trudno natomiast coś powiedzieć na temat jej wykorzystywania przez Rzymian, gdyż jak do tej pory nie natrafiono na jakiś egzemplarz miecza, czy też innego wyrobu z czasów rzymskich o takiej mikrostrukturze. Badany ostatnio przez E. Godfrey i M. van Nie wysokowęglowy przebijak z Heeten, z okresu późnorzymskiego, jest jednak wykonany z metalu otrzymanego w procesie dymarskim, jak twierdzą autorzy (Godfrey i Nie 2004: 1123-1124). Jedną z przyczyn, dla której metal wysokowęglowy nie był chętnie stosowany, był zapewne brak znajomości jego obróbki plastycznej w postaci kucia, przez kowali rzymskich. Metal wysokowęglowy wymagał

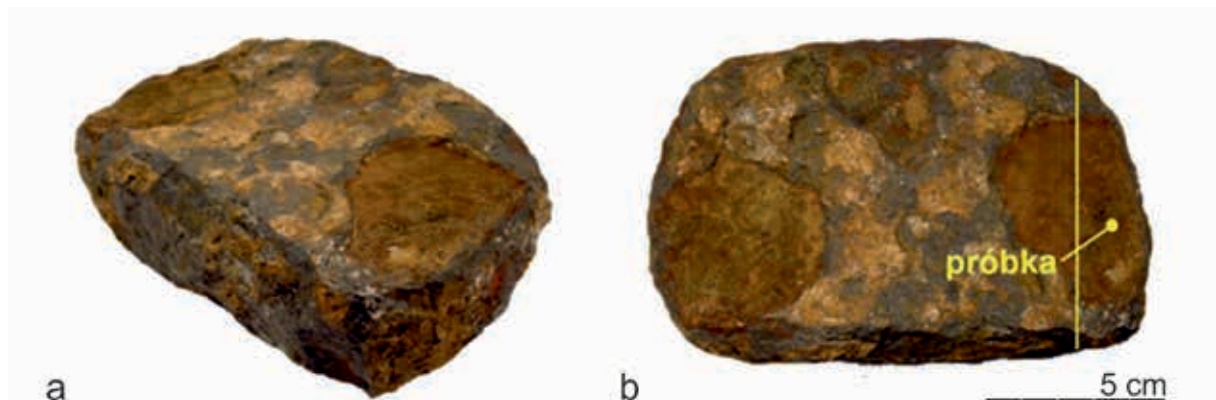




**Ryc. 1.** Mikrostruktura obserwowana w grąpiu ze stan. 9 na Łysej Górze: a – makroskopowy przekrój grąpia; b – obszar o dużym zróżnicowaniu zawartości węgla i mikrostruktury; c – skupisko wtrąceń żużla na tle ferrytu; d – zmiana mikrostruktury od ferrytyczno-perlitycznej do perlitycznej z siatką ferrytu; e – wydzielenia cementytu w postaci igieł i siatki na tle perlitu; f – obszar o wysokim nawęgleniu z wydzieleniami eutektyki potrójnej. Fot. J. Stępiński

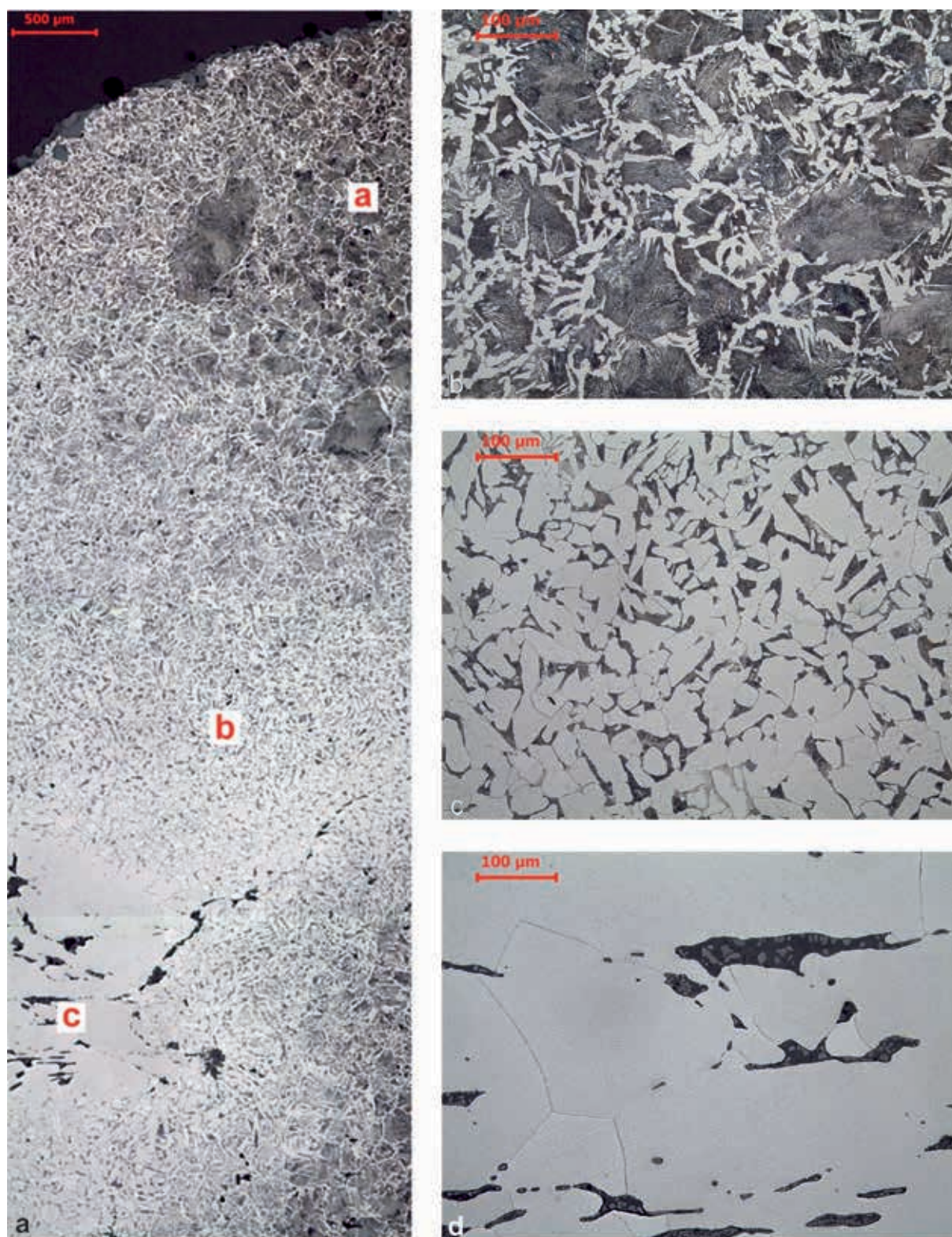


**Ryc. 2.** Żelazny płaskownik pochodzący z Saintes-Maries-de-la-Mer, a – wygląd badanego kawałka płaskownika; b – miejsce pobrania próbki; c – makroskopowy obraz przekroju poprzecznego próbki wraz z miejscami obserwacji mikroskopowej 1–7; d – schematyczne rozmieszczenie składników strukturalnych na próbce oraz wyniki pomiarów twardości HV10 (F – ferryt, p – perlit, Cii – cementyt drugorzędowy, a kropki wskazują obecność węgla). Fot. J. Stępiński



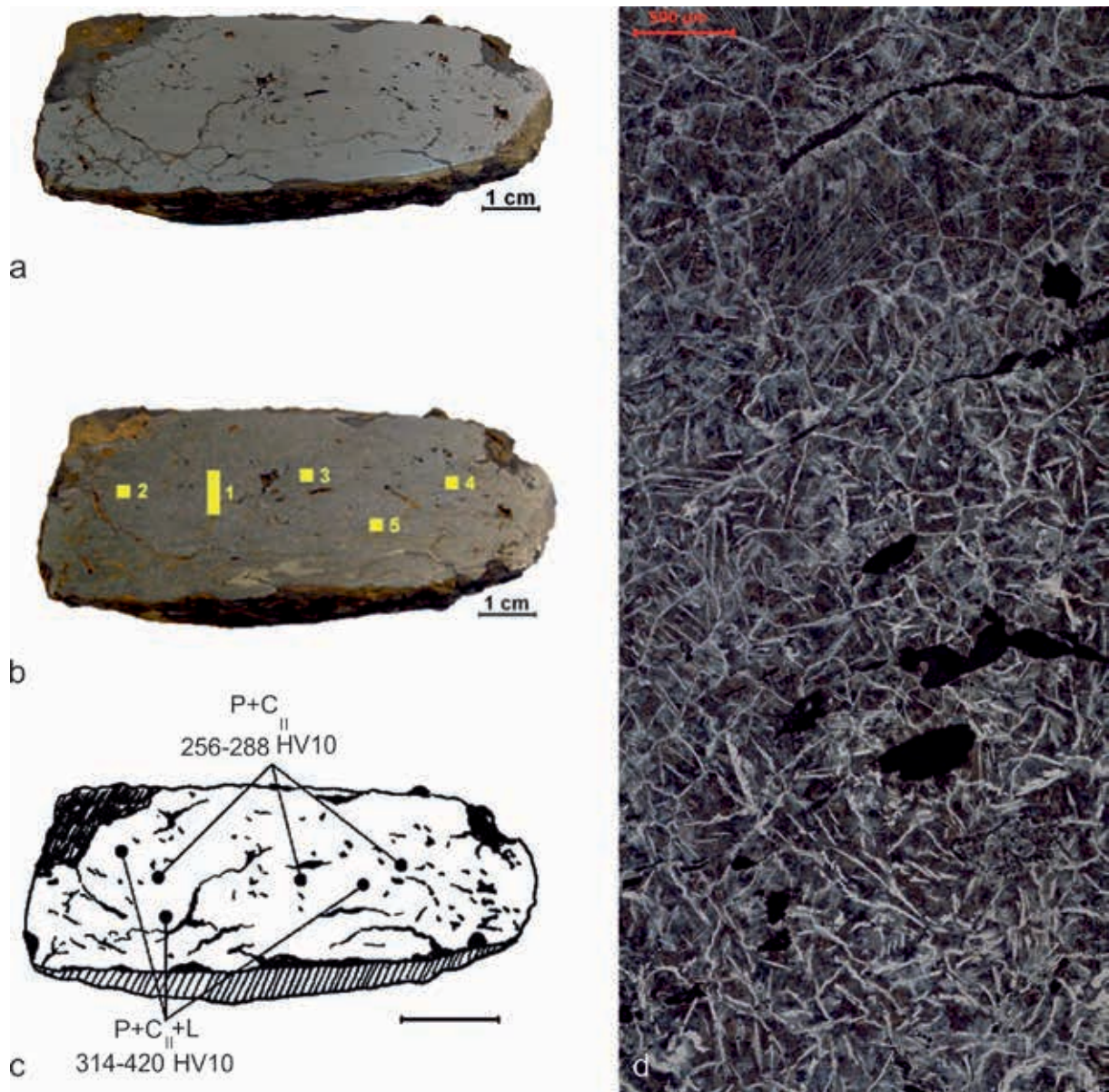
**Ryc. 3.** Żelazne kęsisko płaskie z Risan, a – kształt kęsiska; b – miejsce pobrania próbki. Fot. J. Stępiński





**Ryc. 4.** Zróżnicowanie mikrostruktury na przekroju rzymskiego płaskownika z rejonu Saintes-Maries-de-la-Mer: a – zmiana mikrostruktury od powierzchni do środka płaskownika w miejscu 1 (ryc. 2c), a, b oraz c – obszary wykonania zdjęć mikrostruktury; b – mikrostruktura perlityczna z wydzieleniami ferrytu w postaci siatki i iglastej struktury Widmanstättena w obszarze „a” na ryc. 4a; c – mikrostruktura ferrytyczno-perlityczna w obszarze „b” na ryc. 4a; d – ferryt oraz wtrącenia żużla w obszarze „c” na ryc. 4a. Fot. J. Stępiński





**Ryc. 5.** Przekrój żelaznego kęśiska z Risan: a – obraz przekroju poprzecznego próbki, nie trawiony; b – trawiony obraz przekroju poprzecznego próbki wraz z miejscami obserwacji mikroskopowej 1–5; c – schematyczne rozmieszczenie składników strukturalnych na próbce oraz wyniki pomiarów twardości (HV10) (P – perlit, CII – cementyt drugorzędowy, L – ledeburyt); d – mikrostruktura składająca się z perlitu, cementytu drugorzędowego w postaci siatki i igieł, niewielkich ilości ledeburytu oraz licznych wtrąceń żużla w miejscu 1 na ryc. 5b. Fot. J. Stępiński

bowiem nagrzewania do niższych temperatur kucia (poniżej 850°C) niż temperatury, przy których kuto zazwyczaj żelazo i stal niżej węglową (920-950°C) (Piaskowski 1974: 58-59; Williams 2012: 25).

Przedstawione wyniki badań mikroskopowych pokazują wyraźnie, że mikrostruktury grąpi oraz płaskownika z rejonu Saintes-Maries-de-la-Mer reprezentują ten sam typ metalu, niezależnie od miejsca, gdzie został on otrzymany w procesie dymarskim. Natomiast metal żelaznego kęsiska z Risan jest stałą wysokowęglową otrzymaną w stanie ciekłym, w tyglu, która została dostarczona na teren Cesarstwa Rzymskiego.

### **METALOGRAFICZNE BADANIA NAD TECHNOLOGIĄ NA PRZYKŁADZIE SZCZERBCA**

Jeszcze innym przykładem przydatności archeometalurgii w celach identyfikacyjnych były badania przeprowadzone m.in. nad Szcerbcem (ryc. 6 i 7) – koronacyjnym mieczem królów polskich (Biborski i in. 2009; 2011; 2013). W tym przypadku podstawowym celem analizy było uzyskanie odpowiedzi na pytanie, czy struktura metalu i technika wykonania miecza odpowiadają m.in. jego chronologii. Były bowiem takie sugestie, czy aby nasz miecz nie jest kopią z XVII w., sporządzoną na wniosek króla Jana Sobieskiego dla swojego syna. Zatem założono przeprowadzenie badań mających na celu określenie technologii wykonania głowni, przy wykorzystaniu badań metalograficznych, ale także rentgenograficznych i defektoskopowych, przy równoczesnym określeniu składu chemicznego metalu użytego do wykonania głowni (Biborski i in. 2009). Należy przy tym wspomnieć, że dodatkowo przeprowadzono również (pominięte w tym opracowaniu) badania traseologiczno-porównawcze głowni i rękojeści, w celu uzyskania informacji o skali ich zużycia oraz ustalenia, czy poszczególne elementy rękojeści pod względem stylistycznym wykonano w tym samym warsztacie, czy tą samą ręką i czy występujące na nich zniszczenia pochodzą z tego samego okresu. Ponadto celem badań nad mieczem było określenie składu chemicznego metalu użytego do wykonania rękojeści i doprecyzowanie dotychczasowej chronologii Szcerbca i jego

pochodzenia oraz ostateczne określenie typu badanego miecza.

Ze względu na stan i rangę zabytku nie było żadnych możliwości pobrania próbek metalograficznych z głowni miecza. Zatem koniecznym stało się wybranie do badań przynajmniej dwóch obszarów, oznaczonych dużymi literami alfabetu (ryc. 8). Obszar A położony był w odległości ok. 4 cm od jelca, natomiast obszar B w odległości ok. 14 cm od jelca. Do obserwacji mikroskopowych powierzchnia głowni w badanych miejscach A i B została dokładnie wypolerowana przy użyciu past diamentowych, w podobny sposób jak to się robi w przypadku zgładów metalograficznych przy użyciu specjalnego przyrządu do ręcznego polerowania (ryc. 9). Następnie w celu ujawnienia mikrostruktury, została wytrawiona za pomocą 4% „Nitalu”. Obserwacje mikrostruktury głowni Szcerbca zostały przeprowadzone przy użyciu mikroskopu optycznego Leica – DMLM, w okolicach zastawy, na wytrawionym obszarze.

#### **Obserwacje mikrostruktury w obszarze A**

Mikrostruktura, która dominowała w obszarze A, odpowiadała materiałowi wyjściowemu, z którego wykonano głownię, tj. stali półtwardej o zawartości węgla ok. 0,3-0,5% (ryc. 10). Lokalnie zmieniała się ona jednak od ferrytyczno-perlitycznej, odpowiadającej stali miękkiej o zawartości węgla ok. 0,1-0,2%, do perlityczno-ferrytycznej, odpowiadającej stali twardej o zawartości węgla mieszczącej się w granicach 0,5-0,7%. W obszarach ferrytyczno-perlitycznych występowały też pasma ferrytu o zróżnicowanej wielkości ziarna, zapewne wzbogacone w fosfor, oraz liczne wydłużone wtrącenia żużla. W mikrostrukturze obszaru A nie wykryto śladów obróbki cieplnej.

#### **Obserwacje mikrostruktury w miejscu B**

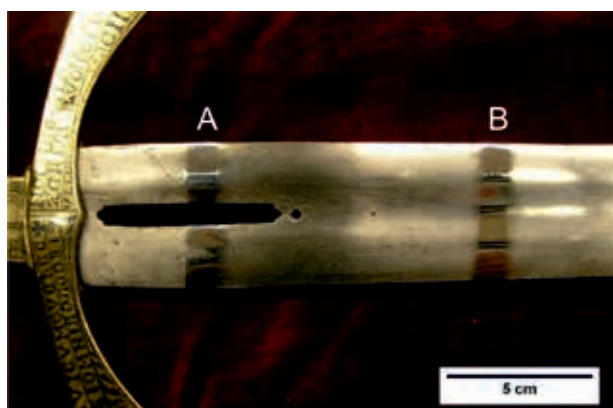
Mikrostruktura występująca w obszarze B wykazała istnienie martenzytu odpuszczonego i ujawniła, że dalsza część głowni miecza została poddana zabiegowi obróbki cieplnej, tj. hartowaniu, a następnie jej odpuszczaniu (ryc. 11). Podobnie jak w obszarze A tu również wystąpiły liczne zróżnicowane wtrącenia żużla (ryc. 12).



**Ryc. 6.** Szczerbek – miecz koronacyjny królów polskich. Zamek Królewski na Wawelu. Fot. archiwum Zamku Królewskiego na Wawelu



**Ryc. 7.** Rękojeść Szczerbca. Fot. M.R. Biborski

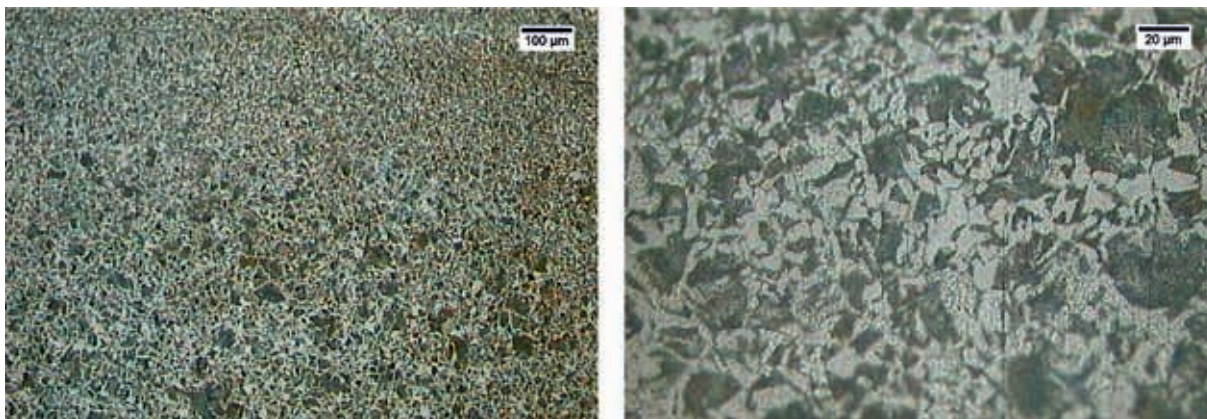


**Ryc. 8.** Szczerbek – głównia z zaznaczonymi miejscami badań (A, B). Fot. M.R. Biborski

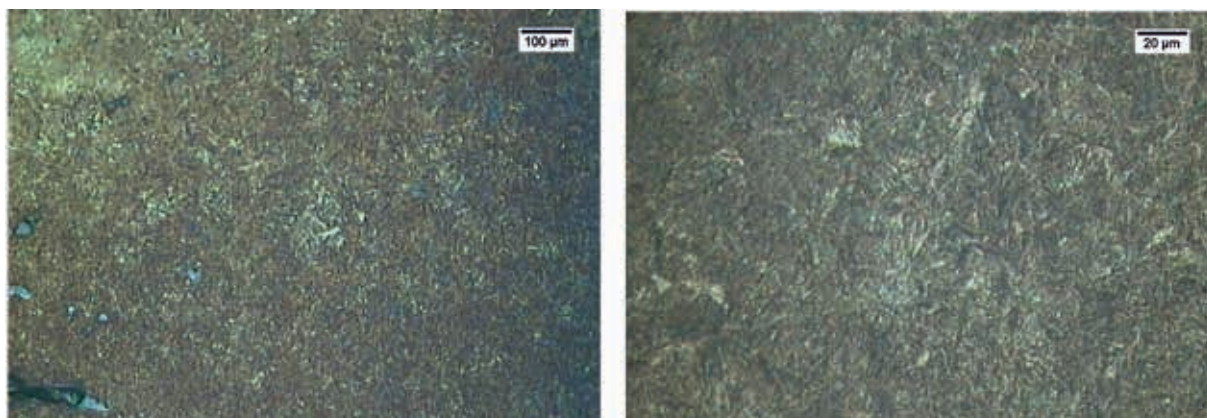


**Ryc. 9.** Zestaw do ręcznego polerowania zgładów metalograficznych. Fot. M.R. Biborski

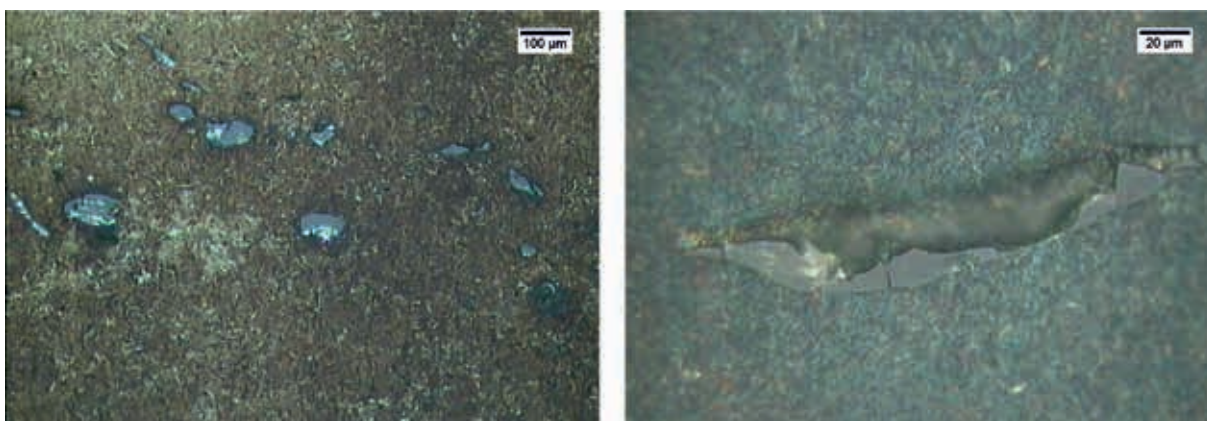




**Ryc. 10.** Mikrostruktura Szczerbca w obszarze A z zawartością węgla 0,3-0,5%. Mikrostruktura składa się z perlitu (ciemna faza) i ferrytu (faza jasna). Fot. J. Stępiński



**Ryc. 11.** Obszar B z obszarem martenzytu odpuszczonego, które doznało obróbki cieplnej. Fot. J. Stępiński



**Ryc. 12.** Obszar B z widocznymi wtrąceniami żużla w martenzycie. Fot. J. Stępiński

### Omówienie badań mikrostruktury głowni

Z obserwacji mikrostruktury w obszarze A wynika, że materiał do wykucia głowni stanowiła nierównomiernie nawęglona stal półtwarda, pochodzenia dymarskiego, zawierająca dość liczne wtrącenia żużla, charakterystyczne dla ówczesnego sposobu otrzymywania żelaza.

Interesujących danych dostarczyła natomiast mikrostruktura występująca w obszarze B. Świadczy ona o tym, że surowa, wykuta ze stali dymarskiej głownia, poddana została zabiegowi obróbki cieplnej w celu utwardzenia jej powierzchni. Proces ten polegał zwykle na zanurzeniu wcześniej rozgrzanej do temperatury czerwonego żaru (dla materiału o tym stopniu nawęglenia ok. 830°C) (Pleiner 2006: 67-69; Tylecote i Gilmour 1986: 17-18; Wesołowski 1974: 269-311) głowni w hartowniczym ośrodku chłodzącym (najczęściej woda lub olej), a następnie szybkim jej wyjęciu. Dzięki temu ciepło zawarte jeszcze w rdzeniu głowni pozwalało odpuścić gwałtownie schłodzoną, a zatem zahartowaną powierzchnię. Uzyskano w ten sposób strukturę martenzytu odpuszczonego, która jest mniej twarda od struktury czysto martenzytycznej, ale za to bardziej odporna na pęknięcia i wykruszenia.

Z porównania mikrostruktur badanych w obszarach A oraz B miecza wynika jeszcze jedna ważna informacja. Wskazuje ona, że jedynie część głowni, poniżej zastawy, została obrobiona cieplnie. Nie można wykluczyć, że kowal świadomie zastosował taki sposób obróbki cieplnej, aby nie narażać miecza na ewentualne pęknięcia hartownicze w rejonie rękojeści. Takie pęknięcia, a nawet odłamania trzpień do rękojeści, obserwujemy m.in. wśród mieczy ze stanowiska bagienne w Illerup (Biborski i Ilkjaer 2006b: 118-119). Trzeba zatem stwierdzić, że sposób wykonania miecza świadczy niewątpliwie o wysokich umiejętnościach i wiedzy warsztatowej jego wykonawcy. Miecz wykazuje bowiem bardzo dobre własności użytkowe, a jego głownia nosi znamiona broni o charakterze bojowym.

### Badania rentgenograficzne

Przeprowadzono także badania rentgenograficzne głowni Szczerbca. W ich wyniku uzyskano obraz



**Ryc. 13.** Badanie głowni Szczerbca grubościomierzem. Fot. M.R. Biborski

w miarę o jednakowym kontraście, stwierdzając przy tym istnienie niewielkich punktowych wad powierzchniowych, spowodowanych korozją metalu. Korespondują one z występującymi na powierzchni skazami spowodowanymi lokalnymi obszarami nieciągłości materiału, które charakterystyczne są dla surowca otrzymywanego na drodze procesu dymarskiego. Są one bardzo płytkie i nie wpływają też w zasadniczy sposób na jakość wyrobu.

### Badania defektoskopowe

Z powodu niemożności wykonania zglądu poprzecznego głowni przeprowadzone badania defektoskopowe miały na celu uzyskanie ewentualnej informacji o sposobie wykucia głowni z jednego, bądź więcej kawałków metalu. Wykonano najpierw badania grubościomierzem typu Krautkamer DME DL, z głowicą dwuprzetwornikową 4MHz (ryc. 13). Uzyskano wskazania świadczące o braku spójności materiałowej mniej więcej w połowie grubości głowni. Wynik ten może dawać podstawy do przypuszczeń, że głownia została wykonana z materiału rozkutego na płasko, a następnie złożonego w postaci dwóch płatów skutyk ze sobą. Natomiast w badaniu defektoskopem ultradźwiękowym typu USM, z głowicą 15MHz, z linią opóźniającą, nie stwierdzono braku spójności. Prawdopodobnie może to świadczyć o bardzo dobrym zgrzaniu obu płatów, bez wyraźnej zgrzeiny.





**Ryc. 14.** Schemat danych umożliwiających identyfikację mieczy rzymskich. M.R.Biborski

### Badania składu chemicznego

Badania składu chemicznego przeprowadzono przede wszystkim pod kątem określenia zawartości innych pierwiastków niż żelazo. Analizę składu chemicznego głowni przeprowadzono spektrometrem iskrowym FUNDY-MASTERS w okolicach sztychu. Z analizy chemicznej miecza wynika, że głownia miecza wykonana została ze stali dymarskiej o podwyższonej zawartości fosforu – 0,092%. Stwierdzono również podwyższoną zawartość krzemu w analizie, w ilości 0,153%, co wiąże się zapewne z występującymi, licznymi wtrąceniami żużla w metalu. Natomiast zawartości pozostałych analizowanych pierwiastków występują w ilościach spotykanych w analizach innych wyrobów wykonanych z metalu dymarskiego, a pochodzących z tego samego okresu co Szczerbiec.

### Konkluzja

Nie ma wątpliwości, że opierając się na przeprowadzonych badaniach archeometalurgicznych, należy przyjąć, że głownia Szczerbca wykonana została według wszelkich zasad wytwarzania mieczy bojowych z XIII i XIV w. Natomiast materiał do wykucia głowni stanowiła nierównomiernie nawęglona stal półtwarda, pochodzenia dymarskiego, zawierająca dość liczne wtrącenia żużla, charakterystyczne dla ówczesnego sposobu otrzymywania żelaza. Zatem jest pewne, że badana broń jest

tym oryginalnym mieczem, którym począwszy od Władysława Łokietka dokonywano ceremonii koronacji kolejnych władców Polski.

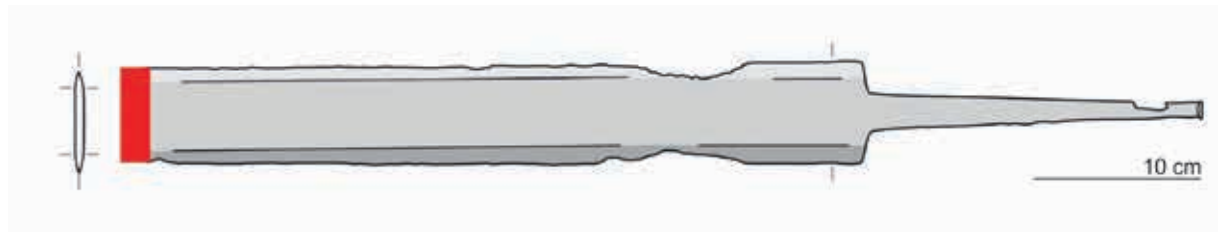
### BADANIA ARCHEOMETALOGRAFICZNE NAD IDENTYFIKACJĄ MIECZY Z OKRESU WPŁYWÓW RZYMSKICH

W badaniach archeologicznych do ważniejszych zagadnień należą kwestie związane z identyfikacją rzymskich mieczy używanych w okresie od I-V w. po Chr. W tym zakresie mamy kilka możliwości. Przyjmuje się, że zdecydowana większość mieczy znaleziona w granicach państwa rzymskiego, to rzeczywiście oryginalna broń rzymska. Ale oprócz miejsca znalezienia za ich rzymską proveniencją przemawiają przede wszystkim takie cechy, jak odciski na ich głowniach lub trzpieniach imienne stemple warsztatowe, inkrustacje z przedstawieniami bóstw rzymskich lub też znaki symboliczne związane z wojskiem i wojną (Biborski 1994a; 1994b; 2017). W niektórych przypadkach dodatkową wskazówką może być też morfologia wykutej głowni oraz towarzyszące jej niekiedy zachowane elementy pochwy i rękojeści. Natomiast z braku wyżej wymienionych cech pozostaje jeszcze jedna możliwość dokonania identyfikacji ośrodka produkcji, tj. na podstawie przeprowadzonych badań metalograficznych głowni (ryc. 14). Pozwalają nam one odróżnić zaawansowane technologicznie egzemplarze rzymskie, m.in. dziwerowane (ang. *pattern welded*) lub wykute ze stali w miarę równomiernie nawęglonej, która nadawała się do obróbki cieplnej (hartowania), od ich barbarzyńskich derywatów. Te ostatnie były wykonywanych zwykle najprostszymi technikami kowalskimi, często z gorszej jakości surowców, przede wszystkim z żelaza fosforowego lub bardzo słabo i nierównomiernie nawęglonej stali (por. m.in. Biborski i in. 1982; Biborski i Kaczanowski 1989).

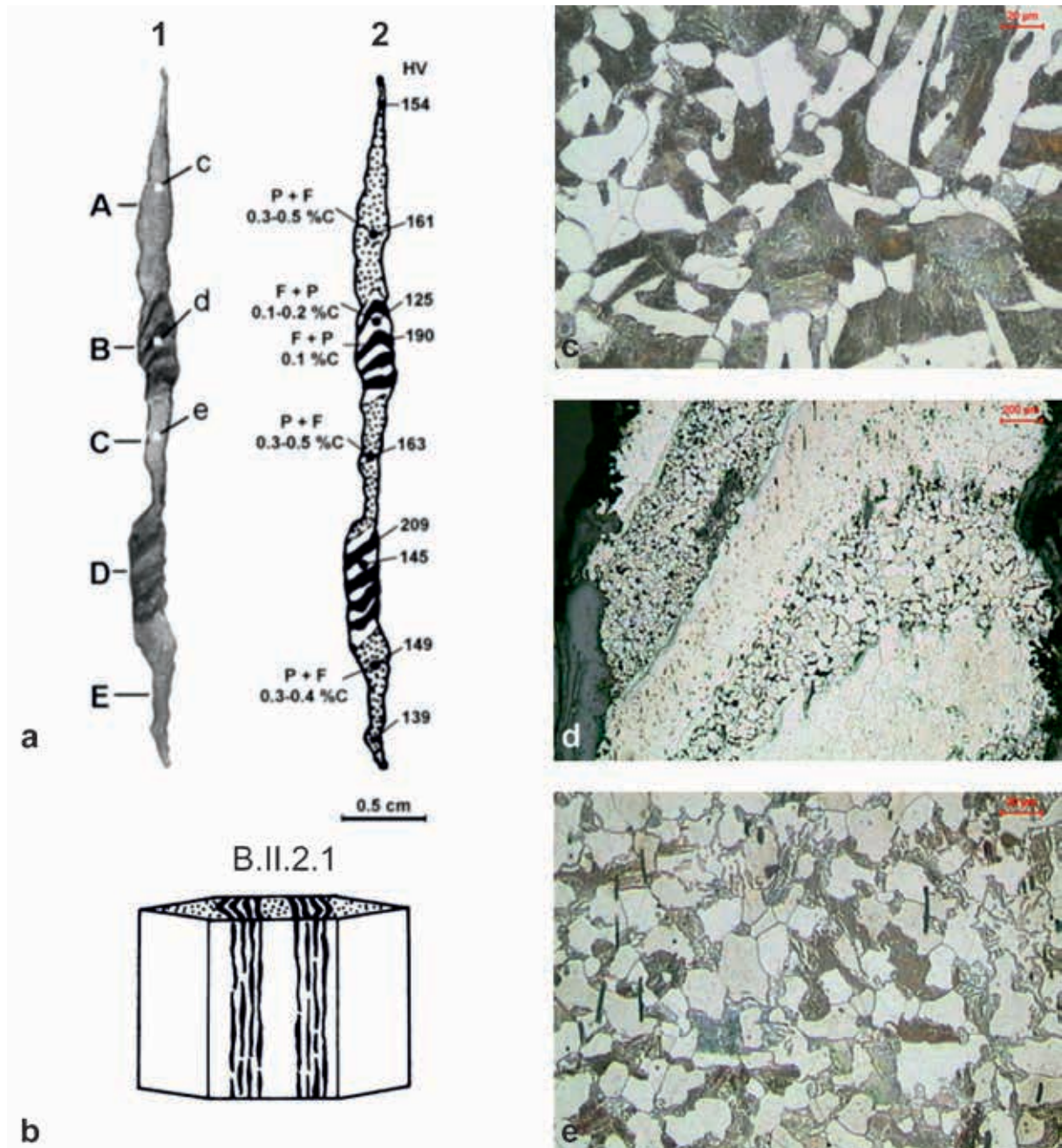
Dobrym przykładem metody identyfikacji mogą być przeprowadzone badania archeometalograficzne uszkodzonego miecza z cmentarzyska kultury przeworskiej z Oblina, z grobu 62 (Biborski i in. 2007: 141-143) (ryc. 15).

Dzięki odłamanej części głowni można było pobrać próbkę obejmującą cały jej przekrój. Następnie





Ryc. 15. Miecz z Oblina, woj. mazowieckie, grób 62. Rys. M.J. Biborski



Ryc. 16. Makroskopowy obraz przekroju poprzecznego głowni: c-e miejsca obserwacji mikroskopowych; a:2 – schematyczne rozmieszczenie składników strukturalnych i pomiarów twardości na przekroju głowni, (F – ferryt, P – perlit, A i E – ostrze, B i D – pasma dziwery oraz C – kawałek rozdzielający dziwery); b – profil i technologia miecza; c – mikrostruktura w ostrzu miecza (A), ciemny perlit z jasnym ferrytem; d – mikrostruktura w rdzeniu głowni, pasmo dziwery (B), jasne warstewki ferrytu fosforowego rozdzielone ciemniejszymi warstewkami stali miękkiej; e – mikrostruktura w rdzeniu głowni, kawałek (C), perlit częściowo zdegenerowany oraz ferryt. Fot. i rys. J. Stępiński



**Ryc. 17.** a – rekonstrukcja poszczególnych faz powstawania dziweru na przykładzie kopii miecza z Nydam (DK); b – kopia głowni miecza dziwerowanego z Nydam (DK) wytrawionego kwasem). Fot. M.R. Biborski

po odpowiednio przygotowanym zgładzie przystąpiono do obserwacji metalograficznych pod mikroskopem świetlnym. W próbce wyróżniono pięć zróżnicowanych obszarów: A i E – to 2 ostrza, B i D – pasma dziweru oraz obszar metalu usytuowany pomiędzy nimi – C. Zachowana powierzchnia głowni jest w znacznym stopniu uszkodzona przez korozję, ale mimo to udało się uwidocznić jej pierwotną, wykutą strukturę.

W przypadku kompletnie zachowanej głowni próbkę zwykle pozyskuje się poprzez trójkątne, prostopadłe do osi wycięcie, o powierzchni ok. 1 cm<sup>2</sup>, dochodzące do osi miecza, które następnie zostaje uzupełnione odpowiednim materiałem.

### Mikrostruktura

W obszarach ostrzy miecza (A i E) występuje struktura perlityczno-ferrytyczna odpowiadająca stali półtwardej, o zawartości węgla 0,3-0,5% (ryc. 16a:1). Pasma dziweru (B i D) wykonane są z czterech warstewek stali z fosforem oraz pięciu warstewek stali miękkiej ferrytyczno-perlitycznej, o zawartości węgla ok. 0,2%, umieszczonych przemienne względem siebie i tworzących pewnego rodzaju pakiet. Obszar kawałka metalu (C), rozdzielający pakiety dziweru

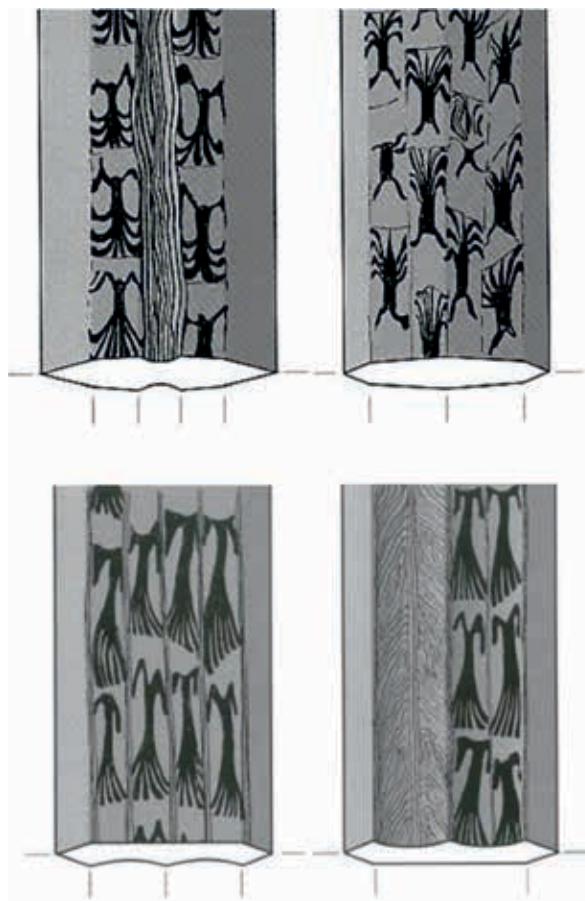
(B i D), wykonany został ze stali półtwardej, o strukturze perlityczno-ferrytycznej (o zawartości węgla 0,3-0,5%), takiej samej jak oba ostrza (ryc. 16a:1, 16d). W metalu potwierdzono obecność manganu w ilości 0,020% i fosforu 0,105%.

W metalu użytym do wykonania miecza występują także liczne jedno- i wielofazowe wtrącenia żużla, zróżnicowane pod względem wielkości i kształtu. W ostrzach miecza (A i E) oraz kawałku (C) wtrącenia żużla zawierają głównie takie pierwiastki, jak: Fe, Si, Mn, Ca, K oraz ślady Al. Natomiast w dziwerowanych pakietach (B i D), zależnie od miejsca analizy, wtrącenia żużla zawierają: Fe, Si, Mn, Ca, K i Al w warstewkach stalowych oraz Fe, Ca, P, Si, i Al w warstewkach stalowych z fosforem.

### Twardość

Mierzona w poszczególnych obszarach głowni twardość przedstawia się następująco: ostrze (A) – 154-161 HV; pasmo dziweru (B) – warstewki stalowe z fosforem 190 HV; warstewki stalowe – 125 HV; obszar stalowy (C) – 163 HV; pasmo dziweru (D) – warstewki stalowe z fosforem – 209 HV; warstewki stalowe – 145 HV oraz ostrze (E) – 139-149 HV (ryc. 16a:2).





**Ryc. 18.** Przykłady dziwerowania na mieczach z Illerup (DK). Rys. U. Socha

### Konkluzja

Miecz wykonany został z pięciu odpowiednio przygotowanych kawałków różnego materiału (A-E), wzajemnie zgrzanych, w procesie kucia na gorąco. I tak do dwóch ostrzy (A i E) dokuwano rdzeń składający się z 2 pakietów dziwerowanych (B i D), rozdzielonych jednym kawałkiem stalowym (C). W efekcie zarówno na powierzchni płazów miecza, jak i jego przekroju powstał widoczny wzór zgrzewny, tzw. dziwer (*pattern-welded*) często niesłusznie nazywany damasceńskim. W klasyfikacji technologicznej mieczy został zaliczony do typu B.II.1 (Biborski i Ilkjaer 2006: 165-166).

Materiał użyty do warstw dziweru był dobierany świadomie, tj. zwykle w postaci na przemian ułożonych sztab, wykutych ze stali fosforowej lub żelaza fosforowego oraz stali miękkiej. Warstwy dziweru były rozdzielone stalą lub

żelazem i znajdowały się zawsze w części środkowej głowni, do której później dokuwano zahartowane ostrza (ryc. 17a). W zależności od sposobu wykonania dziweru, tj. przez zgrzanie kilku lub więcej warstw, a następnie po ich rozcięciu i skręceniu, uzyskiwano na powierzchni głowni zróżnicowany wzór (Piaskowski 1965; 1970; 1974). Prawdopodobnie, aby był on lepiej widoczny, po wypolerowaniu głowni powierzchnie mogły być trawione roztworami o kwaśnym odczynie (np. kwasami organicznymi, jak kwas cytrynowy lub winny) (ryc. 17b). Najczęściej spotykanym wzorem jest wzór pasmowy, jaki występuje na mieczu z Oblina, oraz kątowy. Ponadto reprezentowane są wzory tzw. perełkowe, rombów, palmetowe, komórkowe występujące niekiedy w różnych kombinacjach ze sobą (ryc. 18). W technice dziwerowania, wzór na głowni był elementem ważnym dla posiadacza broni, ale drugorzędny. Nasuwa się zatem pytanie, jaką rolę odgrywał dziwer w produkcji broni białej? Odpowiedź wydaje się bardzo prosta: głownie wzorzyste, a zwłaszcza te o najbardziej skomplikowanych wzorach, dają wspaniały efekt wizualny. Natomiast już pakietowanie i technika prętowa, ale przede wszystkim dziwer, powodowały, że w trakcie walki fala uderzeniowa, poprzez zjawisko interferencji powstałej w wyniku zróżnicowanej budowy głowni, była znacznie osłabiana, a nawet niekiedy w całości niwelowana. To dawało znaczny komfort w utrzymaniu miecza w bezpośrednim starciu z nacierającym przeciwnikiem. Ponadto kompozytowa budowa poprawiała własności techniczne w postaci uelastycznienia głowni i mniejszą podatność na jej pękanie czy nawet złamanie hartowanych ostrzy (Biborski 2018: 83).

Wśród mieczy występują egzemplarze z dziwerem na wskroś, w związku z czym wzór „damasceński” widoczny jest zawsze po obu stronach głowni. Znane są też miecze stalowe, ale z dokutymi wkładkami dziwerowanymi, występującymi nie tylko na jednej, ale czasem na dwu stronach głowni. Ten skomplikowany sposób wykonania wymaga odpowiedniej wiedzy i na wysokim poziomie postawionego i zorganizowanego warsztatu kowalskiego. Z tego też względu tak wykuwane miecze jak z Oblina zalicza się do wyrobów pochodzących z prowincji Cesarstwa Rzymskiego.





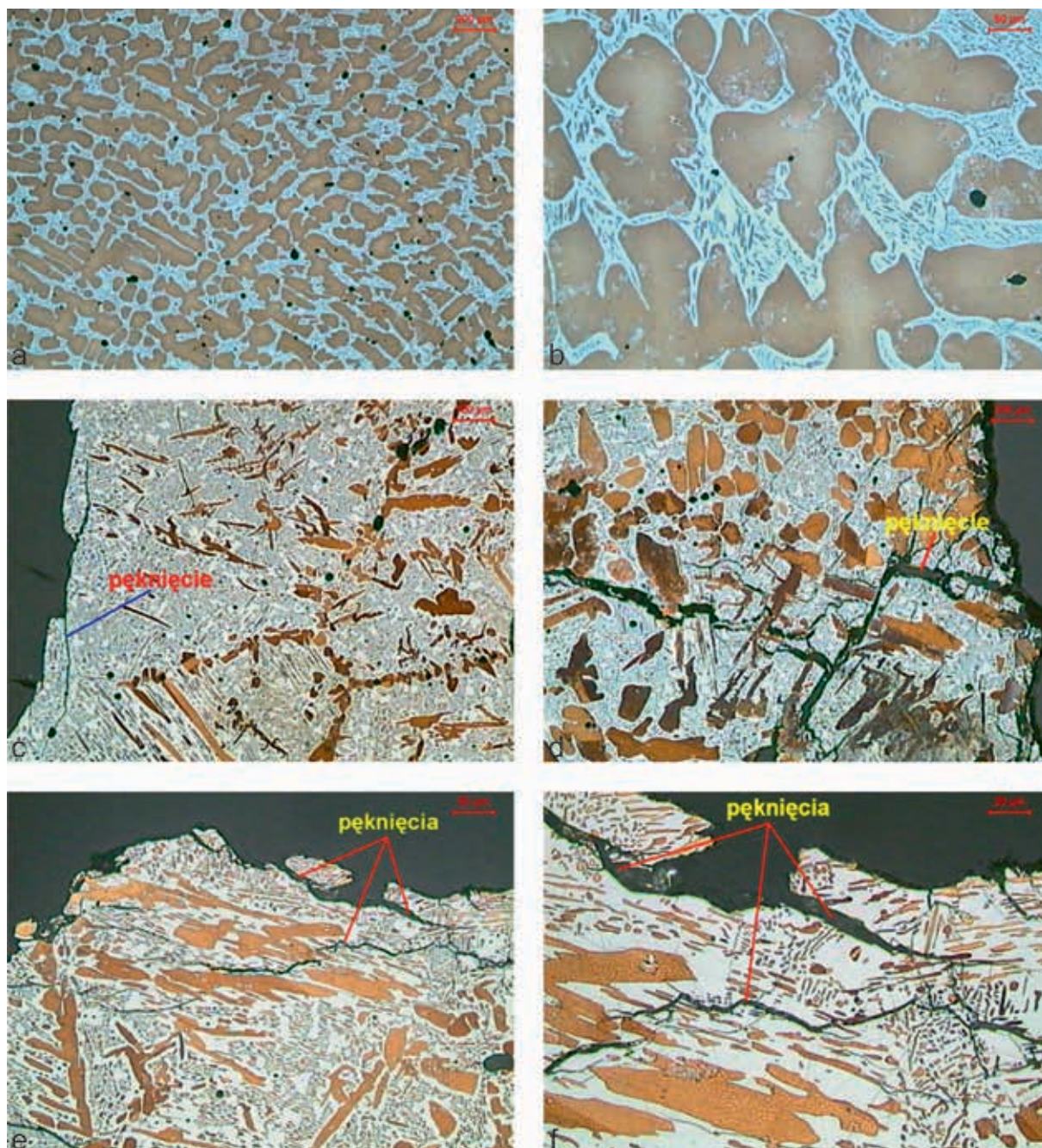
**Ryc. 19.** Dzwon Zygmunt. Katedra Wawelska w Krakowie.  
Fot. M.J. Biborski

### KONSERWATORSKIE BADANIA METALOGRAFICZNE DZWONU ZYGMUNT

Kolejnym przykładem badań archeometalograficznych, tym razem próbek z metalu kolorowego, są przeprowadzone analizy dzwonu Zygmunt na Wawelu (ryc. 19). Odlany z brązu przez ludwisarza Hansa Behema z Norymbergii w 1520 roku w Krakowie dzwon Zygmunt zamilkł pod koniec 2000 roku na ponad 3 miesiące, gdy pękło jego stalowe serce. Kilkakrotnie wcześniejsze udary spowodowały, że po licznych konsultacjach i przeprowadzonych badaniach zdecydowano się na wykonanie repliki starego serca, które obecnie pracuje już od 20 lat. Stare serce spoczęło natomiast u podnóża wieży zygmuntowskiej.

Korzystając z nadarzającej się okazji, że dzwon został pozbawiony serca i nie mógł dzwonić, badaniom poddano także ważyący prawie 10 ton sam kielich dzwonu. Ich celem było m.in. stwierdzenie, na ile metal w trakcie kilkusetletniego dzwonienia podlegał nie tylko procesom korozji powierzchniowej, skutkującej wytworzeniem się warstwy zielonkawej, szlachetnej patyny, ale – co znacznie ważniejsze – czy nie wykazuje on śladów korozji wewnętrznej, tzw. międzykrystalicznej. Ponadto zaplanowano wykonanie analiz składu chemicznego metalu, które miały także dać odpowiedź, czy w stopie znajdują się domieszki metali szlachetnych takich jak złoto i srebro. Zostały więc pobrane próbki z dwóch dostępnych miejsc dzwonu. Jedna z samej góry, tj. z korony, a druga z dolnej krawędzi, tj. z tzw. pierścienia odsercowego (Biborski 2021: 58-59). Mechanicznie wykonane zglądy zostały poddane obserwacjom metalograficznym pod mikroskopem świetlnym. Wykazały one, że dzwon został odlany z brązu jednostopowego tj. stopu miedzi i cyny (Cu-Sn), przy czym rozkład tych metali nie we wszystkich miejscach jest równomierny (Biborski i in. 2002: 255; Biborski 2021: 97). Obraz próbki z korony wykazuje ok. 19% cyny (faza jasna eutektoid  $\alpha + \delta$ ) i 81% miedzi (faza ciemna  $\alpha$  – bogata w miedź) (ryc. 20a-b). Znacznie więcej cyny zaobserwowano w próbce z dolnej części dzwonu, w eutektoidzie ( $\alpha + \delta$ ), zwłaszcza tuż przy jego dolnej krawędzi nawet ponad 30%. Ta znacząca różnica wynika ze zjawiska tzw. likwacji, występującej podczas procesu stygnięcia odlewu. Zjawisko to, zwane też segregacją, wynika z różnicy temperatur krzepnięcia poszczególnych składników stopu, w tym przypadku brązu, w którym szybciej krzepnie miedź o wyższej temperaturze topnienia, a jeszcze płynna cyna, o niższej temperaturze topnienia, siłą grawitacji płynie ku dołowi. Zwiększona ilość cyny powoduje większą twardość stopu, ale też większą jego kruchość (ryc. 20c-f). W efekcie pierwotny ostry kształt krawędzi nowego dzwonu przy zwiększonej kruchości metalu spowodował, że pod wpływem drgań powstałych podczas dzwonienia, nastąpiły bardzo dobrze widoczne, drobne pęknięcia i wykruszenia metalu na całym obwodzie kielicha. Należy pamiętać, że proces wykruszania się krawędzi na skutek silnych drgań będzie samoistnie postępował, aż do momentu jej wyoblenia i może postępować przez kolejne setki lat. Jednak nie mają





**Ryc. 20.** Mikrostruktury Dzwonu Zygmunt: a-b mikrostruktura dzwonu przy koronie a – faza jasna ( $\alpha + \delta$ ), bogata w cynę; b – faza ciemna ( $\delta$ ), bogata w miedź; c-f mikrostruktura przy powierzchni próbki pobranej z wieńca Dzwonu Zygmunta, z widocznymi pęknięciami. Pęknięcia powstają i rozprzestrzeniają się w fazie jasnej tj. eutektoidzie ( $\alpha + \delta$ ), faza ta jest bardzo twarda i krucha (zawiera dużo cyny). Fot. J. Stępiński

one przy tak wielkiej masie dzwonu żadnego istotnego wpływu na jego stan i dźwięk. Podobne zjawisko występuje także w przypadku innych dzwonów (ryc. 21). Natomiast po wykonanych badaniach archeometalograficznych w strukturze metalu, poza widocznymi i nielicznymi czarnymi wtrąceniami

niemetalicznymi, które nie mają wpływu na ogólny stan metalu, nie zaobserwowano korozji, zwłaszcza wspomnianej wyżej międzykrystalicznej, co daje nam pewność, że Zygmunt w dalszym ciągu jest w bardzo dobrej kondycji i będzie grał swoim pięknym basem w tonacji Fis, w oktawie wielkiej.



**Ryc. 21.** Wykruszenia na krawędzi kielicha dzwonu Zygmunta. Fot. M.J. Biborski

Bardzo dokładna analiza składu chemicznego, przeprowadzona w spektrometrze fluorescencyjnym typu MIDEX wykazała także niewielką obecność w stopie metalu takich pierwiastków śladowych, jak m.in. arsen, antymon, ołów, fosfor i cynk. Nie stwierdzono natomiast domieszki w postaci srebra, a tym bardziej złota, co sugerowały liczne przekazy i legendy. Zatem wynik wykonanej analizy podważa piękne opowieści o srebrnej strunie wrzuconej do tygla z roztopionym metalem, aby dzwon pięknie dzwonił, a także o dodanych do stopu srebrach króla Zygmunta Starego. Nie ma też śladu po złotych pierścieniach ochoczo wrzucanych przez królewskie dwórki. Nie jest też prawdą, że dzwon został odlany z armat zdobytych na Wołochach pod Obertynem. Przede wszystkim bitwa ta odbyła się w 1531 r., a więc 11 lat po odlaniu dzwonu. Ponadto, jak wykazały metalograficzne badania różnych armat z XVI w., proporcje poszczególnych składników stopów, są nieco inne niż zwykle stosowane były przy odlewaniu dzwonów (Piaskowski 1981: 142-145).

## PODSUMOWANIE

Z przedstawionej pokrótce problematyki dotyczącej szeroko pojętych badań archeometalurgicznych

wynika, że dziedzina ta szybko rozwija się m.in. dzięki coraz częstszym kontaktom z naukami ścisłymi, takimi jak np. fizyka, chemia, mineralogia itp. Dotyczy to zwłaszcza zastosowania nowoczesnego instrumentarium, które pozwala nam uzyskiwać szybko i w sposób precyzyjny wszelkie potrzebne do interpretacji naukowej wyniki z przeprowadzonych analiz. Ponadto uzyskane dane mogą być przetwarzane i przekazywane innym ośrodkom badawczym w celu porównania i niekiedy też weryfikacji. Dzięki temu pozyskana baza badawcza znacznie bardziej poszerza naszą wiedzę o cywilizacyjnym rozwoju i postępie technicznym społeczeństw pradziejowych. Zaprezentowane przykłady badań archeometalograficznych potwierdzają możliwości ich wykorzystania jako źródła do odtwarzania danych aspektów kultury i historii społeczności zamieszkujących w epoce żelaza nasze ziemie czy też inne obszary Europy. W tym zakresie wykazano np. daleko idące możliwości do przeprowadzenia identyfikacji ośrodków produkcji wyrobów żelaznych na podstawie wypracowanych kryteriów technologiczno-surowcowych oraz np. wykorzystanie tego rodzaju badań przy pracach konserwatorskich.



## LITERATURA

- Belaiew, N.T. 1918. Damascene Steel. *The Journal of the Iron and Steel Institute* 97: 417–437.
- Biborski, M. 1994a. Römische Schwerter mit Verzierung in Form von Figürlichen Darstellungen und symbolischen Zeichen, (w:) C. von Carnap-Bornheim (red.), *Beiträge zu römischer und barbarischer Bewaffnung in den ersten vier nachchristlichen Jahrhunderten, Marburger Kolloquium 1994*. Lublin-Marburg, 109–135.
- Biborski, M. 1994b. Typologie und Chronologie der Ringknaufschwerter, (w:) J. Tejral, A. Stuppner, H. Friesinger (red.), *Markomannenkriege – Ursachen und Wirkungen*. Brno, 85–97.
- Biborski, M. 2017. Einige Bemerkungen zum Auftreten und den Identifizierungsmöglichkeiten romischer Schwerter, (w:) J. Andrzejowski, C. von Carnap-Bornheim, A. Cieśliński, B. Kontny (red.), *Orbis barbarorum. Studia ad archaeologiam Germanorum et Baltorum temporibus Imperii Romani pertinentia Adalberto Nowakowski dedicate. Monumenta archaeologica barbarica, Series Gemina VI*. Warszawa, 309–325.
- Biborski, M. 2018. Rola dziweru określanego często mianem stali damasceńskiej, w historycznej broni białej, (w:) M. Taborska (red.), *Między nauką a praktyką. Szable w dłoń! Szermierka szabłą jako polskie dziedzictwo narodowe*. Kraków, 74–87.
- Biborski, M. 2021. *Dzwoniąc Zygmuntem*. Kraków.
- Biborski, M., Ilkjaer, J. 2006a. Illerup Ådal. Die Schwerter. 11 *Textband*. Århus.
- Biborski, M., Ilkjaer, J. 2006b. Illerup Ådal. Die Schwerter. 12 *Katalog, Tafeln und Fundlisten*. Århus.
- Biborski, M., Kaczanowski, P. 1989. Zur Identifizierung römischer Schwertimporte im Lichte metallographischer Untersuchungen, (w:) R. Pleiner (red.), *Archaeometallurgy of Iron 1967-1987. Symposium (Libice 1987)*. Prag, 379–385.
- Biborski, M., Kaczanowski, P., Kędzierski, Z., Stępiński, J. 1982. Metallographische Untersuchungen als Kriterium einer Identifikation römischer Schwerter, (w:) *Ancient iron manufacture centres in northern central Europe. Archaeologia Interregionalis III*. Warszawa-Kraków, 65–98.
- Biborski, M., Kaczanowski, P., Kędzierski, Z., Stępiński, J. 2007. Metallographische Untersuchungen der zwei- und einschneidigen Schwerter vom Gräberfeld der Przeworsk-Kultur in Oblin, (w:) K. Czarnecka (red.), *Oblin. Ein Gräberfeld der Przeworsk-Kultur in Südmaschien*. Warszawa, 131–146.
- Biborski, M., Kędzierski, Z., Stępiński, J. 2002. Konserwatorskie analizy metalograficzne pękniętego serca dzwonu Zygmunta. *Studia Waweliana* 9/10: 251–261.
- Biborski, M., Stępiński, J. 2014. Materiały do poznania metalurgii żelaza z okresu rzymskiego, (w:) R. Madyda-Legutko, J. Rodzińska-Nowak (red.), *Honoratissimum assensus genus est armis laudare. Studia dedykowane Profesorowi Piotrowi Kaczanowskiemu z okazji siedemdziesiątej rocznicy urodzin*. Kraków, 263–276.
- Biborski, M., Stępiński, J., Żabiński, G. 2009. Nowe badania nad Szczerbcem – mieczem koronacyjnym Królów Polskich. *Studia Waweliana* 14, 235–252.
- Biborski, M., Stępiński, J., Żabiński, G. 2011. Szczerbiec (The Jagged Sword) – The Coronation Sword of the Kings of Poland. *Gladius* 31, 93–148.
- Biborski, M., Stępiński, J., Żabiński, G. 2013. Szczerbiec-Koronacyjny mecz Polskich Koroljey (Rezultaty Issledowanija). *Istorija Orużija. Almanach* 8-9: 83–92.
- Bielenin, K. 1983. Żelazo, (w:) J. Kozłowski, S.K. Kozłowski (red.), *Człowiek i środowisko w pradziejach*. Warszawa, 153–168.
- Bielenin, K. 1992. *Starożytne górnictwo i hutnictwo żelaza w Górach Świętokrzyskich*. Kielce.
- Bielenin, K. 2002. Kilka dalszych uwag dotyczących starożytnego górnictwa świętokrzyskiego, (w:) S. Orzechowski (red.), *Hutnictwo świętokrzyskie oraz inne centra i ośrodki starożytnej metalurgii żelaza na ziemiach polskich*. Kielce, 11–25.
- Buchwald, V.F. 2005. *Iron and steel in ancient times*. The Royal Danish Academy of Sciences and Letters. Historisk-filosofiske Skrifter 29. Copenhagen.
- Coghlan, H.H. 1956. *Notes on Prehistoric and Early Iron in the Old World*. Oxford.
- Godfrey, E.G., van Nie, M. 2004. A Germanic ultrahigh carbon steel punch of the Late Roman-Iron Age. *Journal of Archaeological Science* 31: 1117–1125.
- Kaczanowski, P. 2006. 50 lat badań metaloznawczych zabytków kultury przeworskiej. Komentarz archeologa, (w:) M. Orzechowski, I. Szeliga (red.), *50 lat badań nad starożytnym hutnictwem świętokrzyskim*. Archeologia – Metalurgia – Edukacja. Kielce, 131–134.
- Kędzierski, Z., Stępiński, J. 2006. Metaloznawstwo żelaza z okresu rzymskiego na ziemiach polskich, (w:) M. Orzechowski, I. Szeliga (red.), *50 lat badań nad starożytnym hutnictwem świętokrzyskim*. Archeologia-Metalurgia-Edukacja. Kielce, 175–195.
- Piaskowski, J. 1965. Niektóre dziwerowane miecze na ziemiach Polski. *Z Otchłani Wieków* 31(1): 36–39.
- Piaskowski, J. 1970. O pochodzeniu mieczy rzymskich występujących na ziemiach polskich. *Z Otchłani Wieków* 36(1): 60.
- Piaskowski, J. 1974. O stali damasceńskiej. *Monografie z Dziejów Nauki i Techniki* 92. Wrocław-Warszawa-Kraków-Gdańsk.
- Piaskowski, J. 1981. *Technologia dawnych odlewów artystycznych*. Kraków.
- Pleiner, R. 2000. *Iron in Archaeology the European Bloomery Smelters*. Praha.
- Pleiner, R. 2006. *Iron in Archaeology. Early European Blacksmiths*. Praha.

- Pliniusz Starszy 1961. *Historia Naturalna* (wybór). Przekład i komentarz I., T. Zawadzcy. Wrocław.
- Prakash, B. 1991. Metallurgy of iron and steel making and blacksmithing in ancient India. *Indian Journal of History of Science* 26(4): 353–371.
- Radwan, M. 1961. O niektórych metodach badań nad starożytnym hutnictwem żelaza w Polsce. *Kwartalnik Historii Kultury Materialnej* 9(4), 779–795.
- Radwan, M. 1963. *Rudy, kuźnice i huty żelaza w Polsce*. Warszawa.
- Sim, D. 1998. *Beyond the Bloom. Bloom refining and iron artifact production in the Roman world*. BAR International Series 725, Oxford.
- Stępiński, J. 2012. Wpływ fosforu na mikrostrukturę starożytnych wyrobów żelaznych. Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków (niepublikowana praca doktorska).
- Tylecote, R.F. 1976. *A history of Metallurgy*. London
- Tylecote, R.F., Gilmour, B.J.J. 1986. *The Metallography of Early Ferrous Edge Tools and Edged Weapons*. BAR British Series 155. Oxford.
- Wadsworth, J., Sherby, O. 1980. On the Bulat – Damascus steel Revisited. *Progress in Materials Science* 5: 35–68.
- Wendorf, Z. 1976. *Metalożnawstwo*. Warszawa.
- Wesołowski, K. 1974. *Metalożnawstwo i obróbka cieplna*. Warszawa.
- Williams, A. 2012. *The sword and the crucible*. History of Warfare 77. Leiden-Boston.







# Mikroskopy stosowane w archeologii

Piotr Gunia, Ewa Lisowska, Aldona Kurzawska

---

Zastosowanie różnych technik mikroskopowych zarówno w badaniach zabytków archeologicznych, jak i w badaniach dawnego środowiska naturalnego ma na celu uzyskanie powiększonego obrazu niewielkich obiektów i interesujących nas detali. W wielu dziedzinach wspierających badania archeologiczne, w laboratoriach, stosowane są urządzenia optyczne pozwalające dokładnie zobrazować badane przedmioty, próbki czy preparaty. Dzięki temu uzyskujemy w skali mikroskopowej różne informacje, np. o kształcie, rozmiarze, strukturze czy morfologii i topografii badanych obiektów. Często umożliwiają one zarówno identyfikację interesującego nas materiału, jak i rozpoznanie cech specyficznych dla badanych artefaktów. Mikroskopy wykorzystywane do specjalistycznych badań archeologicznych ze względu na zastosowany rodzaj promieniowania i metody obrazowania możemy podzielić na dwa podstawowe rodzaje. Są to mikroskopy optyczne i elektronowe (Bartoszek i Rosowski 2017).

## MIKROSKOPY OPTYCZNE

Mikroskopy optyczne/światłne to jedno z podstawowych sprzętów laboratoryjnych, umożliwiające sprawną pracę przy obserwacji i identyfikacji

obiektów oraz wykonanie niezbędnych mikropomiarów. Wyposażone w aparat, kamerę oraz – w wersji cyfrowej – podłączone do komputera pozwalają na bardzo sprawną i szybką dokumentację obserwowanych obiektów oraz ich szczególnych cech.

Najważniejszymi elementami mikroskopu są obiektyw i okular. Obserwowany obiekt zostaje powiększony poprzez okular i przez obiektyw. Wielkość powiększenia to iloczyn powiększeń tych dwóch elementów, a zależy przede wszystkim od zdolności rozdzielczej danego mikroskopu, którą ograniczają parametry samego obiektywu. Parametry określonego mikroskopu dostosowujemy zarówno do obserwowanych obiektów, jak i typu wykonywanej pracy. Kluczowe są tu: rodzaj zastosowanych powiększeń i ich zakres, głębokość ostrości (stosunek powiększenia do rozdzielczości), apertura numeryczna obiektywu, jakość zastosowanej optyki oraz rodzaj wybranego oświetlenia. Współczesne mikroskopy posiadają elementy sterowane za pomocą zaawansowanej elektroniki. Dodatkowe możliwości zostały uzyskane również przez zastosowanie detektorów cyfrowych, dzięki którym obraz poddawany jest obróbce graficznej, a jego jakość uzależniona jest od oprogramowania i parametrów komputera sterującego mikroskopem.



**Ryc. 1.** a – mikroskop stereoskopowy w Laboratorium Analiz Mikroskopowych w Archeologii ArcheoMikroLab na Wydziale Archeologii UAM; b - mikroskop laboratoryjny/biologiczny w Ośrodku Studiów Pradziejowych i Średniowiecznych Instytutu Archeologii i Etnologii PAN w Poznaniu. Fot. A. Kurzawska

## MIKROSKOP STEREOSKOPOWY

Mikroskop stereoskopowy, zwany często binokulem, pozwala na obserwację obiektów w świetle odbitym (ryc. 1a). Jest to podstawowy mikroskop stosowany w bardzo wielu dyscyplinach opisywanych w tym tomie (np. w archeobotanice, dendroarcheologii, archeoentomologii, archeomalakologii, badaniu ceramiki czy tekstyliów).

Jakość tego sprzętu uzależniona jest przede wszystkim od wyżej wspomnianych parametrów, które powinny być dostosowane do wielkości obserwowanych obiektów. W przypadku tego mikroskopu bardzo istotna jest tzw. odległość robocza. Jest to odległość między przednią soczewką obiektywu a najwyższym punktem obiektu, kiedy jest on obserwowany. Zwykle odległość ta zmniejsza się wraz ze wzrostem powiększenia. Odległość robocza decyduje o użyteczności mikroskopów stereoskopowych zwłaszcza w przypadku oglądania obiektów, którymi poruszamy i które obserwujemy z różnych stron. Tego typu mikroskop

w wersji podstawowej ma zazwyczaj niewielkie rozmiary i jest wygodnym narzędziem badawczym, a zakres jego powiększeń umożliwia wstępną obserwację i weryfikację badanych próbek i obiektów. Przykładowo, mogą to być: drobne szczątki roślin i zwierząt, odciski ziarniaków, odciski tkanin, włókien na ceramice, ślady pozostałości substancji organicznych na zabytkach. Weryfikacja za pomocą binokularu służy też selekcji próbek do dalszych analiz. Mikroskop stereoskopowy, który jest wyposażony dodatkowo w system dokumentacji obrazu (kamerę czy aparat cyfrowy), jest przeznaczony do sprawniej rejestracji obserwowanych obiektów i stosowany jest również w bardzo wielu dziedzinach nauki (nie tylko w archeologii).

## MIKROSKOP LABORATORYJNY

Za pomocą biologicznych mikroskopów laboratoryjnych w świetle przechodzącym obserwowane są cienkie, przezroczyste preparaty biologiczne





**Ryc. 2.** Mikroskop cyfrowy Keyence VHX-7000 w Laboratorium Analiz Mikroskopowych w Archeologii ArcheoMikroLab na Wydziale Archeologii UAM. Fot. A. Kurzawska

(ryc. 1b). Są one wcześniej odpowiednio przygotowywane i znajdują się na szkiełku podstawowym, które umieszcza się na stoliku roboczym mikroskopu. Preparaty można obserwować w różnych powiększeniach, w zależności od wybranego obiektywu. Obiektywy umieszczone są na odpowiednim uchwycie (tzw. rewolwerowym), który umożliwia szybką ich zmianę w celu zmiany powiększenia obserwowanego obiektu znajdującego się w preparacie. Tego typu mikroskopy wykorzystywane są najczęściej w badaniach preparatów biologicznych zawierających makroskopowo niewidoczne szczątki roślin oraz ziarna pyłku (por. Kołaczek i in. w tym tomie; Moskal-del Hoyo, w tym tomie).

## MIKROSKOPY CYFROWE

Osobną kategorią mikroskopów świetlnych stanowią obecnie mikroskopy cyfrowe, które dają szerokie możliwości obserwacji. Wśród nich mamy

bardzo dużą różnorodność związaną z jakością uzyskanego obrazu, od prostych i małych urządzeń podłączanych do komputera, o stosunkowo niewielkich powiększeniach (często wykorzystywanych w terenie czy do szybkich kontrolnych obserwacji) poprzez zaawansowane technologicznie mikroskopy z możliwością obserwacji obiektów w świetle odbitym lub przechodzącym, z szerokim zakresem powiększeń, skanowaniem 2D i 3D, z pełną głębią ostrości oglądanego obszaru, możliwością łączenia obrazów, powiększeniach rzędu 2500× i wieloma innymi zaawansowanymi funkcjami w jednym urządzeniu (ryc. 2). Zdecydowaną zaletą tych mikroskopów jest połączenie bardzo dobrej jakości obrazu uzyskanego w świetle odbitym lub przechodzącym z ich natychmiastową dokumentacją w postaci wykonanych cyfrowo obrazów, na które dodatkowo można nanieść pomiary i dokonać ich zmian, jak w każdym pliku graficznym. Praca z tego typu mikroskopami pozwala na szybką i wysokiej jakości analizę wizualną oglądanych obiektów.

## MIKROSKOP METALOGRAFICZNY

To mikroskop wykorzystywany do badań nieprzezroczystych próbek w świetle odbitym, w jasnym polu. Wyposażony jest w stolik roboczy oraz obiektywy osadzone na uchwycie rewolwerowym. Używany jest do badania struktury metali i ich stopów (z wykorzystaniem tzw. zgładów metalograficznych), wykrywania mikropęknięć w metalach, dokonywania pomiarów, obliczania udziału fazowego, obserwacji wrostków, wtrąceń, szaz i wielu istotnych, z punktu widzenia metalurgii, cech materiałowych (por. Biborski, w tym tomie). Wykorzystywany jest również w badaniach traseologicznych, np. krzemieni i zabytków wykonanych z kości lub poroża (por. Pyżewicz, w tym tomie) oraz oznaczania węgli drzewnych.

## MIKROSKOP POLARYZACYJNY

To mikroskop wykorzystywany najczęściej w badaniach petrograficznych, ale również służy identyfikacji włókien w badaniach tekstyliów (test Herzoga) (por. Cybulska i Dążkowska, w tym tomie) oraz identyfikacji skrobi (ryc. 3). Analizy można prowadzić tu w świetle przechodzącym lub odbitym. Istotnymi częściami tego mikroskopu są dwie płytki umożliwiające uzyskanie wiązki światła spolaryzowanego, czyli tzw. nikole, z których jedna (polaryzator) znajduje się przed badanym preparatem, a druga (analyzer) na drodze promieni świetlnych bezpośrednio kierowanych do oka obserwatora.

Do innych elementów wyposażenia mikroskopu polaryzacyjnego należą: stolik obrotowy z noniusem i skalą umożliwiającą odczyt kątów w zakresie od  $0^\circ$  do  $360^\circ$ , zestaw soczewek do uzyskiwania światła zbieżnego (badania konoskopowe) oraz okular z podziałką wykorzystywany do pomiarów wielkości ziaren (kryształów) po uprzedniej jego kalibracji za pomocą tzw. płytki mikrometrycznej. Niektóre mikroskopy wyposażone są w specjalny uchwyt (tzw. stolik krzyżowy) umożliwiający zmianę położenia obserwowanego preparatu jedynie w dwóch prostopadłych do siebie kierunkach (Bolewski i Jaskólski 1951).

Obserwacje mikroskopowe skał w świetle przechodzącym wykonywane są pod różnymi powiększeniami. Tradycyjnie przyjętą praktyką jest badanie preparatu najpierw w świetle zwykłym (niespolaryzowanym,



**Ryc. 3.** Mikroskop polaryzacyjny w Instytucie Nauk Geologicznych Uniwersytetu Wrocławskiego. Fot. P. Gunia

tylko przy włączonym analizatorze, przy jednym nikolu), a następnie w świetle spolaryzowanym (po wprowadzeniu w bieg promieni świetlnych polaryzatora i analizatora, tj. po skrzyżowaniu obu nikoli). Podczas obserwacji mikroskopowej z użyciem tylko analizatora (nikole równoległe) określa się: pokrój, sposób wykształcenia i wielkość kryształów (ziaren) minerałów, wielkość kątów pomiędzy śladami płaszczyzn łupliwości lub ścianami kryształów, barwę i pleochroizm, przybliżone wartości współczynnika załamania światła (oznaczane np. metodą reliefu lub smugi Beckego) i inne (Heflik i Parachoniak 1979).

Pod skrzyżowanymi nikolami oznacza się: przynależność minerału do grupy optycznej (izotropowe, anizotropowe), sposób wygaszania światła przez kryształ (proste, skośne, symetryczne), ocenę wartości dwójłomności minerału na podstawie barw interferencyjnych, szczegóły morfologii kryształów (ziaren) oraz rodzaj i charakter zbliżniaczeń w kryształach (zrosłe, przerosłe, polisintetyczne itp.) oraz inne (Heflik i Parachoniak 1979). Szczegółowe dane dotyczące cech morfologiczno-optycznych minerałów skałotwórczych oraz kryteriów klasyfikacji odmian skał według kryteriów Międzynarodowej

Unii Nauk Geologicznych (ang. *International Union of Geological Sciences*, IUGS) można znaleźć w literaturze specjalistycznej poświęconej tym zagadnieniom (Borkowska i Smulikowski 1973; Ryka i Maliszewska 1982; Manecki i Muszyński 2008).

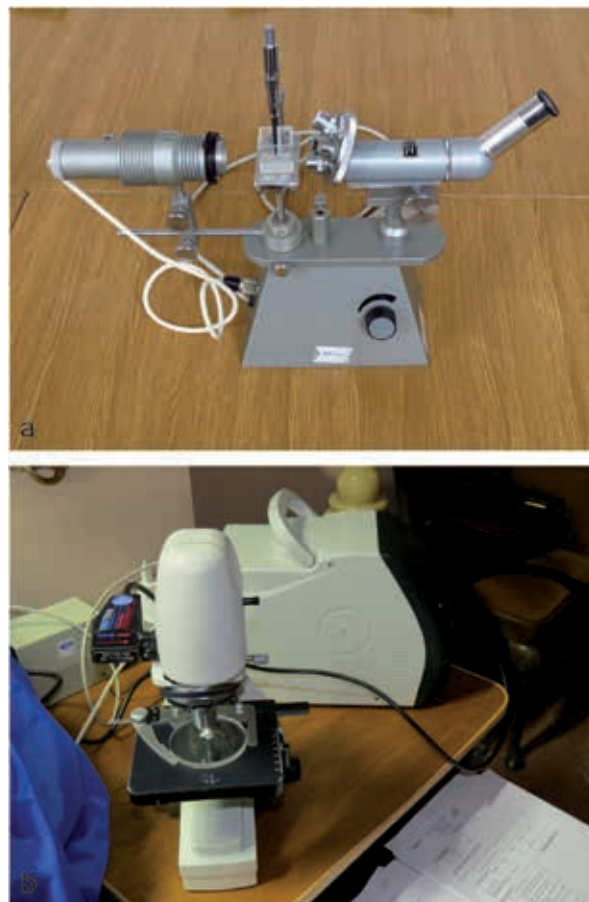
### MIKROSKOP GEMMOLOGICZNY

Mikroskopowe badania gemmologiczne prowadzone są w celu oznaczenia cech jakościowych kamieni szlachetnych i ozdobnych (ryc. 4a). Pozwalają one na odróżnienie naturalnych kamieni jubilerskich od naśladownictw wykonanych ze szkła lub produktów otrzymanych drogą syntezy. Mikroskopy wykorzystywane do badań gemmologicznych mają pionowy lub poziomy układ osi optycznej. W skład dodatkowego wyposażenia tych instrumentów wchodzi zwykle: specjalne uchwyty nożycowe umożliwiające zmianę położenia kamienia jubilerskiego podczas badań, lampa halogenowa emitująca promieniowanie w dwóch zakresach ultrafioletu (SUV i LUV) przeznaczona do badań luminescencji, naczynie ze szkła żaroodpornego z cieczą immersyjną (np. jodek metylenu), w którym po umieszczeniu wewnątrz kamienia możliwe jest dokładne oznaczanie cech morfologiczno-optycznych wrostków i inkluzji kamieni jubilerskich (Gunia 1996). Dodatkowymi akcesoriami tych mikroskopów są również filtry służące do badań w świetle spolaryzowanym, okular z filtrem dychroskopowym do badań pleochroizmu oraz rurkowy spektroskop służący do badań widm absorpcyjnych kamieni jubilerskich w zakresie widma widzialnego światła białego. Podczas prowadzenia badań spektralnych jest on często umieszczany w miejscu okularu (Webster i Anderson 1983).

Niektóre mikroskopy gemmologiczne mają również oprzyrządowanie umożliwiające oświetlenie badanych okazów w różnych kierunkach lub odpowiednie przesłony do uzyskania częściowego oświetlenia (np. potrzebnego do badań metodą ciemnego pola).

Wśród badań mikroskopowych luźnych oszlifowanych kamieni jubilerskich można wyróżnić:

- badania własności optycznych (przynależności do grupy optycznej, obecności anomalii optycznych, pleochroizmu, określenia charakteru optycznego na podstawie figur konoskopowych itp.);
- badania charakteru wrostków i inkluzji (rodzaj inkluzji, fazowość, naturalne – syntetyczne,



**Ryc. 4.** Mikroskop gemmologiczny w Instytucie Nauk Geologicznych Uniwersytetu Wrocławskiego (a). Mikroskop sprzężony ze spektrometrem Ramana przeznaczony do badań kamieni jubilerskich (zdjęcie ilustracyjne) (b). Fot. P. Gunia

ocena charakteru rozmieszczenia barwnika, charakteru mikropęknięć i ubytków związanych z poprawianiem jakości kamienia);

- wyznaczanie wartości współczynnika załamania światła (metodą immersyjną lub metodą pomiaru bezpośredniego; Webster 1976).

W zależności od potrzeb stosuje się różne techniki pracy na mikroskopie gemmologicznym. Najczęściej preferowane są obserwacje w świetle przechodzącym, kiedy światło przenika bezpośrednio przez kamień. W powiększonym obrazie mikroskopowym widoczne są wówczas: ciemne wrostki naturalne, pęcherzyki gazowe typowe dla szkła, mikropęknięcia i inne. Podczas prowadzenia badań metodą tzw. ciemnego pola, kiedy to część pola obserwacji jest słabiej oświetlona, można dostrzec drobne, nieprzezroczyste inkluzje. W przypadku badań w świetle rozproszonym (np. za pomocą matówki),



przedmiotem analiz mogą być struktury o strefowej zmienności zabarwienia (pasma i linie przyrostu w kamieniach naturalnych czy krzywoliniowe pasma przyrostu w kamieniach syntetycznych, „strugi” szklistej substancji w imitacjach z barwnego szkła i inne). Użycie tzw. matówki w badaniach za pomocą mikroskopu polaryzacyjnego polega na wprowadzeniu w bieg promieni świetlnych powyżej oświetlacza specjalnej płytki (ww. matówki), która pozwala na zmniejszenie intensywności oświetlenia preparatu, co finalnie stwarza możliwość lepszej obserwacji morfologii powierzchni ziaren i kryształów. W świetle skośnym lub odbitym bada się przebieg jakości szlifów kamieni i wad znajdujących się na jego powierzchni (np. rysy ze szlifowania, ubytki i pęknięcia) (Gunia 1996). Dzięki tej metodzie można również odczytywać inskrypcje znajdujące się na kamieniach w zabytkowych wyrobach jubilerskich, ślady traseologiczne powstałe podczas szlifowania kamieni czy wiercenia otworów w paciorkach (Gunia 2013).

Do innych, rzadziej wykorzystywanych technik mikroskopii gemmologicznej należą: oświetlenie punktowe światłem spolaryzowanym oraz oświetlenie w kierunku równoległym do górnej płaszczyzny oszlifowanego kamienia o szlifie fasetkowym (Gunia 1996).

## MIKROSKOPY ELEKTRONOWE

### Skaningowy mikroskop elektronowy

Skaningowa mikroskopia elektronowa (SEM) (ryc. 5) daje możliwość dokładnego obrazowania mikrostruktur powierzchniowych różnych obiektów o niewielkich rozmiarach (ryc. 6). Stosowana jest obecnie w wielu dziedzinach nauki. Badanie SEM polega na skanowaniu powierzchni próbki wiązką elektronów ukształtowaną przez układ mikroskopu. Dzięki odchyleniu i formowaniu wiązki elektronów przez cewki i magnetyczne soczewki otrzymujemy sygnał z powierzchni próbki, który dociera do detektora. Najważniejszymi częściami mikroskopu elektronowego są scyntylator i fotopowielacz. Pierwszy z nich przekształca energię elektronów wtórnych w impulsy świetlne, które w dalszej kolejności są wzmacniane przez fotopowielacz, następnie sygnał uzyskany z detektora steruje jasnością obrazu na monitorze

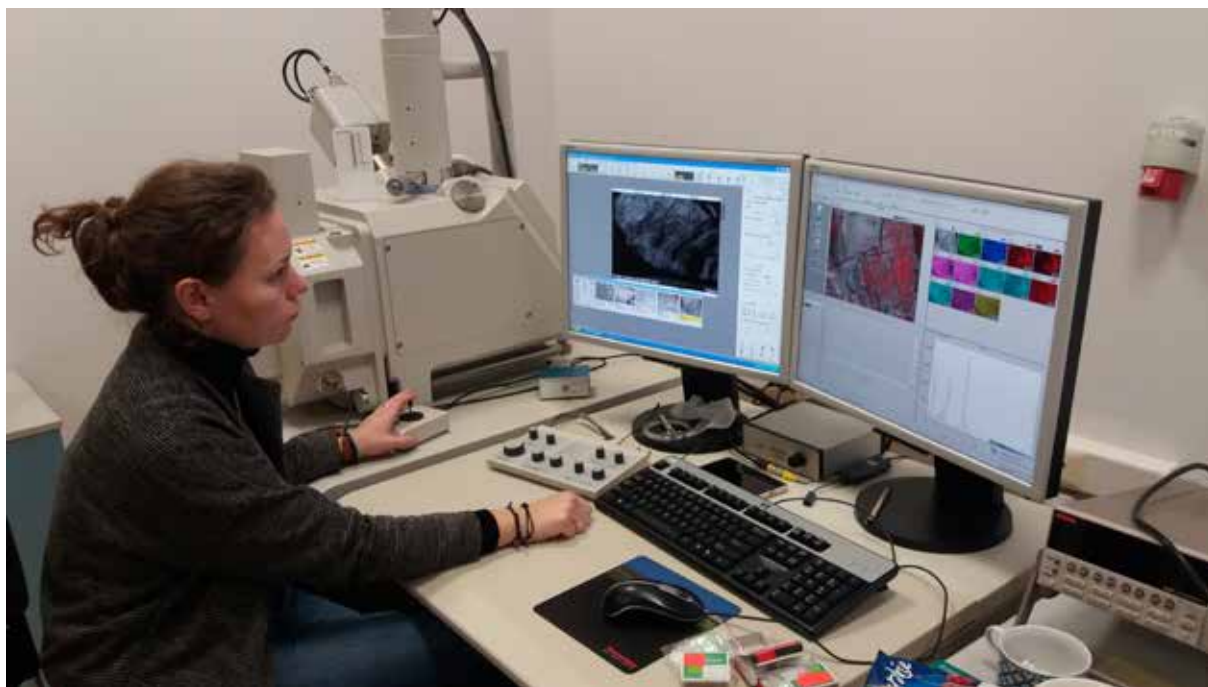
(Barbacki 2003). Konwencjonalny SEM wymaga obrazowania próbek w próżni, ponieważ atmosfera gazowa szybko się rozprzestrzenia i tłumi wiązki elektronów.

Z użyciem mikroskopu elektronowego badane są różne sygnały. Sygnał BSE (ang. *backscattered electrons*, BSE) to emisja elektronów wstecznie rozproszonych, co oznacza, że część elektronów wiązki pierwotnej ulega rozproszeniu wstecznemu (sprężyste rozpraszanie przez atomy próbki) blisko powierzchni próbki. Zdolność ta zależy od liczby atomowej ( $Z$ ) pierwiastków i wraz z jej wzrostem rośnie. W ten sposób można uzyskać informację na temat chemicznego zróżnicowania próbki (Wróbel i in. 2005).

Innego rodzaju sygnałem jest emisja od niskoenergetycznych elektronów wtórnych (ang. *secondary electrons*, SE). Wówczas to pozostałe elektrony wiązki pierwotnej absorbowane przez próbkę zostają rozproszone sprężysto w przypowierzchniowych warstwach atomów, tracąc swoją energię. Powoduje to emisję sygnału pochodzącego od niskoenergetycznych elektronów wtórnych (SE). Dzięki temu na ekranie monitora pojawia się dokładny, trójwymiarowy obraz topografii powierzchni próbki, co sprzyja uzyskaniu dużej głębi ostrości oraz pozwala na wykonanie dokładnych pomiarów wielkości różnych obiektów, ocenę cech morfologii, porowatości oraz czasem grubości w zakresie powiększeń od 50 do 50 000 razy (Słowik 2012).

Mikroskopia skaningowa daje też możliwość wykonania punktowych, ilościowych analiz składu chemicznego próbek. Służą do tego sygnały pochodzące od charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego emitowanego z powierzchni próbki. Wzbudzenie charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego następuje podczas „wybijania” elektronów z wewnętrznej powłoki (K, L, M) atomu próbki. Powstałe wtedy wolne miejsce po wybitym elektronie zajmowane jest przez elektron z powłoki o wyższej energii. Różnica energii elektronów między tymi dwoma poziomami powoduje powstanie promieniowania rentgenowskiego (elektromagnetycznego) w zakresie długości fali od 0,7 Å do 110 Å. W celu określenia stężenia pierwiastków w próbce dokonuje się porównania zakresu uzyskanego promieniowania ze wzorcem o ustalonym składzie chemicznym (Hałas i Szymański 1965).

Promieniowanie rentgenowskie służące do interpretacji składu chemicznego próbki może być wykrywane dwoma metodami mikroanalizy



**Ryc. 5.** Skaningowy mikroskop elektronowy na Wydziale Nauk Geograficznych i Geologicznych UAM. Fot. A. Kurzawska

rentgenowskiej. Pierwszym sposobem jest pomiar długości fali (ang. *wavelength dispersive spectrometry*, WDS), a drugim pomiar energii (ang. *energy dispersive spectrometry*, EDS lub *energy dispersive X-ray analysis*, EDX).

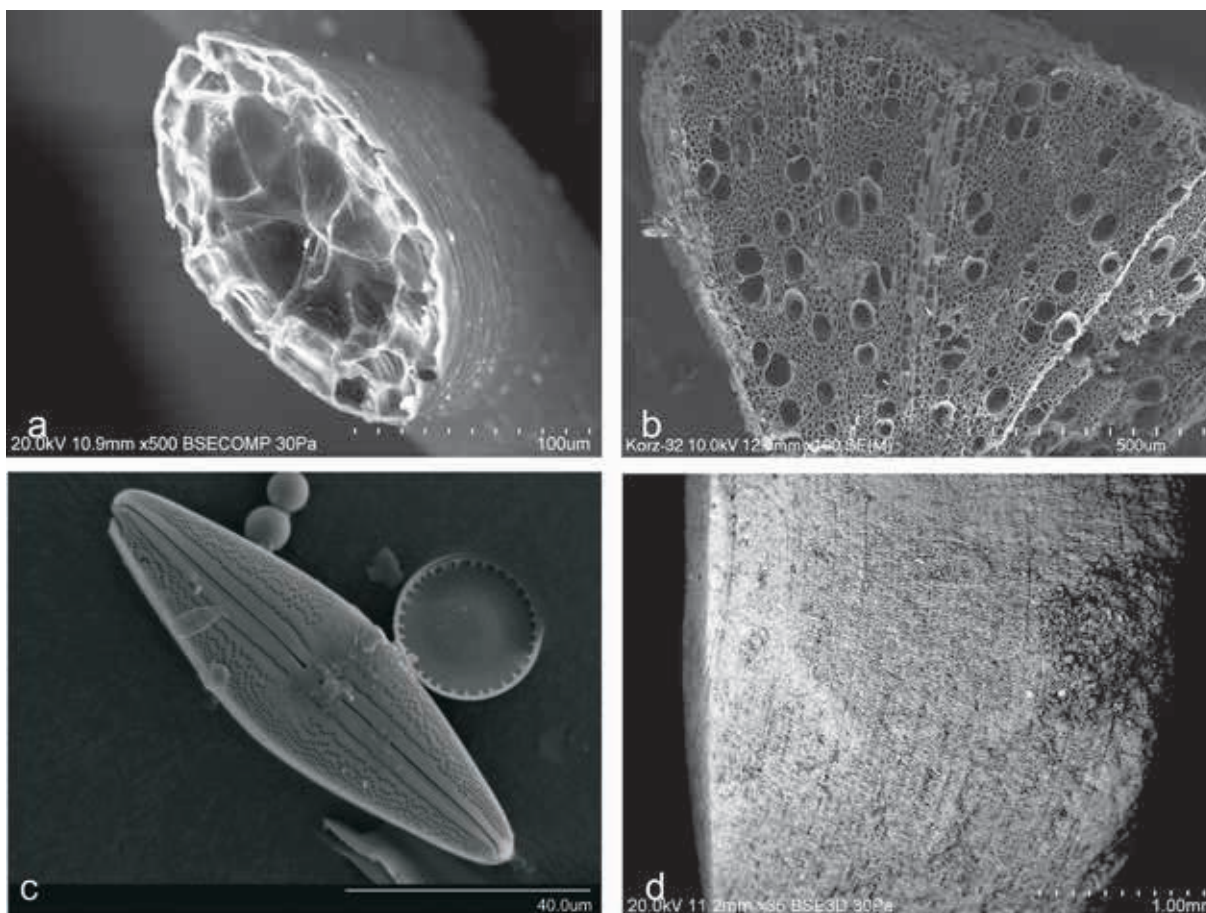
Do punktowych oznaczeń składu różnych zabytków najczęściej wykorzystuje się technikę EDS z uwagi na to, że ilościowe wyniki analiz danego punktu można otrzymać w kilkanaście sekund. Sprzyja temu odpowiednia kalibracja detektora, a uzyskane dane przetwarzane są w odpowiednim programie korekcyjnym mikroanalizy. Jest to technika szybsza, ale mniej dokładna niż dłuższe trwające pomiary WDS. Wyniki analiz wykonanych techniką SEM-EDS mogą być przedstawiane w formie wykresu widma energetycznego obrazującego wyniki analizy jakościowej pokazującego jakie pierwiastki znajdują się w próbce. Dane ilościowe z analiz zwykle są prezentowane w postaci tabel z kolumnami zawierającymi zawartości poszczególnych pierwiastków w % atomowych lub przeliczonych na 100% w formie tlenkowej (Słowik 2012). Zastosowanie odpowiednich algorytmów komputerowych pozwala też na przeprowadzenie analizy ilościowej i jakościowej: punktu, linii oraz wybranego obszaru (mapa rozkładu 2D) próbki. Analizę składu chemicznego próbek techniką EDS

można wykonać dla wszystkich pierwiastków o liczbie atomowej większej od liczby atomowej boru (Słowik 2012).

### Mikroskop katodoluminescencyjny

Obserwacja obiektów archeologicznych z wykorzystaniem mikroskopów CL opiera się na zjawisku katodoluminescencji. Jest to emisja światła przez ciała stałe w wyniku wzbudzenia ich strumieniem elektronów (Marshall 1988). W przypadku materiałów zabytkowych metoda ta stanowi uzupełnienie wyników badań z użyciem mikroskopu polaryzacyjnego. Dzięki obserwacji i interpretacji obrazów i widm CL można dostrzec cechy próbki, które są niewidoczne podczas zwykłej obserwacji petrograficznej w powiększeniu.

Interpretacja obrazów i widm CL w kontekście badań petrograficznych zabytków kamiennych jest szczególnie przydatna do: odtworzenia składu skał zawierających kryptokrystaliczne węglany w tle, rozpoznawania cech morfologii budowy kryształów (np. budowa zonalna, warstwowa lub sektorowa skałeni i niektórych minerałów akcesorycznych), ustalania pierwotnych cech teksturalnych skał klastycznych (uziarnienie, obtoczenie, rodzaje



**Ryc. 6.** Przykładowe mikrofotografie SEM: a – włos sarny, przekrój; b – gałązka *Rubus* sp. – jeżyny lub maliny, ze stanowiska wczesnośredniowiecznego w Korzkwi (VI-VII w.); c – okrywa okrzemki *Anomoeoneis sphaerophora* f. *costata* (Kützing) Schmid; d – paciorek z belemnitu, Stryjów, stan. 30. Zdjęcia (a), (c) i (d) wykonano SEM Hitachi S-3700N na Wydziale Nauk Geograficznych i Geologicznych UAM, zdjęcie (b) wykonano SEM Hitachi S-4700 w Instytucie Nauk Geologicznych Uniwersytetu Jagiellońskiego. Próbkę na zdjęciu (b) i (c) napyłono złotem. Fot. M. Mrozek-Wysocka (a, d), M. Moskal-del Hoyo (b), M. Rzodkiewicz (c)

wypełnienia w interstycjach szkieletu ziarnowe-go itp.) oraz charakteru spękań i zmian wtórnych w powłokach wietrzeniowych (Sikorska 2000; 2005; Richter i in. 2003).

Mikroskopowe badania katodoluminescencyjne mogą być również stosowane do wstępnych analiz dawnych malatur, pigmentów i materiałów wiążących. Nie bez znaczenia jest również użycie tej metody w przypadku badań zabytkowych kamieni szlachetnych i ozdobnych (Sikorska 2000). Poddane analizom CL substancje zabytkowe, świecą pod mikroskopem w różnokolorowych odcieniach. Przy stosowaniu katodoluminescencji warto szybko i sprawnie dokumentować obraz mikroskopowy, ponieważ w próbce zachodzi zjawisko „wyświecania” minerałów, które po dłuższej ekspozycji nie są już tak wyraźnie widoczne jak na początku.

### Mikroskop ramanowski

Bardzo perspektywiczną metodą mikroskopii dla badań archeometrycznych i petrograficznych jest mikrospektrometria ramanowska (ryc. 4b). Jest to spektroskopia polegająca na pomiarze promieniowania rozproszenia Ramana, czyli nieelastycznego rozpraszania fotonów. Może być stosowana zarówno do gazów, cieczy, jak i ciał stałych. Technika ta jest komplementarna do spektroskopii w podczerwieni. Warunkiem pojawienia się pasma ramanowskiego jest jednak konieczna zmiana polaryzowalności cząsteczki w czasie drgania normalnego.

Do wzbudzenia efektów rozproszenia służą laserowe źródła światła o niewielkiej mocy. W zależności od rodzaju badanej substancji (organiczne lub nieorganiczne) wykorzystywane są lasery emitujące



promieniowanie z zakresu widzialnego lub bliskiego nadfioletu o długościach fal: 780 nm, 633 nm, 532 nm i 473 nm.

W badaniach archeometrycznych, szczególnie petroarcheologicznych, wykorzystywane są ramanowskie mikroskopy konfokalne. Praca w trybie konfokalnym daje możliwość ogniskowania promieni lasera na różnej głębokości wewnątrz próbki i otrzymywanie informacji z wyznaczonej głębokości lub z kilku poziomów równocześnie (ang. *depth profiling*). Mikroskopy konfokalne w analizie widmowej umożliwiają rejestrację widm absorpcyjnych na określonym poziomie głębokości preparatu. Konfokalne mikroskopy ramanowskie stosuje się przeważnie do badań obiektów o budowie warstwowej i dzięki zastosowaniu tych urządzeń można określić widma wibracyjne każdej z badanych warstewek podczas jednego ustawienia urządzenia. Obecnie najczęściej stosuje się tę technikę w badaniach elementów elektronicznych składających się z napyłanych warstewek o różnym składzie (np. pamięci komputerowe, obwoły scalone). W archeologii można ten rodzaj analizy zastosować do badań poszczególnych warstw malarskich obrazów, zabytkowych fresków oraz do określenia sposobów złocenia i malowania np. ceramiki. W gemmologii metodę tą stosuje się dość powszechnie do określenia liczby faz i składu wrostków znajdujących się w kamieniach szlachetnych. Ważną zaletą tej metody jest możliwość badania struktury wewnętrznej przedmiotów bez ich uszkodzenia. Inny sposób analizowania obiektów polega na mapowaniu powierzchni próbki (ang. *mapping*), a następnie – dzięki zastosowaniu zautomatyzowanego stolika mikroskopowego – umożliwia rejestrację mapy poszczególnych widm wzbudzanych faz na zaznaczonym wcześniej obszarze.

Interpretacja wyników mikroskopowych badań ramanowskich polega na określeniu przesunięcia pików ramanowskich (w  $\text{cm}^{-1}$ ) oraz ich intensywności na uzyskanym spektrogramie. Następnie dane te przesyłane są w formie arkusza kalkulacyjnego do baz danych, z których otrzymujemy informację zwrotną o strukturze badanej substancji. Przykładowo, identyfikacja minerałów na podstawie interpretacji uzyskanych widm wibracyjnych odbywa się zwykle za pomocą programu CrystalSleuth, który sprawdza informacje w międzynarodowej

bazie wzorców RRUFF. Istnieją również dostępne specjalistyczne komputerowe bazy danych dotyczące widm wibracyjnych różnych substancji znajdujących w artefaktach podczas badań archeometrycznych.

W pracy Smitha i Clarka (2004) znalazły się informacje na temat baz danych dotyczących widm włókien roślinnych, pigmentów mineralnych i organicznych, współczesnych pigmentów syntetycznych oraz pigmentów stosowanych do barwienia szkliwa lub glazury. Archeologiczne bazy danych dotyczące substancji organicznych obejmują widma różnych rodzajów gum, wosków oraz lakierów, żywic oraz klejów i spoiw.

## PODSUMOWANIE

Wykorzystanie mikroskopów w badaniach specjalistycznych, laboratoryjnych ma bardzo duży potencjał poznawczy. Zależy on jednak zarówno od znajomości sprawnej obsługi posiadanych urządzeń, jak i doświadczenia badacza w pracy z konkretnym materiałem. Niezwykle ważne we wszelkich badaniach specjalistycznych są różnego typu kolekcje porównawcze bazy cyfrowe zdjęć – mikroobrazów – wykonane na wysokiej jakości urządzeniach. Są to zazwyczaj fotografie prób, preparatów, obiektów o charakterystycznych cechach. Wszelkie odkrywane na stanowiskach archeologicznych materiały są zmienione przez czas i różnią się często od ich współczesnych odpowiedników. Tworzenie baz danych dla materiałów ze stanowisk archeologicznych w wiodących dla danej dziedziny ośrodkach naukowych, przy wykorzystaniu wysokiej klasy mikroskopów, i ich udostępnianie byłoby pomocne w pracy wielu specjalistów, ale również osób uczących się identyfikacji różnych materiałów.

Uzupełnieniem dla badań mikroskopowych mogą być analizy wykorzystujące sprzęt do instrumentalnych badań składu chemicznego i właściwości fizycznych oraz różne źródła promieniowania. Obecnie do najpopularniejszych metod należą metoda dyfrakcji rentgenowskiej (ang. *X-ray diffraction*, XRD), w której określa się fazy mineralne występujące w próbce, metoda derywatograficzna (DTA) pozwalająca m.in. na ustalenie temperatury wypału naczyń, metoda instrumentalnej

neutronowej analizy aktywacyjnej czy też spektrometria mas z plazmą wzbudzoną indukcyjnie (ICP-MS) wspomagana w niektórych wypadkach jeszcze ablacją laserową (LA-ICP-MS).

## LITERATURA

- Bartoszek, N., Rosowski, M. 2017. Techniki mikroskopowe w badaniach biologicznych. *Laboratorium – Przegląd Ogólnopolski* 9-10: 12–21.
- Barbacki, A. 2003. *Mikroskopia elektronowa*. Poznań.
- Bolewski, A., Jaskólski, S. 1951. *Oznaczanie minerałów*. Państwowy Instytut Geologiczny, Prace Specjalne 2. Warszawa.
- Borkowska, M., Smulikowski, K. 1973. *Minerały skałotwórcze*. Warszawa.
- Gunia, P. 1996. *Gemmologia praktyczna dla geologów*. Wrocław.
- Gunia, P. 2013. Wyniki badań gemmologicznych wczesnośredniowiecznych kamieni jubilerskich z Ostrowa Tumskiego we Wrocławiu, (w:) E. Lisowska (red.), *Wydobywanie i dystrybucja surowców kamiennych we wczesnym średniowieczu na Dolnym Śląsku*. Wrocław, 295–308.
- Hałas, A., Szymański, H. 1965. *Mikroskopy elektronowe*. Warszawa.
- Heflik, W., Parachoniak, W. 1979. Badania w świetle przechodzącym, (w:) A. Bolewski, W. Żabiński (red.), *Badania minerałów i skał*. Warszawa, 59–117.
- Maneck, A., Muszyński, M. 2008. *Przewodnik do petrografii*. Kraków.
- Marschall, D.J. 1988. *Cathodoluminescence of Geological Materials*. London-Boston.
- Richter, D.K., Götze, T., Götze, J., Neuser, R.D. 2003. Progress in application of cathodoluminescence (CL) in sedimentary petrology (Review Article). *Mineralogy and Petrology* 79 (3/4): 127–166.
- Ryka, W., Maliszewska, A. 1982. *Słownik petrograficzny*. Warszawa.
- Sikorska, M. 2000. Od gemmologii do archeologii śladami katodoluminescencji, (w:) *Streszczenia referatów, Instytut Nauk Geologicznych Uniwersytetu Wrocławskiego, Polskie Towarzystwo Geologiczne, Oddział Wrocławski* 2, Wrocław, 53–55.
- Sikorska, M. 2005. *Badania katodoluminescencyjne minerałów*. Instrumentalne Metody Badań Geologicznych 59.
- Słowik, G. 2012. Podstawy mikroskopii elektronowej i jej wybrane zastosowania w charakterystyce katalizatorów nośnikowych, (w:) J. Ryczkowski (red.) *Adsorbenty i katalizatory. Wybrane technologie a środowisko*. Rzeszów, 219–243.
- Smith, G., D., Clark, R., J., H. 2004. Raman microscopy in archaeological science. *Journal of Archaeological Science* 31: 1137–1160.
- Webster, R. 1976. *Practical Gemmology*. Washington.
- Webster, R. Anderson, B.W. 1983. *Gems, their sources, descriptions and identification*. London-Boston.
- Wróbel, B., Zienkiewicz, K., Smoliński, D. J., Niedojadło, J., Świdziński, M. 2005. *Podstawy mikroskopii elektronowej, Skrypt dla studentów biologii*. Toruń.







# Ręczny spektrometr fluorescencji rentgenowskiej (XRF) w archeologii

Michał Krueger

---

## WPROWADZENIE

Ręczny spektrometr fluorescencji rentgenowskiej (XRF) w ostatnich latach zyskał dużą popularność wśród archeologów. Aparat umożliwia oznaczanie od kilku do kilkudziesięciu pierwiastków chemicznych w zależności od wybranego trybu analitycznego. Jest prosty w użyciu i ma kompaktowe rozmiary pozwalające na pracę w terenie. Badania przy użyciu spektrometru wpisują się w coraz powszechniejsze studia z zakresu archeometrii i stanowią ważne uzupełnienie analiz mikroskopowych.

Specjalistyczne analizy zabytków archeologicznych mają bardzo długą tradycję sięgającą XIX w. Badacze od dawna zainteresowani byli materiałem, z którego został wykonany zabytek, użytą do jego wyrobu technologią czy datowaniem. Zabytki czasem trafiały do laboratoriów, gdzie prowadzono analizy składu chemicznego. Przykładowo w 1870 r. Albin hr. Węsierski z Zakrzewa, wieloletni badacz grodu na Ostrowie Lednickim, przekazał fragmenty zaprawy murarskiej z budowli lednickiej do laboratoriów farmaceutycznych celem określenia ich składu pierwiastkowego (Fogel 1991: 23). Dalekowzroczność A. Węsierskiego jest godna podziwu; zaprawy z Lednicy były niedawno analizowane pod kątem składu chemicznego ręcznym spektrometrem (Niedzielski 2020), a ten rodzaj aktywności jest podawany za przykład nowoczesności

prac badawczych. Mało kto jednak pamięta, iż szlak został przetarty 150 lat wcześniej.

Pierwsze przykłady użycia na świecie ręcznych spektrometrów są datowane na drugą połowę lat 60. XX w. W Polsce na początku lat 60. XX w. wykorzystywano stacjonarny spektrometr fluorescencji rentgenowskiej do analiz artefaktów archeologicznych (Pytliński 1962), natomiast już w 1968 r. powstały pierwsze aparaty przenośne o oficjalnej nazwie „fluorescencyjny analizator rud FAR-1” (ryc. 1) produkowane przez Zakład Doświadczalny Biura Urządzeń Techniki Jądrowej w Krakowie (Manecki i Niewodniczański 1988: 647). W latach 70. XX w. prowadzono przy ich użyciu badania naukowe (np. Niewodniczański i in. 1974; Dziunikowski i in. 1976). Archeolodzy bardzo szybko dostrzegli potencjał tej aparatury do badań zabytków archeologicznych, czego efektem są prace na temat identyfikacji surowców krzemiennych (Lech i in. 1974) czy srebrnych monet (Stós-Fertner 1975). Kolejne lata przyniosły gwałtowny rozwój kompaktowych spektrometrów umożliwiających analizy w terenie.

## METODA BADAWCZA

Ręczne spektrometry z dyspersją energii służą do analizy chemicznej opartej na obserwacji promieniowania rentgenowskiego pierwiastków





**Ryc. 1.** Analizator FAR-1 (źródło: Manecki i Niewodniczański 1988: 655)

występujących w próbce, wzbudzanego przez lampę rentgenowską (Maneck i Niewodniczański 1988: 632). Promieniowanie powoduje przejście atomów w stan wzbudzony. Następstwa tego procesu zostały ostatnio opisane przez E. Proniewicz: „Jeżeli bombardujące elektrony mają wystarczającą energię kinetyczną, to w wyniku oddziaływania dochodzi do выбicia elektronów z wewnętrznych powłok elektronowych atomów, z których zbudowana jest badana próbka, w wyniku czego powstają luki. Luki po wybitych elektronach są zapelniane przez elektrony z wyższych powłok elektronowych atomu. Elektron przechodząc z wyższej powłoki do powłoki niższej emituje kwant promieniowania rentgenowskiego. Ponieważ każdy pierwiastek ma unikalną strukturę atomową, to promieniowanie emitowane tworzy unikalny i charakterystyczny zestaw pików (o ściśle określonych energiach) w widmie emisji elektromagnetycznej, co pozwala na identyfikację pierwiastków obecnych w badanej próbce” (Proniewicz 2021).

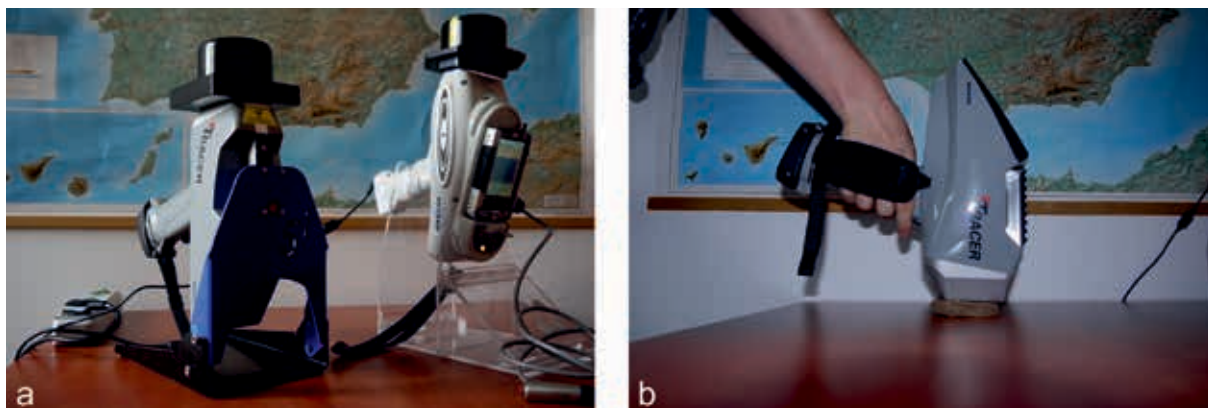
Zanim jednak dojdzie do samej analizy, konieczne jest pozyskanie i przygotowanie artefaktów potrzebnych do jej przeprowadzenia. Ręczny spektrometr fluorescencji rentgenowskiej umożliwia badanie szerokiej gamy artefaktów archeologicznych, wśród których najbardziej popularne są: ceramika, metale i obsydian. Dużą popularnością cieszą się także analizy substancji barwiących. Największą zaletą tego rodzaju badań jest ich nieinwazyjny charakter oraz możliwość transportu aparatury w dowolne miejsce, np. na wykopaliska lub do magazynu muzealnego. Zarówno analizy w Polsce, jak i poza granicami kraju wymagają uzyskania pozwolenia Państwowej Agencji Atomistyki lub jej zagranicznego odpowiednika.

Spektrometrem można analizować całe zabytki albo ich części. Zabytki mogą być dowolnych rozmiarów. Ważne natomiast jest znalezienie płaskiej powierzchni, do której można przyłożyć spektrometr. Często wybieraną strategią jest pobór próbek. Te powinny być pobierane z artefaktów o ustalonym kontekście archeologicznym, możliwe są wówczas analizy wieloaspektowe, a nie tylko chemiczne. Wszelkie informacje o charakterze archeologicznym (precyzyjna lokalizacja, stratygrafia, typologia i datowanie, zabytki towarzyszące, osady i zabrudzenia, geologia obszaru, wykonane zabiegi konserwatorskie itp.) są bardzo cenne i trudno sobie bez nich wyobrazić świadomy proces interpretacji danych. Czasem jednak analizowane są artefakty pozbawione kontekstu archeologicznego, ponieważ specjalistyczne analizy są jedyną drogą do poszerzenia wiedzy o takich zabytkach; jest to przypadek całkiem licznych artefaktów pozyskanych w XVIII lub XIX w., kiedy warsztat badawczy archeologii jeszcze nie istniał lub dopiero raczkował.

Na etapie pobierania prób należy pamiętać, by zabytek właściwie zabezpieczyć i oznakować: w przypadku niewielkich przedmiotów wskazane jest użycie woreczków strunowych i umieszczenie oznaczeń inwentaryzacyjnych na ich powierzchni, w żadnym razie na samej próbce. Oznaczenia warto powtórzyć, ponieważ nawet niezmywalne markery nie są wystarczająco trwałe. Do analiz niekoniecznie muszą być przeznaczone wyłącznie małe artefakty. Ręczny spektrometr ze względu na możliwość łatwego przenoszenia i pracę bez zewnętrznego źródła zasilania umożliwia analizy obiektów o znacznych rozmiarach znajdujących się w otwartej przestrzeni. Warunkiem powodzenia jest uzyskanie płaskiej, czystej powierzchni. Zalecane jest przemywanie próbek wodą o czystości laboratoryjnej. Małe próbki powinny mieścić się pod metalową osłoną nakładaną na stolik laboratoryjny, kiedy spektrometr ustawiony jest pionowo (ryc. 2a). Gwarantuje to zatrzymanie promieni rentgenowskich w obrębie osłony. Praca w trybie ręcznym (ryc. 2b) jest przez to bardziej ryzykowna; należy zwracać uwagę, by aparat ściśle dolegał do badanej powierzchni.

Próbki metalowe powinny być wolne od korozji i jakichkolwiek innych zanieczyszczeń. Nałożone warstwy konserwacyjne wykluczają przeprowadzenie wiarygodnych analiz. W przypadku ceramiki istnieje możliwość sproszkowania próbki, analizy powierzchni zewnętrznej lub przełamu. Powierzchnia wewnętrzna nie powinna być analizowana ze





**Ryc. 2.** Ręczne spektrometry fluorescencji rentgenowskiej w pozycji laboratoryjnej (a); Spektrometr użytkowany w trybie ręcznym (b). Fot. M. Krueger

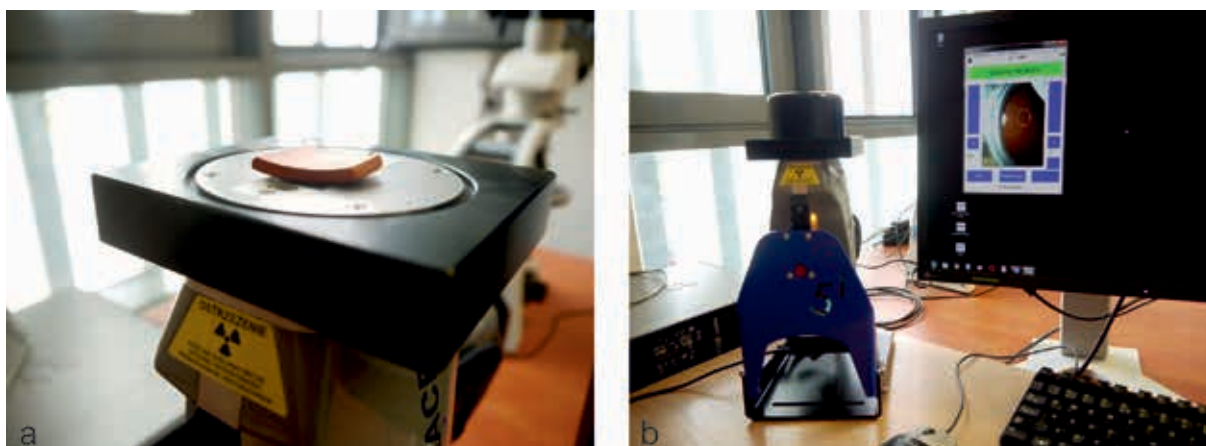
względem na krzywizny uniemożliwiające zachowanie minimalnej odległości między spektrometrem a próbką. Proszkowanie próbki jest dobrym rozwiązaniem, jako że materiał staje się homogeniczny, ale ma także poważną wadę: w przypadku chęci powiększenia zbioru próbek (np. o zabytki pochodzące z wystawy muzealnej) proszkowanie kolejnych fragmentów ceramiki może okazać się niewykonalne ze względów konserwatorskich. Najbardziej polecane jest analizowanie powierzchni zewnętrznej skorupy (ryc. 3a), ponieważ odległość między zabytkiem a detektorem jest stała, a poza tym, decydując się na badania powierzchni zewnętrznej, mamy możliwość analizy kompletnie zachowanych naczyń. Bardzo istotne jest, by zawsze badać w ten sam sposób zabytki z określonego zbioru; badania eksperymentalne pokazują, że wyniki dla tych samych próbek poddanych zmieleniu i niemielonym są odmienne (Niedzielski i in. 2020). Podczas pobierania próbek ceramiki przydają się obcegi pozwalające na dość precyzyjne wydzielenie potrzebnego fragmentu. Do badań spektrometrycznych wystarczające są nawet tak małe skorupy, jak te o powierzchni  $1 \text{ cm}^2$ , jednak korzystniej jest zdobyć większe fragmenty, ponieważ można je przeanalizować w kilku miejscach, przesuwając skorupę na stoliku laboratoryjnym.

Wybór napięcia, natężenia, filtru, użycie pompy próżniowej są uzależnione od trybów analitycznych i zaleceń producenta aparatury. Im dłuższy czas pojedynczej analizy, tym jej dokładność jest większa. Już piętnastosekundowy pomiar pozwala na uzyskanie wiarygodnego wyniku: aparat automatycznie wykonuje w tym czasie piętnaście powtórzeń pomiarów. Artefakty archeologiczne cechują się małą homogenicznością, dlatego korzystniej jest dokonać trzech

pomiarów piętnastosekundowych w odmiennych punktach artefaktu niż jednego czterdziestopięciusekundowego pomiaru w jednym miejscu. Niektóre modele spektrometrów oferują możliwość obserwacji próbki za pomocą kamery (ryc. 3b), dzięki czemu można wybrać obszar najbardziej nadający się do analiz. Warto unikać miejsc z widoczną na powierzchni naczynia domieszką czy zdobieniami wykonanymi przy użyciu pigmentów, chyba że celem badań są powierzchnie malowane. Wyniki analiz widoczne są od razu na ekranie palmtopa (ryc. 4a) lub także na ekranie komputera współpracującego ze spektrometrem (ryc. 4b). Rezultaty powinny zostać uśrednione. Należy także obliczyć odchylenie standardowe dla poszczególnych grup wyników. Jeżeli jest ono duże, to wiarygodność takich pomiarów jest niska. Otrzymane wyniki mogą stać się przedmiotem analiz statystycznych, np. przy użyciu darmowego programu PAST, który zawiera powszechnie używane testy statystyczne i oferuje możliwość sporządzania wykresów.

Wskazane jest tworzenie kolekcji referencyjnych i publikowanie, o ile wydawca na to pozwala, pełnych danych analitycznych. Inne rozwiązanie to upublicznianie wyników w internetowych bazach danych. Dane wyjściowe mogą w przyszłości posłużyć do studiów komparatystycznych.

Wykorzystanie ręcznego spektrometru w sposób pełny związane jest ze współpracą z chemikiem, geologiem i osobą, która biegle posługuje się testami statystycznymi. Archeolog może postawić pytania badawcze, wybrać materiał, przygotować próbki, przeprowadzić analizy i wstępnie obrobić dane. Ocena warunków geologicznych stanowisk archeologicznych, z których pochodzą badane materiały, oraz wyjaśnienie różnic w składzie chemicznym artefaktów



**Ryc. 3.** Właściwe ułożenie próbki ceramiki na stoliku laboratoryjnym (a); Obraz próbki z kamery spektrometru na ekranie monitora (b). Fot. M. Krueger

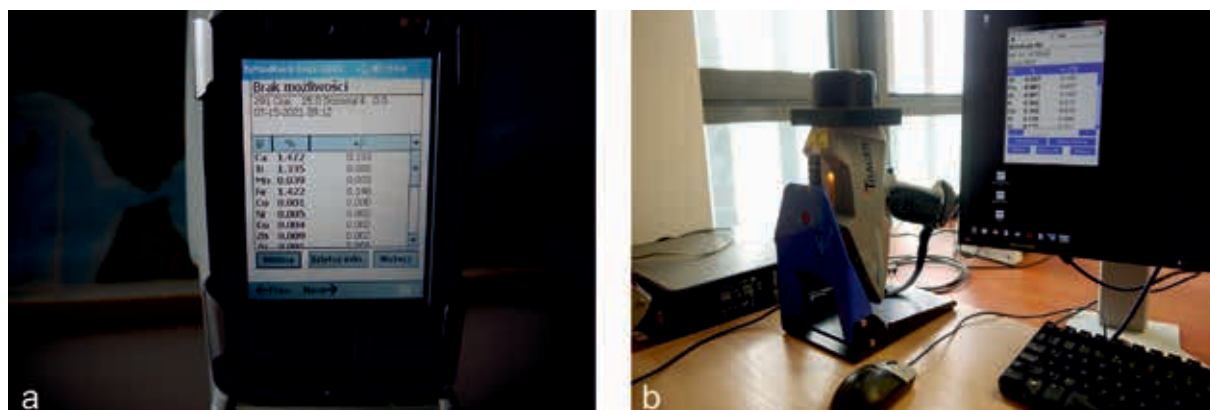
to zadanie dla specjalistów z zakresu nauk o Ziemi i nauk chemicznych. Etap analiz statystycznych i interpretacji przyniesie najlepsze efekty, jeżeli nad rezultatami badań będzie pracował interdyscyplinarny zespół, ponieważ analizy specjalistyczne materiałów archeologicznych są z założenia wielokierunkowe.

### WYBRANE PRZYKŁADY ANALIZ SPEKTROMETRYCZNYCH

Jedną z klasycznych prac ukazujących potencjał ręcznego spektrometru w studiach nad wypaloną gliną jest artykuł autorstwa Y. Goren, H. Mommsena i J. Klingera (2011). Badacze wybrali tę aparaturę ze względu na jej nieinwazyjny charakter i chęć skonstruowania wyników z przeprowadzonymi wcześniej obserwacjami petrograficznymi i rezultatami neutronowej analizy aktywacyjnej. Zespół analizował obszerny zbiór tabliczek klinowych celem ustalenia ich proveniencji. Wyniki pokazały, że ręczny spektrometr nadaje się do tego typu analiz. Zaobserwowano, że najlepsze rezultaty otrzymuje się, analizując wyniki dla następujących pierwiastków: glin, krzem, potas, tytan, rubid, cyrkon i niob. Oprócz zaawansowanych testów statystycznych przeprowadzono także testy par pierwiastków; szczególnie dobre wyniki uzyskano, zestawiając potas z tytanem. Ten test ma charakter uniwersalny i sprawdził się także na drugim krańcu basenu Morza Śródziemnego podczas analiz artefaktów z zachodniej Andaluzji. Dzięki niemu można pogrupować ceramikę pochodzącą z różnych stanowisk archeologicznych. Dla przykładu, ceramika

toczona na kole szybkoobrotowym o niskiej zawartości potasu i tytanu jest charakterystyczna dla stanowiska La Cruz del Negro (Krueger i Brandherm 2019: 80). Taka informacja może być kluczowa, by wykryć przedmioty importowane z La Cruz del Negro wśród materiału ceramicznego pochodzącego z innego stanowiska archeologicznego. Warto przy tym dodać, że to narzędzie w określonych warunkach nie będzie działać. Przeszkodą może być praktyka mieszania glin pochodzących z różnych wychodni albo takie same warunki geologiczne panujące w różnych miejscach czerpania gliny. Szczególnie trudne są badania materiałów ceramicznych pochodzących z terenów Niziny Środkowoeuropejskiej pokrytej utworami polodowcowymi.

Na problemy w badaniu ceramiki ręcznym spektrometrem fluorescencji rentgenowskiej zwrócili m.in. uwagę L. Ceccarelli, I. Rossetti, L. Primavesi i S. Stoddart (2016). Badacze podkreślają dotkliwy brak próbek wzorcowych i reprezentatywnych kalibracji dla materiałów ceramicznych. Cechy fizyczne ceramiki, niska gęstość i mała jednorodność również nie ułatwiają pracy z tego typu artefaktami. Autorzy wybrali jednak do badań przede wszystkim ceramikę pochodzącą ze stanowiska Montelabate położonego w prowincji Perugia, na którym odkryto piece garncarskie, co umożliwia zidentyfikowanie lokalnej produkcji, określenie cech naczyń wyrabianych w tej osadzie i odróżnienie ich od amfor pochodzących z innych stanowisk. Stwierdzono, że poziom zawartości wapnia, strontu i ołowiu jest związany przede wszystkim z procesem garncarskim, natomiast zawartość żelaza i chromu wiąże się z obecnością tych pierwiastków w glinie użytej do toczenia naczyń (Ceccarelli



**Ryc. 4.** Wyniki ilościowe widoczne są na ekranie palmtopa natychmiast po wykonaniu pomiaru. Informacja „brak możliwości” oznacza, że badana próbka nie może być zaklasyfikowana do materiałów referencyjnych zgromadzonych w bazie danych spektrometru. Prawa kolumna cyfr pokazuje zakresy błędów (a); Spektrometrem można sterować z poziomu komputera (b). Fot. M. Krueger

i in. 2016: 260). W toku analiz stworzono wzorce kalibracyjne dla ceramiki, które, jak twierdzą autorzy, mają charakter reprezentatywny i odtwarzalny.

Ręczny spektrometr może, rzecz jasna, badać inne materiały niż tylko wypaloną glinę. Często wykorzystywany jest do analiz obsydianu. Przykładem mogą być badania zespołu zabytków obsydianowych z chalkolitycznej osady Dava Göz w północno-zachodnim Iranie w ujęciu diachronicznym, zainicjowane przez A. Abedi, B. Varoutsikos i C. Chataignera (2018). Badacze przeanalizowali ponad sto dwadzieścia artefaktów z różnych faz istnienia stanowiska. Stwierdzili, że na początku obsydian docierał z różnych źródeł, natomiast wraz z upływem czasu zaczęto korzystać z jednej wychodni. Zmiany te mogły być spowodowane reorganizacją sezonowego pasterstwa; pastarze mogli być bowiem pośrednikami w handlu tą skałą (Abedi i in. 2018: 763). Badania spektrometryczne zidentyfikowały wychodnie, natomiast autorzy wyciągnęli z tych danych interesujące, daleko idące wnioski o przeobrażeniach w ponadregionalnych kontaktach mieszkańców osady Dava Göz.

Powyższe przykłady pokazują, że ręczny XRF jest często wykorzystywany jako narzędzie do badań nad pochodzeniem artefaktów archeologicznych. Jest to wciąż zadawane pytanie badawcze i trudno się temu dziwić, skoro w wielu regionach świata podstawowe problemy archeologii mające implikacje społeczno-ekonomiczne, w tym kwestie związane z proveniencją artefaktów, nie zostały satysfakcjonująco rozwiązane. Upowszechnienie spektrometrów w archeologii zapewne przyczyni się do przewyciężenia tego impasu.

Warto także wspomnieć o możliwościach analiz ręcznym spektrometrem metali. Nie są to badania często przeprowadzane ze względu na powszechną korozję zabytków, która utrudnia otrzymanie wiarygodnych wyników. H. Wrobel Nørgaard (2017) dowiodła istnienia znacznych różnic w składzie chemicznym między powierzchnią zewnętrzną a rdzeniem zabytku wykonanego z brązu. Niemniej jednak, zdaniem autorki, nie należy kompletnie zaniechać analiz artefaktów wykonanych ze stopów miedzi, nawet skorodowanych. Podstawowe pierwiastki chemiczne tworzące materię zabytku są możliwe do zidentyfikowania przez ręczny spektrometr, co daje pewne możliwości rozpoznania stopu (Wrobel Nørgaard 2017: 120). Nie ulega jednak wątpliwości, że nie jest to najlepsze narzędzie do analiz zabytków metalowych, ale zwykle ze względów konserwatorskich nie ma innej alternatywy niż ręczny spektrometr fluorescencji rentgenowskiej.

## KILKA SŁÓW REFLEKSJI

Baza aparaturowa i sposoby jej używania to tylko jeden z aspektów związanych z wprowadzeniem do archeologii tego typu narzędzi. Użycie zaawansowanych instrumentów technologicznych może dawać złudne poczucie docierania do obiektywnych danych pozwalających rekonstruować przeszłość. M. Pawleta i R. Zapłata zastanawiają się (2011: 344-345), czy zastosowanie w archeologii nowych narzędzi z kręgu szeroko rozumianej techniki może być postrzegane jako przejaw fetyszyzacji. Istnieje bowiem





**Ryc. 5.** Analiza XRF zapraw z palatium na Ostrowie Lednickim. Fot. P. Niedzielski

ryzyko, że nowe technologie zostaną przez archeologów wykorzystane w sposób instrumentalny.

W podobnym kierunku podąża W. Rączkowski, który stwierdza, że technika jest powiązana ze sposobem odkrywania, z poznaniem, a nie tylko z użyskiwaniem rezultatów. Wykazuje, że technika, choć powszechnie postrzegana jako neutralna, w istocie taka nie jest (2018: 224). Nieco parafrazując rozważania profesora dotyczące wizualizacji w archeologii, można powiedzieć, że każdy etap procesu badawczego jest uwarunkowany indywidualnymi decyzjami osób zaangażowanych w analizy, a końcowe dane są efektem procesów podejmowanych na podstawie wiedzy, możliwości technicznych i umiejętności (2018: 225). Rezultatów analiz nie można zatem traktować jako wiernego odwzorowania rzeczywistości.

Nie oznacza to oczywiście, że należy pominąć specjalistyczne analizy i rzucić się w wir rozważań wyłącznie teoretycznych. Sedno problemu leży w świadomym podejściu do złożoności procesu badawczego i do licznych ograniczeń z nim związanych. Warto pamiętać, że same wyniki w postaci ciągów liczb czy licznych wykresów niewiele mówią o przeszłości, a są przecież atrakcyjnymi apendyksami w archeologicznych monografiach. Dokumentują przeprowadzone analizy, ale bez próby interpretacji mogą być co najwyżej elementem publicznej bazy danych, którą można wykorzystać w przyszłości.

Pytanie o sensowność prowadzenia badań przy użyciu ręcznego spektrometru przed dekadą postawiła R. Joyce, znana przede wszystkim z prac z zakresu archeologii społecznej. Jej opinia była jednoznacznie pozytywna, a opierała się na stwierdzeniu, iż kwestie technologiczne są nierozdzielnie związane z relacjami społecznymi (Joyce 2011: 196-198). W takim ujęciu badania z zakresu archeometrii mogą znaleźć się w kręgu zainteresowań archeologii społecznej.

Wybór określonej technologii jawi się jako ściśle uzależniony od czynników społecznych, takich jak tradycja, wierzenia, organizacja społeczna etc., a wyrabiane przedmioty stanowią ślad podejmowanych decyzji w zakresie użytkowanej kultury materialnej. Poprzez użycie określonych surowców oraz technologii dawne społeczności mogły manifestować własną tożsamość, przywiązanie do lokalnych tradycji lub przeciwnie – otwartość na przyjęcie impulsów z zewnątrz. Jest to wystarczający argument, by nie tylko nie zaniechać analiz specjalistycznych, lecz przyjmując krytyczną postawę, próbować docierać do dawnych znaczeń za pomocą nowoczesnej aparatury. Kluczowe wydają się być dobrze przemyślany i zaplanowany proces badawczy, gruntowna znajomość ograniczeń metody, refleksja nad uzyskanymi informacjami i współpraca ze specjalistami z zakresu nauk ścisłych.

## PODSUMOWANIE

Ręczny spektrometr fluorescencji rentgenowskiej (XFR) jest bez wątpienia użytecznym narzędziem, które może dostarczyć nowych informacji o artefaktach archeologicznych. Rozpoznanie składu pierwiastkowego, poza identyfikacją rodzaju badanego materiału, co w przypadku niektórych zabytków wcale nie jest rzeczą oczywistą, stanowi pierwszy krok w kierunku ustalenia proveniencji zabytku i poznania technologii wyrobu. Jest to asumpt do dalszych refleksji o charakterze społeczno-ekonomicznym. Poza badaniem materiału masowego spektrometr umożliwia także nieinwazyjne analizy artefaktów, które znajdują się w kolekcjach muzealnych. Dostarcza przez to nowych informacji o artefaktach pozbawionych kontekstu archeologicznego. Potencjał badawczy aparatury może być właściwie wykorzystany poprzez standaryzację procedur analitycznych, tworzenie referencyjnych baz danych i nade

wszystko, krytyczne podejście do otrzymywanych wyników. Aparatura ta powinna być wykorzystywana jako narzędzie komplementarne względem technik mikroskopowych. Ręczny spektrometr fluorescencji rentgenowskiej co prawda nie jest tak precyzyjny jak przystawka EDS do skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM), jednak na korzyść XRF przemawia jego wielokrotnie niższa cena niż SEM, a także możliwość przeprowadzenia analiz artefaktów o nieograniczonych rozmiarach (ryc. 5). Ważną cechą tej aparatury są jej niewielkie rozmiary pozwalające na przewóz spektrometru w bagażu podręcznym.

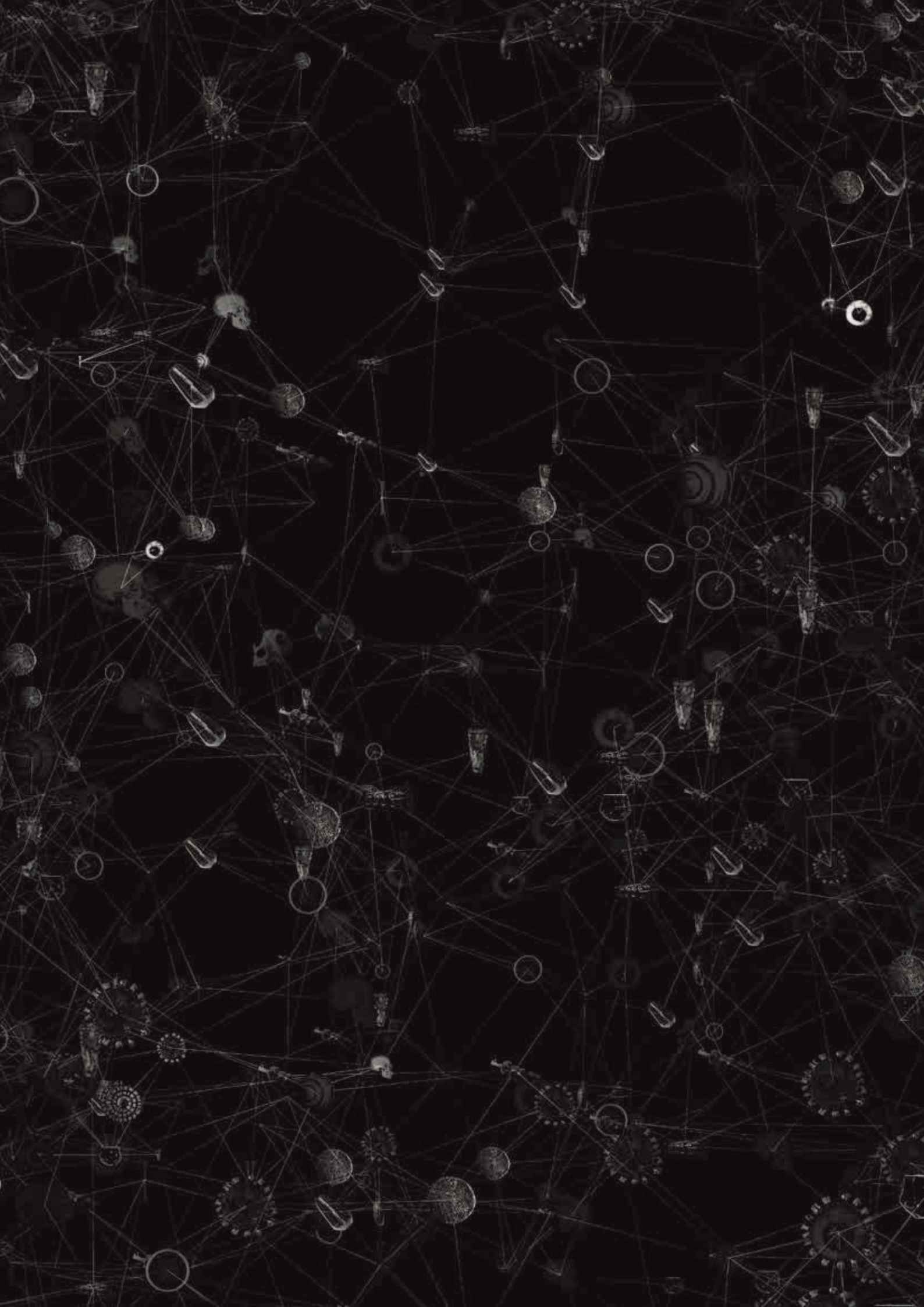
## FINANSOWANIE

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki na podstawie decyzji 2017/25/B/HS3/00635. Bardzo dziękuję Panu Profesorowi Przemysławowi Niedzielskiemu z Wydziału Chemii UAM oraz Panu Inżynierowi Mikołajowi Szulerowiczowi z firmy PIK Instruments za wszechstronną pomoc w zakresie użytkowania spektrometrów fluorescencji rentgenowskiej.

## LITERATURA

- Abedi, A., Varoutsikos, B., Chataigner, C. 2018. Provenance of obsidian artifacts from the Chalcolithic site of Dava Göz in NW IRAN using portable XRF. *Journal of Archaeological Science: Reports* 20: 756–767.
- Ceccarelli, L., Rossetti, I., Primavesi, L., Stoddart S. 2016. Non-Destructive Method for the Identification of Ceramic Production by Portable X-Rays Fluorescence (PXRF). A Case Study of Amphorae Manufacture in Central Italy. *Journal of Archaeological Science: Reports* 10: 253–262.
- Dziunikowski, B., Markowicz, A., Hybińska-Gacek, E. 1976. Radiometryczne oznaczanie  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  w glinach i łupkach ogniotrwałych w warunkach kopalnianych, (w:) M. Wasilewska (red.), *Postępy techniki izotopowej w nauce i gospodarce narodowej*. Kraków, 11–27.
- Fogel, J. 1991. *Pompeja polska. Z dziejów archeologii wielkopolskiej XIX wieku: działalność Albina hr. Węsierskiego i Zbigniewa hr. Węsierskiego-Kwileckiego*. Poznań.
- Goren, Y., Mommsen, H., Klinger, J. 2011. Non-destructive provenance study of cuneiform tablets using portable X-ray fluorescence (pXRF). *Journal of Archaeological Science* 38: 684–696.
- Joyce, R.A. 2011. Is There a Future for XRF in a 21st Century Archaeology?, (w:) M.S. Shackley (red.), *X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF) in Geoarchaeology*. New York-Dordrecht-Heidelberg-London, 193–202.
- Krueger, M., Brandherm, D. 2019. Chemical Characterization via pXRF of Early Iron Age Pottery from SW Iberia. *UISPP Journal* 2(1): 77–82.
- Lech, J., Nowicki, Z., Sołtyk, W. 1974. Zastosowanie reaktorowej analizy aktywacyjnej i fluorescencji rentgenowskiej do identyfikacji surowców krzemieniach dla badań archeologicznych, (w:) M. Wasilewska (red.), *Postępy techniki izotopowej w nauce i gospodarce narodowej*. Kraków, 87–96.
- Manecki, A., Niewodniczański, J. 1988. Rentgenowska analiza fluorescencyjna, (w:) A. Bolewski, W. Żabiński (red.), *Metody badania minerałów i skał* (II wyd.). Warszawa, 632–657.
- Niedzielski, P. 2020. Wstępne wyniki badań składu pierwiastkowego zapraw palatium na Ostrowie Lednickim z użyciem rentgenowskiej spektrometrii fluorescencyjnej (XRF), (w:) D. Banaszak, A. Kowalczyk, A. Tabaka, A.M. Wyrrwa (red.), *Ostrów Lednicki - palatium Mieszka I i Bolesława Chrobrego. Chronologia i kontekst*. Lednica, 261–274.
- Niedzielski, P., Krueger, M., Brandherm, D. 2020. Effects of sample processing on XRF results from archeological pottery. *Materials and Manufacturing Processes* 35(13): 1455–1460.
- Niewodniczański, J., Manecki, A., Dominik, B. 1974. Non-destructive determinations of nickel in iron meteorites. *Journal of Radioanalytical Chemistry* 20: 71–75.
- Pawleta, M., Zapłata, R. 2011. Obrazowanie przeszłości w świetle nowych mediów – technologii cyfrowych, (w:) R. Zapłata (red.), *Digitalizacja dziedzictwa kulturowego. Wybrane zagadnienia*. Lublin: 335–358.
- Proniewicz, E. 2021. Spektroskopia rentgenowska z dyspersją energii, (w:) M. Starowicz (red.), *Podstawy chemii polimerów* (e-podręcznik AGH). Kraków. Dokument elektroniczny <https://epodreczniki.open.agh.edu.pl/tiki-index.php>, dostęp 5 lutego 2021.
- Pytliński, A. 1962. Rentgeno-spektrograficzna analiza fluorescencyjna i możliwości jej zastosowania dla badania składu chemicznego zabytków archeologicznych. *Kwartalnik Historii Kultury Materialnej* 10(1-2): 137–142.
- Rączkowski, W. 2018. Fetyszizacja: chwila namysłu nad technologiami i wizualizacjami w archeologii, (w:) A. Posern-Zieliński, J. Sawicka, J. Kabaciński, M. Kara, K. Zamel-ska-Monczak (red.), *Archeologia jako humanistyczna interpretacja przeszłości. Studia dedykowane Profesorowi Henrykowi Mamzerowi*. Poznań, 229–245.
- Stós-Fertner, Z. 1975. Zastosowanie radioizotopowej analizy fluorescencyjnej do oznaczania zanieczyszczeń ciężkimi metalami srebra dirhemów arabskich. *Wiadomości Numizmatyczne* 19(4): 207–224.
- Wrobel Nørgaard, H. 2017. Portable XRF on Prehistoric Bronze Artefacts: Limitations and Use for the Detection of Bronze Age Metal Workshops. *Open Archaeology* 3(1): 101–122.







## Wykaz autorów

---

**Karina Apolinarska**

Instytut Geologii  
Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych  
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza  
ul. Bogumiła Krygowskiego 12  
61-680 Poznań  
ORCID: 0000-0002-3507-5139  
e-mail: karina.apolinarska@amu.edu.pl

**Marcin Biborski**

Laboratorium Archeometalurgii i Konserwacji Zabytków  
Instytut Archeologii  
Uniwersytet Jagielloński  
ul. Gołębia 11  
31-007 Kraków  
ORCID: 0000-0003-3066-9840  
e-mail: biborski@interia.pl

**Mateusz Biborski**

Laboratorium Archeometalurgii i Konserwacji Zabytków  
Instytut Archeologii  
Uniwersytet Jagielloński  
ul. Gołębia 11  
31-007 Kraków  
ORCID: 0000-0002-6672-6264  
e-mail: mateusz.biborski@uj.edu.pl

**Maciej Chyleński**

Instytut Biologii i Ewolucji Człowieka  
Wydział Biologii

Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu  
ul. Uniwersytetu Poznańskiego 6  
61-614 Poznań  
ORCID: 0000-0003-1347-1904  
e-mail: maciejchylenski@gmail.com

**Maria Cybulska**

Instytut Architektury Tekstyliów  
Wydział Inżynierii Materiałowej i Wzornictwa Tekstyliów  
Politechnika Łódzka  
ul. Żeromskiego 116  
90-924 Łódź  
ORCID: 0000-0002-9364-8820  
e-mail: maria.cybulska@p.lodz.pl

**Sambor Czerwiński**

Pracownia Ekologii Zmian Klimatu  
Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych  
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza  
ul. Bogumiła Krygowskiego 10  
61-680 Poznań  
ORCID: 0000-0003-3422-040X  
e-mail: sambor.czerwinski@amu.edu.pl

**Henryk P. Dąbrowski**

Muzeum Archeologiczne w Biskupinie  
Biskupin 17  
88-410 Gąsawa  
ORCID: 0000-0002-8846-5042  
e-mail: hpdabrowski@gmail.com

**Anna Drążkowska**

Instytut Archeologii  
Katedra Archeologii Późnego Średniowiecza  
i Nowożytności  
Uniwersytet Mikołaja Kopernika  
Wydział Nauk Historycznych  
ul. Szosa Bydgoska 46/48  
87-100 Toruń  
ORCID: 0000-0002-8180-7273  
e-mail: annadr9@wp.pl

**Mariusz Glapiński**

Zakład Medycyny Sądowej  
Uniwersytet Medyczny im. Karola Marcinkowskiego  
w Poznaniu  
ul. Święcickiego 6  
60-789 Poznań  
ORCID: 0000-0003-1682-8921  
e-mail: mariusz.glapinski@gmail.com

**Piotr Gunia**

Uniwersytet Wrocławski, Wydział Nauk o Ziemi i  
Kształtowania Środowiska,  
Instytut Nauk Geologicznych,  
pl. Maksa Borną 9  
50-204 Wrocław  
ORCID: 0000-0002-7283-7913  
e-mail: piotr.gunia@uwr.edu.pl

**Agata Hałuszko**

Instytut Archeologii  
Uniwersytet Wrocławski  
ul. Szewska 48  
50-139 Wrocław  
Fundacja Archeolodzy.org  
ul. B. Prusa 81/3i  
50-316 Wrocław  
ORCID: 0000-0001-8312-3222  
e-mail: agata@archeolodzy.org

**Anna Hyrchala**

Szkoła Doktorska Nauk Humanistycznych  
Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej  
ul. Weteranów 18  
20-038 Lublin  
ORCID: 0000-0001-8749-1583  
e-mail: ahyrchala@gmail.com

**Michał Jankowiak**

Pracownia Geozagrożeń

**Instytut Geologii**

Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych  
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza  
ul. Bogumiła Krygowskiego 12  
61-680 Poznań  
e-mail: michal.jankowiak@amu.edu.pl

**Marcin Kadej**

Pracownia Biologii i Entomologii Sądowej  
Zakład Biologii, Ewolucji i Ochrony Bezkręgowców  
Wydział Nauk Biologicznych  
Uniwersytet Wrocławski  
ul. Przybyszewskiego 65  
51-148 Wrocław  
ORCID: 0000-0001-5983-0402  
e-mail: marcin.kadej@uwr.edu.pl

**Monika Karpińska-Kołaczek**

Pracownia Ekologii Zmian Klimatu  
Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych  
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza  
ul. Bogumiła Krygowskiego 10  
61-680 Poznań  
ORCID: 0000-0002-3249-7408  
e-mail: monika\_kk@interia.eu

**Wojciech Kociemba**

Wielospecjalistyczny Szpital Miejski im. Józefa Strusia  
ul. Szwajcarska 3  
61-285 Poznań  
ORCID: 0000-0002-3706-4054  
e-mail: wkociemba@wp.pl

**Piotr Kołaczek**

Pracownia Ekologii Zmian Klimatu  
Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych  
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza  
ul. Bogumiła Krygowskiego 10  
61-680 Poznań  
ORCID: 0000-0003-2552-8269  
e-mail: piotr.kolaczek@amu.edu.pl

**Szymon Konwerski**

Zbiory Przyrodnicze  
Wydział Biologii  
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza  
ul. Uniwersytetu Poznańskiego 6  
61-614 Poznań  
ORCID: 0000-0002-6438-8759  
e-mail: szymkonw@amu.edu.pl

**Marta Krueger**

Wydział Archeologii  
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza  
ul. Uniwersytetu Poznańskiego 7  
61-614 Poznań  
e-mail: mbartk@amu.edu.pl

**Michał Krueger**

Wydział Archeologii  
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza  
ul. Uniwersytetu Poznańskiego 7  
61-614 Poznań  
ORCID: 0000-0002-2607-2825  
e-mail: krueger@amu.edu.pl

**Aldona Kurzawska**

Ośrodek Studiów Pradziejowych i Średniowiecznych  
Instytut Archeologii i Etnologii PAN  
ul. Rubież 46  
61-612 Poznań  
ORCID 0000-0003-0215-046X  
e-mail: aldonakurzawska@wp.pl

**Mariusz Lamentowicz**

Pracownia Ekologii Zmian Klimatu  
Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych  
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza  
ul. Bogumiła Krygowskiego 10  
61-680 Poznań  
ORCID: 0000-0003-0429-1530  
e-mail: mariusz.lamentowicz@amu.edu.pl

**Karolina Leszczyńska**

Pracownia Geozagrożeń  
Instytut Geologii  
Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych  
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza  
ul. Bogumiła Krygowskiego 12  
61-680 Poznań  
ORCID: 0000-0001-8729-1733  
e-mail: karles3@amu.edu.pl

**Ewa Lisowska**

Instytut Archeologii  
Uniwersytet Wrocławski  
ul. Szewska 48  
50-139 Wrocław  
ORCID: 0000-0002-0444-9513  
e-mail: ewa.lisowska@uwr.edu.pl

**Dorota Lorkiewicz-Muszyńska**

Zakład Medycyny Sądowej  
Uniwersytet Medyczny im. Karola Marcinkowskiego  
w Poznaniu  
ul. Święcickiego 6  
60-789 Poznań  
Zakład Medycyny Sądowej  
Collegium Medicum  
Uniwersytet Zielonogórski  
ul. Zyty 28  
65-046 Zielona Góra  
ORCID: 0000-0001-8868-8812  
e-mail: dlorkiew@ump.edu.pl

**Katarzyna Marcisz**

Pracownia Ekologii Zmian Klimatu  
Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych  
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza  
ul. Bogumiła Krygowskiego 10  
61-680 Poznań  
ORCID: 0000-0003-2655-9729  
e-mail: katarzyna.marcisz@amu.edu.pl

**Magdalena Moskal-del Hoyo**

Instytut Botaniki im. W. Szafera  
Polskiej Akademii Nauk  
ul. Lubicz 46  
31-512 Kraków  
ORCID: 0000-0003-3632-7227  
e-mail: m.moskal@botany.pl

**Katarzyna Pyżewicz**

Wydział Archeologii  
Uniwersytet Warszawski  
ul. Krakowskie Przedmieście 26/28  
00-927 Warszawa  
ORCID: 0000-0001-9228-9347  
e-mail: k.pyzewicz@uw.edu.pl

**Monika Rzodkiewicz**

Pracownia Biogeochemii  
Instytut Geoekologii i Geoinformacji  
Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych  
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza  
ul. Bogumiła Krygowskiego 10  
61-680 Poznań  
ORCID 0000-0002-6672-2183  
e-mail: monika.rzodkiewicz@amu.edu.pl



**Iwona Sobkowiak-Tabaka**

Wydział Archeologii  
Uniwersytet im. A. Mickiewicza  
ul. Uniwersytetu Poznańskiego 7  
61-614 Poznań  
ORCID: 0000-0001-5913-1177  
e-mail: iwosob@amu.edu.pl

**Julia Sobol**

Zakład Medycyny Sądowej  
Collegium Medicum  
Uniwersytet Zielonogórski  
ul. Zyty 28  
65-046 Zielona Góra  
ORCID 0000-0001-8430-6901  
e-mail: j.sobol@cm.uz.zgora.pl

**Jarosław Wilczyński**

Instytut Systematyki i Ewolucji Zwierząt  
Polskiej Akademii Nauk  
ul. Sławkowska 17  
31-016 Kraków  
ORCID: 0000-0002-9786-0693  
e-mail: wilczynski@isez.pan.krakow.pl

**Izabela Zawiska**

Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania  
Polskiej Akademii Nauk  
ul. Twarda 51/55  
00-818 Warszawa  
ORCID: 0000-0002-5971-9728  
e-mail: izawiska@twarda.pan.pl

Podstawowym czynnikiem napędzającym rozwój każdej dziedziny, jest ciekawość i nieustające zadawanie nowych i wymagających pytań badawczych. Odkrywając stanowiska archeologiczne poznajemy świat makroskopowo, znajdujemy to co widoczne – okruchy przeszłości człowieka. Dopiero w laboratoriach mamy możliwość spojrzeć na pozyskany materiał w mikroskali, z pomocą specjalistycznych analiz mikroskopowych, archeometrycznych, izotopowych, biomolekularnych; odkryć to co ukryte i niewidoczne.

Ostatnie dekady przyniosły olbrzymi postęp jakościowy w badaniach specjalistycznych wykorzystywanych w archeologii. Współczesna archeologia już w niewielkim stopniu przypomina tą z przełomu XIX i XX w., a nawet z większej części XX w. Stało się to w dużej mierze dzięki szerokiemu zastosowaniu zdobyczy nauk przyrodniczych i ścisłych przy badaniu materiałów archeologicznych.

*Mikroprzeszłość* jest książką, która próbuje objąć i usystematyzować współczesną wiedzę na temat badań specjalistycznych w archeologii Polski. Poszczególne rozdziały napisane są przez wybitnych specjalistów w swoich dziedzinach, zaangażowanych w analizy i badania materiałów pochodzących z wykopalisk. Pozycję tę kierujemy przede wszystkim do zawodowych archeologów, prehistoryków, historyków, ale także studentów, czy też sympatyków archeologii i nauk pokrewnych, mając nadzieję, że przyczyni się do pogłębienia wiedzy o badaniach specjalistycznych, stosowanych w archeologii.

dr Aldona Kurzawska i dr hab. Iwona Sobkowiak-Tabaka prof. UAM

