MIKROPRZESZŁOŚĆ

Badania specjalistyczne w archeologii

część 2



pod redakcją
Aldony Kurzawskiej i Iwony Sobkowiak-Tabaki

WNI

MIKROPRZESZŁOŚĆ

MIKROPRZESZŁOŚĆ

Badania specjalistyczne w archeologii

Część 2

pod redakcją
Aldony Kurzawskiej i Iwony Sobkowiak-Tabaki

GRUPA WYDAWNICZA FNCE
Publikacje naukowe oraz beletrystyka
www.fnce.info
WNI
UAM Wydział Archeologii

Poznań 2025

Wydział Archeologii

Recenzja naukowa:
dr hab. Joanna Pyzel, prof. UMCS
prof. dr hab. Piotr Włodarczak

Redakcja:
Aldona Kurzawska
Iwona Sobkowiak-Tabaka

Opracowanie techniczne i skład komputerowy:
Reverse Bartosz Płotka

Korekta językowa:
Ewelina Siemianowska
Aneta Cierechowicz
Aleksandra Radziszewska
Jolanta Rżanek

Projekt okładki i rycin poprzedzających rozdziały:
Przemysław Matejko

© Copyright by Wydział Archeologii, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu i autorzy
© Copyright by Wydawnictwo Nauka i Innowacje

Poznań 2025

ISBN: 978-83-973780-1-8
https://doi.org/10.64158/ech0ks9r4o

Monografia jest dostępna również w wersji online na stronie wydawcy:
https://fnce.info

Wydawnictwo Nauka i Innowacje
ul. Rubież 46
61-612 Poznań
wni@fnce.info

Grupa Wydawnicza FNCE
ISBN 978-83-68609-08-0

GRUPA WYDAWNICZA FNCE
Publikacje naukowe oraz beletrystyka
www.fnce.info

SPIS TREŚCI

Wprowadzenie 7
Andrzej Michałowski, Aldona Kurzawska, Iwona Sobkowiak-Tabaka

Izotopy trwałe węgla i azotu w badaniach diety 11
Rafał A. Fetner

Badania fizykochemiczne szkła 29
Tomasz Purowski, Barbara Wagner, Olga Syta, Beata Marciniak-Maliszewska

Pigmenty i barwniki 51
Joanna Trąbska

Odciski tekstyliów w glinie 81
Agata Ulanowska, Magdalena Przymorska-Sztuczka

Zmineralizowane pozostałości materiałów organicznych 105
Aldona Kurzawska, Iwona Sobkowiak-Tabaka

Archeoskórnictwo 129
Anna B. Kowalska

Traseologia wytworów z surowców kostnych 155
Grzegorz Osipowicz, Justyna Orłowska

Traseologia ceramiki 181
Dagmara Łaciak

Traseologia zabytków metalowych 197
Dawid Sych

Izotopy metali (Pb, Sn, Ag) 211
Ewelina Miśta-Jakubowska

Konserwacja ruchomych zabytków archeologicznych 231
Magdalena Majorek-Lipowicz

Archeomuzykologia. Miary i wymiary dźwięku 251
Anna Gruszczyńska-Ziółkowska

System Informacji Geograficznej (GIS) 277
Jarosław Jasiewicz

Vibra-coring: Wiercenia udarowe i pobieranie rdzeni osadów w archeologii 313
Jakub Niebieszczański, Sebastian Teska, Piotr Majorek, Cezary Bahyrycz, Janusz Czebreszuk

Geochemiczne badania osadów biogenicznych 329
Ryszard Krzysztof Borówka, Daniel Okupny

Lotnicze skanowanie laserowe (LIDAR) 367
Łukasz Banaszek

Trójwymiarowa dokumentacja zabytków ruchomych 387
Maksym Mackiewicz

Wybrane narzędzia analizy chemicznej stosowane w archeologii 409
Jędrzej Proch, Przemysław Niedzielski

Wykaz autorów 431

Wprowadzenie

Andrzej Michałowski, Aldona Kurzawska, Iwona Sobkowiak-Tabaka

Wejrzeć w to, co niewidoczne. Zobaczyć strukturę rzeczy i odczytać to, co umyka nie tylko oku, ale i zwyczajnemu szkiełku. To marzenie każdego badacza – poszerzyć źródła aż po granice uchwytności. Przez takie światy prowadziły nas teksty pierwszej części *Mikroprzeszłości* – książki, która zyskała bardzo pozytywny odbiór zarówno w środowisku naukowym, jak i wśród studentów oraz osób zafascynowanych archeologią. Druga część jest pewnym uzupełnieniem prezentowanych wcześniej treści. Nie wyczerpuje jednak szerokiego wachlarza metod stosowanych we współczesnej archeologii, bowiem ze względu na jej dynamiczny rozwój nie jest to możliwe.

Blisko 350 lat temu Izaak Newton powiedział: *Jeśli widzę dalej to tylko dlatego, że stoję na barkach olbrzymów.* W duchu tej myśli powstał niniejszy tom – przygotowany z perspektywy nowoczesnej humanistyki, która integruje narzędzia i metody nauk przyrodniczych, ścisłych oraz technicznych w celu tworzenia nowych narracji o przeszłości. Takie podejście pozwala uzyskać świeże spojrzenie na pamięć i tożsamość oraz pogłębić refleksję nad rolą człowieka w świecie i jego relacjami z otoczeniem. Znakomicie wpisuje się w to również cyfryzacja humanistyki, która otwiera archeologię na nowe perspektywy badawcze i umożliwia szerokie udostępnianie danych o przeszłości. Działania te adresowane są zarówno do środowisk akademickich, jak i do szerokiej publiczności, tworząc przestrzeń dialogu między nauką a społeczeństwem. Archeologia dostarcza narzędzi do krytycznej refleksji, pytań o znaczenie, wartości i narracje, oferuje również metody umożliwiające osadzenie tych pytań w konkretnych danych: społecznych, środowiskowych i materialnych. Obie perspektywy łączy idea całościowego, wielowymiarowego spojrzenia na przeszłość, które z jednej strony opiera się na danych empirycznych, a z drugiej – uwzględnia społeczne, kulturowe i symboliczne aspekty ludzkiego życia. *Mikroprzeszłość*, zarówno jej pierwsza, jak i oddawana w Państwa ręce druga część, dotyka niewielkiego wycinka archeologii – tej dostarczającej danych empirycznych, które, płynąc z nurtem nowoczesnego podejścia do badania przeszłości człowieka, uzupełniają refleksję humanistyczną o konkretne, namacalne podstawy, stając się nieodzownym elementem w podejmowanych próbach poznania dawnych społeczności.

Pierwszy rozdział niniejszej publikacji poświęcony jest analizie trwałych izotopów węgla i azotu

DOI: 10.64158/u6wwftgjt8

w badaniach nad dietą. Dostarczają one nie tylko cennych informacji o sposobie życia naszych przodków, ale także mogą przybliżyć nas do zrozumienia ich struktur społecznych i kulturowych. Wyniki tych analiz podkreślają znaczenie relacji między człowiekiem a środowiskiem oraz ukazują wpływ diety na rozwój cywilizacji.

Kolejny rozdział, poświęcony fizykochemicznym badaniom szkła, stanowi przykład interdyscyplinarnego podejścia łączącego chemię z archeologią. Analizy te pozwalają nie tylko określić pochodzenia surowców, ale także zidentyfikować techniki produkcji, co umożliwia rekonstrukcję dawnych procesów technologicznych. Współczesne metody badawcze odgrywają w tym zakresie kluczową rolę, ponieważ na podstawie zachowanych fragmentów szkła dostarczają cennych informacji o kulturze materialnej minionych epok.

Rozdział poświęcony pigmentom i barwnikom, zarówno mineralnym, jak i organicznym, otwiera nowe perspektywy w badaniach nad estetyką i sztuką dawnych cywilizacji. Analiza ich składu chemicznego umożliwia nie tylko identyfikację lokalnych źródeł surowców, lecz także lepsze zrozumienie procesów wymiany handlowej oraz wpływów kulturowych między różnymi regionami.

Dwa kolejne rozdziały uzupełniają zaprezentowane w pierwszej części *Mikroprzeszłości* badania i analizy tkanin. Odciski tekstyliów w glinie stanowią doskonały przykład zachowanych śladów przeszłości, rzucając światło na techniki ich wytwarzania. Z kolei analizy zmineralizowanych pozostałości materiałów organicznych z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego, wprowadzają nas w świat, w którym natura i kultura współistniały ze sobą w niezwykle złożony sposób.

Zagadnienia związane ze skórami i skórnictwem, a także traseologią zabytków kościanych, ceramicznych i metalowych, ukazują niewidzialne nici łączące człowieka z jego materialnym otoczeniem. Techniki traseologiczne dostarczają informacji o metodach obróbki i sposobach użytkowania konkretnych przedmiotów, co może być kluczowym elementem w podejmowanych przez archeologów próbach rekonstrukcji życia codziennego naszych przodków.

Niezwykle szeroki wachlarz zagadnień poruszanych w niniejszej publikacji, obejmujący m.in. analizę izotopów metali oraz techniki konserwacji ruchomych zabytków archeologicznych, ukazuje dynamiczny rozwój współczesnych badań archeologicznych, wzbogacanych nieustannie o nowe pytania i metody badawcze. Laserowe skanowanie LIDAR oraz trójwymiarowa dokumentacja zabytków ruchomych to przykłady nowoczesnych technologii, które rewolucjonizują proces pozyskiwania i interpretacji danych oraz znalezisk. Otwierają one nowe perspektywy nie tylko w skali mikro, lecz także w makro, odsłaniając krajobrazy minionych epok, które dzięki tym narzędziom niemal dosłownie ożywają na naszych oczach.

Publikację zamyka przegląd narzędzi analizy chemicznej stosowanych w archeologii, które odpowiednio dobrane do specyfiki obiektów dziedzictwa kulturowego, pozwalają szczegółowo analizować strukturę materiałów oraz procesy ich degradacji.

Jak już wspomniano pierwsza część publikacji *Mikroprzeszłość* spotkała się z ogromnym uznaniem środowiska naukowego, stając się niekwestionowanym bestsellerem. Mamy nadzieję, że druga część powtórzy ten sukces, pokazując jak wszechstronnie można dziś zbliżyć się do poznania człowieka i dziejów jego cywilizacji. W tym celu wykorzystujemy nowoczesne technologie oraz metody wykraczające poza klasyczny kanon metodologii nauk humanistycznych, nie tracąc jednak z oczu tego, co najistotniejsze – ludzkiej myśli zamkniętej w materialnych świadectwach przeszłości.

Treści poszczególnych rozdziałów, które oddajemy właśnie w ręce Czytelników, wskazują na wciąż ogromny, często niewykorzystany potencjał materiałów archeologicznych. Poddane badaniom, nie tylko dostarczają nowej wiedzy, ale także inspirują do twórczej refleksji nad przeszłością i jej znaczeniem we współczesnym świecie. Zachęcamy do lektury i odkrywania mikroprzeszłości – fascynującej mozaiki dawnych ludzkich doświadczeń, które dzięki aktualnym metodom badawczym nabierają nowego znaczenia i pozwalają zajrzeć w to, co dotąd pozostawało niewidoczne.

Na koniec pragniemy wyrazić nasze szczere podziękowania wszystkim Autorom, którzy przyjęli zaproszenie do współtworzenia tego tomu, dzieląc się swoją wiedzą i poświęcając czas na przygotowanie tekstów. Ich zaangażowanie jest nieocenione, bez niego powstanie tej publikacji nie byłoby możliwe.




C4

Izotopy trwałe węgla i azotu w badaniach diety

Rafał A. Fetner

WPROWADZENIE

Dieta dostarcza kluczowych informacji o wpływie działalności człowieka na środowisko, sposobach pozyskiwania dóbr, ich redystrybucji w grupie oraz o dostępnych składnikach odżywczych i ich wpływie na dobrostan jednostek (Twiss 2012; Katzenberg 2008; Schoeninger 2010). Badania diety pozwalają na interpretację historycznych modeli gospodarczych, m.in. łowiecko-zbierackich czy rolniczo-pasterskich, oraz na analizę obiegu dóbr i handlu między społecznościami. W końcu odzwierciedla styl życia pojedynczych osób, ich stan zdrowia, interakcje społeczne i adaptacje do środowiska naturalnego. Dodatkowe informacje pozwalają na szczegółową analizę zmienności diety wewnątrz grup zwierząt lub ludzi i identyfikację grup uprzywilejowanych lub marginalizowanych. Połączenie tych danych ze wskaźnikami takimi jak stopień odżywienia czy poziom stresu umożliwia ocenę tego, w jaki sposób dieta przekładała się na zdrowie danej osoby.

Na tym etapie niezbędne jest rozróżnienie dwóch pojęć: dieta i menu. Dieta definiuje zestaw produktów spożywanych przez osobnika, podczas gdy menu obejmuje wszystkie dostępne produkty (Reitz i Shackley 2012: 25). Wybór konkretnych pokarmów z menu jest uzależniony od wielu czynników, które mogą się zmieniać w zależności od wieku, płci, statusu społecznego, zamożności oraz przekonań, a także ulegać cyklicznym zmianom w ciągu tygodnia, sezonu czy roku. Menu jest głównie kształtowane przez środowisko, w którym żyje jednostka. Ludzie mogą jednak adaptować środowisko do swoich potrzeb, np. poprzez udomowienie roślin i zwierząt, co zwiększa jego produktywność, lub wprowadzanie jadalnych gatunków na nowe tereny, rozszerzając tym samym możliwości żywieniowe. Analiza menu umożliwia zatem określenie zmian w środowisku oraz strategie dostosowania go do potrzeb żywieniowych.

HISTORIA BADAŃ

Rozwój badań izotopowych nad dietą dawnych populacji rozpoczął się w latach 60. ubiegłego wieku dzięki zaobserwowanym różnicom w datowaniu węgla drzewnego i zwęglonych ziaren kukurydzy. Kluczowe

DOI: 10.64158/8enn0zgzjc

informacje przyniosły równolegle prowadzone badania izotopowe współczesnych roślin oraz odkrycie różnic w metabolizmie węgla między roślinami: C_3 (w tym drzewami) a C_4 (w tym kukurydzą). Analiza tych rozbieżności podczas badania szczątków osób, które mogły spożywać kukurydzę, umożliwiła wyciągnięcie wniosków na temat ich diety oraz dokonanie korekt datowań (Katzenberg 2008).

Pod koniec lat 70. i na początku lat 80. XX w., przeprowadzono liczne eksperymenty na zwierzętach z kontrolowaną dietą, które ukazały różnice między wartościami izotopowymi spożywanych pokarmów a wartościami izotopowymi różnych tkanek (DeNiro i Epstein 1978), w tym kolagenu (Schoeninger i DeNiro 1984). Wprowadzenie analizy izotopów azotu (DeNiro i Epstein 1981; Schoeninger i DeNiro 1984), a później innych izotopów, np. siarki, pozwoliło na dalsze doskonalenie metod rekonstrukcji diety.

W Polsce pierwsze szerzej zakrojone badania nad rekonstrukcją diety ludzkiej z zastosowaniem izotopów trwałych kolagenu zrealizowano dopiero pod koniec pierwszej dekady XXI w. Były to analizy prowadzone na szczątkach ludzkich z Giecza (Reitsema i in. 2010) i Rogowa (Reitsema i Kozłowski 2013). W tym samym czasie powstała praca dotycząca badań szczątków zwierzęcych (Reitsema i in. 2013). Od tego czasu badania izotopowe coraz częściej wykorzystywane są do odtwarzania przeszłości człowieka, co ułatwia zrozumienie dawnych nawyków żywieniowych i adaptacji dietetycznych.

FRAKCJONOWANIE

Obecnie analiza diety często wykorzystuje izotopy węgla i azotu, rzadziej siarki. Izotopy to odmiany tego samego pierwiastka, które różnią się liczbą neutronów w jądrze. Na przykład, powszechnie występujący izotop węgla, ^{12}C, posiada 6 protonów i 6 neutronów, podczas gdy izotop ^{13}C składa się z 6 protonów i 7 neutronów. Oba izotopy są trwałe, co oznacza, że mają długi okres połowicznego rozpadu. W archeologii często stosowany jest nietrwały izotop węgla, ^{14}C, używany do datowania bezwzględnego. Jego okres połowicznego rozpadu wynosi 5730 lat, co oznacza, że po tym czasie połowa pierwotnej liczby izotopów ^{14}C ulegnie samorzutnemu rozpadowi (Katzenberg 2008; Sulzman 2007). Różnice w liczbie neutronów wpływają na masę atomu i zachowanie izotopów w reakcjach chemicznych, co jest kluczowe z punktu widzenia frakcjonowania izotopowego. Cięższe izotopy wymagają więcej energii, aby wziąć udział w reakcji chemicznej. Mniej energii, potrzebują lżejsze izotopy, zatem chętniej biorą udział we wszelkich reakcjach. W efekcie w produktach reakcji chemicznej znajdzie się więcej lżejszych izotopów, a cięższe izotopy częściej będą pozostawały w substratach. Co więcej, cięższe izotopy będą również miały tendencję do gromadzenia się na dnie zbiorników, przez co częściej też będą rozpuszczone w wodzie. Znajduje to odzwierciedlenie w badaniach izotopowych organizmów morskich i oceanicznych (Sulzman 2007).

Izotopy są nieocenionym narzędziem analizy substancji, z których powstaje produkt procesów chemicznych. Często sam proces jest nieobserwowalny, możliwe jest natomiast zbadanie jego produktu. Oznaczenie izotopowe (dodanie do jednego z substratów rzadko występujących izotopów danego pierwiastka), może pozwolić na określenie czy oznaczony substrat znalazł się w produkcie, wziął udział w procesie chemicznym czy też nie. Podobnie rekonstruowana jest dieta: na podstawie produktu procesów chemicznych (np. kolagenu) możemy wnioskować o substratach, które zostały dostarczone organizmowi, czyli o diecie. Znając zmienność proporcji izotopów w diecie, możemy próbować następnie identyfikować produkty, które złożyły się na dietę danej osoby/zwierzęcia.

Analiza kolagenu najczęściej opiera się na dwóch systemach izotopowych, węgla i azotu. Tutaj proporcja izotopów cięższych do lżejszych ($^{13}C/^{12}C$ oraz $^{15}N/^{14}N$) jest zestawiana z wartościami standardowymi według wzoru:

Równanie 1. Równanie na obliczenie proporcji izotopów pierwiastka w odniesieniu do materiału standardowego.

$$\delta R = \left(\frac{R_{próba}}{R_{standard}} - 1\right) \times 1000$$

Różnica pomiędzy próbą a standardem wyrażona jest za pomocą greckiej litery *delta* (gdzie δR oznacza $\delta^{13}C$ dla węgla, $\delta^{15}N$ dla azotu) i jest wyrażana w promilach (‰). Rożnica między dwiema wartościami δ zapisywana jest wielką literą *delta* (Δ).

WĘGIEL W BIOSFERZE

Podstawowym rezerwuarem węgla dostępnego dla biosfery jest dwutlenek węgla znajdujący się

w atmosferze ($CO_{2\text{-atm}}$), którego współczesna wartość $\delta^{13}C$ wynosi ok. -8,0‰. Wartość ta uległa zmianie w ostatnich wiekach w wyniku spalania paliw kopalnych, które emitowały do atmosfery CO_2 o niskich wartościach $\delta^{13}C$. Przez większą część holocenu wartość ta oscylowała wokół -6.5‰ (Marshall i in. 2007). Drugim ważnym rezerwuarem węgla jest dwutlenek węgla rozpuszczony w wodzie ($CO_{2\text{-aq}}$). Część $CO_{2\text{-atm}}$ jest pochłaniana przez wodę, głównie przez oceany ze względu na ich powierzchnię. W wyniku frakcjonowania $CO_{2\text{-aq}}$ jest bogatszy o cięższe izotopy węgla o ok. +8‰ w stosunku do $CO_{2\text{-atm}}$. Średnia globalna wartość nieorganicznego węgla rozpuszczonego w wodzie wynosi ok. 0-1‰. To zjawisko jest obserwowane przede wszystkim w dużych zbiornikach wodnych, takich jak morza i oceany, nie zauważa się go w mniejszych zbiornikach i ciekach wodnych, gdzie inne źródła nieorganiczne wpływają na wartości $\delta^{13}C$ (Michener i Kaufman 2007).

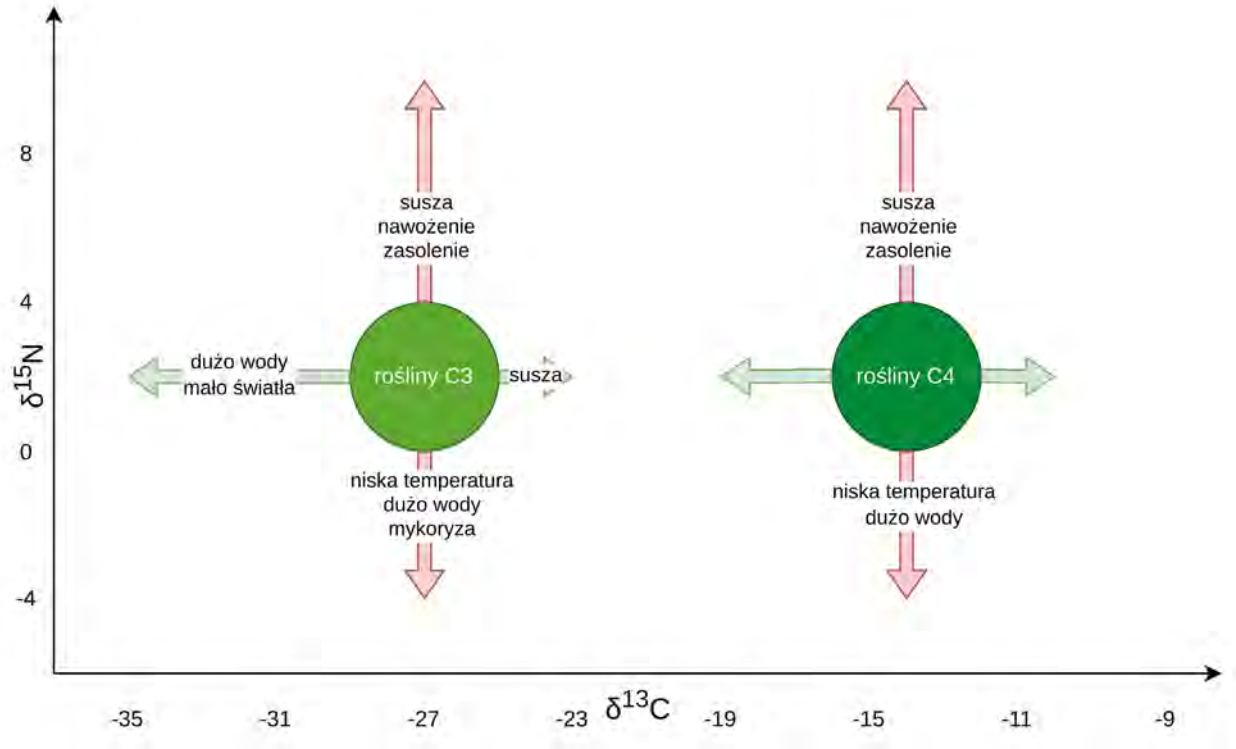
Dwutlenek węgla jest włączany do łańcucha pokarmowego przez autotrofy, organizmy samożywne, które dzięki fotosyntezie przekształcają nieorganiczny dwutlenek węgla w proste związki organiczne. Poniżej przedstawiony zostanie uproszczony schemat obiegu węgla w liściu wraz z najważniejszymi procesami frakcjonowania, które mają kluczowe znaczenie dla ostatecznej wartości $\delta^{13}C$ w tkankach roślin. Szczegółowe omówienie można znaleźć w Marshall i in. (2007).

Atmosferyczny dwutlenek węgla dostaje się do wnętrza liścia przez aparat szparkowy umieszczony na jego spodzie. Stopień otwarcia aparatu szparkowego zależy od wilgotności otoczenia. W wilgotne dni aparat pozostaje szeroko otwarty, umożliwiając swobodną wymianę gazową, natomiast w czasie suszy jest zamknięty, co ogranicza dostęp CO_2 do liścia i zmniejsza wydalanie dwutlenku węgla przez roślinę. Gdy aparat jest szeroko otwarty, różnica między $CO_{2\text{-atm}}$ a CO_2 w aparacie szparkowym pozostaje niewielka. Różnica ta wzrasta w miarę zamykania się aparatu. Ograniczona wymiana gazowa sprawia, że częściej lżejsze izotopy węgla przedostają się do wnętrza liścia. Średnia różnica pomiędzy $CO_{2\text{-atm}}$ a CO_2 w aparacie szparkowym wynosi -4.4‰ (Marshall i in. 2007). Wpływ wilgotności na wartości $\delta^{13}C$ roślin C_3 może pomóc w badaniu wykorzystania wody przez rośliny, a w archeologii w rekonstrukcjach zastosowania technik irygacji. Rośliny sztucznie nawadniane będą miały niższe wartości $\delta^{13}C$ niż rośliny, które nie miały dostępu do dodatkowej wody (Wallace i in. 2013).

Transport węgla między aparatem szparkowym a chloroplastem, gdzie zachodzi proces RuBisCO, znacząco różni się między roślinami, co wpływa na ich wartości $\delta^{13}C$. Ewolucyjnie starszy proces, cykl Calvina (tzw. cykl C_3), wykorzystuje wodę do transportu CO_2. Z kolei rośliny wykorzystujące młodszy ewolucyjnie proces, cykl Hatcha-Slacka (tzw. cykl C_4), mają zdolność wiązania CO_2 do fosfoenolopirogronianu, co prowadzi do koncentracji węgla i zapobiega niepożądanemu fotooddychaniu. Wiązanie CO_2 do fosfoenolopirogronianu prowadzi do istotnego wzbogacenia węgla o ok. 6‰. Niektóre rośliny, przede wszystkim sukulenty, mogą korzystać z obu sposobów transportu węgla w zależności od potrzeb (tzw. mechanizm CAM). W ich przypadku stopień wzbogacenia w cięższe izotopy węgla będą wahać się między 0 a 6‰, a same rośliny będą mieć wartości pośrednie między roślinami C_3 a C_4. Przykładem rośliny korzystającej z CAM jest ananas (Marshall i in. 2007), por. ryc. 1.

Węgiel tworzący tkanki heterotrofów, czyli organizmów cudzożywnych, pochodzi z ich pożywienia (Koch 2007). Kolagen kości lub zębiny jest wzbogacony o cięższe izotopy węgla w odniesieniu do konsumowanego białka (roślinnego lub zwierzęcego). Średnia wartość wzbogacenia troficznego między pokarmem a kolagenem wynosi +3,7‰ (±1,6‰ odchylenia standardowego). Dla 95% przebadanych organizmów wartość ta oscyluje między 0,5 a 6,9‰ (Szpak i in. 2012). Kolagen zwierząt roślinożernych będzie wzbogacony o cięższe izotopy węgla o ok. 5‰ w stosunku do spożywanych roślin, natomiast kolagen zwierząt mięsożernych o 1-3‰ w stosunku do spożywanych tkanek zwierzęcych. Wynika to z różnic w fizjologii procesu trawienia. Zwierzęta wszystkożerne znajdują się pomiędzy tymi dwoma grupami, w zależności od proporcji konsumowanego białka zwierzęcego.

W środowisku wodnym relacje troficzne ukształtowane są podobnie (Michener i Kaufman 2007; Schoeninger i DeNiro 1984). Kluczowe jest tutaj rozróżnienie środowiska, w którym żyje ryba. W środowisku przybrzeżnym ryby mają dostęp do lokalnego planktonu (wartości $\delta^{13}C$ między -24 a -18‰) i wodorostów (-15 do -3‰). Różnice między tymi autotrofami wynikają z głównych źródeł węgla rozpuszczonego w wodzie: plankton wykorzystuje węgiel z rozpuszczonego CO_2, a wodorosty – z węglanów tworzących dno zbiornika (Michener i Kaufman 2007). Niezależnie od miejsca żerowania, ryby morskie mają wyższe wartości $\delta^{13}C$ niż organizmy lądowe (Schoeninger i DeNiro 1984). Inaczej przedstawia



Ryc. 1. Podsumowanie czynników wpływających na zmienność wartości izotopów trwałych węgla i azotu w roślinach

się sytuacja w wodach śródlądowych, gdzie z powodu mniejszej powierzchni zbiornika wpływ atmosferycznego dwutlenku węgla jest mniejszy, a większą rolę odgrywają węglany z podłoża oraz roślinność lądowa, która trafia do zbiornika i może stać się pokarmem ryb. Wartości $\delta^{13}C$ ryb śródlądowych są bardzo zróżnicowane, zwykle niższe niż u zwierząt lądowych, ale mogą osiągać poziomy podobne do ryb morskich (Fetner i Iwaszczuk 2021). Ryby zamieszkujące estuaria i delty rzek, gdzie dochodzi do mieszania wód słodkich i słonych, a także ryby dwuśrodowiskowe, które w zależności od etapu życia zmieniają miejsce bytowania (z rzek do mórz lub z mórz do rzek), mają bardzo zróżnicowaną dietę. Ich wartości $\delta^{13}C$ zazwyczaj mieszczą się pomiędzy wartościami ryb wód śródlądowych i morskich (Fetner i Iwaszczuk 2021).

AZOT W BIOSFERZE

Azot atmosferyczny ($\delta^{15}N$ = 0‰) jest naturalnym rezerwuarem tego pierwiastka w biosferze, jednak ze względu na silne wiązania między atomami w cząsteczce, większość organizmów nie jest w stanie go wykorzystać. Staje się on biodostępny dzięki działalności bakterii, które wiążą cząsteczki azotu atmosferycznego w jony amonowe i azotanowe, łatwo przyswajalne przez rośliny. Proces ten zależy od wilgotności i temperatury otoczenia. Rośliny pobierają jony zawierające azot z gleby przez system korzeniowy i zazwyczaj nie zwracają go do środowiska. Zatem wartość izotopowa rośliny odpowiada wartościom izotopowym biologicznie dostępnego azotu w glebie, a zmiany w proporcjach izotopów azotu w glebie mają bezpośredni wpływ na wartości rośliny (Evans 2001). Badania ekologiczne wykazały, że wartości $\delta^{15}N$ roślin mogą się wahać między -10 a 10‰ w zależności od gatunku, wilgotności, zasolenia i obecności nawozów naturalnych w glebie. W klimacie umiarkowanym wartości te zwykle oscylują między 1 a 4‰ (Evans 2001).

Istotnym czynnikiem różnicującym wartości $\delta^{15}N$ w zależności od gatunku rośliny jest obecność symbionta w korzeniach. Rośliny motylkowe wykształciły symbiozę z bakteriami, które dostarczają im biodostępnego azotu. Te rośliny zazwyczaj wykazują mniejsze zróżnicowanie wartości $\delta^{15}N$ niż inne rośliny rosnące w tych samych warunkach (Evans 2001). Dalsze zróżnicowanie wśród roślin możemy

obserwować ze względu na dostępność wody, zasolenie czy nawożenie. Rośliny rosnące w stosunkowo suchych warunkach (poniżej 250-300 mm opadów rocznie) mają wyższe średnie wartości $\delta^{15}N$ niż rośliny rosnące w miejscach o lepszej dostępności wody (Pate i Anson 2008). Wyższe wartości zaobserwujemy również wśród roślin z terenów o wysokim zasoleniu, w tym wybrzeży i słonych bagien. W końcu wysokie wartości $\delta^{15}N$ będą miały również rośliny uprawiane na regularnie nawożonych polach (ryc. 1) (Bogaard i in. 2007).

Podobnie jak w przypadku węgla, kolagen konsumentów będzie wzbogacony w cięższe izotopy azotu w porównaniu do spożywanego białka (Koch 2007). Stopień wzbogacenia zależy od ilości białka w diecie, głównego źródła azotu. Kluczowe znaczenie będzie miał tutaj proces ureogenezy. Podczas niego usuwane są z organizmu przede wszystkim lekkie izotopy azotu, a ciężkie pozostają w organizmie i są wykorzystywane, m.in. do syntezy kolagenu. U zwierząt roślinożernych, których dieta jest uboga w białko, mniej azotu jest przekazywane do procesu ureogenezy, co skutkuje mniejszą różnicą między pokarmem a tkankami. U zwierząt mięsożernych, czyli o diecie bogatej w białko, więcej azotu uczestniczy w ureogenezie, co prowadzi do wyższych wartości $\delta^{15}N$ tkanek (Koch 2007). Średnia wartość wzbogacenia pomiędzy kolagenem a pokarmem wynosi 3,6‰ (±1,7‰ odchylenia standardowego), z zaobserwowanymi wartościami w przedziale od 1 do 6‰ (Szpak i in. 2012). Wartości poniżej średniej są typowe dla zwierząt roślinożernych, a wyższe dla mięsożernych. Oznacza to, że zwierzęta roślinożerne mają wyższe wartości $\delta^{15}N$ o ok. 1-3‰ w stosunku do spożywanych roślin, podczas gdy mięsożerne o ok. 3-6‰ względem konsumowanego białka zwierzęcego. Zwierzęta wszystkożerne plasują się między tymi grupami, w zależności od proporcji białka zwierzęcego w diecie.

W środowisku wodnym gospodarka azotem jest podobna (Michener i Kaufman 2007). Głównym źródłem jest rozpuszczony w wodzie azot atmosferyczny, który jest wiązany w jony dostępne autotrofom. Dodatkowe źródło biodostępnego azotu stanowią spłukiwane z lądu szczątki organiczne oraz ścieki komunalne, co może wzbogacać tereny przybrzeżne w cięższe izotopy azotu. W środowisku morskim ryby drapieżne mogą konsumować inne ryby drapieżne, co prowadzi do wysokich wartości $\delta^{15}N$ u dużych ryb drapieżnych, często wyższych niż u lądowych drapieżników. Najwyższe wartości obserwujemy wśród ssaków morskich, które polują na największe ryby (Michener i Kaufman 2007; Schoeninger i DeNiro 1984). Podsumowanie zmienności wartości $\delta^{13}C$ oraz $\delta^{15}N$ dla poszczególnych typów organizmów przedstawia ryc. 2.

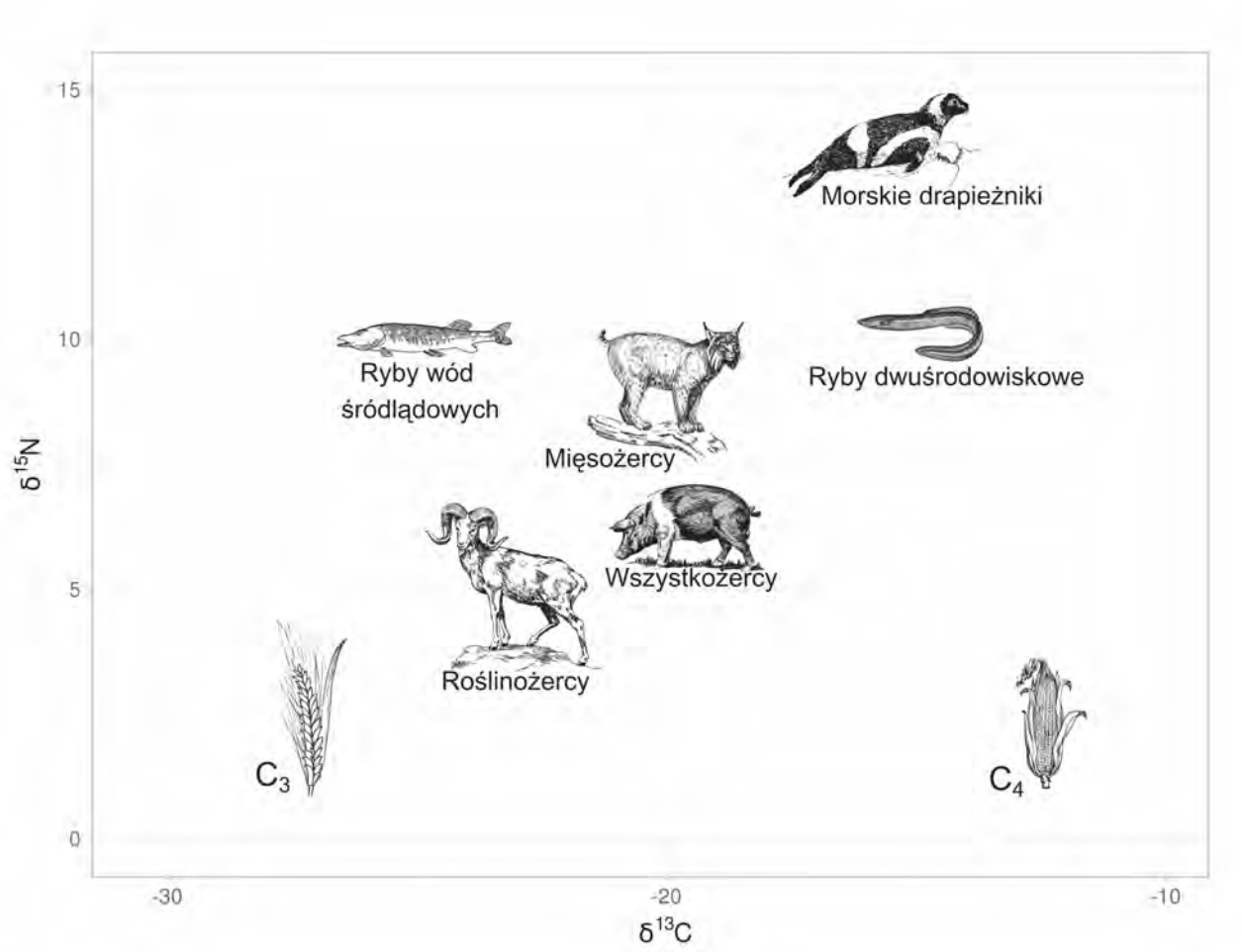
TECHNIKI BADANIA DIETY

Szczątki ludzkie i zwierzęce oferują możliwość analizy frakcji organicznej (głównie kolagenu) oraz nieorganicznej (bioapatytu) kości. Ten ostatni częściej wykorzystuje się w badaniach pochodzenia osobnika, zatem dyskusja obejmować będzie kolagen.

Kości ulegają ciągłej przebudowie, co oznacza, że przechowują informację biochemiczną o diecie konsumowanej w ostatnich latach życia osobnika (Fahy i in. 2017), np. w przypadku kości długich człowieka dotyczy to okresu ostatnich 15 lat (trzon kości udowej) lub ostatnich 3 lat (trzon żebra). Inaczej sytuacja wygląda w przypadku zębów, które są formowane raz i odzwierciedlają dietę z pierwszych lat życia osobnika, np. u człowieka do końca 14. roku życia (przy zachowanych drugich zębach trzonowych) lub nawet do 19. roku życia przy obecnych i zachowanych trzecich zębach trzonowych (Hillson 2005). Staranny dobór próbek umożliwia rekonstrukcję diety z różnych etapów życia osobnika.

W typowej rekonstrukcji diety ludzi fragment żebra jest poddawany ekstrakcji kolagenu, co pozwala na porównania między mężczyznami a kobietami oraz osobami w różnym wieku. U dzieci poniżej 3. roku życia obserwuje się efekt karmienia mlekiem matki, które charakteryzuje się wysokimi wartościami $\delta^{15}N$ (Tsutaya i Yoneda 2015). W badaniach nad typową dietą grupy ludzi, dzieci poniżej 3. roku życia można wykluczyć z analizy. Jeśli żebra nie są dostępne, można użyć trzonów kości długich, które odzwierciedlają uśrednioną dietę z dłuższego okresu życia (do 15 lat). W ostateczności możliwe jest zbadanie korzeni zębów trzonowych (2. lub 3.), które formują się między 7. a 19. rokiem życia, co pozwala wnioskować o diecie osób w tym wieku.

Celem uzyskania najpełniejszego obrazu diety zaleca się analizę serii prób reprezentujących różne etapy życia osobnika, w tym korzeni zębów wraz z fragmentem trzonu kości udowej oraz żebra. Pozwala to uchwycić zmiany pomiędzy czasem dzieciństwa, ostatniej dekady i kilku lat przed śmiercią. Zaawansowaną techniką jest mikropróbkowanie. Umożliwia ono pobranie próbek z kolejnych części korzenia. Dzięki dokładnemu przypisaniu danej



Ryc. 2. Podsumowanie zmienności wartości proporcji izotopów trwałych węgla i azotu

próbki do konkretnego momentu życia osobnika możliwe staje się stworzenie sekwencji chronologicznej oraz badanie sezonowych zmian w diecie. Metoda ta ograniczona jest okresem wzrostu korzeni zębów, u człowieka, do ok. 19. roku życia (dla 3. zęba trzonowego) (Hillson 2005).

Ekstrakcja kolagenu

W najprostszym ujęciu proces ekstrakcji kolagenu rozpoczyna się od rozpuszczenia frakcji mineralnej kości w słabym kwasie, przy dbałości o to, aby nie uszkodzić kolagenu. Z uwagi na stan zachowania kości pochodzących z wykopalisk archeologicznych, które często są zanieczyszczone kwasami pochodzącymi z gleby, a frakcja organiczna zdegradowana, proces ten wymaga staranności. Poniżej przedstawionono proces ekstrakcji kolagenu na podstawie zmodyfikowanej metody zaproponowanej przez Longin (1971), por. ryc. 3.

Najpierw pozyskujemy fragment kości lub zębiny (ryc. 4), zazwyczaj poprzez jego wycięcie ze szkieletu, następnie dokładnie go czyścimy mechanicznie, aby usunąć wszelkie zabrudzenia. Ważymy fragment kości, ponieważ do przeprowadzenia procesu ekstrakcji potrzebujemy ok. 500 mg kości/zębiny. Próbkę umieszczoną w próbówce zalewamy roztworem NaOH lub H_2O_2 o niskim stężeniu, co ma na celu usunięcie kwasów pochodzących z gleby potencjalnie zanieczyszczających próbkę. W roztworze zasadowym próbę należy trzymać krótko, aby ograniczył on swoje działanie jedynie do powierzchni kości, ponieważ przy dłuższej ekspozycji może również niszczyć kolagen wewnątrz próby.

Kolejny krok to dokładne płukanie próbki wodą dejonizowaną. Po wypłukaniu dodajemy do próbki kwas solny (HCl) o stężeniu 0,3 mola/litr (ryc. 5). Próbki pobrane z dobrze zachowanych kości można trzymać w temperaturze pokojowej, natomiast te z gorzej zachowanych oraz szczątki ryb lepiej jest



Ryc. 3. Schematyczne przedstawienie procesu demineralizacji tkanki kostnej i pozyskanie kolagenu do analiz izotopowych



Ryc. 4. Próby kości i zębów zwierząt wybrane do analizy proporcji izotopów trwałych

trzymać w temperaturze ok. 4˚C. Takie działanie wydłuża proces demineralizacji nawet trzykrotnie, ale oszczędza pozostały w kości kolagen. Wodę z kwasem wymieniamy regularnie, co najmniej 2-3 razy w tygodniu, aż do momentu, gdy próbka staje się elastyczna lub półprzezroczysta, co zazwyczaj trwa ok. 3 tygodnie w temperaturze pokojowej lub 2-3 miesiące w temperaturze 4˚C.

Następnie próbkę należy wypłukać trzykrotnie wodą dejonizowaną i dodać do próbówki roztwór wodny HCl o pH równym 3. Probówki z tak przygotowanymi próbkami należy zakleić i umieścić w piecyku nastawionym na 70˚C. Po 48 godzinach można je wyjąć. W próbówkach powinna znajdować się przezroczysta ciecz o odcieniu słomkowym, a kolagen powinien rozpuścić się w wodzie.

Kolejnym etapem pracy jest filtrowanie, do czego często wykorzystuje się filtry EezeeFilter o oku wielkości 30-60 μm, które pozwalają oddzielić potencjalne zabrudzenia od rozpuszczonego kolagenu. Tak przygotowane próbki umieszczamy w zamrażarce, w temperaturze minimum -20˚C na kilka dni, aby dobrze się zamroziły. Zamrożony roztwór kolagenu poddajemy następnie liofilizacji w próżni od 24 do 48 godzin, aby cały lód wyparował, a pozostał suchy kolagen, który ma teraz postać zbitej, sztywnej waty (ryc. 6). Należy zważyć go w celu kontroli jakości. Kolagen dobrej jakości powinien mieć nie mniej niż 1% masy próby (zważonej na początku procesu ekstrakcji). Po zważeniu umieszczamy pozyskany kolagen w małej, zamykanej probówce. W tej postaci może być krótko przechowywany w suchym pomieszczeniu lub przesłany do laboratorium. Przesyłane próby powinny mieć masę powyżej 5 mg, gdyż urządzenie wymaga użycia między 1-2 mg kolagenu, a przesłanie większych ilości pozwala na zduplikowanie próby.

Badania spektrometrem

Pomiar proporcji izotopów trwałych węgla i azotu w kolagenie odbywa się w spektrometrze mas (ang.



Ryc. 5. Fragmenty kości podlegające demineralizacji w kwasie solnym

isotope ratio mass spectrometer, IRMS) (Sulzman 2007). Obok kolagenu mierzone są proporcje izotopów w materiałach referencyjnych (wewnątrzlaboratoryjnych i posiadających międzynarodowy atest). Pomiar rozpoczyna się spaleniem próby w bardzo wysokiej temperaturze (ok. 10 000˚C), np. w systemie ICP-MS (ang. *inductively coupled plasma – mass spectrometer*). Powstałe gazy wraz z gazem obojętnym (np. helem), przekazywane są do spektrometru, a zawarty w nich ładunek jonów jest mierzony na detektorze. Izotopy są rozróżniane na podstawie wielkości ładunku, gdzie cięższe z nich mają wyższe wartości. Różnice te są jednak bardzo subtelne i czynniki, takie jak temperatura urządzenia, temperatura otoczenia, ciśnienie atmosferyczne czy ciśnienie gazu obojętnego w urządzeniu, mają znaczący wpływ na ostateczny odczyt. Zjawisko to nazywane jest dryfem urządzenia. W celu jego kontroli w sekwencji prób równomiernie rozmieszcza się materiały referencyjne, co pozwala na automatyczną korektę w urządzeniu. Atestowane materiały referencyjne służą również jako punkty odniesienia dla kalibracji wartości prób względem powszechnie przyjętych standardów, takich jak Vienna PeeDee Belemnite (VPDB) dla węgla i Ambient Inhalable Reservoir (AIR) dla azotu, co zapewnia porównywalność wyników pomiędzy laboratoriami. W każdej sekwencji pomiarów zaleca się stosowanie co najmniej dwóch różnych materiałów standardowych, aby prawidłowo skalibrować wyniki (Roberts i in. 2018). Lista dobrych praktyk stosowanych analizach izotopowych została przedstawiona przez Szpak i in. (2017).

Kontrola jakości

Przed przystąpieniem do modelowania wyników analizy izotopowej, kluczowe jest sprawdzenie jakości pozyskanych danych. W tym celu powszechnie stosuje się

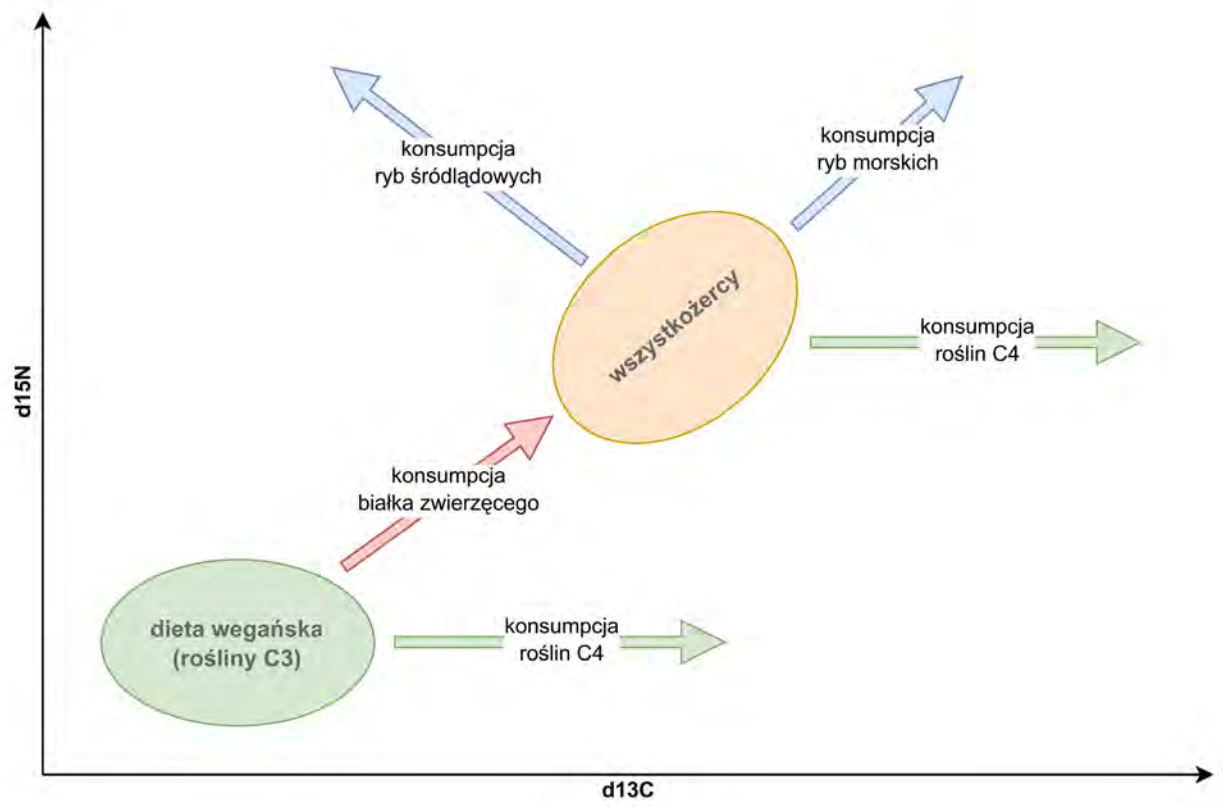


Ryc. 6. Zamrożony kolagen w trakcie liofilizacji

cztery metody (Guiry i Szpak 2021). Pierwsza z nich wykorzystuje udział suchego kolagenu w próbce kości, przy czym uznaje się, że wartość graniczna powinna wynosić nie mniej niż 1%, chociaż czasami akceptowalna jest wartość 0,5%. Kolejna metoda to ocena zawartości mas atomowych węgla i azotu w próbce. Według Ambrose'a (1990) próby uznaje się za dobrze zachowane, jeśli zawartość węgla przekracza 13%, a azotu 4,8%. Najczęściej stosowany jest wskaźnik proporcji atomów węgla do azotu w kolagenie, który u ssaków powinien wynosić ok. 3,2, z dopuszczalnym zakresem od 2,9 do 3,6 (DeNiro 1985). Próbka kolagenu uznawana jest za dobrze zachowaną, jeśli spełnia wszystkie te kryteria.

Interpretacja wyników

Interpretacja wyników analiz izotopowych w dużej mierze polega na porównaniu pomiędzy grupami (por. ryc. 7), np. między zwierzętami znajdującymi się na podobnym poziomie troficznym, ale żerującymi w różnych środowiskach, bądź między ludźmi i zwierzętami o znanych preferencjach żywieniowych, takimi jak roślinożercy. Takie porównania zazwyczaj opierają się na analizach statystycznych. Zestawienie oraz przewodnik do analiz statystycznych najczęściej wykorzystywanych w badaniach izotopowych można znaleźć w Roberts i in. (2018).



Ryc. 7. Schematyczne przedstawienie najważniejszych sposobów interpretacji wyników badań izotopowych

Najczęściej wykonywane porównania odnoszą się do określenia: 1) udziału roślin C_4 w diecie, 2) udziału białka zwierzęcego w diecie wszystkożerców, 3) udziału ryb śródlądowych/morskich w diecie, a następnie porównanie między badanymi grupami różniącymi się wiekiem, płcią, statusem społecznym).

Analiza udziału roślin C_4 w diecie opiera się przede wszystkim na określeniu liczby osób o wartościach $\delta^{13}C$ większych lub zbliżonych do -18,0‰ przy umiarkowanych wartościach $\delta^{15}N$. Pozwoli to na uchwycenie konsumentów prosa, a w czasach bardziej nam współczesnych, również kukurydzy. Warto pamiętać, że konsumpcja zwierząt żywionych roślinami C_4 również znajdzie odzwierciedlenie się w diecie ich konsumentów.

Kwestia udziału białka zwierzęcego w diecie często jest określana poprzez odniesienie do wartości kolagenu kostnego zwierząt roślinożernych (np. średnia wartość dla średniowiecznego bydła zmierzone dla terenów Polski wynosi dla $\delta^{13}C$ = -21,4‰, a dla $\delta^{15}N$ = 6,1‰). W uproszczeniu wartość dla wszystkożerców odejmuje się od wartości dla roślinożerców i dzieli przez wartość wzbogacenia troficznego. Jest to jednak model nadmiernie uproszczony, który nie sprawdza się przy zróżnicowanej diecie obserwowanej zwłaszcza u ludzi i zwierząt wszystkożernych. Co więcej, wartość wzbogacenia troficznego nie jest stała, a stanowi raczej przedział wartości i arbitralny wybór jednej z nich może znacząco wpłynąć na wyniki modelu. Obecnie rozwijane są metody szacowania proporcji udziału różnych produktów w diecie człowieka, z uwzględnieniem jego fizjologii i zapotrzebowań organizmu na różne elementy. Modelowanie to wymaga jednak szczegółowych informacji między innymi o proporcji izotopów węgla i azotu w potencjalnych źródłach pokarmu, co jest rzadko dostępne w materiale pochodzącym z badań archeologicznych.

W przypadku konsumpcji ryb morskich na ich spożycie będą wskazywały podwyższone wartości zarówno węgla, jak i azotu (np. średnie wartości dorszy pochodzących ze średniowiecznych stanowisk Polski dla $\delta^{13}C$ = -16,1‰, a dla $\delta^{15}N$ = 12,0‰), szczególnie gdy różnica między dietą wszystkożerców a roślinożerców przekracza wartość wzbogacenia troficznego. Tutaj należy poczynić jedno zastrzeżenie, regularna konsumpcja zwierząt wszystkożernych, takich

jak świnie czy kury, przez inne organizmy wszystkożerne może dać podobny efekt jak konsumpcja ryb morskich. Duże ryby będą miały wyższe wartości $\delta^{13}C$ i $\delta^{15}N$, natomiast małe mogą mieć wartości $\delta^{15}N$ podobne do zwierząt roślinożernych lub wszystkożerców o diecie ubogiej w białko zwierzęce. Zatem regularna konsumpcja małych ryb morskich może przypominać dietę wszystkożerców z regularnym spożyciem roślin C_4, a przez to pozostawać niewidoczna w badaniach izotopowych.

Konsumpcja ryb śródlądowych wiąże się z wysokimi wartościami $\delta^{15}N$ (np. średnia dla znalezisk z terenu Polski to 8,9‰) i niskimi wartościami $\delta^{13}C$ (np. średnia dla znalezisk z terenów Polski to -22,5‰). Podobnie jak w przypadku ryb morskich, konsumpcja małych ryb śródlądowych może być trudna do uchwycenia, gdyż cechuje się niskimi wartościami $\delta^{13}C$, lecz wciąż w zakresie wartości typowych dla zwierząt roślinożernych, z wartościami $\delta^{15}N$ typowymi dla zwierząt wszystkożernych.

Na koniec warto zauważyć, że różnice istotne statystycznie mogą być wynikiem procedur stosowanych w różnych laboratoriach. Porównanie wyników z wielu laboratoriów dla tej samej kości zwierzęcej wykazało, że różnice mniejsze niż 0,6‰ dla $\delta^{13}C$ i 0,9‰ dla $\delta^{15}N$ mogą nie być wynikiem różnic *in vivo*, lecz artefaktem analizy laboratoryjnej (Pestle i in. 2014).

PRZYKŁADY Z BADAŃ

Compendium Isotoporum Medii Aevi (CIMA) – izotopowa baza danych dla średniowiecznej Europy

Nagromadzenie danych oraz współpraca pomiędzy badaczami wielokrotnie przyczyniły się do powstania dużych baz danych izotopowych, takich jak *Compendium Isotoporum Medii Aevi* (CIMA) (Cocozza i in. 2022). Jest to baza danych o otwartym dostępie, zaprojektowana w celu konsolidacji pomiarów izotopowych próbek bioarcheologicznych z całej średniowiecznej Europy (500-1500 n.e.). Jej stworzenie ma na celu rozwiązanie problemu fragmentacji danych izotopowych, które pochodzą z licznych, mniejszych badań. Fragmentacja ta utrudnia wszechstronne analizy historycznych zjawisk, takich jak wzorce dietetyczne, mobilność czy praktyki rolnicze w okresie średniowiecznym.

Baza CIMA gromadzi ponad 50 000 pomiarów izotopowych szczątków ludzkich, zwierzęcych i roślinnych z całej Europy, uwzględniając izotopy węgla ($\delta^{13}C$), azotu ($\delta^{15}N$), siarki ($\delta^{34}S$), tlenu ($\delta^{18}O$) oraz strontu ($^{87}Sr/^{86}Sr$). Dane zostały zebrane między listopadem 2019 a majem 2020 r., co oznacza, że wyniki nowszych publikacji nie zostały uwzględnione. Kryteria włączenia były rygorystyczne i skupiały się na jakości danych izotopowych, ich kontekście kulturowym, historycznym, czy położeniu geograficznym. Dzięki stworzeniu scentralizowanego zasobu CIMA umożliwia badaczom prowadzenie bardziej szczegółowych i szerzej zakrojonych analiz, niż byłoby to możliwe poprzez pojedyncze studia. Ułatwia identyfikację luk w danych i wspiera badania nad średniowiecznymi sposobami życia, praktykami rolniczymi oraz warunkami środowiskowymi. Baza jest szczególnie cenna do badania zmian w czasie i przestrzeni w zakresie diety, wzorców migracji oraz interakcji środowiskowych. Ponadto podkreśla, jak integracja danych izotopowych z innymi źródłami archeologicznymi i historycznymi może znacząco wzbogacić zrozumienie średniowiecznej Europy.

Przypadek CIMA ilustruje siłę współpracy interdyscyplinarnej w badaniach nad przeszłością człowieka. Poprzez zbieranie danych izotopowych na skalę kontynentalną CIMA oferuje niezrównane możliwości adresowania złożonych pytań o przeszłość i jednocześnie demonstruje postęp metodologiczny w badaniu średniowiecza, który wykorzystuje nowoczesne techniki analityczne. Trwające gromadzenie i doskonalenie danych obiecują dalsze rozszerzenie tych możliwości i potencjalnie ustanawiają nowy standard dla badań bioarcheologicznych w innych okresach i regionach.

Pochodzenie i handel rybami w średniowiecznym Chełmie

Rozróżnienie między lokalnymi rybami słodkowodnymi pozyskiwanymi lokalnie a tymi przetransportowanymi z odległych regionów stanowi istotne wyzwanie w badaniach archeoichtiologicznych. Na Nizinie Polskiej w średniowieczu wzrost konsumpcji ryb i handlu nimi był stymulowany ograniczeniami dotyczącymi spożycia mięsa podczas postów religijnych. Najlepiej udokumentowany pozostaje handel rybami morskimi, a to dzięki znaleziskom ich szczątków daleko poza naturalnymi siedliskami tych zwierząt. W przypadku ryb słodkowodnych handel nimi jest trudniejszy do oszacowania, ponieważ przedmiotem wymiany były gatunki, które mogły też występować lokalnie.

Badania izotopowe przeprowadzone na szczątkach ryb z Chełma (Fetner i Iwaszczuk 2021) skupiały się na określeniu środowiska, w jakim mogły one wzrastać. Analizowano szczątki znalezione w kompleksie mieszkalnym na Wysokiej Górce w Chełmie, datowanym na połowę XIII-XIV w. Przeanalizowano próbki od 16 osobników reprezentujących dziewięć taksonów, które spełniały kryteria jakości kolagenu. Zastosowanie analizy trwałych izotopów węgla i azotu pozwoliło na odróżnienie ryb z różnych środowisk wodnych.

Wyniki badań wykazały znaczną różnorodność wartości izotopów węgla wśród badanych ryb. Niektóre z nich miały wartości typowe dla środowisk morskich, sugerujące ich pochodzenie z odległych regionów, prawdopodobnie z wybrzeża Bałtyku, które znajduje się ok. 450 km od Chełma. Inne osobniki wykazywały wartości typowe dla wód słodkowodnych, wskazując na ich lokalne pochodzenie. Te wartości zostały zestawione ze znanymi warunkami ekologicznymi i geologicznymi regionu. Niektóre ryby słodkowodne miały wartości niespotykane w regionie Chełma, co pozwala przypuszczać, że zostały tutaj sprowadzone z innych miejsc, np. z estuarium Wisły.

W badanym okresie szeroko rozwinięty był handel rybami morskimi, co jest dobrze poświadczone zarówno izotopowo, jak i w źródłach pisanych. Istniały także metody konserwacji ryb, takie jak solenie, wędzenie i suszenie, które umożliwiały dalekosiężny transport bez ryzyka zepsucia mięsa. Te techniki odgrywały kluczową rolę w logistyce długodystansowego handlu rybami. Wysoki popyt, istniejąca sieć wymiany i techniki konserwacji wskazują na możliwość ponadregionalnego handlu rybami słodkowodnymi. Studium przypadku Chełma ukazuje, jak zaawansowane metody analityczne w archeologii mogą przyczynić się do głębszego zrozumienia historycznych praktyk handlowych i konsumpcyjnych, jednocześnie podkreślając znaczenie lokalnych warunków środowiskowych w badaniach archeologicznych.

Kształtowanie się elit w Królestwie Longobardów

Kształtowanie się nowych społeczności, interakcje pomiędzy ludnością miejscową i przybyszami pozostaje wyzwaniem dla badaczy starających się odtworzyć i zrozumieć procesy zachodzące w przeszłości. Nowoczesne narzędzia analityczne, takie jak badania archeogenetyczne oraz analiza izotopów, odgrywają kluczową rolę w identyfikowaniu i interpretowaniu tych procesów. Oprócz omawianej tutaj analizy proporcji izotopów trwałych węgla i azotu można posłużyć się jeszcze badaniem stosunków izotopów strontu, które pozwala na śledzenie migracji poszczególnych osób. W tym kontekście analiza izotopów węgla i azotu dostarcza informacji na temat diety, a tym samym o możliwym stopniu akulturacji – przejęcia przez jedną grupę obcych zwyczajów oraz sposobów życia.

Wieloaspektowe badanie osób pochowanych w Collegno, miejscowości położonej niedaleko Turynu we Włoszech, dostarcza informacji o formowaniu się wczesnośredniowiecznych społeczności podczas napływu Longobardów (Tian i in. 2024). Na stanowisku w Collegno odkryto cmentarzysko z okresu longobardzkiego, datowane na VI-VIII wiek n.e., które liczyło 157 grobów.

Analiza archeogenetyczna osób pochowanych w Collegno pozwoliła na wyróżnienie trzech rodów. Największy z nich funkcjonował tutaj przez 5 pokoleń. Z kolei analiza izotopów strontu, która pozwala na określenie geograficznego pochodzenia człowieka na podstawie składu izotopowego szkliwa zębów, wykazała, że wśród założycieli najstarszego z rodów byli migranci. Stąd domysł, że przybyli oni do Collegno najprawdopodobniej wraz z przemieszczającymi się Longobardami. Wyposażenie grobowe wskazuje na elitarny charakter tego rodu, sugerując, że po przybyciu zdominowali oni miejscową ludność i ustabilizowali swój wysoki status społeczny. Ród ten nie był jednak endogamiczny, ponieważ badania genetyczne wskazują, że włączano do niego przedstawicieli ludności lokalnej.

Dieta osób pochowanych w Collegno była również zróżnicowana, co pokazuje, jak różne grupy w tej społeczności mogły podążać za odmiennymi zwyczajami żywieniowymi. Analiza izotopów węgla ($\delta^{13}C$) i azotu ($\delta^{15}N$) wykazała, że mieszkańcy Collegno konsumowali zarówno rośliny C_3 (jak pszenica, jęczmień), jak i C_4 (jak proso). Większość osób opierała swoją dietę na roślinach C_3, ale 22% badanych spożywało znaczne ilości roślin C_4, co wskazuje na zróżnicowane preferencje żywieniowe w obrębie społeczności.

Interesująca jest również korelacja między dietą a pochodzeniem genetycznym osób. Zestawienie izotopów węgla i azotu z danymi archeogenetycznymi pozwoliło na wyróżnienie dwóch tradycji konsumpcyjnych. Osoby, których aDNA wykazywało znaczny komponent iberyjski, miały wyraźnie niższe wartości $\delta^{13}C$ w porównaniu do osób z komponentem północnoeuropejskim (Longobardowie). Zatem różne grupy

genetyczne w Collegno miały różne nawyki żywieniowe. Najprawdopodobniej Longobardowie spożywali proso, które nie było powszechne w diecie osób z komponentem iberyjskim.

Co więcej, analiza statystyczna wykazała, że osoby blisko spokrewnione miały dietę bardziej zbliżoną do siebie niż do osób dalej spokrewnionych. To odkrycie podkreśla znaczenie rodziny i pokrewieństwa w kształtowaniu codziennych nawyków i praktyk żywieniowych. W Collegno elity nie tylko odgrywały istotną rolę w kształtowaniu struktury społecznej, ale również w zachowywaniu tożsamości grupowej poprzez specyficzne zwyczaje, takie jak właśnie m.in. dieta. Elity te cechowała otwartość na włączanie nowych jednostek, a więc nie były genetycznie jednorodne. Nasuwa się zatem wniosek, że ich status wynikał bardziej z politycznych i społecznych przesłanek niż z jednolitego pochodzenia biologicznego.

Podsumowując, badania w Collegno ukazują, jak złożone i dynamiczne były procesy kształtowania się nowych społeczności po upadku Cesarstwa Rzymskiego. Wskazują one również, że mobilność i migracje stanowiły kluczowe elementy w rozwoju tych społeczności, a elity odgrywały centralną rolę w integracji nowych grup, przy jednoczesnym zachowaniu własnej tożsamości kulturowej. Dieta jako wskaźnik akulturacji dostarcza cennych informacji o procesach asymilacji i funkcjonowaniu odmiennych grup w ramach jednej społeczności.

PODSUMOWANIE

Badania izotopowe kolagenu kostnego stanowią kluczowe narzędzie w archeologii, umożliwiając dogłębne zrozumienie życia dawnych społeczności. Analiza izotopów węgla ($\delta^{13}C$) i azotu ($\delta^{15}N$) umożliwia rekonstrukcję diety oraz procesów adaptacyjnych ludzi i zwierząt do zmieniających się środowisk.

Izotopy węgla pozwalają identyfikować źródła pożywienia pochodzące od roślin o różnej ścieżce fotosyntetycznej. Rośliny C_3 (większość drzew i roślin stref umiarkowanych), charakteryzują się niższymi wartościami $\delta^{13}C$, natomiast rośliny C_4 (w tym proso) oraz niektóre sukulenty (CAM) mają wyższe wartości $\delta^{13}C$. To umożliwia badaczom określenie, które produkty były głównym źródłem pożywienia i jak zmieniały się diety w odpowiedzi na migracje czy zmiany środowiskowe.

Izotopy azotu dostarczają informacji o poziomie troficznym w diecie, co pozwala wnioskować o spożyciu białka zwierzęcego czy technikach agrarnych. Wyższe wartości $\delta^{15}N$ często wskazują na większy dostęp do mięsnych produktów, co może odzwierciedlać różnice społeczno-ekonomiczne w dostępie do zasobów. Na przykład elity mogą wykazywać wyższe wartości $\delta^{15}N$, co świadczy o lepszym dojściu do luksusowych produktów mięsnych, podczas gdy niższe wartości w populacjach rolniczych mogą sugerować dietę opartą głównie na roślinach C_3.

Analiza izotopowa jest również użyteczna w badaniu stanu zdrowia populacji, ponieważ może wykazać związek między dietą a wskaźnikami takimi jak stopień odżywienia czy poziom stresu fizjologicznego.

Badania izotopowe kolagenu kostnego oferują możliwość kompleksowego zrozumienia przeszłych zmian środowiskowych i adaptacji do nich, co pozwala rekonstruować nie tylko dietę, ale i szerokie obrazy ekosystemów oraz ich ewolucji w czasie.

W Polsce tego typu badania przeprowadza się stosunkowo rzadko, dlatego stwierdzenie, że potrzebne są dalsze analizy pozostaje nadal truizmem. Dodatkowych problemów przysparza dysproporcja między badaniami szczątków zwierzęcych i ludzkich, z przewagą tych ostatnich. Tymczasem bez szczegółowego rozpoznania fauny nie jest możliwa precyzyjna interpretacja diety ludzi. W tym kontekście widzę potencjał rozwoju badań nad dietą – poprzez analizę proporcji izotopów trwałych w szczątkach zwierzęcych, co umożliwi rekonstrukcję nisz ekologicznych, w których funkcjonowały zwierzęta. Może to prowadzić do lepszego zrozumienia gospodarki zwierzęcej oraz do bardziej precyzyjnych wniosków dotyczących diety ludzkiej i jej zróżnicowania w obrębie jednej społeczności, zarówno na podstawie nowych analiz, jak i reinterpretacji dotychczasowych badań. Analizy te są niezbędne dla każdej epoki, a ich systematyczne i masowe przeprowadzanie może dostarczyć cennych informacji dla rekonstrukcji przeszłości.

LITERATURA

Ambrose, S.H. 1990. Preparation and characterization of bone and tooth collagen for isotopic analysis. *Journal of Archaeological Science* 17(4): 431–451. https://doi.org/10.1016/0305-4403(90)90007-R.

Bogaard, A., Heaton, T.H.E., Poulton, P., Merbach, I. 2007. The impact of manuring on nitrogen isotope ratios in cereals: archaeological implications for reconstruction of diet and crop management practices. *Journal of Archaeological Science* 34(3): 335–343. https://doi.org/10.1016/j.jas.2006.04.009.

Cocozza, C., Cirelli, E., Groß, M., Teegen, W-R., Fernandes, R. 2022. Presenting the compendium isotoporum Medii Aevi, a multi-isotope database for Medieval Europe. *Scientific Data* 9(1): 354. https://doi.org/10.1038/s41597-022-01462-8.

DeNiro, M.J. 1985. Postmortem preservation and alteration of in vivo bone collagen isotope ratios in relation to palaeodietary reconstruction. *Nature* 317(6040): 806–809.

DeNiro, M.J., Epstein, S. 1978. Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 42(5): 495–506. https://doi.org/10.1016/0016-7037(78)90199-0.

DeNiro, M.J, Epstein, S. 1981. Influence of diet on the distribution of nitrogen isotopes in animals. *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 45(3): 341–351. https://doi.org/10.1016/0016-7037(81)90244-1.

Evans, R.D. 2001. Physiological mechanisms influencing plant nitrogen isotope composition. *Trends in Plant Science* 6(3): 121–126. https://doi.org/10.1016/S1360-1385(01)01889-1.

Fahy, G.E., Deter, C., Pitfield, R., Miszkiewicz, J.J., Mahoney, P. 2017. Bone deep: variation in stable Isotope ratios and histomorphometric measurements of bone remodelling within adult humans. *Journal of Archaeological Science* 87 (November): 10–16. https://doi.org/10.1016/j.jas.2017.09.009.

Fetner, R.A., Iwaszczuk, U. 2021. Isotopic evidence of possible long-distance freshwater fish trade in the 13th to 14th century Chełm, Modern Poland. *International Journal of Osteoarchaeology* 31(2): 135–145. https://doi.org/10.1002/oa.2931.

Guiry, E.J., Szpak, P. 2021. Improved quality control criteria for stable carbon and nitrogen isotope measurements of Ancient bone collagen. *Journal of Archaeological Science* 132: 105416. https://doi.org/10.1016/j.jas.2021.105416.

Hillson, S. 2005. *Teeth*. Cambridge.

Katzenberg, M.A. 2008. Stable isotope analysis: a tool for studying past diet, demography, and life history. (w:) M.A. Katzenberg, S.A. Saunders (red.), *Biological anthropology of the human skeleton*, Hoboken, 411–441. https://doi.org/10.1002/9780470245842.ch13.

Koch, P.L. 2007. Isotopic study of the biology of modern and fossil vertebrates. (w:) R.H. Michener, K. Lajtha (red.), *Stable isotopes in ecology and environmental science*, Malden-Oxford-Carlton, 99–154. https://doi.org/10.1002/9780470691854.ch5.

Longin, R. 1971. New method of collagen extraction for radiocarbon dating. *Nature* 230(5291): 241–242. https://doi.org/10.1038/230241a0.

Marshall, J.D., J.R. Brooks, K. Lajtha. 2007. Sources of variation in the stable isotopic composition of plants. (w:) R.H. Michener, K. Lajtha (red.), *Stable isotopes in ecology and environmental science*, Malden-Oxford-Carlton, 22–60. https://doi.org/10.1002/9780470691854.ch2.

Michener, R.H., Kaufman L. 2007. Stable isotope ratios as tracers in marine food webs: an update. (w:) R.H. Michener, K. Lajtha (red.), *Stable isotopes in ecology and environmental science*, Malden-Oxford-Carlton, 238–282. https://doi.org/10.1002/9780470691854.ch9.

Pate, F.D., T.J. Anson. 2008. Stable nitrogen isotope values in arid-land kangaroos correlated with mean annual rainfall: potential as a palaeoclimatic indicator. *International Journal of Osteoarchaeology* 18(3): 317–326. https://doi.org/10.1002/oa.938.

Pestle, W.J., Crowley, B.E., Weirauch, M.T. 2014. Quantifying inter-laboratory variability in stable isotope analysis of Ancient skeletal remains. *PLOS ONE* 9(7): e102844. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102844.

Reitsema, L.J., Kozłowski, T., Makowiecki, D. 2013. Human–environment interactions in Medieval Poland: a perspective from the analysis of faunal stable isotope ratios. *Journal of Archaeological Science* 40 (10): 3636–46. https://doi.org/10.1016/j.jas.2013.04.015.

Reitsema, L.J., Crews, D.E., Polcyn, M. 2010. Preliminary evidence for Medieval Polish diet from carbon and nitrogen stable isotopes. *Journal of Archaeological Science* 37(7): 1413–1423. https://doi.org/10.1016/j.jas.2010.01.001.

Reitsema, L.J., Kozłowski, T. 2013. Diet and society in Poland before the state: stable isotope evidence from a Wielbark population (2nd c. AD). *Anthropological Review* 76(1): 1–22. https://doi.org/10.2478/anre-2013-0010.

Reitz, E.J., Shackley, M. 2012. *Environmental archaeology*. Boston. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3339-2.

Roberts, P., Fernandes, R., Craig, O.E., Larsen, T., Lucquin, A., Swift, J., Zech, J. 2018. Calling all archaeologists: guidelines for terminology, methodology, data handling, and reporting when undertaking and reviewing stable isotope applications in archaeology. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 32(5): 361–372. https://doi.org/10.1002/rcm.8044.

Schoeninger, M.J. 2010. Diet econstruction and ecology using stable isotope ratios. (w:) Larsen, C.S. (red.), *A Companion to biological anthropology*, Malden-Oxford-Chichester, 445–464.

Schoeninger, M.J, DeNiro, M. 1984. Nitrogen and carbon isotopic composition of bone collagen from marine and terrestrial animals. *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 48(4): 625–639. https://doi.org/10.1016/0016-7037(84)90091-7.

Sulzman, E.W. 2007. Stable isotope chemistry and measurement: a primer. R.H. Michener, K. Lajtha (red.), *Stable isotopes in ecology and environmental science,* Malden-Oxford-Carlton, 1–21. https://doi.org/10.1002/9780470691854.ch1.

Szpak, P., Metcalfe, J.Z, Macdonal, R.A. 2017. Best ractices for alibrating and eporting table sotope easurements in rchaeology. *Journal of Archaeological Science: Reports* 13 (June): 609–616. https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2017.05.007.

Szpak, P., Orchard T.J, McKechnie, I., Gröcke, D.R. 2012. Historical ecology of late holocene sea otters (Enhydra Lutris) rom Northern British Columbia: isotopic and zooarchaeological perspectives. *Journal of Archaeological Science* 39(5): 1553–1571. https://doi.org/10.1016/j.jas.2011.12.006.

Tian, Y., Koncz, I., Defant, S., Giostra, C., Vyas, D.N, Sołtysiak A., Baricco, J.P. i in. 2024. The role of emerging elites in the formation and development of communities after the fall of the Roman Empire. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 121(36): e2317868121. https://doi.org/10.1073/pnas.2317868121.

Tsutaya, T., Yoneda M. 2015. Reconstruction of breastfeeding and weaning practices using stable isotope and trace element analyses: a review. *American Journal of Physical Anthropology* 156(S59): 2–21. https://doi.org/10.1002/ajpa.22657.

Twiss, K. 2012. The Archaeology of food and social diversity. *Journal of Archaeological Research* 20(4): 357–395. https://doi.org/10.1007/s10814-012-9058-5.

Wallace, M., Jones, G., Charles, M., Fraser, R., Halstead, P., Heaton, T.H.E., Bogaard, A. 2013. Stable carbon isotope analysis as a direct means of inferring crop water status and water management practices. *World Archaeology* 45(3): 388–409. https://doi.org/10.1080/00438243.2013.821671.





Badania fizykochemiczne szkła

Tomasz Purowski, Barbara Wagner, Olga Syta, Beata Marciniak-Maliszewska

WPROWADZENIE

Szkło towarzyszy ludzkości od kilku tysięcy lat, ale oswajanie przez człowieka tego plastycznego tworzywa było długim procesem. Szkło odsłaniało swe tajniki powoli i stopniowo, a sekretów jego wytopu – początkowo zarezerwowanych dla nielicznych rzemieślników działających w zaledwie kilku miejscach na świecie – pilnie strzeżono. Najpierw wykonywano z niego biżuterię, nierzadko naśladującą kamienie półszlachetne. Wynalezienie ok. połowy I w. p.n.e. piszczeli do dmuchania szkła spowodowało, że tworzywo to stało się powszechniej dostępne. Masową produkcję wyrobów szklanych zawdzięczamy zdobyczom rewolucji przemysłowej. W XIX w. nastąpił w szklarstwie gwałtowny rozwój mechanizacji i automatyzacji, co umożliwiło tańsze wykonywanie tysięcy wyrobów szklanych (Nowotny 1959: 7, 12). Obecnie szkło jest wszędzie i trudno wyobrazić sobie bez niego życie. Jest niezastąpione w budownictwie, komunikacji czy przemyśle. Każdy z nas styka się z nim codziennie przy najbardziej prozaicznych czynnościach: wyglądając przez szybę w domu, samochodzie czy autobusie, pijąc ze szklanki, zakładając okulary, włączając światło żarówki. Z drugiej strony dzięki swej plastyczności, przezroczystości czy różnobarwności szkło nadal inspiruje artystów na całym świecie. Wykonane z niego dzieła spotykamy w najlepszych muzeach i galeriach sztuki współczesnej, a prace najbardziej rozpoznawalnych twórców osiągają zawrotne ceny na aukcjach.

W niniejszej pracy omawiamy tzw. szkło właściwe (cechujące się brakiem lub małą liczbą inkluzji). Nie analizujemy innych „tworzyw szklistych" („fajansu" i „szklistego fajansu", które poza szkłem zawierają liczne nieroztopione ziarna kwarcu) znanych w Europie w pradziejach i starożytności (por. Purowski 2019: 21). Koncentrujemy się na materiałach z Polski pokazanych na tle europejskim, północnoafrykańskim i bliskowschodnim, datowanych na II-I tys. p.n.e.; rzadziej przywołujemy przykłady z młodszych czasów, tj. z okresu rzymskiego i średniowiecza. Naszym celem jest przybliżenie czytelnikom problematyki dotyczącej badań składu chemicznego szkieł zabytkowych. Nie uwzględniamy natomiast studiów nad techniką wykonania naczyń,

DOI: 10.64158/awhitx3404

bransolet czy paciorków szklanych, ponieważ jest to temat na odrębny, obszerny artykuł (zob. np. Dekówna i Szymański 1971; Stawiarska 1985: 19–40; 1999: 43–62; Dzięgielewski i Purowski 2011: 95–106; Purowski 2012: 83–104).

Czym jest szkło?

Szkłem technolodzy nazywają ciała bezpostaciowe, które przez przechłodzenie roztworu (masy) oraz w wyniku stopniowego zwiększenia lepkości (inaczej: plastyczności, ciągliwości) przechodzą w stan szklisty i przybierają właściwości mechaniczne ciał stałych. Co istotne, proces przejścia ze stanu ciekłego w stan szklisty jest odwracalny. Innymi słowy, szkło w wyższych temperaturach jest cieczą, a po ostygnięciu uzyskuje cechy podobne do właściwości ciał stałych (Nowotny 1959: 15, 47). Ponieważ w czasie chłodzenia wzrasta lepkość, szkło nie ma struktury krystalicznej (Fernández-Navarro i Villegas 2013: 3).

Archeolog Jerzy Olczak (1968: 250) nazywał szkłem tworzywo występujące samodzielnie, z którego wykonano konkretny przedmiot, np. naczynie, bransoletę czy paciorek. Może ono cechować się odmiennym składem chemicznym oraz różną przezroczystością i barwą. Używanie dla tej grupy wyrobów innej nazwy (np. szkliwo, masa szklana, pasta szklana czy emalia) nie jest poprawne. Należy jednak zaznaczyć, że z technologicznego punktu widzenia szkliwo (inaczej: glazura) oraz emalia również są szkłem, ale pokrywającym przedmioty wykonane z innych surowców (Olczak 1968: 248–250; Purowski 2019: 21, p. 24).

Skład chemiczny dawnych szkieł krzemianowych

Szkło to efekt połączenia surowców mineralnych i organicznych, co wyróżnia je na tle innych używanych w przeszłości tworzyw, np. metali czy surowców takich jak kamień i drewno (Dekówna 1980: 9). Skład chemiczny oraz budowa fizyczna szkieł współczesnych różnią się od tworzyw wytapianych w pradziejach i starożytności (Purowski 2012: 105). Te ostatnie cechują się przede wszystkim mniejszą zawartością krzemionki, a większą alkaliów. Ponieważ w przeszłości nie potrafiono uzyskać tak wysokich temperatur w piecach szklarskich jak obecnie, konieczne było dodawanie dużych ilości alkaliów, które są bardzo dobrymi topnikami szkła (w stosunkowo niewysokich temperaturach tlenki sodu lub potasu tworzą z tlenkiem krzemu krzemiany, które łatwo topnieją). Ich zawartość w szkle nie może być jednak zbyt wysoka, ponieważ mają ujemny wpływ na właściwości użytkowe szkła (wspomniane krzemiany łatwo rozpuszczają się w wodzie). Zapobiec temu może obecność w szkle tzw. utrwalaczy (tlenki wapnia lub magnezu tworzą z tlenkiem krzemu krzemiany, które nie są rozpuszczalne w wodzie, czyli czynią szkło odpornym na działanie wody) (Nowotny 1959: 198–199, 208–209).

Dawne szkła krzemianowe składają się więc przede wszystkim z trzech grup tlenków: 1) szkłotwórczych, tj. krzemionki (SiO_2); 2) alkalicznych (inaczej: zasadowych), tj. tlenków sodu (Na_2O) i/lub potasu (K_2O); 3) utrwalaczy (inaczej: stabilizatorów), tj. tlenków wapnia (CaO) i/lub magnezu (MgO). Najpopularniejszym surowcem, który dostarczał krzemionkę był piasek; rzadziej wykorzystywano kamienie kwarcowe, które cechują się – w porównaniu do piasku – mniejszą liczbą zanieczyszczeń innymi związkami. Źródło alkaliów stanowił popiół roślin lub soda mineralna (inaczej: naturalna), zaś tlenków wapnia – m.in. piasek (zawierający, poza kwarcem, okruchy materiałów wapiennych), muszle, kości, popioły drzew niektórych gatunków, kalcyt, kreda czy marmur (Dekówna 1980; Stawiarska 1984: 33–38; Henderson 2013: 56–65; Purowski 2012: 158–164). Z wymienionych surowców głównych tworzono tzw. zestaw, z którego wytapiano szkło. Aby nadać mu odpowiednią przezroczystość i barwę stosowano surowce uzupełniające, tj. związki mącące, odbarwiające lub barwiące. Wpływ na kolor szkła mogły mieć również takie czynniki jak czas topienia czy atmosfera panująca w piecu (Kociszewski 1966: 56; Dekówna i Olczak (red.) 2002: 193–198).

Najstarsze przedmioty szklane znane z Polski

Przedmioty szklane pojawiły się w Europie (w tym na obszarze obecnej Polski) w II okresie epoki brązu (ok. 1650/1600-1300 r. p.n.e.). Tworzywo, z którego wykonywano pierwsze paciorki, było wyraźnie przejrzyste i jednokolorowe, najczęściej barwy turkusowej. Z kolejnych okresów wspomnianej epoki znane są egzemplarze dekorowane guzkami lub liniami spiralnymi. Z wczesnej epoki żelaza pochodzą

wyroby wykonane ze szkła różnej barwy (najczęściej niebieskiej, turkusowej, zielonej, białej, żółtej lub czarnej) i przezroczystości (wyraźnie lub słabo przejrzyste, nieprzezroczyste lub opakowe), często dekorowane szkłem innego koloru (np. „oczkami", „guzkami", liniami falistymi lub poziomymi), a rzadziej żłobkami. W okresie lateńskim obok różnych typów paciorków pojawiły się licznie bransolety, natomiast od okresu rzymskiego – naczynia (wcześniej występujące w Europie sporadycznie, a na obszarze obecnej Polski zupełnie nieznane).

CEL BADAŃ ARCHEOMETRYCZNYCH SZKŁA

Badając właściwości fizykochemiczne szkła zabytkowego archeolog szuka odpowiedzi na m.in. następujące pytania: 1) Z jakich surowców podstawowych zostało wykonane (jakie były źródła krzemionki oraz związków alkalicznych)?; 2) Jakich surowców uzupełniających (barwniki, środki mącące) użyto?; 3) Czy możemy określić miejsce pozyskania w/w surowców?; 4) Jakie stosowano „receptury" szklarskie?; 5) Czy możemy wskazać region wykonania szkła z surowców podstawowych (na jakim obszarze działały warsztaty/„huty")?; 6) Czy możemy określić na jakim etapie produkcyjnym barwiono tworzywo w: „hucie" czy oddalonej od niej innej pracowni?; 7) Gdzie wykonano przedmioty szklane? Czy na tym samym obszarze, gdzie wytopiono szkło, czy na innym, gdzie tworzywo dotarło w formie półfabrykatów?; 8) Czy analizowane szkła są importami czy wykonano je na miejscu?; 9) A jeśli importami, to jakimi szlakami docierały na badany obszar?; 10) Jak zmieniała się „receptura" wytopu szkła w określonym czasie? (por. np. Purowski 2019: 10).

Celem badań archeometrycznych szkła jest więc w pierwszej kolejności próba rekonstrukcji procesów produkcyjnych, tj. wskazanie jakie zastosowano surowce główne (i w jakich proporcjach) oraz jakie środki barwiące czy mącące szkło. Ponieważ skład chemiczny wykorzystywanych piasków, sody czy niektórych barwników pochodzących z różnych źródeł może być odmienny, to niekiedy możliwe jest wskazanie miejsca wytopu szkła. Pozwala to archeologom na zrekonstruowanie dawnych szlaków wymiany oraz kierunku napływu biżuterii i innych przedmiotów na często odległe tereny. Badania archeometryczne szkła są więc nieocenionym, ale jednocześnie często jeszcze niedocenianym niestety źródłem wiedzy nie tylko na temat technologii ich wytwarzania, ale też kontaktów ludności zamieszkującej badany obszar z głównym centrami cywilizacyjnymi.

ZARYS HISTORII BADAŃ

Już pod koniec XVIII w. zaczęto zwracać uwagę na skład chemiczny szkieł zabytkowych. W XIX w. różni badacze wykonali w sumie ok. 50 analiz szkieł starożytnych i średniowiecznych. W pierwszej połowie kolejnego stulecia pojawiły się publikacje z pierwszymi podsumowaniami wykonanych badań archeometrycznych, a w jego drugiej połowie – prace dotyczące interpretacji rezultatów analiz fizykochemicznych (Caley 1962: 13–23; Stawiarska 1984: 13–15).

Badania szkieł zabytkowych w Polsce podsumowała w ostatnim czasie kilkakrotnie Maria Dekówna (2005; 2017). Przypomnijmy tylko, że w polskim piśmiennictwie pierwsze wyniki badań składu chemicznego szkieł archeologicznych pojawiły się w pracach Heleny Cehak-Hołubowiczowej (1937: 32–34; 1939-1948: 426). Pogłębione studia nad technologią szkieł wczesnośredniowiecznych zapoczątkowali Jerzy Olczak (Olczak i Jasiewiczowa 1963; Olczak 1968) oraz Maria Dekówna (1962; 1975; 1980). W ślady obu tych wielkich archeologów poszli inni badacze. Tworzywa z okresu wpływów rzymskich opracowała Teresa Stawiarska (1984; 1999), zaś z epoki brązu i wczesnej epoki żelaza – Tomasz Purowski (2012; 2019). Liczniejsze analizy badań składu chemicznego szkieł datowanych od wczesnej epoki żelaza po wczesne średniowiecze pojawiły się w pracach wielu autorów (np. Girdwoyń 1986; Stolpiak 1988; Malinowski (red.) 1990; Braziewicz i in., 1996; Starynowicz 2005; Dekówna i Purowski 2012; 2016; 2019; Pankiewicz i in., 2017); nie sposób wymienić tu wszystkich.

Niezwykle cenną monografią w polskim, ale i światowym piśmiennictwie pozostaje nadal praca zatytułowana *Principes de description des verres anciens depuis les temps les plus reculés jusqu'au XIII^e^ siècle de n.è.*, w której omówione zostały zasady opisu cech formalnych i technologicznych wyrobów szklanych. Powstała ona z inicjatywy Jerzego Olczaka oraz Marii Dekówny, a przygotował ją międzynarodowy zespół naukowców reprezentujących różne dziedziny (Dekówna i Olczak (red.) 2002).

W badaniach archeometrycznych szkieł zabytkowych wykorzystywano różne metody analityczne.



Ryc. 1. Mikrosonda SX100



Ryc. 2. Mikrosonda SXFiveFE

W Polsce od lat 60. XX w. stosowano przede wszystkim metodę ilościowej analizy spektograficznej (Dekówna 1980: 7; 2017: 79). W Centralnym Laboratorium Instytutu Historii Kultury Materialnej (od 1992 r. Instytutu Archeologii i Etnologii) Polskiej Akademii Nauk przebadano za jej pomocą skład chemiczny szkła kilku tysięcy przedmiotów datowanych na różne okresy (Dekówna 2005: 15). Po inne techniki analityczne w drugiej połowie XX w. i na początku trzeciego tysiąclecia sięgano znacznie rzadziej (Dekówna 2005: 10–18; Samek i in., 2007). Wśród nich popularnością cieszyła się przede wszystkim metoda spektroskopii dyspersji energii (ang. *energy dispersive spectroscopy*, EDS) (np. Dekówna i Purowski 2016: 154; Sawicka 2017: 137).

W XXI w. zarówno w Polsce, jak i na świecie, na popularności zyskały dwie metody: EPMA (ang. *electron probe micro-analysis*) oraz LA-ICP-MS (ang. *laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry*) (zob. niżej). Każda z nich ma nieco inne zalety, dlatego zdarza się, że te same szkła analizowane były obiema technikami (por. np. Dekówna i Purowski 2016: 154–155; 2019: 237–238).

Pierwsza w Polsce pracownia mikrosondy elektronowej powstała w roku 2000 na Wydziale Geologii Uniwersytetu Warszawskiego, który obecnie jest jednym z czterech ośrodków naukowych w kraju świadczących usługi analityczne metodą EPMA. W laboratorium tym wykonano dotychczas setki analiz szkieł zabytkowych (por. np. Dekówna i Purowski 2012; 2016; 2019; Purowski 2012; 2019; Purowski i in., 2012; Pankiewicz i in., 2017). Pracownia dysponuje dwoma najwyższej klasy urządzeniami pomiarowymi: 1) Cameca SX100 z tradycyjną katodą wolframową, wyposażona w 4 spektrometry WDS oraz kryształy analizujące: PC0, PC2, TAP, LiF, LLiF, PET, LPET (ryc. 1); 2) Cameca SXFiveFE z emisją termojonowo-polową (emiter Schottky'ego), wyposażona w 5 spektrometrów WDS oraz kryształy analizujące: LPC0, PC1, PC2, PC3, TAP, LTAP, LLiF, LPET (ryc. 2). Każde z urządzeń posiada wbudowany mikroskop polaryzacyjny oraz detektory: EDS, BSE, SE (elektronów wtórnych, ang. *secondary electrons*) i CL (katodoluminescencji). W pracowni standardowo wykonywane są punktowe analizy mikrosondowe, ale precyzyjnie można zbadać także zmienność zawartości poszczególnych pierwiastków wzdłuż zadanej linii (profil) czy na określonej powierzchni preparatu (tzw. mapping).

Metoda LA-ICP-MS stosowana jest na Wydziale Chemii Uniwersytetu Warszawskiego od 2002 r. Wykonano nią bardzo liczne analizy szkieł z różnych okresów (por. np. Purowski i in., 2012; 2018; Dekówna i Purowski 2019; Kamyszek i in., 2018; Purowski 2019; Then-Obłuska i Wagner 2019). Spektrometria mas należy do względnie „młodych" metod analizy instrumentalnej, gdyż jej historia ma niewiele ponad 100 lat. Za ojca tej techniki uznaje się odkrywcę elektronu J.J. Thomsona, który badając naturę wyładowań elektrycznych w gazach,

skonstruował w 1907 r. urządzenie umożliwiające pomiar stosunku masy do ładunku poszczególnych jonów. Dla współczesnych badań bardzo istotne okazało się wprowadzenie w 1980 r. źródła jonizacji w postaci plazmy indukcyjnie sprzężonej (ang. *inductively coupled plasma*, ICP), a następnie zaproponowanie w 1985 r. ablacji laserowej (ang. *laser ablation*, LA) jako metody bezpośredniego mikropróbkowania materii stałej, bez potrzeby jej roztwarzania (Gray 1985). Szczególnie ta ostatnia propozycja znacząco zmieniła postrzeganie czułych oznaczeń spektralnych w badaniach szkieł zabytkowych i otworzyła drogę do pierwiastkowych analiz na poziomie śladowych zawartości.

„SZKIEŁKO I OKO", CZYLI METODY BADAŃ SZKIEŁ ZABYTKOWYCH

Metody badań wyrobów szklanych można podzielić na kilka grup: 1) pozyskiwania źródeł; 2) opisu; 3) analizy i 4) interpretacji (Dekówna 1980: 21; Purowski 2012: 43–50). W badaniach archeometrycznych omawianych tworzyw wykorzystywane są dwie ostatnie. W pierwszej kolejności szkło analizuje się pod względem składu chemicznego. Kolejnym krokiem, po wykonaniu poprawnych badań fizykochemicznych, jest klasyfikacja i interpretacja uzyskanych wyników. Klasyfikacja opiera się na wydzieleniu składników szkłotwórczych (SiO_2, Na_2O, K_2O, CaO, MgO, Al_2O_3, PbO), których zawartość w szkle ma zasadniczy wpływ na jego właściwości, a następnie na obliczeniu proporcji niektórych komponentów w jakich występują i zestawieniu ich w schematy według zasad nadrzędności i podrzędności. Dzięki temu można określić jakiego rodzaju (sodowe, potasowe, ołowiowe, mieszane) czy odmiany (np. sodowe: „popiołowe" lub „mineralne") jest analizowane szkło (Dekówna 2005: 18–19).

Metody analityczne

Jak wspomnieliśmy wyżej, obecnie do badań fizykochemicznych szkieł wykorzystywane są najczęściej dwie metody analityczne: EPMA oraz LA-ICP-MS. Do analiz wybierane są (niezależnie czy opracowywany jest zbiór zabytków z jednego stanowiska archeologicznego, czy też z jakiegoś większego obszaru, np. Śląska czy całej Polski) przedmioty odmiennych kategorii (np. bransolety, kółka, paciorki itd.) różniące się techniką wykonania, formą, barwą i przezroczystością szkła, a także chronologią (np. Purowski 2012: 106; Dekówna i Purowski 2019: 237). Należy też pamiętać, żeby analizować szkło „zdrowe", a nie skorodowane. Często się bowiem zdarza, że szkło zewnętrzne (powierzchniowe) na skutek korozji zawiera mniej alkaliów, a więcej krzemionki niż szkło wewnętrzne. Oznacza to, że jego skład chemiczny różni się od pierwotnego i interpretowanie go może dostarczyć błędnych wyników (Kociszewski 1966: 72–74).

Metoda EPMA

Mikrosonda elektronowa EPMA jest jedną z mikrowiązkowych metod określania składu chemicznego ciał stałych. Ma powszechne zastosowanie przede wszystkim w badaniach materiału geologicznego (skały, minerały, meteoryty, szkliwo, skamieniałości), ale także archeologicznego (wyroby szklane, ceramiczne, metalowe), a nawet materiałów budowlanych czy związanych z przemysłową działalnością człowieka (beton, szkło, ceramika, żużel, stopy metali).

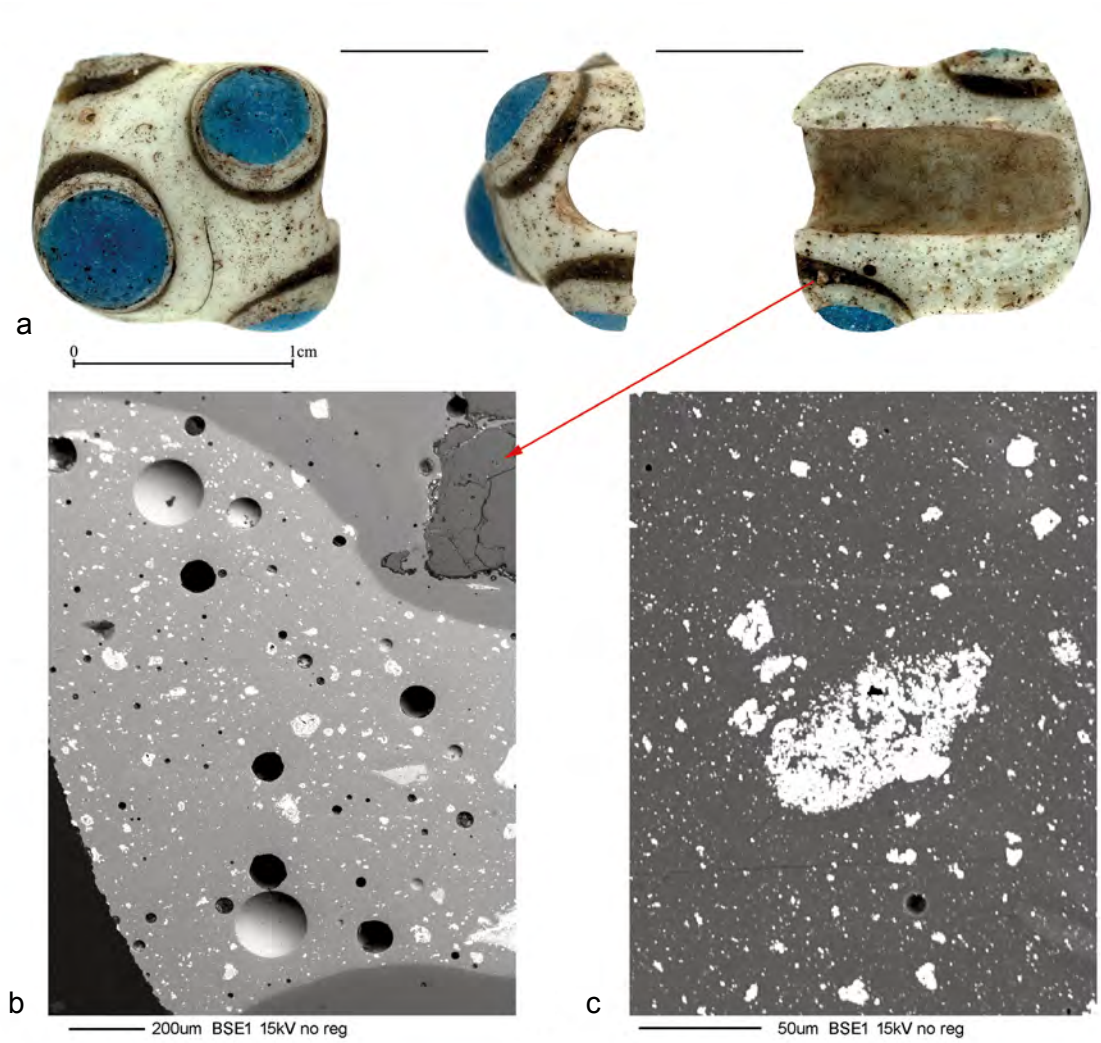
Zastosowanie metodyki EPMA wiąże się z bombardowaniem wybranego punktu na powierzchni preparatu zogniskowaną wiązką elektronową (zazwyczaj o średnicy mniejszej niż 1 μm). W efekcie oddziaływania wysokoenergetycznych elektronów z materią próbki dochodzi m.in. do emisji charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego przez wzbudzone atomy próbki. Analiza energii lub długości fali tego promieniowania umożliwia wskazanie rodzaju, a przede wszystkim zawartości poszczególnych pierwiastków budujących badany obiekt. Kluczowym elementem każdej mikrosondy elektronowej są spektrometry dyspersji długości fali promieniowania rentgenowskiego (ang. *wavelength dispersive spectroscopy*, WDS). Wyposażona w kilka takich spektrometrów – wraz z odpowiednimi kryształami analizującymi (monochromatorami promieniowania rentgenowskiego) – mikrosonda umożliwia pomiar zawartości pierwiastków od boru do uranu. W zależności od konfiguracji urządzenia oraz składu chemicznego szkła (tzw. matrycy), limit detekcji, czyli granica wykrywalności oznaczanych pierwiastków, mieści się w granicach 0,01-0,2% wag. (zob. wyjaśnienia pod tabelą 1). Pomiar ilościowy możliwy jest dzięki porównaniu intensywności emitowanego przez pierwiastek z próbki promieniowania z intensywnością promieniowania pochodzącego od tego samego pierwiastka, ale z materiału



Ryc. 3. Fragmenty paciorków szklanych zatopione w żywicy epoksydowej

referencyjnego (substancji o znanym składzie chemicznym). Powszechne zastosowanie mają tu wzorce naturalne (minerały) lub syntetyczne: tlenki, krzemiany, siarczki, metale itp.

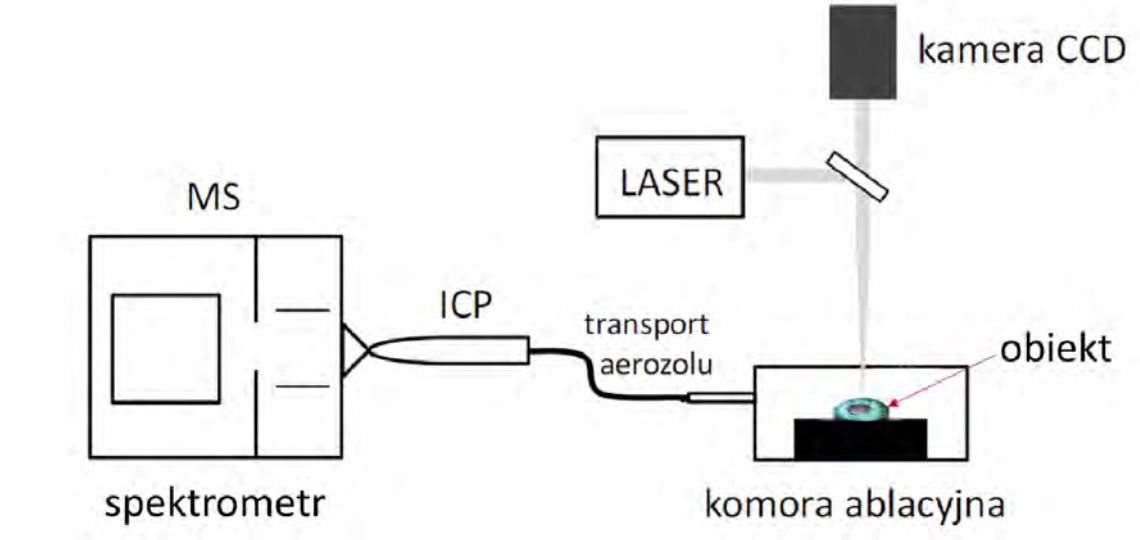
Mikroanalizę rentgenowską zalicza się do metod nieniszczących, wymaga ona jednak specjalnego przygotowania próbek. Odpowiednio wyselekcjonowane i reprezentatywne fragmenty wyrobów szklanych zatapia się w żywicy epoksydowej (ryc. 3). Po jej utwardzeniu, przeznaczoną do badań powierzchnię preparatu bardzo precyzyjnie wyrównuje się za pomocą proszków szlifierskich i zawiesin diamentowych (najmniejsza wymagana wielkość ziarna diamentu to 0,25 μm). Następnie gotowy preparat umieszcza się wewnątrz napylarki próżniowej, gdzie jego powierzchnia zostaje pokryta warstwą węgla (jako materiału przewodzącego) o grubości ok. 20 nm. Należy zaznaczyć, że po wykonaniu badań mikrosondowych, preparat można przechowywać jeszcze przez wiele lat (najlepiej w eksykatorze), a gdy zajdzie taka potrzeba, po przepolerowaniu powierzchni, może ponownie zostać użyty do badań.



Ryc. 4. Paciorek szklany z Wiciny badany fizykochemicznie. a – zdjęcie paciorka w trzech rzutach; b, c – obrazy BSE szkła paciorka. Fot. M. Gmur (a), P. Dzierżanowski (b, c)

Parametry wiązki elektronowej w czasie przeprowadzania analiz EPMA uzależnione są od specyfiki danej próbki. W przypadku wyrobów szklanych stosuje się napięcie przyspieszające 15 kV, natężenie prądu 10 nA i zwykle rozszerzoną wiązkę elektronową o średnicy 10-30 µm. Wszystkie obserwacje przeprowadza się bezwzględnie w warunkach wysokiej próżni oraz ze stabilizacją prądu wiązki elektronów. Oprócz wykonywania właściwych analiz składu chemicznego z użyciem spektrometrów WDS, mikrosonda umożliwia również obserwację widm energodyspersyjnych promieniowania rentgenowskiego (ang. *energy dispersive spectroscopy*, EDS). Widma EDS wykorzystuje się jedynie pomocniczo – do szybkiej, jakościowej analizy składu pierwiastkowego. Dodatkowo dzięki wbudowanemu detektorowi elektronów wstecznie rozproszonych (ang. *backscattered electrons*, BSE), istnieje możliwość zaobserwowania ewentualnych niejednorodności składu chemicznego na powierzchni badanego fragmentu szkła (ryc. 4).

Należy w tym miejscu zaznaczyć, że zarówno detektory BSE, jak i spektrometry EDS są standardowym wyposażeniem skaningowych mikroskopów elektronowych (ang. *scanning electron microscope*, SEM). Mikroskopy te są nieocenionym narzędziem w obrazowaniu powierzchni zabytków archeologicznych. Jednak mikroanaliza rentgenowska z zastosowaniem SEM-EDS charakteryzuje się niższą dokładnością i precyzją pomiaru, wyższymi limitami detekcji dla poszczególnych pierwiastków oraz niższą zdolnością rozdzielczą w porównaniu



Ryc. 5. Schemat układu pomiarowego LA-ICP-MS. Obiektem badanym jest przykładowy paciorek umieszczony wewnątrz komory ablacyjnej

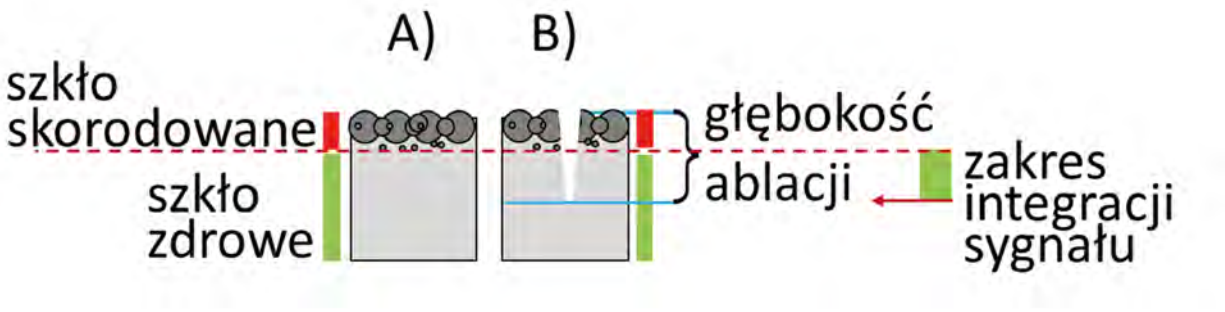
do właściwej analizy EPMA (WDS). W celu pogłębienia wiedzy dotyczącej mikroanalizy rentgenowskiej odsyłamy czytelnika do opracowań Goldsteina i in. (2018) oraz Reeda (2005).

Metoda LA-ICP-MS

Na czas pomiaru, analizowany obiekt umieszczany jest w specjalnej, szczelnej komorze pomiarowej, którą od góry zamyka okienko wykonane z czystego kwarcu (ryc. 5). Promieniowanie laserowe kierowane jest przez to okienko na powierzchnię analizowanego obiektu lub próbki pobranej przed pomiarem z obiektu szklanego. Decyzja o możliwości przeprowadzenia badania bezpośrednio z powierzchni analizowanego przedmiotu bądź o konieczności mechanicznego pobrania fragmentu przed pomiarem LA-ICP-MS zależy od objętości komory pomiarowej. Obecnie możliwe są różne rozwiązania techniczne, a zatem decyzję należy podejmować indywidualnie w zależności od dostępnego układu pomiarowego. Najczęściej obiekty o niewielkich rozmiarach (np. paciorki) mieszczą się wewnątrz komory razem z materiałami wzorcowymi.

W wyniku bezpośredniego oddziaływania promieniowania laserowego następuje absorpcja energii lasera przez znikomą objętość próbki, a następnie energia ta jest przekazywana w głąb materiału. Po przekroczeniu progowej wartości gęstości mocy lasera następuje eksplozyjne wyrzucenie materiału próbki do strumienia gazu nośnego przepływającego przez komorę ablacyjną Materiał wyrywany jest z powierzchni próbki w postaci zarówno elektronów, jonów, atomów, cząsteczek, jak i klasterów. Należy podkreślić, że ablacja jest skomplikowanym procesem, którego poszczególne etapy przebiegają nieliniowo, a zmieniają się w zależności nie tylko od energii i długości fali zastosowanego lasera, ale także od czasu trwania pojedynczych impulsów i od właściwości badanej próbki, jej koloru, twardości, jednorodności chemicznej i składu pierwiastkowego.

Wybór sposobu mikropróbkowania laserowego zależy przede wszystkim od celu prowadzonej analizy. Informacje na temat sposobu rozmieszczenia składników w głąb materiału z rozdzielczością w skali mikrometrów można uzyskać stosując ablację punktową. Ten sposób mikropróbkowania polega na oddziaływaniu wiązki lasera z nieruchomą próbką i dlatego nazywany jest często statycznym. Każdy kolejny puls lasera powoduje ablację materiału z coraz głębszych jej warstw, pozwalając na usunięcie ewentualnych warstw korozji, które mogą występować na powierzchni badanego materiału (ryc. 6).



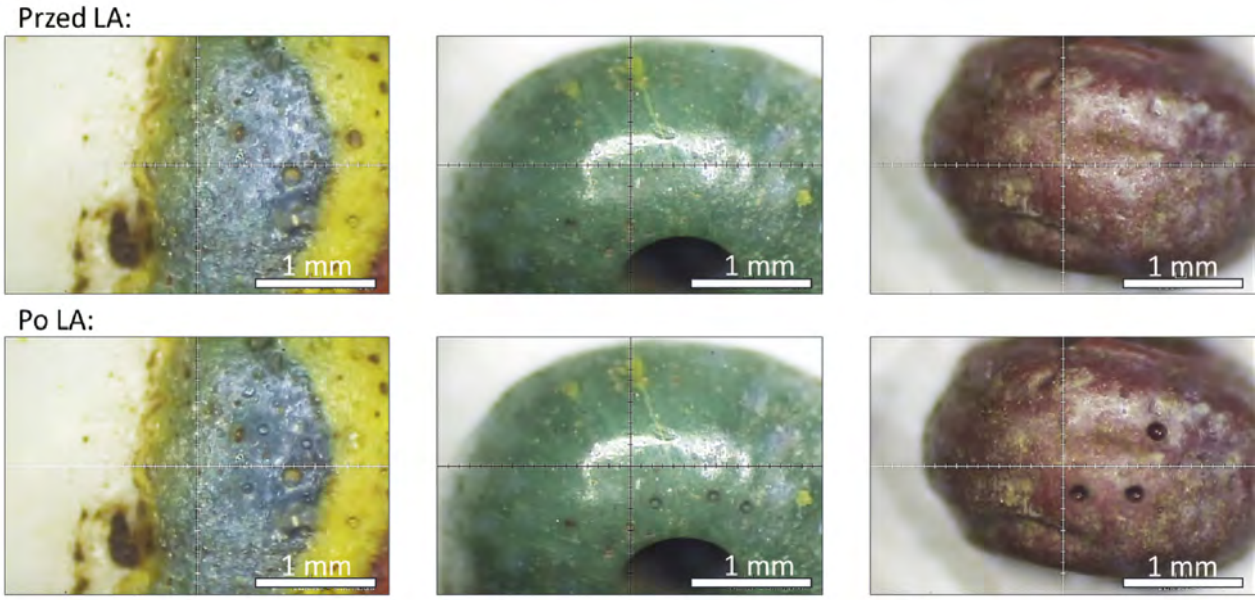
Ryc. 6. Sposób badania szkła pokrytego warstwą korozji metodą LA-ICP-MS: a) schematyczny rysunek szkła z warstwą korozji przed LA; b) schematyczny rysunek szkła z warstwą korozji po LA. Czerwonym kolorem zaznaczona została warstwa szkła skorodowanego, zielonym kolorem oznaczono szkło zdrowe. Zakres integracji sygnału brany pod uwagę podczas obliczeń w celu uzyskania informacji na temat składu pierwiastkowego zdrowego szkła również zaznaczono kolorem zielonym. Wyniki uzyskane podczas ablacji warstw powierzchniowych nie są brane pod uwagę podczas obliczeń

W przypadku nieznanej homogeniczności próbek istotne jest kilkukrotne (z reguły 3-5) powtórzenie pomiaru w różnych oddalonych od siebie miejscach na powierzchni próbki. Inny sposób prowadzenia pomiarów to mikropróbkowanie liniowe lub mapowanie, podczas którego wiązka lasera oddziałuje z próbką poruszającą się względem niej w zadanym kierunku, według ustalonego toru i z wybraną prędkością (tzw. szybkością skanowania). Uzyskany w ten sposób materiał pochodzi praktycznie z tej samej głębokości próbki, a przebieg rejestrowanego sygnału odzwierciedla lokalne zmiany składu i homogeniczność rozmieszczenia pierwiastków na powierzchni próbki.

Ablacja powoduje wprowadzenie cząstek próbki do strumienia gazu nośnego (najczęściej Ar lub mieszaniny He/Ar), natychmiastowe utworzenie aerozolu, który w sposób ciągły jest transportowany do plazmy sprzężonej indukcyjnie (ang. *inductively coupled plasma*, ICP). Temperatura plazmy nie jest jednakowa we wszystkich strefach palnika kwarcowego, ale miejscami może dochodzić do 10000 K. Dzięki tak wysokim temperaturom pierwiastki obecne w aerozolu próbki ulegają atomizacji, a potem jonizacji z wysoką wydajnością. Następnie dodatnio naładowane jony w fazie gazowej przekazywane są do analizatora mas, gdzie następuje ich rozdzielenie względem stosunku masy do ładunku (m/z), a strumień jonów wykrytych w detektorze pozwala na zarejestrowanie danych numerycznych. Zapisane dane zawierają zakodowaną informację na temat składu pierwiastkowego próbki.

Po ablacji mikropróbkowana powierzchnia pozostaje praktycznie niezmieniona, cały proces odbywa się jedynie w mikroobszarach, a głębokość penetrowania wiązką lasera najczęściej nie przekracza kilku μm. Należy jednak pamiętać o tym, że badanie przeprowadzone metodą LA-ICP-MS jest mikroniszczące wówczas, gdy obiekt ma rozmiary pozwalające na umieszczenie wewnątrz komory, w której zachodzi mikropróbkowanie (ryc. 7). W przeciwnym wypadku najczęściej konieczne jest mechaniczne pobranie niewielkiego fragmentu, który będzie reprezentował cały obiekt w dalszych badaniach, lub wykorzystanie szlifów, które wcześniej przebadano metodą SEM-EDS lub EPMA. Takie połączenie jest bardzo popularne i wydaje się dobrym rozwiązaniem, które pozwala na wykorzystanie zalet obu wspomnianych metod instrumentalnych (Wagner i in. 2008). Dla dużych obiektów możliwe jest także zastosowanie kilku nieklasycznych rozwiązań polegających na ablacji w powietrzu i stosowaniu dodatkowego systemu pomp wymieniających powietrze na argon zanim strumień transportujący aerozol dotrze do plazmy (Kovacs i in. 2010), zasysaniu aerozolu na filtrach (Glaus i in. 2012) i ponownej reablacji w klasycznych systemach laboratoryjnych albo stosowaniu tzw. komór otwartych, które na czas pomiaru przymocowuje się do powierzchni badanych obiektów (Wagner i Jędral 2011). W ten ostatni sposób zbadano m.in. słynną zapinkę z Gorszewic (Purowski i in. 2016).

Pomimo wielu lat, które upłynęły od momentu pierwszego zastosowania LA-ICP-MS w badaniach nad składem dawnych szkieł, metoda ta nadal należy do nierutynowych ze względu na pułapki, które czyhają na niemal każdym etapie analizy, poczynając od oceny stanu zachowania zabytku, przez



Ryc. 7. Zróżnicowane efekty ablacji laserowej dla różnobarwnych szklanych paciorków. Zachowano takie same warunki mikropróbkowania: E (energia lasera) = 5 mJ; φ (średnica wiązki) = 100 μm; τ (częstotliwość) = 20 Hz; λ (długość fali) = 213nm, t (czas trwania impulsu) = 5ns

konieczność optymalizacji warunków pomiarowych, a kończąc na prawidłowym doborze wzorców i materiałów odniesienia oraz strategii obliczeniowych. Oznaczenia ilościowe pozwalają na podanie konkretnych zawartości wybranych pierwiastków (lub ich formy tlenkowej) w szkle. LA-ICP-MS należy do metod porównawczych (względnych), zatem takie oznaczenia są możliwe jedynie wówczas, gdy laboratorium dysponuje odpowiednimi wzorcami zewnętrznymi, które można poddać badaniom w identyczny sposób, w jaki badane są przedmioty szklane. Skład stosowanego wzorca zewnętrznego powinien być jak najbardziej jednorodny oraz zbliżony do składu badanego obiektu, dlatego najczęściej stosowanymi wzorcami w analizie szkła są certyfikowane materiały odniesienia NIST 610-617 (*National Institute of Standards and Technology*) opracowane w latach 70. XX w. Procedura wykonania szklanych wzorców NIST wymaga dużej staranności. Matrycę każdego materiału odniesienia stanowi wysokiej czystości piasek, popiół sodowy, węglan wapnia oraz tlenek glinu, które przetapia się w elektrycznym piecu o pojemności 200 funtów wyłożonym rodem i platyną. Tak przygotowana baza zawiera: 72% wag. SiO_2, 12% wag. CaO, 14% wag. Na_2O i 2% wag. Al_2O_3. Następnie w temperaturze 1550°C „dodawanych" jest 61 pierwiastków o małej i śladowej zawartości we wzorcach: NIST 610 i 611 na poziomie 500 mg/kg, NIST 612 i 613 – 50 mg/kg, NIST 614 i 615 – 1,0 mg/kg, NIST 616 i 617 – 0,02 mg/kg. Otrzymane walce o średnicy 0,5 cala przycinane są na dwie grubości. Materiały odniesienia o numerach parzystych mają grubość 3 mm, a o numerach nieparzystych 1 mm. Cięcie dokonywane jest tarczą diamentową z częściami miedzianymi, dlatego na końcu wzorce przemywane są kwasem azotowym (V).

Oprócz wzorca zewnętrznego kolejnym elementem kalibracji jest stosowanie wzorca wewnętrznego, który niweluje różnice w wydajności ablacji między próbką a materiałem odniesienia oraz różnice w masie pobranej podczas mikropróbkowania w różnych obszarach próbki. Wzorcowanie wewnętrzne minimalizuje także w pewnym stopniu efekty matrycowe i zmiany czułości pomiarów ICP-MS oraz zwiększa precyzję oznaczeń. Podczas badania ciał stałych w ich naturalnym stanie skupienia i formie wykorzystuje się wzorce wewnętrzne, które są głównym składnikiem próbki, a ich zawartość można wyznaczyć w niezależnej analizie. Odpowiedni wzorzec wewnętrzny powinien być jednorodny w całej objętości poddawanej ablacji, występować w zbliżonej zawartości zarówno w próbce, jak i we wzorcu zewnętrznym, oraz zachowywać się podobnie jak cała próbka podczas

ablacji laserowej, transportu i jonizacji. W pomiarach LA-ICP-MS szkieł najczęściej wybieranymi wzorcami wewnętrznymi są izotopy krzemu: ^{29}Si, ^{30}Si lub wapnia: ^{42}Ca, ^{43}Ca.

Inny sposób korygowania różnic w wydajności ablacji próbki i stałego wzorca zewnętrznego polega na normalizowaniu wszystkich wyznaczonych zawartości pierwiastków w próbce do 100% wag. Zaletę tej metody stanowi brak konieczności dysponowania informacją ilościową o składzie chemicznym badanego materiału, za to niezbędne są dane o składzie jakościowym oraz oznaczenie zawartości pierwiastków z dużą dokładnością. Wyniki ilościowe pomiarów obiektów szklanych przedstawia się najczęściej jako zawartości poszczególnych tlenków znormalizowane do 100% wag. Stosowne informacje o warunkach pomiarowych oraz wybranych algorytmach, pozwalających na przeliczenie rejestrowanych sygnałów na wyniki ilościowe, powinny być zawsze podawane w raporcie szczegółowo opisującym wybrany scenariusz analityczny.

Poprawność zastosowanej strategii kalibracji oraz dokładność oznaczeń ilościowych szacuje się na podstawie porównania wyników analizy materiałów odniesienia o matrycy zbliżonej do badanych próbek z wartościami podanymi w certyfikacie lub literaturze. Ciekawą serią szklanych materiałów referencyjnych są opracowane przez Roberta Brilla z amerykańskiego Muzeum Szkła w Corning cztery materiały: CMG-A, CMG-B, CMG-C i CMG-D (nazywane Corning A, B, C lub D), odzwierciedlające skład chemicznych szkieł historycznych. Dane opisujące zawartości poszczególnych tlenków w Corningach nie są wartościami certyfikowanymi, jednak badania przeprowadzone przy użyciu różnych metod, m.in. bardzo czułej neutronowej analizy aktywacyjnej (ang. *neutron activation analysis*, NAA), potwierdziły ich skład oraz homogeniczność (względne odchylenie standardowe poniżej 2%).

Prawidłowo przeprowadzone oznaczenia zawartości poszczególnych pierwiastków w tworzywie zabytków szklanych każdorazowo powinny obejmować trzy grupy obiektów zmierzone w identycznych warunkach: 1) pomiar wzorców zewnętrznych (np.: szkła NIST); 2) pomiar materiałów odniesienia (np.: szkła CMG) oraz 3) pomiar obiektów zabytkowych. Dokumentacja obejmująca tabelaryczne zestawienie wyników zawiera wówczas dane obliczone dla próbek względem certyfikowanych wartości wybranych wzorców oraz dowód poprawności zastosowanego algorytmu obliczeniowego w postaci wyników uzyskanych dla materiałów odniesienia (zob. np. Purowski i in. 2016: 112, tab. 1; Kamyszek i in. 2018: 189 tab. 2). Te ostatnie dane są bardzo istotne dla udokumentowania spójności pomiarowej. W celu pogłębienia wiedzy o możliwości prowadzenia badań LA-ICP-MS odsyłamy czytelnika do pracy Wagner i in. (2017).

Metody interpretacji wyników badań laboratoryjnych

Uzyskane wyniki badań fizykochemicznych szkieł publikowane są w formie tabelarycznej. Najczęściej podawane są rezultaty uśrednione z kilku miejsc pomiarowych, ale też niekiedy zamieszczane są dodatkowo wyniki pojedynczych analiz (np. Dekówna i Purowski 2019). Należy pamiętać, że we wspomnianych tabelach powinno się podawać w pierwszej kolejności zawartość krzemionki (SiO_2), następnie alkaliów (Na_2O i K_2O) oraz stabilizatorów (CaO i MgO), a dopiero później pozostałe składniki, które przedostały się do szkła razem z piaskiem, popiołami roślin, barwnikami czy środkami mącącymi (zob. niżej tabela 1).

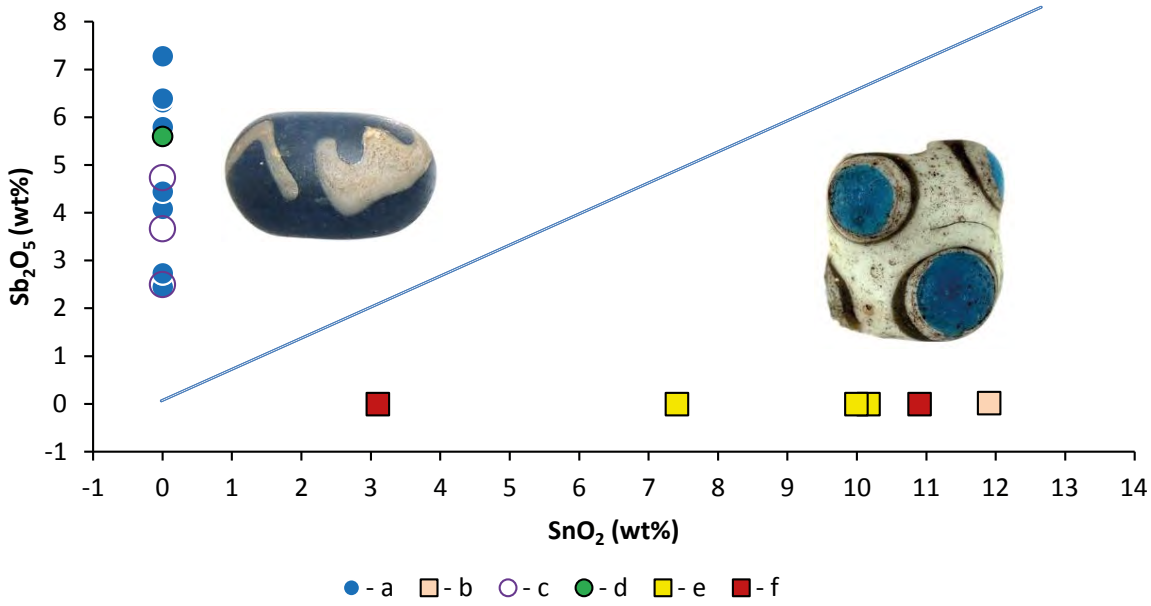
Analiza rezultatów badań archeometrycznych szkła polega na wydzieleniu głównych składników szkłotwórczych i porównaniu zawartości wybranych tlenków, ich sum lub proporcji (Dekówna 1980: 30; Purowski 2019: 30). W Polsce stosowane są, głównie dla materiałów z okresu wpływów rzymskich i wczesnego średniowiecza, kryteria klasyfikacji wyników badań laboratoryjnych składu chemicznego szkła zaproponowane przez Julię Szczapową (1973; 1983). Ponieważ zagadnienie to było w literaturze przedmiotu omawiane już wielokrotnie (por. Dekówna 2005: 18–19), w tym miejscu przedstawimy je bardzo skrótowo.

Wspomniana analiza polega na wyodrębnieniu składników (SiO_2, Na_2O, K_2O, CaO, MgO, Al_2O_3, PbO) mających wpływ na właściwości szkła, obliczeniu ich sum (np. $Na_2O + K_2O$ czy CaO + MgO) i proporcji (np. Na_2O/K_2O lub CaO/MgO), a następnie zestawieniu tych danych w schematy nadrzędności i podrzędności. Zabiegi te pozwalają na wydzielenie rodzajów szkła (sodowe, potasowe, ołowiowe, mieszane), odmian (np. szkła sodowe wytopione przy pomocy: sody mineralnej lub popiołów roślin) oraz typów (np. $Na_2O{\bullet}CaO{\bullet}SiO_2$ lub $Na_2O{\bullet}CaO{\bullet}Al_2O_3{\bullet}SiO_2$). Jak zauważyła Maria Dekówna (2005: 19): „Stosowanie owych wskaźników

Tabela 1. Wyniki analizy wykonanej metodą EPMA składu chemicznego szkła paciorka zdobionego „guzkami" z Wiciny (wg Purowskiego 2012, tabela 136 [na płycie CD], ze zmianami)

Próbka	**Szkło osnowy**	**Szkło ornamentu**		
Przezroczystość i barwa szkła	**opakowe, białe**	**opakowe, białe**	**wyraźnie przejrzyste, niebieskie**	**słabo przejrzyste, brązowe**
Rodzaj szkła	**sodowe**			
Odmiana szkła	**„mineralne" (wytopione przy pomocy sody mineralnej)**			**„popiołowe", inaczej: sodowo-potasowe (wytopione przy pomocy popiołu roślin halofitowych)**
Typ chemiczny szkła	**$Na_2O•CaO•PbO•SiO_2$**		**$Na_2O•CaO•SiO_2$**	**$Na_2O•K_2O•CaO•Al_2O_3•SiO_2$**
Nr próbki	**69a**	**69b**	**69c**	**69d**
Składniki (w % wagowych)				
SiO_2	62,26	60,53	71,66	63,63
Na_2O	11,58	11,32	16,33	12,48
K_2O	0,17[a]	0,15[c]	<	2,13
CaO	8,14	7,74	8,60	7,38
MgO	0,44	0,45	0,57	1,98
Al_2O_3	0,36	0,37	0,49	2,49
Fe_2O_3	0,46[b]	1,49[c]	0,38	1,52
MnO	<	<	<	<
Sb_2O_5	<	<	<	<
PbO	7,01	7,37	<	2,05
CuO	<	<	2,06	<
BaO	<	<	<	<
TiO_2	<	<	<	<
SnO_2	10,16	9,99	<	4,61
NiO	<	<	<	<
ZnO	<	<	<	<
As_2O_5	<	<	<	<
P_2O_5	<	<	<	0,61
SO_3	<	<	<	<
Cl	0,84	0,85	1,02	0,83
Suma	101,42	100,26	101,11	99,71

Objaśnienia: [a] – związek wystąpił w 2 z 3 pomiarów (średnia została więc wyliczona z 2 pomiarów); [b] – związek wystąpił tylko w 1 z 3 pomiarów (w tabeli podany jest więc wynik jednostkowy, a nie średnia z 3 analiz); [c] – niewielkie ilości związku ujawniono tylko w 1 z 7 pomiarów; „<" – poniżej granicy wykrywalności metody. Limity detekcji (w % wagowych) wynoszą: Si – 0,05%; Na – 0,15%; K – 0,05%; Ca – 0,07%; Mg – 0,04%; Al – 0,04%; Fe – 0,14%; Mn – 0,17%; Sb – 0,11%; Pb – 0,12%; Cu – 0,20%; Ba – 0,13%; Ti – 0,07%; Sn – 0,08%; Ni – 0,17%; Zn – 0,25%; As – 0,08%; P – 0,07%; S – 0,05% Cl – 0,14%.



Ryc. 8. Korelacja zawartości tlenków cyny i antymonu w opakowych szkłach barwy białej z wczesnej epoki żelaza z Polski. a, c, d – szkła barwione związkami antymonu; b, e, f – szkła barwione związkami cyny; a – Kisielsk, Owidz, Stare Bojanowo, Teklin i Wicina; b – Lubień; c – Wicina; d – Starosiedle; e – Kępno i Wicina; f – Kozów. Zmienione za: Purowski 2019: ryc. 5.78

stwarza duże możliwości poznawcze; analizując przy pomocy tych samych wskaźników wyniki badań składu chemicznego szkła znalezisk z różnych obszarów, a także rezultaty analiz głównych surowców szklarskich: piasku, sody mineralnej, popiołu […], można uzyskać ważne informacje na temat surowców użytych do wyrobu badanych szkieł, receptur, według których szkło było wytopione, oraz ośrodka (lub rejonu), gdzie mogło ono być wytworzone".

Według zaprezentowanego schematu szkła sodowe (czyli takie, w których składzie chemicznym $Na_2O > K_2O$ lub PbO) można podzielić na dwie główne odmiany: 1) „mineralne", wytopione przy pomocy sody naturalnej; 2) „popiołowe" (sodowo-potasowe), wytopione z popiołu rośli bogatych w sód (Dekówna 2005: ryc. 8). Pierwsze zawierają tlenek potasu (K_2O) w ilościach mniejszych niż 1,3%, a $Na_2O / K_2O \geq 13 / 1$. Szkła sodowo-potasowe (wytopione z popiołu roślin) zawierają K_2O w ilościach większych lub równych 1,3%, a tlenki sodu i potasu występują w nich w proporcjach mniejszych niż 13/1 (Szczapowa 1973: 27; por. uwagi Dekówny 1980: 30–31; Purowski 2012:166, tabela 14).

Za przykład zastosowania powyższego schematu postępowania może posłużyć analiza niezwykłego paciorka odkrytego na osadzie z wczesnej epoki żelaza w Wicinie. Przedmiot został wykonany z opakowego szkła barwy białej, a udekorowano go wielobarwnymi guzkami, zrobionymi ze szkła: 1) słabo przejrzystego koloru brązowego, 2) opakowego, białego i 3) wyraźnie przejrzystego, niebieskiego (ryc. 4a). Analogie formalne wskazują, że ozdobę wykonano na obszarach położonych nad północnymi wybrzeżami Morza Czarnego (Purowski 2012: 341–343; 2019: 228). Ale czy na tym samym terenie wytopiono szkło z surowców głównych, a następnie zastosowano zabiegi uzupełniające (barwienie, mącenie)? Szukając odpowiedzi na te pytania przebadano metodą EPMA zarówno tworzywo osnowy, jak i trzy warstwy dekoracji paciorka z Wiciny (tabela 1). Zgodnie z opisanymi powyżej kryteriami klasyfikacji wszystkie szkła można zaliczyć do rodzaju sodowego, przy czym trzy z czterech – do odmiany szkieł wytopionych z sody naturalnej, a jedno – z popiołu roślin halofitowych (słonolubnych). Okazy pierwszej odmiany reprezentują dwa typy chemiczne: $Na_2O•CaO•SiO_2$ lub $Na_2O•CaO•PbO•SiO_2$, natomiast „popiołowe" – jeden: $Na_2O•K_2O•CaO•Al_2O_3•SiO_2$ (Purowski 2012: 143, próbka nr 69). W szkle barwy białej zwraca uwagę wysoka zawartość tlenków cyny (10% SnO_2) i ołowiu (7% PbO). Nie ulega wątpliwości, że oba związki przedostały się do szkła z surowcem mącąco-barwiącym (Purowski 2019: 266–267). Porównanie

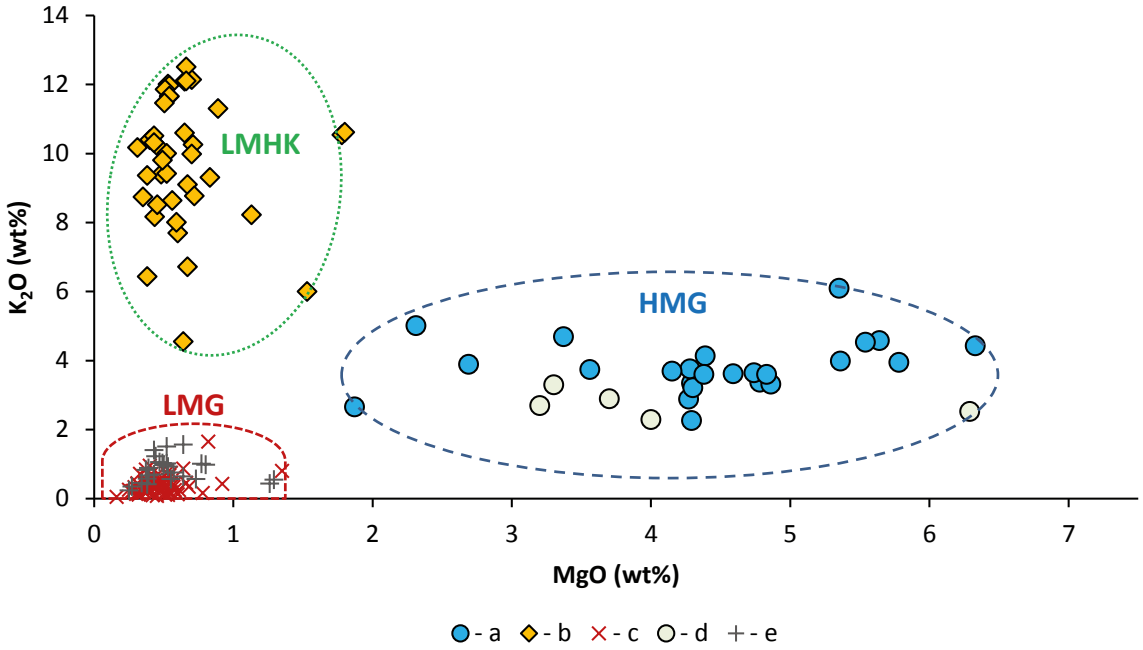
sum i proporcji składników głównych wykazało tylko pojedyncze podobieństwa szkieł z Wiciny do szkieł znanych z innych obszarów i okresów chronologicznych (Purowski 2012: 180-181 [tab. 18], 205 [tab. 30], 223 [tab. 42], 365-370 [tab. 56], 381 [tab. 60], 397 [tab. 65]), nie mogło więc stać się podstawą do wyciągnięcia szerszych wniosków historycznych. Zastosowanie jako topnika sody mineralnej, a w jednym przypadku popiołów roślin halofitowych wskazuje jednak, że analizowane szkła wytopiono na obszarze wschodnionadśródziemnomorskim. Natomiast użycie związków cyny (tabela 1; ryc. 4) dowodzi, że tworzywo barwy białej mącone było na terenie nadczarnomorskim (Purowski 2019: 268). Analiza składu chemicznego szkieł paciorka z Wiciny pozwala więc na prześledzenie jego długiej historii: szkło wytopiono na obszarze wschodnionadśródziemnomorskim w dwóch pracowniach (typu A według podziału M. Dekówny [1988], tj. „hutach") lub jednej, ale wykorzystującej różne surowce (sodę mineralną oraz pochodzącą z popiołów roślin); później trafiło ono na tereny nadczarnomorskie do warsztatów przetwórczych (typu B), gdzie zostało poddane dalszym zabiegom technologicznym (przynajmniej tworzywo opakowe barwy białej, które zostało na tym obszarze zamącone), a następnie uformowano z niego piękny paciorek. W końcu przedmiot ten trafił na obszary obecnej zachodniej Polski (Wicina), przypuszczalnie razem z przybyłą ze wschodu ludnością koczowniczą (przez niektórych badaczy łączoną ze Scytami).

Należy też podkreślić, że publikacja wyników badań paciorka z Wiciny (Purowski i in., 2012: 164) zmieniła dotychczasowe poglądy na temat zastosowania związków cyny do mącenia szkieł, przesuwając o kilka wieków („postarzając") początki ich wykorzystywania w szklarstwie europejskim (Henderson 2013: 367). Co ciekawe, w tym samym czasie (tj. we wczesnej epoce żelaza) opakowe szkła barwy białej, które tworzą dekorację paciorków sprowadzanych na obszary obecnej Polski z zachodu, mącone były nie związkami cyny i ołowiu (jak szkło biżuterii, która trafiła do środkowej Europy ze wschodu), ale związkami antymonu (ryc. 8). Rozpoznanie środka mącącego w szkłach barwy białej z wczesnej epoki żelaza może więc wskazać kierunek napływu poszczególnych przedmiotów.

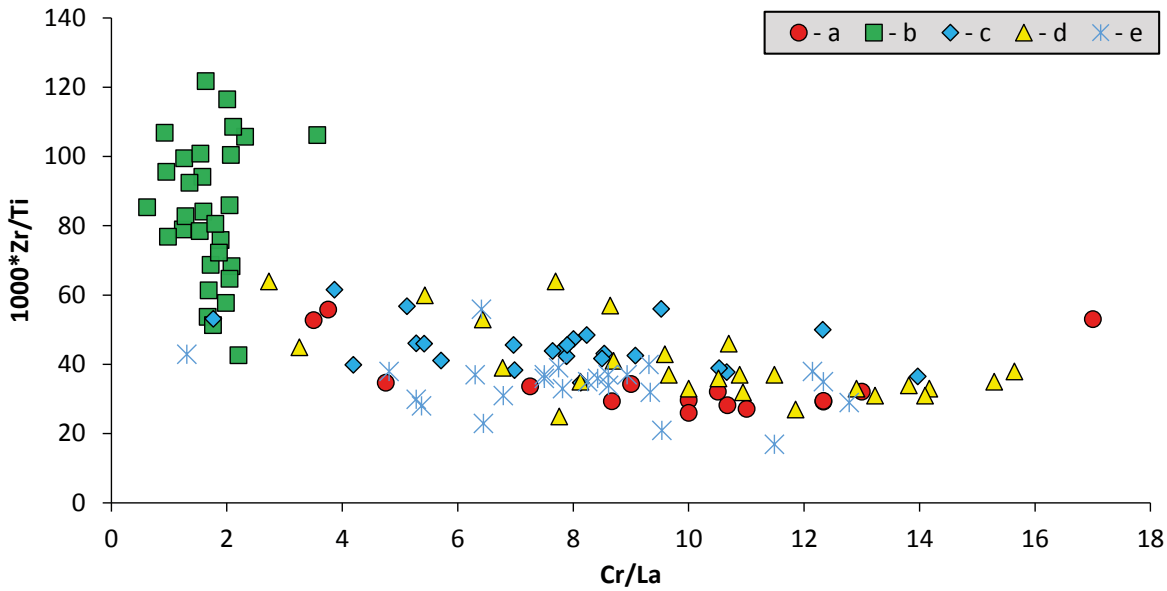
Niestety, opisane powyżej kryteria podziału i interpretacji, stosowane powszechnie m.in. w naszym kraju zwłaszcza dla tworzyw z okresu rzymskiego i wczesnego średniowiecza, nie zawsze mogą być wykorzystywane z powodzeniem w przypadku materiałów starszych. Nie da się ich zastosować do tzw. szkieł mieszanoalkalicznych, które cechują się wysoką zawartością zarówno związków sodu, jak i potasu (w większości tworzyw przeważa K_2O, ale w niektórych – Na_2O, a to oznacza, że – według propozycji J. Szczapowej – należałoby je zaliczyć do dwóch odmian i analizować osobno). Dla materiałów z epoki brązu oraz okresów halsztackiego i lateńskiego stosowane są więc nieco odmienne kryteria podziału. Dla szkieł sodowych głównym wskaźnikiem podziału również są tlenki, które przedostały się do szkła z surowcem alkalicznym (topnikiem), ale brana jest pod uwagę przede wszystkim zawartość Na_2O, K_2O i MgO (por. np. Henderson 1988; 1989; 2013; Purowski 2019). Porównując proporcje wymienionych składników, a zwłaszcza tlenków potasu i magnezu, wyróżnia się wśród tworzyw z II-I tys. p.n.e. szkła wysokomagnezowe (ang. *high magnesium glass*, HMG), niskomagnezowe (ang. *low magnesium glass*, LMG) oraz niskomagnezowe-wysokopotasowe (ang. *low magnesium, high potassium*, LMHK), nazywane „mieszanoalkalicznymi". Wszystkie wspomniane odmiany szkieł znane są z ziem obecnej Polski (ryc. 9; tabela 2). Dotychczasowe studia wskazują, że w przypadku HMG wykorzystano sodę pochodzenia organicznego, tj. popioły roślin halofitowych (stąd w ich składzie wyższa zawartość K_2O i MgO), natomiast przy wytopie LMG posłużono się sodą mineralną, taką jak natron (dlatego szkła te nie zawierają dużych ilości K_2O i MgO). Trudniej wskazać topnik zestawu szkieł „mieszanoalkalicznych"; przypuszcza się, że dodawano ługowany popiół roślin (Hartmann i in., 1997: 554), choć nie jest to jedyna hipoteza (Venclová i in., 2011: 577). Zastosowanie wymienionych surowców (sody mineralnej lub roślin halofitowych) wskazuje, że HMG i LMG wytopiono na obszarze wschodnionadśródziemnomorskim. Natomiast odkrycie warsztatów szklarskich w Italii dowodzi, że na tym terenie wytapiano szkła LMHK. O ich europejskim rodowodzie świadczy również fakt, że nie są one znane z Egiptu i Mezopotamii.

Jak więc wynika z informacji przedstawionych w poprzednim akapicie, w przypadku szkieł z epoki brązu, okresu halsztackiego i lateńskiego, rozpoznanie głównego składu chemicznego szkła może nam wskazać jakie zastosowano surowce szklarskie, a także – w jakim regionie wytopiono szkło.

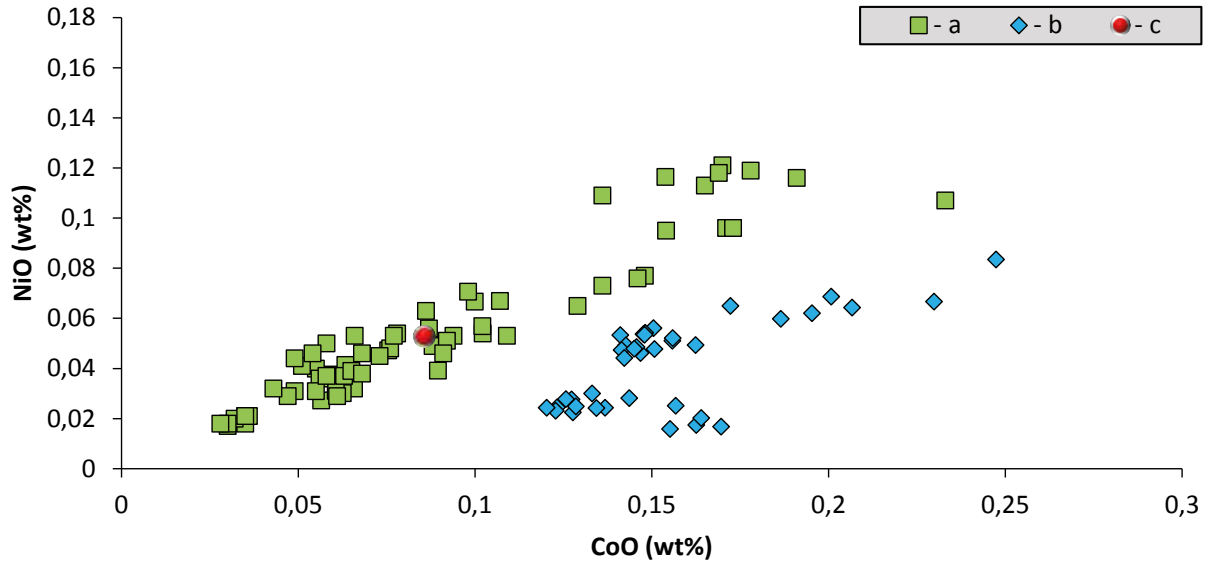
Jeśli chodzi o HMG z epoki brązu dysponujemy dodatkowym narzędziem, które umożliwia nam precyzyjniejsze określenie miejsca (obszaru) wykonania



Ryc. 9. Korelacja zawartości MgO i K_2O w szkłach z Polski. a – HMG z epoki brązu; b – LMHK z epoki brązu; c – LMG z okresu halsztackiego-starszego okresu przedrzymskiego; d – HMG z okresu halsztackiego–początków starszego okresu przedrzymskiego; e – LMG z LTC. Zmienione za: Purowski 2019: ryc. 7.2



Ryc. 10. Korelacja zawartości Cr/La do Zr/Ti w szkle wysokomagnezowym (HMG) z epoki brązu. a – Polska; b – Egipt; c – Mezopotamia; d – Dania; e – Korsyka. Zmienione za: Purowski 2022: ryc. 4



Ryc. 11. Korelacja zawartości CoO do NiO w szkle wysokomagnezowym (HMG) z epoki brązu barwionym związkami kobaltu. a – Egipt; b – Mezopotamia; c – Polska. Zmienione za: Purowski 2019: ryc. 4.38

szkła. Jest to możliwe dzięki porównaniu zawartości oraz proporcji niektórych pierwiastków śladowych i ziem rzadkich. Jak bowiem ustalili Andrew Shortland i in. (2007) egipskie wysokomagnezowe szkła bezbarwne oraz koloru niebieskiego z II tys. p.n.e. cechują się najczęściej nieco wyższą zawartością tytanu (Ti), cyrkonu (Zr) i lantanu (La), a niższą chromu (Cr) niż szkła mezopotamskie. A jaką ilość wymienionych składników zawierają HMG z epoki brązu odkryte w dorzeczu Odry i Wisły? Aby odpowiedzieć na to pytanie konieczne stało się przeprowadzenie badań składu chemicznego szkła precyzyjną metodą LA-ICP-MS (tabela 2). Okazało się, że korelacja Cr z Zr oraz Cr/La z Zr/Ti w szkłach wysokomagnezowych znanych z Polski zbliżona jest do obserwowanej w tworzywach znalezionych na terenie Mezopotamii (ryc. 10), a to uprawnia nas do wskazania tego obszaru jako miejsca wytopu większości HMG, z którego wykonano biżuterię odkrytą na obecnych ziemiach polskich (Purowski i in., 2018; Purowski 2019: 144).

Również analiza składników, które przedostały się do tworzywa razem z barwnikiem, może dostarczyć informacji o regionie, w którym wykonano szkło. Z taką, trzeba jednak zaznaczyć, nieczęstą sytuacją mamy do czynienia w przypadku pojedynczych szkieł wysokomagnezowych z epoki brązu okrytych na obszarach południowej Polski. Wpływ na ich niebieski kolor miały przede wszystkim związki kobaltu. Zaobserwowana w ich składzie chemicznym znacząca, choć nie bardzo duża ilość CoO, a także podwyższona zawartość niektórych innych składników (m.in. niklu, cynku czy manganu), wskazuje, że w przypadku omawianych tworzyw do barwienia wykorzystano egipskie ałuny (Purowski 2019: 130–131). Potwierdza to również korelacja CoO i NiO (ryc. 11), czyli tlenków, które przedostały się do tworzywa razem z barwnikiem.

Znakomitym uzupełnieniem rezultatów badań składu chemicznego szkła jest analiza obrazów BSE, na których możemy zaobserwować różnego rodzaju inkluzje, w tym barwnika i środka mącącego (ryc. 4b, c), a także „zanieczyszczeń" piasku. Skład tych inkluzji jest również badany, co ułatwia nam wskazanie jakie surowce wykorzystywano w procesie produkcyjnym konkretnych tworzyw. Na przykład obecność w szkle ziaren cyrkonu dowodzi, że źródłem krzemionki był piasek, a nie kamienie kwarcowe. Razem z piaskiem do gotowego tworzywa mogły przedostać się również skalenie widoczne nieraz na obrazach BSE (Purowski 2019: 194–195, 251–254, 323; Dekówna i Purowski 2019: 286, ryc. 12).

Na koniec należy zauważyć, że w badaniach archeometrycznych szkła stosowane są również analizy izotopów strontu $^{87}Sr/^{86}Sr$ i neodymu $^{143}Nd/^{144}Nd$, które mogą odpowiedzieć na pytania dotyczące miejsca wykonania omawianych tworzyw (np. Henderson 2013: 328 nn.; Henderson i in., 2015). Badania takie

Tabela 2. Wyniki analizy wykonanej metodą LA-ICP-MS składu chemicznego szkła paciorków odkrytych w Polsce (wg Purowskiego 2019: tabele 4.10. i 4.12.; Kamyszek i in., 2018: tabela 2)

Miejscowość	**Błogocice**	**Kietrz**	**Racibórz**
Datowanie	**1 poł. III EB (= BrD)**	**IV EB (= HaA2-HaB1)**	**LTC**
Przedmiot	**paciorek**	**paciorek**	**bransoleta**
Próbka	**szkło osnowy**	**szkło osnowy**	**szkło osnowy**
Przezroczystość i barwa szkła	**wyraźnie przejrzyste, turkusowe**	**wyraźnie przejrzyste, turkusowe**	**słabo przejrzyste, niebieskie**
Odmiana szkła	**HMG**	**LMHK**	**LMG**
Miejsce wytopu szkła	**Mezopotamia**	**Europa (prawdopodobnie Italia)**	**obszar wschodniośródziemnomorski**
Nr próbki	**112**	**125**	**182a**
Składniki (w % wagowych)			
SiO_2	56,31	78,47	71,76
Na_2O	18,93	2,84	12,95
K_2O	4,58	6,72	1,41
CaO	8,57	2,09	7,73
MgO	5,64	0,67	0,43
Al_2O_3	1,01	2,54	2,56
Fe_2O_3	0,45	0,68	0,77
MnO	0,0367	0,0145	0,17
Sb_2O_5	0,0003	0,001	0,01
PbO	0,0012	0,0039	0,07
CoO	0,0003	0,0011	0,086
CuO	0,5916	4,298	0,16
BaO	0,0074	0,0088	0,04
TiO_2	0,0580	0,0093	0,04
SnO_2	0,0004	0,0164	0,0048
NiO	0,0003	<	<
ZnO	0,0025	0,0237	0,017
As_2O_5	0,0006	0,0019	<
P_2O_5	0,1859	0,1814	<
B_2O_3	0,0321	<	0,1
Cs_2O	0,0000(1)	<	<
V_2O_5	0,0015	0,0014	0,0011
Rb_2O	0,0011	0,0166	0,0023
SrO	0,0682	0,0183	0,0562
Y_2O_3	0,0003	0,0003	0,0007
ZrO_2	0,0017	0,0045	0,0041
Mo_2O_3	0,0000(1)	<	<
Ag_2O	<	<	<
La_2O_3	0,0003	0,0005	0,0006
Ce_2O_3	0,0006	0,001	0,0011
HfO_2	0,0000(1)	0,0001	<
Bi_2O_3	<	0,0003	<
ThO_2	0,0001	0,0001	0,0000(1)
UO_2	0,0000(1)	0,0000(1)	0,0001
Li_2O	0,0051	0,0028	<
Cr_2O_3	0,0037	<	<
CdO	<	<	<
Sc_2O_3	<	<	<
Nd_2O_3	0,0001	0,0003	0,0003
W_2O_3	<	<	<
Au_2O_3	<	<	<

„<" – poniżej granicy wykrywalności metody.

dla szkieł z II tys. p.n.e.-I tys. n.e. z obszarów Polski nie były do tej pory prowadzane. W ostatnim czasie wykonano zaś pierwsze analizy izotopów ołowiu materiałów z XII-XIII w. z Czermna (Wajda i in., 2024).

PODSUMOWANIE

W niniejszej pracy staraliśmy się pokazać w jakim celu i za pomocą jakich narzędzi wykonywane są badania fizykochemiczne szkieł zabytkowych. Reasumując, w pierwszej kolejności archeolog powinien się zastanowić na jakie pytania chciałby odpowiedzieć znając skład chemiczny szkła opracowywanych przedmiotów, a dopiero później omówić ich wykonanie z badaczami, którzy specjalizują się w analizowaniu takich tworzyw i mają dostęp do wysokiej jakości sprzętu laboratoryjnego. Obecnie w badaniach szkieł zabytkowych najlepiej sprawdzają się metody EPMA i LA-ICP-MS, które się wzajemnie uzupełniają. Otrzymane rezultaty badań fizykochemicznych są przez archeologa interpretowane przy pomocy różnych metod. Dzięki ich zastosowaniu możliwe jest odtworzenie nie tylko procesu produkcyjnego, ale też wskazanie regionu, na którym szkło zostało wytopione oraz jakimi szlakami trafiło na badany obszar. Przeanalizowanie wyników badań przedmiotów z kolejnych okresów chronologicznych prowadzi do wniosków bardziej ogólnych, o szerszym zasięgu. Można bowiem wskazać zmiany technologii wytopu szkła zachodzące w kolejnych wiekach, np. w którym okresie wykorzystywano sodę mineralną, a w którym pochodzącą z popiołów roślin, kiedy i na jakim terenie pojawiły się poszczególne środki barwiące czy mącące szkło itd. Studia te umożliwiają nam wskazanie czasu i kierunku napływu wyrobów szklanych na badany teren.

LITERATURA

Braziewicz, J., Karwowski, M., Jaskóła, M. 1996. Zastosowanie rentgenowskiej analizy fluorescencyjnej do określania stężenia pierwiastków w szkle zabytków celtyckich z Polski. *Archeologia Polski* 41(1-2): 39–63.

Caley, E.R. 1962. *Analyses of ancient glasses 1790-1957. A comprehensive and critical survey*. Corning, N.Y.

Cehak-Hołubowiczowa, H. 1937. Materiał i zagadnienia cmentarzyska kurhanowego koło wsi Nawry w powiecie połtawskim. *Rocznik Archeologiczny* 1: 5–53.

Cehak-Hołubowiczowa, H. 1939–1948. Słowiańskie groby kurhanowe koło Czerniewicz w pow. dziśnieńskim. *Wiadomości Archeologiczne* 16: 419–455.

Dekówna, M., 1962. Naczynia szklane pochodzenia obcego na ziemiach polskich we wczesnym średniowieczu. *Slavia Antiqua* 9: 219–254.

Dekówna, M., 1975. Wyroby szklane z grodziska w Styrmen (Bułgaria). *Slavia Antiqua* 22: 177–277.

Dekówna, M., 1980. *Szkło w Europie wczesnośredniowiecznej*. Wrocław-Warszawa-Kraków-Gdańsk.

Dekówna, M., 1988. Uwagi na temat klasyfikacji i interpretacji pozostałości starożytnej i wczesnośredniowiecznej produkcji szklarskiej, (w:) G. Labuda, S. Tabaczyński (red.), *Studia nad etnogenezą Słowian i kulturą Europy wczesnośredniowiecznej*, II. Wrocław-Warszawa-Kraków-Gdańsk-Łódź, 5–20.

Dekówna, M., 2005. Rozwój metod badania znalezisk szkła w Polsce. *Acta Universitatis Nicolai Copernici. Archeologia* 29. *Archeologia szkła* 9: 3–40.

Dekówna, M. [2010] 2015. The glass from Cösitz (Zörbig), Sachsen-Anhalt, and the origins of non-alkaline lead-silica glass from European finds. The state of research in outline. *Archaeologia Polona* 48: 269–287.

Dekówna, M. 2017. Badania nad początkami szklarstwa i wyrobami szklanymi na ziemiach polskich: problemy i metody badań. Zarys. *Przegląd Archeologiczny* 65: 69–88.

Dekówna, M., Olczak, J. (red.) 2002. *Principes de description des verres anciens depuis les temps les plus reculés jusqu'au XIII^e siècle de n.è.* Warszawa-Toruń.

Dekówna, M., Purowski, T. 2012. Znaleziska związane ze szklarstwem oraz okazy z kwarcu ze stanowiska Janów Pomorski 1, (w:) M. Bogucki, B. Jurkiewicz (red.), *Janów Pomorski, stan. 1. Wyniki ratowniczych badań archeologicznych w latach 2007-2008*, *I/3. Analizy*. Elbląg, 65–260.

Dekówna, M., Purowski, T. 2016. Paciorki szklane, (w:) A. Buko (red.), *Bodzia. Elitarny cmentarz z początków państwa polskiego*. Warszawa, 153–205.

Dekówna, M., Purowski, T. 2019. Biżuteria szklana z cmentarzyska w Dziekanowicach, (w:) J. Wrzesiński (red.), *Groby z biżuterią wczesnośredniowiecznego cmentarzyska w Dziekanowicach*. Lednica, 237–360.

Dekówna, M., Szymański, A. 1971. Badanie technik produkcji wczesnośredniowiecznych paciorków szklanych metodami petrograficznymi. *Slavia Antiqua* 18: 283–309.

Dzięgielewski, K., Purowski, T. 2011. Uwagi o datowaniu i technikach wykonania celtyckich ozdób szklanych z osady w Podłężu koło Krakowa (stanowisko 17). *Przegląd Archeologiczny* 59: 75–135.

Fernández-Navarro, J.-M., Villegas, M.-A. 2013. What is Glass?, (w:) K. Janssens (red.), *Modern methods for analysing archaeological and historical glass*. Chichester, 1–22.

Girdwoyń, A. 1986. Celtic glass bracelets from excavations in Poland. A technological study. *Archaeologia Polona* 25/26: 199–208.

Glaus, R., Koch, J., Günther, D. 2012. Portable laser ablation sampling device for elemental fingerprinting of objects outside the laboratory with laser ablation inductively

coupled plasma mass spectrometry. *Analytical Chemistry* 84: 5358–5364.

Goldstein, J.I, Newbury, D.E., Michael, J.R., Ritchie, N.W.M., Scott, J.H.J., Joy, D.C. 2018. *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis. Fourth edition*. New York.

Gray, A.L. 1985. Solid sample introduction by laser ablation for inductively coupled plasma source mass spectrometry. *Analyst* 110: 551–556.

Hartmann, G., Kappel, I., Grote, K., Arndt, B. 1997. Chemistry and technology of Prehistoric glass from Lower Saxony and Hesse. *Journal of Archaeological Science* 24: 547–559.

Henderson, J. 1988. Glass production and Bronze Age Europe. *Antiquity* 62: 435–451.

Henderson, J. 1989. The scientific analysis of ancient glass and its archaeological interpretation, (w:) J. Henderson (red.), *Scientific analysis in archaeology and its interpretation*. Oxford, 30–62.

Henderson, J. 2000. *The science and archaeology of materials*. London-New York.

Henderson, J. 2013. *Ancient glass: an interdisciplinary exploration*. Cambridge.

Henderson, J., Evans, J., Bellintani, P., Bietti-Sestieri, A.-M. 2015. Production, mixing and provenance of Late Bronze Age mixed alkali glasses from northern Italy: an isotopic approach. *Journal of Archaeological Science* 55: 1–8.

Kamyszek, L., Kępa, L., Purowski, T., Wagner, B., Żygadło, L. 2018. Znaleziska związane z osadnictwem ludności kultury lateńskiej z Raciborza, stanowisko 426, woj. śląskie. *Przegląd Archeologiczny* 66: 177–192.

Kociszewski, L. 1966. Metody laboratoryjne badania przedmiotów zabytkowych ze szkła. *Studia z Dziejów Rzemiosła i Przemysłu* 6: 49–75.

Kovacs, R., Nishiguchi, K., Utani, K., Günther, D. 2010. Development of direct atmospheric sampling for laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 25: 142-147.

Malinowski, T. (red.) 1990. *Research on glass of the Lusatian and Pomeranian cultures in Poland*. Słupsk.

Nowotny, W. 1959, *Podstawy technologii szkła. Część I*, Warszawa.

Olczak, J. 1968. *Wytwórczość szklarska na terenie Polski we wczesnym średniowieczu. Studium archeologiczno-technologiczne*. Wrocław-Warszawa-Kraków.

Olczak, J., Jasiewiczowa, E. 1963. *Szklarstwo wczesnośredniowiecznego Wolina*. Szczecin.

Pankiewicz, A., Siemianowska, S., Sadowski, K. 2017. *Wczesnośredniowieczna biżuteria szklana z piastowskich ośrodków grodowych Śląska (Wrocław, Opole, Niemcza)*. Wrocław.

Purowski, T. 2012. *Wyroby szklane w kulturze łużyckiej w międzyrzeczu Noteci i środkowej Odry. Studium archeologiczno-technologiczne*. Warszawa.

Purowski, T. 2019. *Od fajansu do szkła. Kontakty ziem polskich z głównymi centrami cywilizacyjnymi w II-I tys. p.n.e. w świetle badań archeometrycznych tworzyw szklistych*. Warszawa.

Purowski, T. 2022. Identifying Bronze Age glass production centres through bead-making techniques. *Archeologia Polski* 67: 61–80.

Purowski, T., Dzierżanowski, P., Bulska, E., Wagner, B., Nowak, A. 2012. A study of glass beads from the Hallstatt C-D from Southwestern Poland: implications for glass technology and provenance. *Archaeometry* 54(1): 144–166.

Purowski, T., Kępa, L., Wagner, B. 2018. Glass on the Amber Road: the chemical composition of glass beads from the Bronze Age in Poland. *Archaeological and Anthropological Sciences* 10: 1283–1302.

Purowski, T., Syta, O., Wagner, B. 2016. Italian leech-shaped glass fibula bow from the Hallstatt period, discovered in Poland. *Archeologické rozhledy* 68: 109–118.

Reed, S.J.B. 2005. *Electron microprobe analysis and scanning slectron microscopy in geology. Second edition*. Cambridge.

Samek, L., Karwowski, M., Czopek, S., Ostachowicz, J., Stęgowski, Z. 2007. Analysis of glass beads from the graves of the Tarnobrzeg Lusatian Culture in Jasionka and Grodzisko Dolne employing the X-ray fluorescence method. *Analecta Archaeologica Ressoviensia* 2: 101–129.

Sawicka, J. 2017. Pozostałości produkcji szklarskiej odkryte w pracowni ceramiki budowlanej na Górze Lecha w Gnieźnie. *Archeologia Polski* 62: 131–154.

Shortland, A., Rogers, N., Eremin, K. 2007. Trace element discriminants between Egyptian and Mesopotamian Late Bronze Age glasses. *Journal of Archaeological Science* 34: 781–789.

Starynowicz, M. 2005. Badania fizykochemiczne paciorków szklanych odkrytych na grodzisku ludności kultury łużyckiej w Wicinie, woj. lubuskie. *Archeologia Polski* 50(1-2): 21–52.

Stawiarska, T. 1984. *Szkła z okresu wpływów rzymskich z północnej Polski. Studium technologiczne*. Wrocław-Warszawa-Kraków-Gdańsk-Łódź.

Stawiarska, T. 1985. *Paciorki szklane z obszaru Polski północnej w okresie wpływów rzymskich*. Wrocław-Warszawa-Kraków-Gdańsk-Łódź.

Stawiarska, T. 1999. *Naczynia szklane okresu rzymskiego z terenu Polski*. Warszawa.

Stolpiak, B. 1980. Z badań nad wyrobami szklanymi w kulturze przeworskiej na Kujawach centralnych. *Archeologia Polski* 25(1): 167–181.

Szczapowa, J.L.1973. Zasady interpretacji analiz składu szkła zabytkowego. *Archeologia Polski* 18(1): 15–72.

Ščapova, J.L. 1983. *Očerki istorii drevnego steklodelia*. Moskva.

Then-Obłuska, J., Wagner, B. 2019. *Glass bead trade in Northeast Africa. The evidence from Meroitic and post-Meroitic Nubia*. Warszawa.

Venclová, N., Hulínský, V., Henderson, J., Chenery, S., Šulová, L., Hložek, J. 2011. Late Bronze Age mixed-alkali glasses from Bohemia. *Archeologické rozhledy* 63: 559–585.

Wagner, B., Jędral, W. 2011. Open ablation cell for LA-ICP-MS investigations of historic objects. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 26: 2058–2063.

Wagner, B., Nowak, A., Bulska, E., Kunicki-Goldfinger, J., Schalm, O., Janssens, K. 2008. Complemenatary analysis of historical glass by SEM/EDS and LAICPMS. *Microchimica Acta* 162: 405–424.

Wagner, B., Syta, O., Sawicki, M. 2017. A moderate microsampling in laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry analysis of cultural heritage objects: a review,

(w:) P. Targowski i in. (red.), *Lasers in the conservation of artworks XI. Proceedings of LACONA XI*. Toruń, 155–178.

Wajda, S., Merkel, S.W., Florkiewicz, I., Jansen, M., Marciniak-Maliszewska, B., Wagner, B., Wołoszyn, M. 2024, Early medieval lead glass bangles from Czermno, Poland: results of elemental and lead isotopes analyses. *Archaeometry* 66(2): 306–325.





Pigmenty i barwniki

Joanna Trąbska

WPROWADZENIE

Terminy barwa i kolor mają szerokie znaczenie. Pierwszy z nich definiowany jest przez słownik języka polskiego jako „wrażenie wywoływane w mózgu, gdy oko odbiera promieniowanie elektromagnetyczne z zakresu światła", drugi jako „barwa, zabarwienie; substancja barwiąca" (https://sjp.pl). Nie są to określenia precyzyjne. Barwa, w tym jej stosowanie i recepcja jest przedmiotem badań dziedzin analizujących relację człowieka z jego środowiskiem naturalnym i kulturowym. Stanowi przedmiot zainteresowania nie tylko fizyki optycznej, ale także neuronauk (w tym psychologii, fizjologii, neurologii, informatyki, biofizyki), kognitywistyki oraz marketingu, archeologii, historii sztuki, historii, sztuki jako takiej, w tym np. malarstwa, rzeźby, architektury, literatury (por. cykl publikacji „Barwa w języku, literaturze i kulturze", Komorowska i Stanulewicz 2014). Fizyczne przyczyny powstawania barw w określonym fragmencie materii (np. w pigmencie, barwniku, elemencie rośliny czy barwnym kamieniu oraz czynniki wpływające na wzajemne oddziaływanie barw (w tym mieszanin substancji barwnych) są liczne i różne, wielorakie są także złudzenia optyczne wpływające na percepcję. Informacje na ten temat znajdują się we wszystkich podręcznikach fizyki optycznej (np. Feynman i in., 2022).

Określoną cechę optyczną (zatem także barwę) można rozumieć zarówno jako subiektywne wrażenie zmysłowe, jak i stymulujące je, obiektywnie istniejące zjawisko fizyczne (Łapot 2004). Finalny efekt barwny materiału i powierzchni barwnej zależy od cech substancji barwiących, technologii wykonania malowidła, sposobu eksponowania przedmiotu, wreszcie subiektywnej recepcji. Wielorakość fizycznych aspektów warunkujących barwę niech zilustruje w tym miejscu biel, którą postrzegamy dzięki całkowitemu odbiciu światła. U roślin zachodzi ono dzięki dużym przestrzeniom międzykomórkowym lub martwym komórkom zawierającym powietrze. Taki efekt obserwuje się w przypadku kory brzozy (Gronowska 1997). Ta zasada dotyczy też niektórych mlecznych szkieł, gdzie efekt wywołany jest celowym wprowadzeniem bardzo drobnych pęcherzyków powietrza (Davison i Newton 2003, Nowotny 1978). Nośnikami białej barwy w kwiatach są niektóre barwniki (np. pochodne

DOI: 10.64158/9twv8v3grt

flawanu). Wśród współczesnych pigmentów za idealnie białe uważane są siarczan barowy i tlenek magnezowy, oba odbijające 100% światła polichromatycznego (Gronowska 1997).

Wymienione aspekty badań nad kolorem eksplorowane są w obszarze nazywanym *vision science*, łączącym różne gałęzie nauki. Czasopisma poświęcone badaniom relacji barwy i człowieka to m.in. *Journal of Vision*, *Investigative Ophtalmology and Visual Science*, *Translational Vision Science and Technology*. W publikacjach archeometrycznych oraz poświęconych ochronie zabytków zamieszczane są informacje o występowaniu, sposobach identyfikacji i źródłach pochodzenia substancji barwiących w kontekstach archeologicznych i historycznych. W archeologii i historii barwa jest analizowana pod kątem nadawania jej znaczeń w określonych kontekstach kulturowych. Badacze mogą oddzielać barwę od kontekstu praktycznego, co ma miejsce w przypadku czerwonych surowców żelazistych, takich jak ochra czy hematyt, które stosowano do różnych aktywności. Barwa jest także wiązana z działaniami praktycznymi, np. w kosmetyce lub medycynie. Rozszerzanie palety barwnej i surowcowej następuje w miarę wprowadzania nowych technologii lub/i nowych koncepcji postrzegania świata. Przykładem może być wprowadzenie błękitu i zieleni do palety późniejszej niż paleolityczna oraz nowych substancji, takich jak czerwony cynober, co wiąże się z rozpoczęciem poszukiwań i górnictwa metali. Badania nad rozwojem świadomości rodzaju *Homo* obejmują analizę percepcji barwy i jej odcieni, nadawania barwom znaczeń symbolicznych, pojawienia się umiejętności wytwarzania określonych substancji barwnych, ich aplikowania i modyfikowania, a także nazewnictwa, zmieniającej się mody lub ideologii oraz estetycznych zapatrywań.

Surowce warstw barwnych, oprócz szczególnych dla danej kultury znaczeń, spełniały też inne funkcje, będąc ochroną przedmiotów (np. hematyt, ochra, cynober lub vermilion) oraz lekiem dla ludzi i zwierząt. Substancje barwiące były także wypełniaczami klejów, np. w paleolicie (Trąbska 2015, tam dalsza literatura). Wiele związków, zwłaszcza pochodzenia roślinnego, wykorzystywanych w dawnej medycynie i barwierstwie, znajduje zastosowanie do dziś (np. Ożarowski 1976). Wskazanie przeznaczenia surowca, zwłaszcza roślinnego, zidentyfikowanego poza bezpośrednim kontekstem (tj. poza warstwą barwną) może nie być oczywiste. Identyfikacja składu farb, substancji barwiących, modyfikujących i spoiw oraz charakterystyka cech szczególnych każdego komponentu (np. mikromorfologii ziaren) umożliwia porównywanie cech warstw malarskich w kontekstach trudnych do datowania i wskazywanie prawdopodobnej jednoczesności lub następstwa czasowego wykonania poszczególnych elementów (Rozwadowski 2009). Poszukiwane mogą być zależności między rodzajami elementów malowidła a surowcami stosowanymi dla uzyskania nawet tej samej (makroskopowo) barwy. Analizować można istnienie zależności między lokalizacją elementu (np. na ścianie jaskini) a rodzajem użytego do jego wykonania środka. Błędem jest pozostawanie w tego rodzaju badaniach na etapie obserwacji stylu, bowiem barwny surowiec mógł być nośnikiem osobliwego znaczenia poprzez swoje pochodzenie np. ze ściśle określonego miejsca. Badać można nie tylko wersje ostateczne, ale także przygotowawcze (szkice, znaki wykrojów na tkaninach). Identyfikowane są dawne działania naprawcze (nazwalibyśmy je dziś konserwatorskimi) i barwne modyfikacje przedmiotów (np. przemalowania), fałszerstwa, „poprawianie" substancji barwiących. Warto wspomnieć, że proceder fałszowania substancji barwiących opisywali już przez autorzy starożytni, np. przez Pliniusz Starszy i Witruwiusz. Badania dzieł sztuki oraz współczesnych substancji barwiących, będących przedmiotami obrotu handlowego, ujawniają kontynuację tych działań dla różnych substancji i w różnych rejonach świata. Przykładem niech będzie żółty proszek z żywicy drzew rodzaju *Garcinia* (gambodża) z południowo-wschodniej Azji „uzupełniany" często kalafonią i skrobią (Winter 1997), kraplak fałszowany proszkiem terakotowym, ochrą, korą dębu, korą drzewa kampeszowego i in. (Schweppe i Winter 1997), cynober minią, o czym pisze Witruwiusz. Definiowane są cechy warsztatów malarskich (od paleolitu do współczesności). Właściwa identyfikacja materiału malarskiego pozwala interpretować sens zwykle niejednoznacznych określeń zawartych w traktatach, których treść wciąż warta jest analizy. Wśród szerzej znanych traktatów dotyczących materii malarskiej wymienić należy m.in. autorstwa Mnicha Teofila *Diversarum Artium Schedula* (2009 r.), Dioskurydesa *De Materia Medica* (2000 r.), Teofrasta pisma przyrodnicze (1963 r.), Papirusy tebańskie w opracowaniu Stefana Stawickiego (1987 r.), Witruwiusza *O architekturze ksiąg dziesięć* (1999 r.), Herakliusza *De coloribus et artibus Romanorum* czy cytowane niżej dzieło ze zbiorów Biblioteki Czartoryskich *Średniowieczne kompendium wiedzy o barwnikach* (Wyrozumski 1974), spośród nowożytnych Cennino Cenniniego *Rzecz o malarstwie* (1933), a także źródła poświęcone innej tematyce,

poruszające jednak kwestie materiałów malarskich (np. Cipriano Piccolpasso).

„Przejmowanie" przez człowieka barwy ze świata natury łączyło i nadal łączy się z poszukiwaniem surowców, określonymi sposobami ich obróbki, wytwarzaniem substancji syntetycznych, stosowaniem określonych technik aplikowania substancji barwnych (np. technik malarskich czy sposobów barwienia tkanin), wymianą surowców, półsurowców i wykonanych z ich udziałem przedmiotów.

Istotnymi nośnikami barwy były nie tylko warstwy malarskie, ale także barwne kamienie, nazywane obecnie szlachetnymi lub półszlachetnymi. W tym miejscu nie będą one omawiane ze względu na specyficzne procedury badawcze pozostające domeną gemmologii (Łapot 1999, 2000).

Aspekty wszystkich wymienionych problemów badawczych pozostaną w sferze domniemywań, jeśli nie zostanie przeprowadzona identyfikacja składników warstw barwnych i odtworzony sposób ich aplikacji oraz określenie proweniencji surowców (z reguły niestety w przybliżeniu) na podstawie zdefiniowanych cech charakterystycznych surowców, w tym stopnia ich zmienności.

Definicje

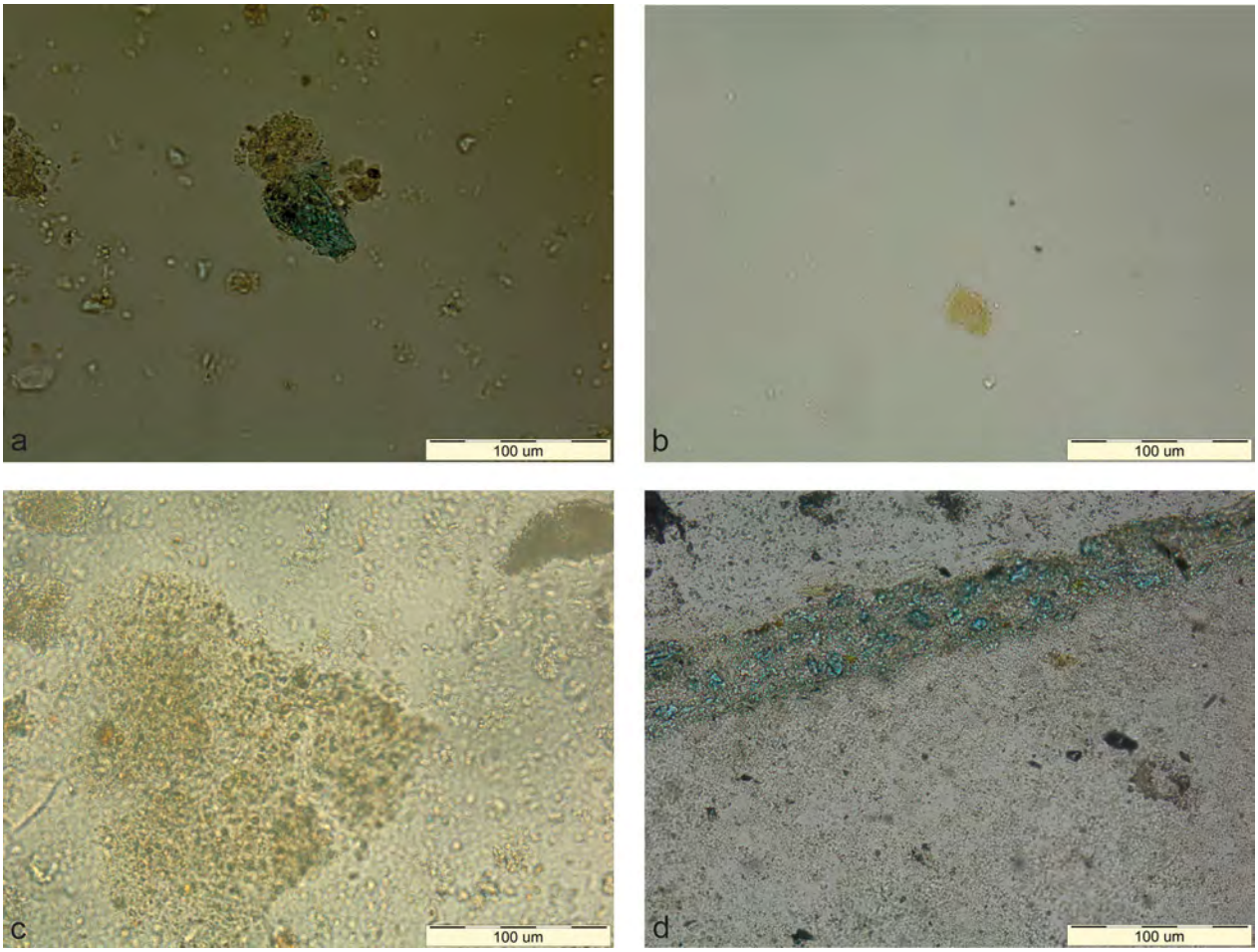
Według słownika języka polskiego pigment to: 1) naturalna substancja barwiąca, produkowana przez żywe komórki niektórych zwierząt i roślin, 2) nierozpuszczalna w wodzie i olejach substancja używana w przemyśle farbiarskim do barwienia farb. W kontekście dalszych rozważań brana pod uwagę będzie tylko druga definicja. Barwnik to substancja barwiąca różnego rodzaju materiały. Farba to mieszanina barwników używana do malowania (https://sjp.pl).

Chemia substancji barwiących doprecyzowuje te określenia dzieląc je na pigmenty, barwniki i laki. Pigmenty to substancje nierozpuszczalne w spoiwach, charakteryzujące się bardzo dobrymi własnościami kryjącymi i stabilnością. Najczęściej są to substancje nieorganiczne, naturalne lub syntetyczne (np. cynober, hematyt, ultramaryna, błękit egipski, syntetyczne pigmenty zielone, ryc. 1a, ryc. 3a-3d), choć w chemii barwników wymienia się również organiczne (np. eozyna, indantren). Jako odrębna podgrupa opisywane są pigmenty perłowe (płytkokształtne), zarówno nieorganiczne, jak i organiczne, charakteryzujące się wysokim współczynnikiem załamania światła i różną barwą (srebrną, złotą, niebieską, zieloną, czerwoną). Efekt perły zależy od wielkości cząstek. Zalicza się tu przede wszystkim płytki metalu. Złocistożółty auripigment (ryc.1b) czy biało błyszcząca mika (muskowit, serycyt) także spełniają wymagania tej definicji.

Barwniki to substancje rozpuszczające się w rozpuszczalnikach polarnych lub niepolarnych. Mogą być organiczne, mineralne lub syntetyczne. Laki są barwnikami organicznymi syntetycznymi lub naturalnymi (zwierzęcymi lub roślinnymi), osadzonymi na nieorganicznym nośniku (np. błękit Majów, w którym indygo znajduje się na podłożu minerału pałygoskitu lub, w innym przypadku, czerwień koszenilowa na podłożu bieli ołowiowej). Nazywane bywają czasem kompozytowymi substancjami barwnymi. Wszystkie one znajdują swoje miejsce w Międzynarodowym Indeksie Barw (Colour Index International), gdzie przypisane są im jednoznaczne nazwy generyczne i oznaczenia numeryczne (https://colour-index.com). W określeniu „laka" kryje się niejednoznaczność – lakami roślinnymi nazywane są wydzieliny roślinne, jak wydzieliny drzew (np. *Acacia greggi* czy *Acacia nilotica*), ale też wydzieliny owadów (np. *Coccus lacca*) żerujących na różnych drzewach, głównie na krotonie (*Croton laccifer*) (Drobnik 2021).

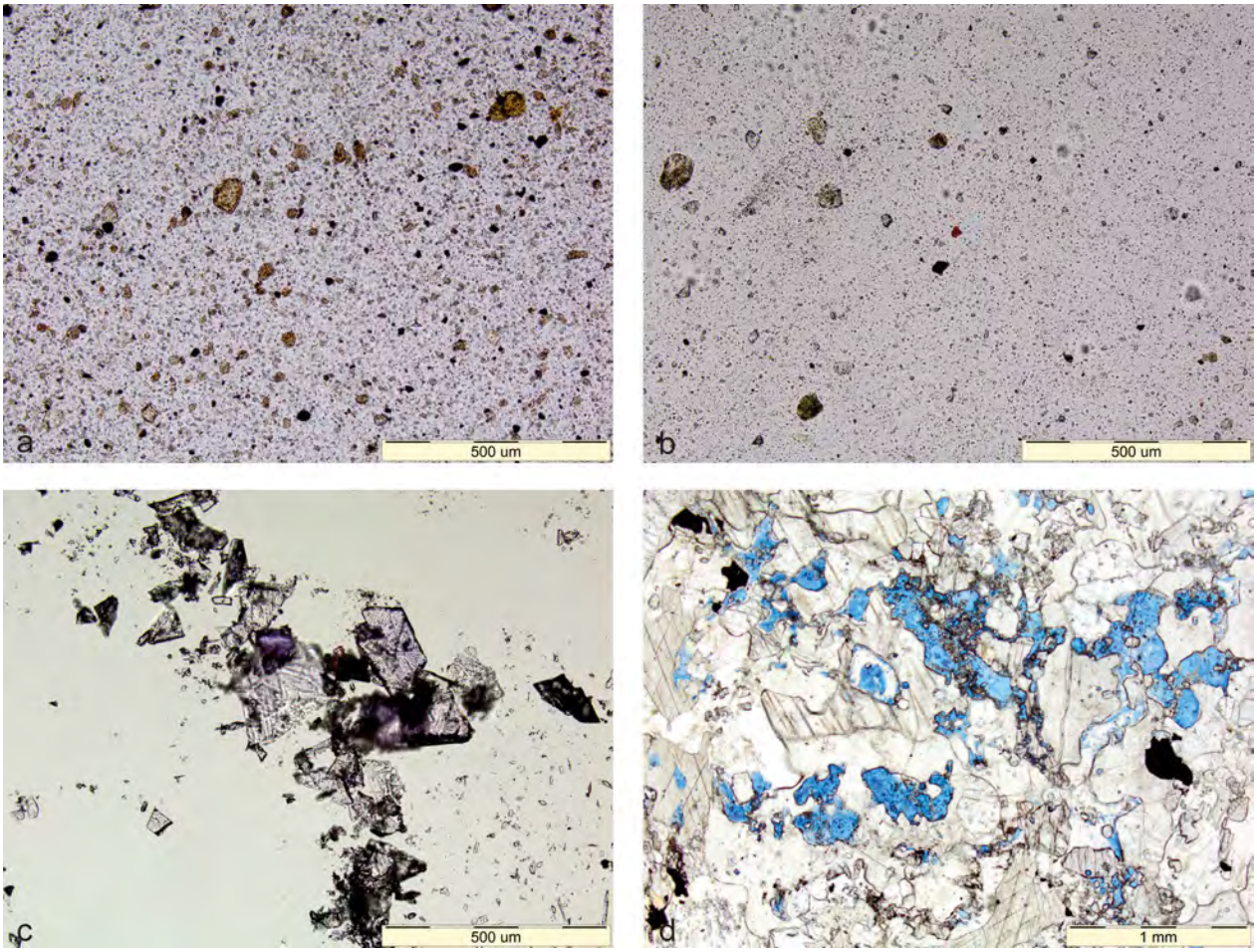
Publikacje poświęcone technikom malarskim (np. Doerner 1975; Losos 1991; Werner 1989) zasadniczo powtarzają opisany wyżej schemat, pomijając pigmenty perłowe. Problem definicyjny, który rozwiązać najlepiej chyba należy przez użycie określeń opisowych, pojawia się w przypadku pigmentów, które uległy częściowemu rozpuszczeniu w medium (spoiwie). Jest to sytuacja dotycząca szczególnie pigmentów miedziowych (zwłaszcza malachitu naturalnego i syntetycznego, azurytu, grynszpanu, *viride salsum*). Powstają organiczno-nieorganiczne sole miedzi, nadal o zielonej barwie, ale o odmiennym składzie chemicznym i uporządkowaniu struktury. Część pigmentów rozpuszczając się w pewnym stopniu w medium olejnym powoduje szybsze jego „tężenie", działając jako sykatywy (substancje przyspieszające schnięcie olejów). Przykładem jest syntetyczna biel ołowiowa, substancja wprawdzie trująca, ale łatwa do wykonania i chętnie stosowana przez malarzy.

W farbie, oprócz pigmentów i/lub barwników oraz spoiw, znajdują się często substancje dodatkowe. Mogą mieć charakter nieorganiczny i organiczny. Ich celem jest nadanie farbie szczególnych cech, np. stabilności (tę rolę spełnia biały litopon, mieszanina siarczanu baru i siarczku cynku) czy świetlistości (np. mączka marmurowa, kwarc, w rzadkich przypadkach inne, np. antozonit). W niektórych farbach,



Ryc. 1. Przykłady dawnych pigmentów w obrazie mikroskopii polaryzacyjnej (polaryzatory równoległe): a – ziarno głównego składnika błękitu egipskiego, jednego z najstarszych pigmentów syntetycznych – cuprorivaitu. Obecność tej fazy została potwierdzona dzięki proszkowej analizie rentgenograficznej. Giza, Egipt, dokładna lokalizacja nieznana; b – ziarno auripigmentu z warstwy malarskiej ikony Matki Boskiej z Korczmina (woj. lubelskie). Zwraca uwagę blaszkowy pokrój pigmentu sprawiający, że światło mocno się od niego odbija. Dlatego też auripigment zastępował czasem złoto w aureolach. Proszę zwrócić też uwagę na wielkość cząstki – sprawia to, że pigmenty są trudnym materiałem badawczym; c – fragment zielonej warstwy malarskiej z gotyckiego malowidła ściennego z kościoła w Kondratowie, woj. dolnośląskie. Uważna obserwacja ujawnia obecność bardzo drobnych ziaren azurytu (syntetycznego?) zmieszanych z żółtą ochrą (widoczne ziarno po lewej stronie) i zanurzonych w kryptokrystalicznym węglanie wapnia (spoiwie pochodzącym z wody wapiennej); d – błękitna warstwa malarska z gotyckiego malowidła ściennego w kościele pw. Jana Chrzciciela i św. Katarzyny Aleksandryjskiej w Świerzawie, woj. dolnośląskie. Niebieskim pigmentem jest azuryt. Zwraca uwagę różna wielkość cząstek pigmentu: te drobniejsze charakteryzują materiał jasnoniebieski, te grubsze – ciemniejszy w odcieniu. Nie wiadomo, czy malarz mieszał dwa sortymenty, czy taki właśnie pigment był przez niego zakupiony lub zrobiony

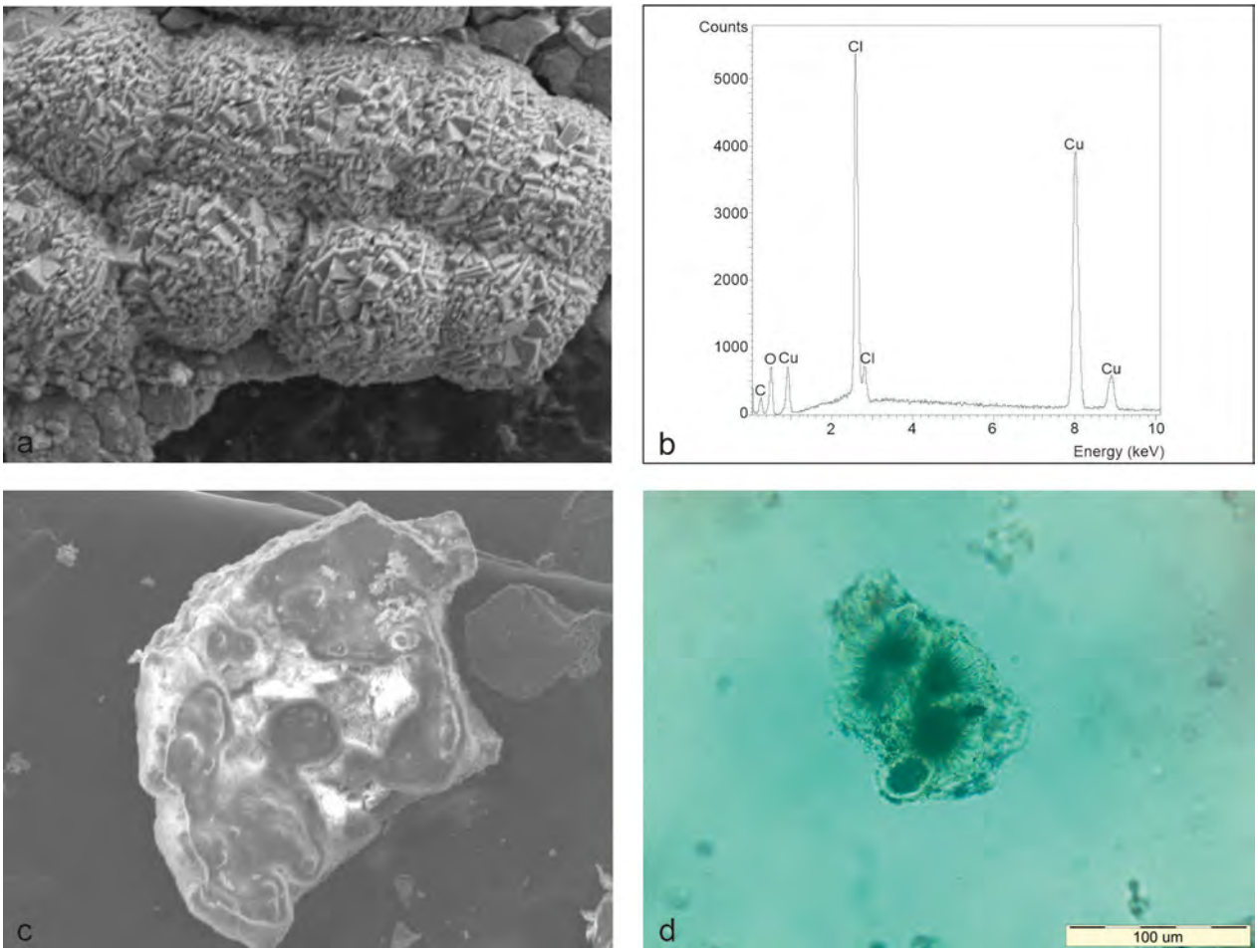
wypalanych wraz z przedmiotami ceramicznymi, identyfikuje się podwyższoną, w stosunku do masy ceramicznej, koncentrację potasu lub/i związków wapnia i fosforu. Są to ślady popiołów roślinnych wprowadzonych, aby spełniały rolę topników: farba lepiej wiąże się wtedy z podłożem i ulega homogenizacji. Może mieć ona zatem bardzo prosty skład (pigment + spoiwo lub barwnik + spoiwo) albo wręcz przeciwnie, skład bardzo skomplikowany (kilka pigmentów + kilka barwników + substancje modyfikujące + złożone z kilku składników organicznych spoiwo, por. ryc. 1c, 1d). W najprostszej wersji, np. w zabarwionych sedymentach, zwykle mamy do czynienia z występowaniem lub użyciem tylko pigmentu (np. ochry w komorach grobowych). Malarstwo naskalne i petroglify to rodzaj sztuki (w dzisiejszym rozumieniu), gdzie farby charakteryzowały się stosunkowo prostym składem.



Ryc. 2. Przykłady dawnych pigmentów w obrazie mikroskopii polaryzacyjnej (polaryzatory równoległe (cd.): a – umbra cypryjska, pigment komercyjny, naturalny. Zwraca uwagę zróżnicowanie wielkości ziaren i dosyć ciemny ich odcień, ciemniejszy niż w przypadku żółtej ochry. W umbrach odpowiada za niego obecność manganu; b – ziemia zielona, naturalny pigment komercyjny. Powszechnie stosowana w warstwach malarskich i podmalówkach, daje efekt oliwkowej, zgaszonej zieleni; c – sproszkowany kryształ antozonitu, rzadkiego fioletowego pigmentu, którego stosowanie było ograniczone w czasie i przestrzeni; d – błękitny lazuryt w skale lapis lazuli. W otoczeniu lazurytu obecny jest kalcyt i pirokseny. Pigment uzyskany z lazurytu nosi nazwę ultramaryna. Wzajemne przerastanie minerałów jest powodem długiej i skomplikowanej separacji lazurytu od minerałów płonnych, co wpływa na cenę tej niezwykle kosztownej substancji

Stratygrafia malowideł – podłoża, grunty, warstwy malarskie, warstwy ochronne, warstwy wtórne

Malowidło można rozpatrywać jako układ złożony z pewnej liczby warstw. Pierwszą z nich, schematycznie rzecz ujmując, jest podłoże, następnie pojawia się grunt (nazywany także pobiałką, zaprawą lub warstwą wyrównującą), potem szkic i podmalówka (przygotowanie pod właściwe malowidło), warstwa malarska, werniks, ewentualnie także wtórne warstwy. Obecność tych ostatnich wynikać może z różnych przyczyn (np. pokrycie malowidła tynkiem, wtórne naskorupienia, dawne interwencje konserwatorskie). Wszystkie te elementy podlegają badaniom, stanowiąc często cechę specyficzną warsztatu malarskiego, do którego nie zaliczamy oczywiście wtórnych naskorupień. Te ostatnie ułatwiają datowanie. O stratygrafii trudniej mówić, gdy przedmiot uległ zabarwieniu w całej objętości (np. tabliczki woskowe, przedmioty szklane). Przykładami malowideł o skomplikowanej stratygrafii są dzieła mieszkańców australijskiego Terytorium Północnego, datowane na ok. 1200 lat BC (Watchman i in., 2000). W cytowanej publikacji zobrazowano przerwane ciągłości warstw barwnych oraz obecność licznych wtórnych naskorupień, także podścielających te malowidła.



Ryc. 3. Pigmenty syntetyczne; a – zieleń brunszwicka, syntetyczny pigment otrzymany po raz pierwszy w drugiej połowie XVIII w. przez braci Gravenhorst (Eastaugh i in., 2005). Ten pigment został wytworzony przez autorkę niniejszego tekstu przez działanie solami chloru na sole miedzi. Zwraca uwagę struktura „sklejonych" sferolitów – są one charakterystyczne także dla innych syntetycznych pigmentów, np. malachitu (mikrofotografia spod mikroskopu skaningowego, pow. 500x, fot. B. Trybalska); b – widmo EDS zieleni brunszwickiej. Widoczny jest skład chemiczny, ale niemożliwa do sprecyzowania jest faza; c – viride salsum, zielony syntetyczny pigment, zasadowy chlorek miedzi (tutaj jest to paratacamit) otrzymany przez autorkę tekstu według receptury Mnicha Teofila. Zwraca uwagę łuskowy pokrój ziarna (mikrofotografia spod mikroskopu skaningowego, pow. 500x, fot. B. Trybalska); d – syntetyczny zielony pigment – malachit lub viride salsum – w warstwie malarskiej XV-wiecznego malowidła ściennego z kościoła oo. Franciszkanów w Krośnie, woj. podkarpackie. Zwraca uwagę zabarwienie tła. Jest to rezultat rozpuszczania się związków miedzi w otaczającym balsamie kanadyjskim i powstanie organicznych związków tego pierwiastka. Analogiczne procesy zachodzą w obecności spoiw malarskich (mikrofotografia spod mikroskopu polaryzacyjnego, polaryzatory równoległe, preparat proszkowy)

Podłoża

Podłożem, na które można nałożyć warstwę barwną, może być prawie wszystko. W szczególności jest to skóra żywego człowieka (i innego organizmu), w tym tatuaż i kosmetyki, oraz skóra „użytkowa" różnego rodzaju (np. kurdyban lub pergamin). Są to ściany skalne, jaskinie i ekspozycje odkryte, gdzie naturalny relief podłoża stanowił integralny element malowidła lub zabarwiona powierzchnia (na czerwono związkami żelaza lub na czarno związkami manganu) stanowiła tło dla wyrytych petroglifów. Naturalne pokrycie tych malowideł mlekiem wapiennym lub innego rodzaju naturalnymi patynami stanowi ich ochronę, choć utrudnia odnalezienie malowidła. Do specyficznych podłoży należą powierzchnie i wnętrza muszli, w tym pojemników na substancje barwiące. Są to także zewnętrzne i wewnętrzne ściany budowli wykonane z różnego materiału, np. z niewypalanej cegły lub bloków surowego kamienia (wapienia, granitu, piaskowca, innych). Stanowią one podłoże dla fresków różnego rodzaju (fresk suchy z zastosowaniem różnych spoiw, fresk mokry) oraz barwnych tynków i sgraffito. Barwione były powierzchnie

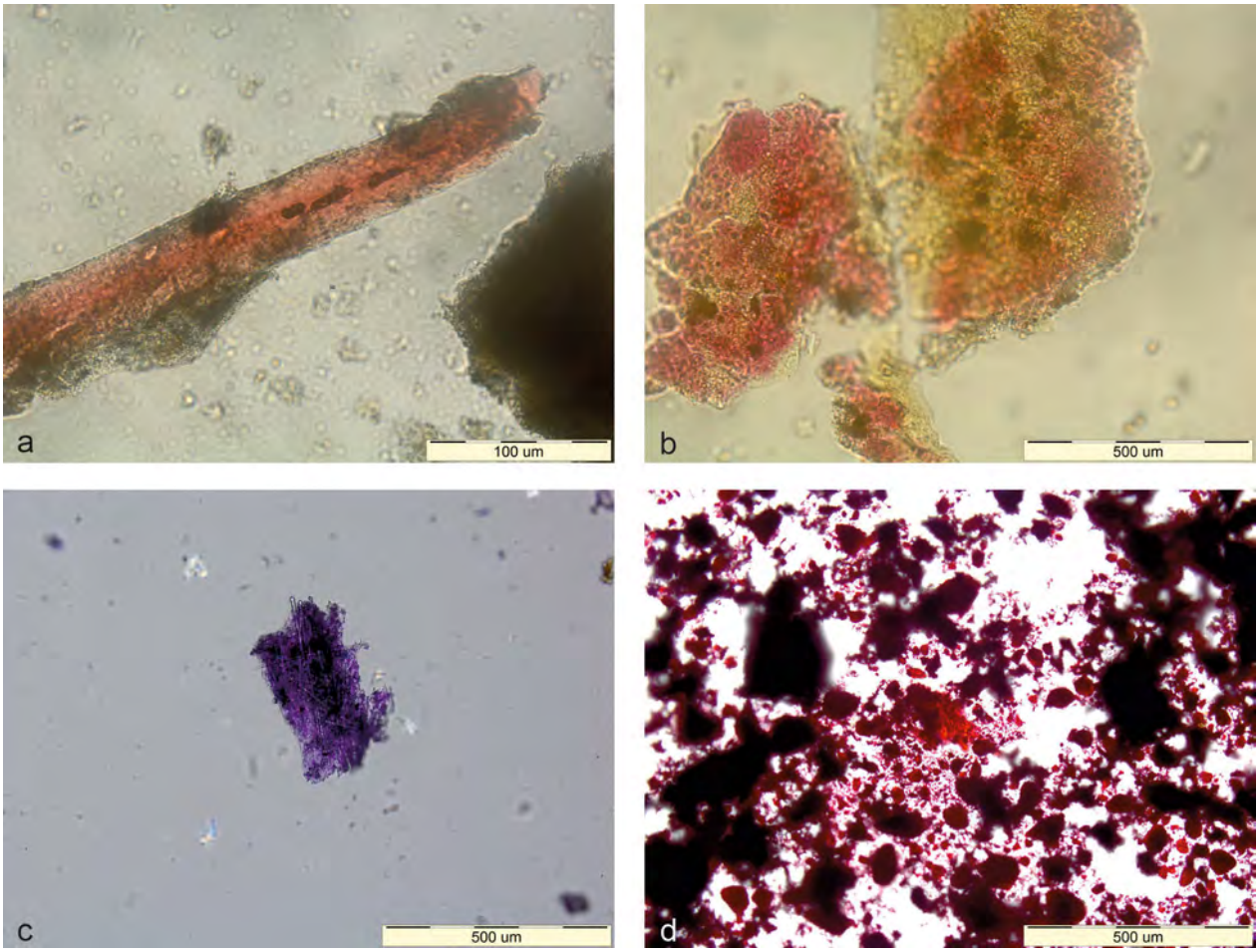
rzeźb i architektonicznych elementów kamiennych, a ślady tych zabiegów identyfikowane są obecnie nawet jako mikroskopijne plamki. Malowano przedmioty i obiekty drewniane: elementy konstrukcyjne budowli i statków, realizowano malowidła na deskach (przykładem niech będą portrety funeralne z Fajum lub ikony). Podłoże zabiegów malarskich stanowiły tkaniny: obrazy na płótnie, w tym malowane zasłony, także barwione w całości oraz powierzchniowo zdobione szaty (np. kimona), włosy (np. w celach kosmetycznych, do dziś w wielu kulturach barwione ochrą albo barwnikami roślinnymi). Włókna barwiono 30 tysięcy lat temu na obszarze dzisiejszej Gruzji (Kvavadze i in., 2009). Barwiono kość i poroże, papier, metale (patyny celowo nakładane, niello, emalie, malowidła figuralne i ornamentalne na podłożu metalowym, np. sarmackie portrety trumienne), przedmioty szklane i witraże malowane i złocone (oraz pokrywane innymi rodzajami folii metalowych), żywność (jej barwienie na pewno nie jest wynalazkiem współczesności), kosmetyki, leki. Zdobiono także powierzchnie przedmiotów ceramicznych przez angobowanie, malowanie, inkrustację, powłoki szkliste z ornamentem barwnym podszkliwnym, naszkliwnym lub bez niego, lustry, sgraffito, ornamenty plastyczne. Należy wspomnieć, że barwienie szkła, glazur i emalii przebiega z zastosowaniem podobnych substancji, jak w przypadku malowideł, ale procesy fizyczne kryjące się za powstawaniem efektów kolorystycznych są odmienne. Do barwnych opracowań powierzchni ceramiki zaliczyć należy przebarwienia wynikające ze zmian atmosfery wypału i zakopceń w końcowych etapach wypału. Pewne grupy pigmentów są odporne na przemiany termiczne, choć zmianie ulega zwykle ich skład mineralny, często chemiczny oraz mikrostruktura (np. czerwone i wiśniowe związki żelaza, czarne związki manganu, białe glinokrzemiany). Zmian nie zaobserwujemy w przypadku pigmentów spreparowanych w temperaturze wyższej niż temperatura wypału naczynia (np. biel kostna) lub ze swojej natury odpornych na przemiany termiczne (np. talk).



Ryc. 4. Naskorupienia przypominające warstwy malarskie; a – fragment bruku z dna grobu kultury złockiej ze stanowiska Książnice, woj. świętokrzyskie. Czerwonopomarańczowe naskorupienie przypomina celowo nałożoną warstwę barwną lub pozostałość po proszku ochry. Obserwacje terenowe ujawniły obecność związków żelaza oraz ich mobilność w postaci m.in. smug i pierścieni Lieseganga; b – w obrazie mikroskopowym w świetle przechodzącym (polaryzatory skrzyżowane) widoczna jest czerwonoruda, kryptokrystaliczna warstwa o wyrównanej grubości wynoszącej ok. 0,1 mm. Kontakt z podłożem jest wyraźny, ale ma charakter przejściowy, mglisty. Barwne skupienia reprezentują związki żelaza, jednak nie zostały one naniesione na podłoże przez człowieka. Ich obecność to rezultat precypitacji na podłożu będącym barierą wytrąceniową (za: Trąbska 2021)

Grunty (zaprawy, pobiałki)

Podłoża pod malowidło podlegają takim samym procedurom badawczym jak farby, a wyniki badań obu tych materiałów mają takie samo znaczenie. Podłoża najczęściej przygotowywano w określony sposób. Zabiegi te miały na celu modyfikację kształtu powierzchni (np. jej wyrównanie), polepszenie przyczepności warstwy barwnej lub wręcz jej umożliwienie, jak w przypadku złoceń złotem płatkowym (płatki złota nakładano na tzw. pulment, mieszaninę ochry, ziemi zielonej lub białej glinki kaolinitowej z klejami organicznymi), modyfikację barwną warstw malarskich lub gruntu (np. dzięki stosowaniu domieszki ziemi zielonej do białej kredy) i modyfikację świetlistości

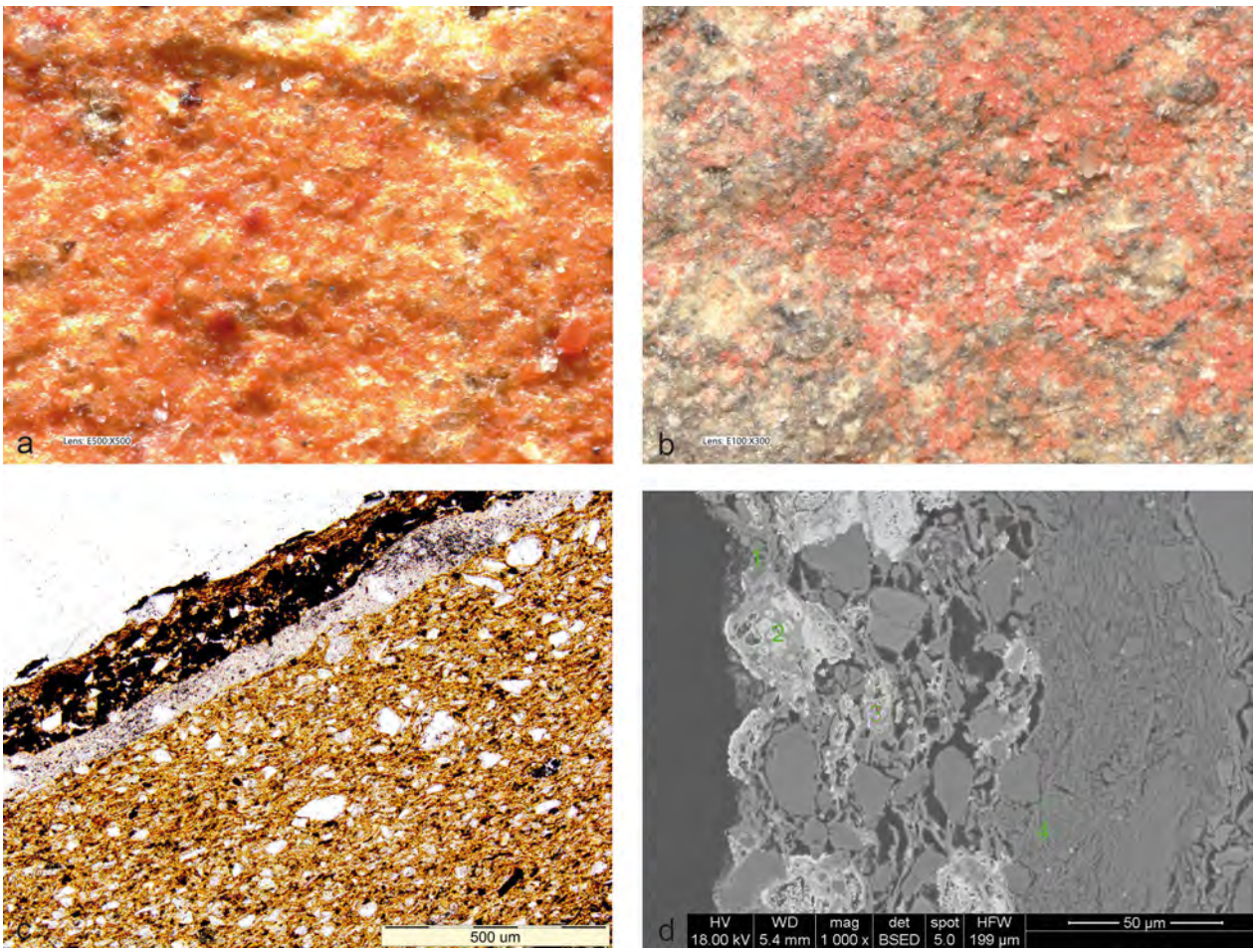


Ryc. 5. Przykłady barwników – substancji pochodzenia organicznego (mikrofotografie spod mikroskopu polaryzacyjnego, preparaty proszkowe, polaryzatory równoległe): a – zabarwione na czerwono włosie (widoczne poprzeczne struktury znamionujące jego obecność) zidentyfikowane w warstwie malarskiej. Barwnik organiczny niezidentyfikowany – w badaniach mikroskopowych na jednym włosiu trudno to zrobić. Bliski Wschód/Afryka Wschodnia, malowidło z około III w n.e., dokładna lokalizacja nieznana; b – zabarwione na różowo płatki spoiwa z ikony Matki Boskiej z Korczmina (woj. lubelskie). Jest to organiczny barwnik, na co wskazuje niski relief tych skupień. Niestety żadna metoda spektroskopowa ani mikroskopia skaningowa nie mogła być w momencie badań zastosowana do analizy tej próbki; c – drobny fragment ciemnofioletowego naturalnego naskorupienia na podłożu skały węglanowej, powstałego z destrukcji mięczaka morskiego. Odpowiada on w pewnym stopniu purpurze tyryjskiej, aczkolwiek skład chemiczny tej substancji nie jest znany. Okaz pochodzi z wybrzeża Adriatyku; d – kraplak alizarynowy, ciemny, barwnik współczesny, komercyjny, w postaci proszkowej. Syntetyczny (i o wiele tańszy) odpowiednik czerwieni otrzymywanej m.in. z marzanny barwierskiej

warstw malarskich np. przez dodanie do warstwy gruntującej mączki marmurowej.

Spektakularnym przykładem oddziaływania barwy gruntu na końcowy efekt jest słynny „błękit woroniecki", znany z cerkwi rumuńskiej Bukowiny. Jest to ciemnoniebieska lub granatowa i bardzo wyrazista barwa. Gruntem pod nią jest warstwa proszku węgla drzewnego w spoiwie mleka wapiennego (Buzgar i in. 2014). Czerń pod błękitem wzmacnia ten ostatni, a uzyskany w ten sposób efekt kolorystyczny znany jest też w malarstwie współczesnym. Przypuszczalnie dodatkowym rezultatem jest częściowa izolacja azurytu od silnie alkalicznego podłoża fresku. Substancja gruntująca była zwykle mieszaniną składników nieorganicznych oraz organicznych spoiw umożliwiających jej nałożenie i zapewniających przyczepność. Należy wyraźnie podkreślić, że rodzaj tych substancji stanowił istotną cechę danego warsztatu malarskiego. Grunt, którego rodzaj wpływa na cechy estetyczne oraz stabilność malowidła, podlega zatem tak szczegółowym badaniom jak pigmenty i barwniki.

Określone techniki malarskie definiowano przez rodzaj użytego spoiwa (np. tempera, enkaustyka, fresk). Spoiwami były substancje organiczne (woski, kleje, oleje, jajka) w różnych połączeniach i z czasem



Ryc. 6. Przykłady warstw malowideł i glazur na powierzchniach naczyń ceramicznych: a –fragment jasnoczerwonej farby z powierzchni amfory z kręgu scytyjskiego, Chotyniec, woj. podkarpackie. Widoczna ścisła unifikacja farby z podłożem oraz jej kryptokrystaliczność. Badania SEM/EDS ujawniły, że jest to wysokożelazista glinka o charakterze smektytu, możliwe, że dodatkowo wzbogacona przed użyciem w tlenowodorotlenki żelaza; b – fragment czerwonoróżowej farby z powierzchni amfory z kręgu scytyjskiego, Chotyniec, woj. podkarpackie. Od poprzedniej różni się nie tylko odcieniem, ale także ziarnistością. Skład chemiczny obu farb jest podobny. Mikrofotografie a i b wykonano za pomocą mikroskopu cyfrowego; c – przekrój przez półmajolikę nieglazurowaną z Miechocina, woj. podkarpackie, XVII w. Na starannie dobrane, drobnoziarniste podłoże masy ceramicznej nałożono białą warstwę angoby, następnie warstwę ciemnoczerwoną, która zakończona jest cienką warstwą czerwoną. Wszystkie one dobrze przylegają do siebie, angoba do podłoża. Skład angoby jest ilasto-ziarnisty; analizy SEM/EDS wykazały, że wśród składników ilastych dominuje smektyt, natomiast ziarna to głównie kwarc. Składnikami ciemnoczerwonej, gruboziarnistej warstwy są ziarna zendry żelazistej oraz ziarna kwarcu. Kolorystyka powierzchni została uzupełniona przez naniesienie bardzo cienkiej warstwy czerwonej „glinki". Zatem jest to próbka reprezentująca naczynie wykonane w bardzo wyrafinowany sposób. Również wzory tej ceramiki są bardzo atrakcyjne, ich rekonstrukcje można zobaczyć w Muzeum – Zamku Tarnowskich w Tarnobrzegu (mikrofotografia spod mikroskopu polaryzacyjnego, płytka cienka, polaryzatory równoległe); d – mikrofotografia spod mikroskopu skaningowego przekroju przez fragment malowanej ceramiki z Miechocina. Tutaj widoczna jest struktura i składniki ciemnoczerwonej, ziarnistej warstwy. Zauważalna jest także mieszanina ziaren zendry i ziaren kwarcu, dla różnych naczyń te proporcje się różnią. W zaznaczonych punktach zostały wykonane analizy EDS, z których czerpiemy informacje o składzie chemicznym ziaren (mikrofotografia spod mikroskopu skaningowego, fot. B. Trybalska)

z dodatkami substancji nieorganicznych (np. niektóre odmiany enkaustyki). Spoiwem nieorganicznym była woda wapienna, stosowana jako spoiwo we fresku prawdziwym. Techniki malarskie, zwłaszcza fresk, nie pozwalały na stosowanie pigmentów mało trwałych w silnie alkalicznym środowisku. Spoiwa malarskie i techniki malarskie to szeroki temat, który tutaj nie będzie poruszany, warto poszerzyć wiedzę o informacje zawarte w cytowanych wyżej pozycjach dotyczących technologii malarstwa.

Czynniki wpływające na barwę warstwy malarskiej wykonanej z użyciem pigmentów

Barwa warstwy malarskiej wykonanej za pomocą pigmentów zależy od wielu czynników, najpierw od barwy pigmentu i kształtu (pokroju) jego cząstek. Przykładem spektakularnego oddziaływania światła i powierzchni cząstki pigmentu jest z jednej strony auripigment, który bywał stosowany jako imitacja złota w ikonach (ryc. 1b), z drugiej – ochra, umbra czy ziemia zielona (ryc. 2a-b). W pierwszym przypadku blaszkowe ziarna odbijają światło od stosunkowo dużej powierzchni, w drugim – ulega ono rozpraszaniu, dając efekt braku połysku. Barwa zależy też od wielkości jego cząstek: wiele pigmentów wraz z rozdrobnieniem charakteryzuje się coraz jaśniejszą barwą. Należy do nich np. malachit, azuryt, smalta, cynober. Sprzedawane były w odrębnych sortymentach. Obecność ziaren o dwóch (np.) wyraźnych wielkościach sugeruje użycie przez malarza celowo sporządzonej mieszaniny. Efekt ostateczny zależy także od ilości ziaren pigmentu w spoiwie warstwy malarskiej.

Barwa pigmentu wynika z barwy surowca, z którego go uzyskano. Sproszkowany (utarty) surowiec zwykle daje proszek o odpowiadającej mu barwie. Wyjątkiem jest kryptokrystaliczna, czarna odmiana hematytu, której proszek (jak u wszystkich odmian tego minerału) jest wiśniowy. Innym nietypowym przykładem są minerały kobaltu, które nigdy nie są błękitne, tak jak uzyskiwane z nich drogą skomplikowanej przeróbki błękity kobaltowe. W zdecydowanej większości przypadków przy wyborze potencjalnych surowców pigmentów kierowano się makroskopową barwą skały czy minerału (np. lapis lazuli i lazuryt, auripigment, cynober i inne, por. ryc. 1a-d, 2a-d). Lista pigmentów jest wyraźnie krótsza dla substancji używanych do drugiej połowy XVIII w. (Eastaugh i in. 2005) w porównaniu z używanymi później. Badania mineralogiczne i chemiczne z zastosowaniem nowoczesnych metod instrumentalnych prowadzą jednak wciąż do nowych odkryć rzadkich faz, makroskopowo identycznych z popularnymi pigmentami. Minerały te są cennymi wskaźnikami pochodzenia surowca. Przykładem niech będzie konichalcyt ($CaCuAsO_4OH$), bardzo rzadki złożony zielony arsenian miedzi, bliźniaczo przypominający malachit, odkryty w ikonach rumuńskiej Bukowiny (Buzgar i in. 2014). Długa lista faz zidentyfikowanych wśród zielonych i niebieskich pigmentów miedziowych przytoczona została w publikacji Svorovej Pawełkowicz i in. (2021).

Identyfikowane są też rzadkie fazy, które mogą mieć charakter wtórny, np. siarczany miedzi (brochantyt, dolerophanit). Konieczna jest wtedy szczególnie uważna analiza otoczenia pigmentu i identyfikacja źródła ewentualnej kontaminacji prowadzącej do zmiany pierwotnej substancji. W tabeli 1 zestawiono pigmenty najczęściej stosowane w różnych kontekstach kulturowych, okresach i rejonach geograficznych. Bywają pigmenty specyficzne dla danego obszaru, np. dla obszaru Morza Śródziemnego są to syntetyczne błękit i zieleń egipska (ryc. 1a), dla Dalekiego Wschodu – również syntetyczny błękit, ale i fiolet Han. Wykorzystanie lokalnych surowców prowadzi do pojawiania się w paletach malarskich specyficznych, rzadkich pigmentów. Ich zasięg użytkowania jest wtedy w mniejszym lub większym stopniu ograniczony rejonem dostępności surowca. Przykładem jest fioletowy antozonit, odmiana fluorytu, znany z Bawarii i Dolnego Śląska (ryc. 2c).

Niekorzystne przemiany pigmentów

Przyczynami niepożądanych zjawisk kolorystycznych są: (i) wpływy środowiska, zarówno zachodzące na powierzchni ziemi jak i w sedymencie (zabrudzenie, niekorzystne lub zmienne pH i Eh, chemizm otoczenia, np. obecność związków chloru, zawilgocenie, wpływy mikrobiologiczne o charakterze chemicznym i mechanicznym, ruchy gruntu, powstawanie wtórnych naskorupień, wreszcie katastrofy żywiołowe), (ii) działania człowieka związane z użytkowaniem przedmiotu, (iii) mniej lub bardziej świadome działania niszczycielskie człowieka, (iv) immanentne cechy materiału warunkujące podatność na zniszczenie w określonych warunkach, (v) wady (niestaranność lub brak świadomości) wykonania przedmiotu barwnego lub malowidła,(vi) niewłaściwe zabiegi ochronne i konserwatorskie.

Zjawiska niekorzystnych przemian mają charakter: (i) chemiczny i fazowy (zmiana składu chemicznego lub zmiana struktury krystalicznej) wywołane czynnikami niebiologicznymi i biologicznymi, (ii) zmiany o charakterze fizycznym, dotyczące głównie warstw barwnych (łuszczenie, odspajanie, pojawianie się barwnych naskorupień, matowienie).

Skutkami powyższych zjawisk są: (i) zmiana barwy, (ii) zmiana fazy bez zmiany barwy, ale na niekorzyść stabilności. Przemiany te mają różną kinetykę, pojawiają się w sposób nieoczekiwany w różnych częściach malowideł. Różne substancje w odmiennym stopniu

Tabela 1. Wybrane pigmenty zidentyfikowane w kontekstach archeologicznych i historycznych do 2. połowy XVIII wieku

Barwa	Pigment	Skład mineralny, wzór chemiczny	Przykład zastosowania
Czerwień	Ochra	Naturalna mieszanina tlenowodorotlenków żelaza i minerałów ilastych	Malowidła na różnych podłożach, wypełniacz klejów, ochrona ciała i przedmiotów, lek, wypełnienia grobów
	Ochra przepalona	Spiek o różnym składzie, w zależności od temperatury	Malowidła na różnych podłożach, wypełniacz klejów
	Hematyt	Fe_2O_3	Malowidła na różnych podłożach, lek, kosmetyk
	Hematyt przepalony	Fe_2O_3 o cechach mikrostrukturalnych odmiennych od hematytu surowego	Malowidła na różnych podłożach
	Hematyt syntetyczny	Fe_2O_3 o cechach mikrostrukturalnych odmiennych od hematytu naturalnego	Malowidła na różnych podłożach, lek, kosmetyk
	Cynober naturalny	HgS	Malowidła na różnych podłożach, wypełnienie komór grobowych, ochrona powierzchni
	Vermilion (cynober syntetyczny, o cechach mikrostrukturalnych odmiennych od hematytu naturalnego)	HgS	Malowidła na różnych podłożach, ochrona powierzchni
	Realgar naturalny Realgar syntetyczny/ AsS/barwne paciorki (Czech-Błońska i Miśta 2017)	AsS	Malowidła na różnych podłożach
	Czerwienie ołowiowe	Syntetyczne: minia Pb_3O_4 i lithargit PbO	Malowidła na różnych podłożach (m.in. w malarstwie miniatorskim, nazwa związana z używaniem minii)
	Proszek terakotowy	Sproszkowana przepalona glinka żelazista lub przedmioty z niej wykonane	Wypełnienie komory grobowej szamanki, barwienie tynków
	Związki miedzi różnego pochodzenia	Cu	Szkło „rubinowe”
	Złoto	Au - złoto koloidalne	„Purpura Kasjusza” - rzymski puchar Likurga, IV w. n.e. (Freestone et al. 2007)
Fiolet	Antozonit	CaF_2 (odmiana fluorytu)	Malowidła ścienne i tablicowe
	Fiolet Han	Syntetyczny spiek, w którego skład wchodzi krystaliczny krzemian baru i miedzi $BaCuSi_2O_6$	Malowidła na różnych podłożach (charakterystyczny dla Dalekiego Wschodu)
	Związki manganu	Tlenki i wodorotlenki manganu	Barwienie i odbarwianie szkieł
	Hematyt	Fe_2O_3	Malowidła naskalne (szczególne odmiany hematytu)
Czerń	Grafit	C	Powierzchnia naczyń ceramicznych, masy ceramiczne, szkice
	Związki manganu	Tlenki i wodorotlenki manganu	Malowidła na różnych podłożach
	Sadza różnego pochodzenia	C, różne związki organiczne	Malowidła na różnych podłożach
	Związki żelaza i miedzi	Substancje różnego pochodzenia	Szkła (barwienie w całości)
	Czerń kostna	Przepalony bioapatyt, substancja C ze śladami fosforu	Malowidła na różnych podłożach
	Chromit (spinel chromowy)	$FeCr_2O_4$	Ceramika islamska, pigment podszkliwny
	Piryt	FeS_2	Naturalny pigment czarnych wapieni, np. wapienia dębnickiego

Barwa	Pigment	Skład mineralny, wzór chemiczny	Przykład zastosowania
Czerń o ciepłym odcieniu	Tlenki, tlenowodorotlenki, wodorotlenki żelaza i manganu	Naturalna mieszanina	Malowidła na różnych podłożach
Biel	Biel kostna	Przepalona mączka kostna (przepalony bioapatyt) $Ca_3(PO_4)_2$	Malowidła na różnych podłożach, inkrustacja ceramiki, barwienie szkła
	Minerały ilaste z grupy kaolinitu	Glinokrzemian glinu, $Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$	Malowidła na różnych podłożach
	Minerały ilaste z grupy smektytu	Duża grupa glinokrzemianów o zmiennym składzie, zawierających Ca, Mg, Al, Fe, Na	Malowidła na różnych podłożach
	Związki cyny	Głównie kasyteryt SnO_2	Glazury, np. w majolice
	Gips	$CaSO_4.2H_2O$	Grunty, malowidła, inkrustacje
	Gips palony (bassanit)	$CaSO_4.1/2H_2O$	Grunty, malowidła, inkrustacje
	Kreda (kalcyt)	$CaCO_3$	Grunty, malowidła, inkrustacje
	Aragonit	$CaCO_3$	Malowidła na różnych podłożach
	$CaCO_3$	Pokruszone lub zmielone muszle mięczaków	Malowidła na różnych podłożach
	Biel ołowiowa (pigment syntetyczny)	Mieszanina węglanu ołowiu i octanu ołowiu	Malowidła na różnych podłożach, grunty
	Wapno palone i gaszone	CaO, $Ca(OH)_2$	Inkrustacje
	Kwarc	SiO_2	Angoby pod ornamentami podszkliwnymi, dodatek do gruntów
Srebrzysty	Ag	Folia, mielone srebro, amalgamat	Różne podłoża, np. metale, pergamin, drewno
	Sn	Folia	Różne podłoża, np. metale, pergamin, drewno
Żółcień	Ochra (por. wyżej)	Por. wyżej	Malowidła na różnych podłożach
	Aurypigment	As_2S_3	Malowidła na różnych podłożach
	Żółcień antymonowo-ołowiowa (żółcień neapolitańska)	Pigment syntetyczny	Malowidła na różnych podłożach ale głównie barwienie glazur
	Masykot	Syntetyczny PbO	Malowidła na różnych podłożach
	Związki żelaza	Różny skład wyjściowy	Barwienie glazur i szkieł
Brąz	Umbra	Jak ochra, ale z naturalnym dodatkiem związków manganu	Malowidła na różnych podłożach
	Brąz Van Dycka	Naturalne bituminy, węgiel drzewny	Malarstwo tablicowe
Złoty, złocisty	Au	Folia, mielone złoto, amalgamat	Różne podłoża, wnętrza teserów mozaik, chryzografia
	SnS_2 („złoto mozaikowe")	Złocista folia imitująca złoto	Różne podłoża, tesery mozaik
Błękit	Azuryt naturalny	$Cu_3(CO_3)_2(OH)_2$	Malowidła na różnych podłożach
	Azuryt syntetyczny	$Cu_3(CO_3)_2(OH)_2$ o odmiennej mikromorfologii od naturalnego odpowiednika	Malowidła na różnych podłożach
	Ultramaryna	$(Na,Ca)_8[(S,Cl,SO_4,OH)_2\|(Al_6Si_6O_{24})]$	Malowidła na różnych podłożach
	Vivianit	$Fe_3(PO_4)_2 \bullet 8H_2O$	Malowidła na różnych podłożach
	Błękit egipski (syntetyczny)	Spiek związków miedzi i krzemionki, często zawierający fazę odpowiadającą minerałowi cuprorivaitovi $CaCuSi_4O_{10}$	Malowidła na różnych podłożach (głównie strefa śródziemnomorska)

Barwa	Pigment	Skład mineralny, wzór chemiczny	Przykład zastosowania
Błękit	Błękit Han (syntetyczny)	Spiek związków miedzi i krzemionki, często zawierający fazę odpowiadającą minerałowi effenbergerytowi $BaCuSi_4O_{10}$	Malowidła na różnych podłożach, łącznie z metalowymi (głównie Daleki Wschód)
	Grynszpan (verdigris)	Octany miedzi	Malowidła na różnych podłożach
	Pigmenty kobaltowe (syntetyczne) egipskie	Spiek: syntetyczny glinian kobaltu	Malowidła na różnych podłożach, składnik glazur
	Pigmenty kobaltowe (syntetyczne) nowożytne	Smalta (szkło kobaltowe)	Malowidła na różnych podłożach, składnik glazur
	Związki żelaza	Różny skład wyjściowy	Szkła
	Związki miedzi	Różny skład wyjściowy	Glazury, szkła
Zieleń	Malachit naturalny	$Cu_2CO_3(OH)_2$	Malowidła na różnych podłożach
	Malachit syntetyczny	$Cu_2CO_3(OH)_2$ o mikrostrukturze odmiennej od naturalnego odpowiednika	Malowidła na różnych podłożach
	Viride salsum	Syntetyczny zasadowy chlorek miedzi	Malowidła na różnych podłożach
	Zieleń egipska	Spiek związków miedzi i krzemionki	Malowidła na różnych podłożach
	Ziemia zielona	Różne glinokrzemiany zawierające żelazo (np. glaukonit, seladonit, Fe-montmorillonit)	Malowidła na różnych podłożach
	Grynszpan (verdigris)	Octany miedzi, skład zróżnicowany	Malowidła na różnych podłożach

podatne są na przemiany, niektóre mają opinię wyjątkowo mało stabilnych (np. *viride salsum*). Jednak w wielu przypadkach zalety substancji barwiącej przewyższały ryzyko, były np. bardzo tanie. Przykładem takich przemian jest czernienie cynobru i vermilionu zachodzące pod wpływem zjawisk fotochemicznych (pisał o nich już Witruwiusz), czy zielenienie błękitnych partii obrazów wskutek pojawiania się zasadowych chlorków miedzi. Przemian takich jest oczywiście znacznie więcej.

O ile długotrwałe ucieranie pigmentu, którego celem jest uzyskanie bardzo drobnego i homogenicznego pod względem wielkości ziaren produktu, raczej nie zmienia właściwości materii, to przemiany termiczne sprawiają, że mamy do czynienia z nową substancją. Na cechy produktu wpływa atmosfera przepalania, czas, obecność i rodzaj substancji towarzyszących (np. topników, często są to popioły roślinne). Przepalenia tlenowodorotlenków żelaza oraz wodorotlenków i tlenków manganu, udowodnione w malowidłach paleolitycznych, są trudne do wykazania, choć nie niemożliwe. Po przepaleniu zmienia się makroskopowy wygląd substancji barwiącej, co trudno zauważyć w przypadku drobnego proszku zaaplikowanego w warstwie malarskiej. Skutki przepaleń stają się widoczne w mikrostrukturze: mikromorfologii obserwowanej pod mikroskopem skaningowym lub elektronowym transmisyjnym w połączeniu z analizą fazową ujawniającą zmiany uporządkowania krystalitów (Trąbska 2015, tam dalsza literatura).

Najczęściej problem przepalonych pigmentów dotyczy ceramiki, choć w zależności od rodzaju zdobień obecne bywają też pigmenty nieprzepalone. Niektórych pigmentów nie wypala się wraz z przedmiotem ze względu na rozpad ich struktury i nieodwracalne zmiany barwne. Należą do nich np. zasadowe węglany miedzi: malachit i azuryt. Finalny efekt barwny zdobionego przedmiotu ceramicznego zależy od barwy podłoża (masy ceramicznej lub angoby, zwykle czerwonej albo białej, np. lekytów), barwy farby, domieszek w farbie, atmosfery wypału, ewentualnego werniksowania oraz użytkowania i historii postdepozycyjnej.

Barwy naskorupień i sedymentów. Fałszywe „warstwy malarskie”

Sedymenty warstw kulturowych zabarwiane są substancjami o znaczeniu kulturowym lub istotnymi dla

interpretacji procesów naturalnych. Geneza naskorupień, wykwitów, nalotów i nawarstwień może być różna, a jej interpretacja trudna. Struktury te mogą być naturalne, po części naturalne i antropogeniczne lub antropogeniczne, przy czym te ostatnie mogły powstawać w różnym czasie. Przykładem naturalnych naskorupień są czarne powłoki związków manganu na różnego rodzaju podłożach skalnych, często wykorzystywane w różnych kulturach i różnym czasie jako tło dla petroglifów. Związki manganu tworzą nierzadko dendrytowe skupienia do złudzenia przypominające wyrafinowane formy malarskie (Manecki i Wrzak 2011). Do rzadszych sytuacji należą skupienia czarnych siarczków (żelaza, ołowiu, miedzi, srebra) lub tlenków metali. Czarne skupienia framboidalnego pirytu z powodzeniem naśladowały intencjonalne wypełnienia zygzakowatych rowków na powierzchni schyłkowopaleolitycznego przedmiotu z poroża łosia odkrytego w Rusinowie (Trąbska i Trybalska 2017). Naskorupienia i czarno zabarwione warstwy mogą wiązać się z działalnością człowieka, np. paleniem ognisk, pozostają one także w postaci śladów na przedmiotach interpretowanych jako lampki. Wtedy zabarwienie wynika z obecności substancji węglistych, których charakter (rodzaj substancji wyjściowej, stopień jej degradacji termicznej) podlega badaniom. Często obserwuje się czerwone, wiśniowe, rude, pomarańczowe lub żółte naskorupienia powstałe wskutek naturalnej koncentracji związków żelaza: w klimacie wilgotnym lub umiarkowanie wilgotnym są to tlenowodorotlenki żelaza (goethyt, lepidokrokit, akaganeit), w klimacie suchym przeważa hematyt (ryc. 4a-b). Powstające wskutek naturalnej dyfuzji związków żelaza tzw. pierścienie Lieseganga mogą tworzyć frapujące struktury, przypominające czasem wzory wykonane przez człowieka. Znane jest zjawisko powstawania patyny ogniowej – cienkiej warstwy wiśniowego hematytu – na przepalonych w stosach ciałopalnych przedmiotach żelaznych. Białe naskorupienia są rezultatem wytrącania się mleka wapiennego, gipsu, szczawianów wapnia, czasem fosforanu wapnia. Dodatkowo mogą pojawiać się minerały ilaste, kwarc, skalenie, czyli najczęstsze składniki pyłu nawiewanego przez wiatr. Geneza tych naskorupień jest często mieszana: nieorganiczna i organiczna. Mogą one w zaskakujący sposób imitować barwne warstwy wygenerowane przez człowieka (Trąbska i Trybalska 2014, ryc. 4a-b). Występujące w białych naskorupieniach węglany wapnia i szczawiany wapnia mogą być datowane metodą węgla C^{14} w technice AMS (spektrometria mas z akceleratorem, Accelerator Mass Spectrometry), wszystkie one oraz gips lub anhydryt mogą podlegać badaniom izotopowym umożliwiającym identyfikację wahań klimatycznych czy innych parametrów wspomagających m.in. datowanie. Na powierzchniach przedmiotów i obiektów naturalnych, w obecności żelaza i fosforu, w warunkach umiarkowanego utlenienia może powstać warstwa kryptokrystalicznego niebieskogranatowego vivianitu lub skupienia jego kryształów. Taki interesujący barwnie nalot może w całości pokrywać przedmiot. Fioletowe naloty, którym myląco można przypisać intencjonalność wykonania, powstają na powierzchniach przedmiotów (np. kości czy kamieni) wskutek rozkładu mięczaków. Dawno temu ludzie zauważyli to zjawisko i nauczyli się produkować purpurę tyryjską ze ślimaka rodzaju *Murex*. Unikalnym przykładem naturalnej, zabarwionej niklem na jabłkowozielony kolor żywicy jest wydzielina drzew porastających Nową Kaledonię, na której znajdują się bogate wietrzeniowe złoża tego pierwiastka (Paul in. 2021). Wzmianek na temat użytkowania tej żywicy przez dawnych mieszkańców wyspy na razie brak.

Warstwy sedymentu w profilach archeologicznych są różnie zabarwione wskutek procesów naturalnych i działań człowieka – dzięki temu można wskazać ich granice. Zróżnicowanie naturalnego zabarwienia wynika w naszym klimacie najczęściej z obecności różnej koncentracji i rodzaju związków żelaza wymienionych wyżej, rzadziej z obecności pyłu kwarcowego lub węglanu wapnia czy gipsu, które nadają białe lub białoszare zabarwienie. Odrębną kwestią jest celowe rozsypanie czerwonego lub czerwonowiśniowego pyłu ochrowego lub hematytowego w obszarze działań ściśle związanych z rytuałami funeralnymi lub innymi. W kontekście funeralnym możemy mieć do czynienia nie tylko ze związkami żelaza, ale także z cynobrem lub vermilionem (Kawano i in., 2014) lub z pyłem terakotowym (Trąbska i in., 2015). Pył barwiący sedyment może być rezultatem działań technologicznych, np. ucierania bryłek ochry lub hematytu dla uzyskania substancji barwiącej, leku lub do garbowania skóry. Zdarzają się też podobnej barwy grudki z innego surowca, np. różowo i pomarańczowo zabarwionego porcelanitu, rzadkiej skały, którą jednak człowiek zauważył i potrafił wykorzystać (Trąbska i in., 2015). W rzadkich przypadkach, przy niedostatecznej ilości tlenu, związki żelaza mogą barwić sedyment na kolor ciemnozielony, granatowy i czarny, wtedy należy spodziewać się obecności siarczków żelaza (piryt, greigit, czasem markasyt) lub fosforanu, vivianitu. We

wszystkich przypadkach rozpoznaniu powinna być poddana przyczyna obecności siarki i fosforu: naturalna czy antropogeniczna.

Specyficznymi „warstwami", a właściwie strefami barwnymi, są przebarwienia powierzchni metalowych wynikające z segregacji jednego z pierwiastków stopowych. Na tych powierzchniach mogą być też obecne ślady celowo nałożonych patyn, będących rezultatami wzajemnych reakcji różnych związków chemicznych i podłoża. Identyfikacja substancji wyjściowych jest trudna (Cronyn 2005). Myłące ślady barwne bywają także wynikiem interwencji konserwatorskich, które, dawno wykonane, nie znalazły odzwierciedlenia w dokumentacji lub takowa nie istnieje z różnych przyczyn, np. z powodu zniszczeń wojennych. Śladami barwnymi niezwiązanymi w żaden sposób z kontekstem, a wymagającymi kosztownych badań, są „kropki" pozostałe po stosowaniu czerwonej plasteliny dla stabilizowania przedmiotu w trakcie np. robienia zdjęć. Takiego działania należy się zdecydowanie wystrzegać, podobnie jak dokładnego szorowania powierzchni zabytków bez uzyskania informacji o składzie tychże. Usunięte mogą być bowiem np. białe węglany ołowiu będące echem działań technologicznych związanych z produkcją tego metalu lub z przechowywaniem jego związków (np. bieli ołowiowej) oraz mikroślady pozostałe po powierzchniach barwnych lub inkrustacjach.

Rozróżnienie naturalnych i intencjonalnych zabarwień, jeśli kontekst nie definiuje jasno sytuacji, może okazać się problematyczne. Niezbędna jest analiza środowiska wokół „podejrzanego" zabytku, np. obserwacja mobilności związków żelaza. Konieczne bywa porównanie cech barwnego śladu ze skupieniami znajdującymi się w otoczeniu, zwykle dotyczy to „ochr". Sprawdzana jest obecność substancji organicznych, które sugerowałyby zastosowanie kleju, analizuje się cechy morfologii barwnej substancji, sposób jej przylegania do podłoża, stopień homogeniczności i rozdrobnienia ziarnistych składników.

Barwniki organiczne – roślinne, zwierzęce i kompozytowe (laki)

Podział organicznych substancji barwiących można przeprowadzić wielorako: (i) ze względu na barwę, (ii) pochodzenie (roślinne, np. indygo, zwierzęce, np. purpura tyryjska, laki, kompozyty, np. błękit Majów, mieszanej proweniencji, np. gambodża, koszenila); (iii) substancje naturalne lub sztuczne, (iv) sposób stosowania w barwieniu (barwniki bezpośrednie, kadziowe, zaprawowe i reaktywne), (v) skład chemiczny (antracenowe, flawonoidowe i in., por. niżej), (vi) na sprawowaną w naturze funkcję. Laki definiowane są jako barwniki organiczne osadzone na nieorganicznym nośniku, mogą być roślinne lub zwierzęce, naturalne lub syntetyczne (np. Grabska i Kaczmarek 2019). Jednak pod tym określeniem kryją się też barwne substancje (z reguły czerwone) otrzymywane z owadów żerujących na różnych roślinach (Drobnik 2021, Eastaugh i in., 2005) (tab. 2, 3).

Barwniki charakteryzują się szeroką gamą kolorystyczną, która zależy przede wszystkim od rodzaju i koncentracji substancji aktywnych w roślinie. Barwa wynika też z użytej części rośliny, zależna jest od pory zbioru i od warunków klimatycznych w danym sezonie. Czynniki środowiskowe wpływają też na koncentrację i jakość barwiących substancji w ciałach zwierząt. Organiczne barwniki zastępowały pigmenty jako substancje łatwo dostępne, przeważnie stosunkowo tanie oraz dobrze wybarwiające delikatne podłoża, np. papier. Nigdy jednak nie zdołały ich wyprzeć ze względu na niską trwałość. Zastępowały one pigmenty jako łatwo dostępne i przeważnie stosunkowo tanie oraz dobrze wybarwiające delikatne podłoża (np. papier), nigdy jednak nie zdołały ich wyprzeć ze względu na cechującą je niską trwałość.

Barwniki, oprócz stosowana ich w malowidłach (do zdobień powierzchni) i do barwienia tkanin, obecne są w środkach spożywczych naturalnie i celowo barwionych, w przyprawach, kosmetykach (np. w szminkach i w środkach do barwienia włosów), w truciznach organicznych i w lekach – każda roślina barwierska zawiera substancje czynne działające w przypadku określonych schorzeń (Ożarowski 1976). Procedury badawcze są w przypadku tych substancji takie jak dla barwników stosowanych „klasycznie".

Barwniki organiczne ze względu na skład chemiczny dzieli się na barwniki antracenowe, flawonoidowe, antocjanowe, naftochinowe, taninowe, indolowe (Schmid-Przewoźna 2020, tam dalsza literatura). Barwniki antracenowe, charakteryzujące się przede wszystkim czerwoną i pomarańczową barwą, to jedne z najtrwalszych substancji; znajdują się m.in. w korzeniach marzanny barwierskiej oraz w larwach owadów (kermes, koszenila, czerwiec polski). Barwniki flawonoidowe są zwykle żółte, a rośliny ich dostarczające to m.in. rezeda żółtawa i janowiec barwierski. Barwniki antocjanowe barwią na niebiesko, lecz nie są odporne na działanie światła, pod wpływem którego zmieniają barwę na brązową. Znajdują się

Tabela 2. Wybrane barwniki pochodzenia roślinnego strefy środkowoeuropejskiej oraz otrzymywane z nich barwy. Nie uwzględniono substancji dodatkowych, modyfikujących barwę (Schmid-Przewoźna 2020; Schweppe i Winter 1997; Tuszyńska 1986)

Barwa	**Roślina**
Czerwień	Marzanna barwierska (korzeń) (*Rubia tinctorum*) Alkanna barwierska (korzeń) (*Alkanna tinctoria*) Krokosz barwierski (kwiaty – płatki) (*Carthamus tinctorius*)
Fiolet	Orselia (porost) Połączenie błękitu indygo i czerwieni z barwnika zwierzęcego, koszenili
Czerń	Dąb (kora młodych gałęzi) (rodzaj *Quercus*) Olcha (kora) (rodzaj *Alnus*) Zaprawianie tkaniny ciemnym barwnikiem (np. indygo) i uzupełnienie brązem Zwęglone rośliny (np. winorośl, pestki owoców) Sumak (rodzaj *Rhus*) Galas ze związkami żelaza Sadza Dziegieć i smoła (jako substancje pochodzenia roślinnego)
Szary	Olcha (kora) Galasy dębowe
Żółcień	Rezeda (ziele) (rodzaj *Reseda*) Sierpik barwierski (ziele) (*Serratula tinctoria*) Brzoza (liście) (rodzaj *Betula*) Wrzos (młode pędy) (rodzaj *Calluna*) Dąb (drewno) (rodzaj *Quercus*) Janowiec barwierski (ziele) (*Genista tinctoria*) Czosnek (łupiny) (rodzaj *Allium*)
Pomarańcz	Połączenie barwników z rezedy i marzanny
Błękit	Urzet barwierski (liście) (*Isatis tinctoria*) Tarnina (owoc) (*Prunus spinosa*) Dziki bez czarny (owoc) (*Sambucus nigra*)
Zieleń	Wilcza jagoda (owoc) (*Atropa belladonna*)
Brąz	Porost (np. *Parmelia perlata*) Orzech włoski, łupiny i korzeń (*Juglans regia*) Łupiny cebuli (rodzaj *Allium*)

Tabela 3. Wybrane barwniki zwierzęce (precyzyjniejsze byłoby określenie: roślinno-zwierzęce) oraz otrzymywane z nich barwy. Nie uwzględniono substancji dodatkowych, modyfikujących barwę (Drobnik 2021; Eastaugh i in., 2005)

Barwa	**Nazwa w powszechnym użyciu**	**Zwierzę**	**Środowisko życia**
Purpura	Purpura tyryjska	Ślimak z rodzaju *Murex*	m.in. Morze Śródziemne
Czerwień	Karmin	Pluskwiak – czerwiec polski (*Porphyrophora polonica*)	Korzenie rośliny z rodzaju czerwiec (*Sclerathus*) i innych
	Karmin	Pluskwiak – czerwiec ormiański (*Porphyrophora hameli*)	Korzenie traw z rodziny wiechlinowatych (*Aeluropus*) i trzciny pospolitej (*Phragmites australis*)
Purpura, czerwień	Koszenila, karmin	Samice pluskwiaka czerwca kaktusowego (*Coccus cacti* lub *Dactylopius coccus*)	Pędy opuncji, np. opuncji koszenilowej (*Nopalea cochenillifera)*
	Kermes, karmazyn	Samice owadów rodzaju *Kermes*	Gałęzie dębu ostrolistnego i dębu kermesowego (*Quercus ilex, Q. coccifera*)
	Laka (tzw. laka chińska)	Owad czerwiec lakowy (*Coccus lacca, Kerria lacca)*	Kroton (*Croton laccifer*), figowce, rodzaj akacja (*Accacia*)

np. w borówkach. Barwniki karotenoidowe barwią na czerwono, pomarańczowo i żółto. Rośliną je zawierające jest m.in. szafran. Barwniki naftochinowe charakteryzują się również żółtą lub czerwoną barwą, znajdujemy je w np. łupinach orzecha włoskiego, stosowanych m.in. do barwienia włosów. Chlorofile barwią na zielono, jednak barwa tak uzyskana jest nietrwała, dobrze sprawdza się natomiast w szybko zużywanych środkach spożywczych i kosmetykach (np. sok z pokrzyw). Taniny są garbnikami roślinnymi (z grupy polifenoli) stosowanymi do wielu celów (np. garbowania skór), ale też do wytwarzania tuszów. Taninę uzyskuje się z galasów lub kory wielu drzew, np. dębu. Barwniki indolowe (ich pochodną jest indygo, niewystępujące w takiej postaci w przyrodzie) występują w licznych gatunkach indygowca i w urzecie barwierskim. Roślinnymi nośnikami barw mogą być nie tylko fragmenty roślin, ale także ich wydzieliny, np. żywice, wśród nich żółta gambodża, w której barwnikami są kwasy przeważnie należące do grupy polifenoli (Winter 1997).

Szczególnie istotnym obszarem stosowania barwników było farbiarstwo, ale znalazły one uznanie także w malarstwie (tablicowym, sztalugowym, w miniatorstwie), barwieniu skór i przedmiotów, nawet w zdobieniu ceramiki. Nie każdy rodzaj rośliny lub zwierzęcia nadawał się dla wszystkich rzemiosł zainteresowanych barwieniem. We wspomnianym traktacie ze zbiorów Biblioteki Czartoryskich czytamy: „rdzeń tego drzewa [mowa o barwniku z drzewa brazylijskiego] dobry jest nie dla malarzy i iluminatorów, ale tylko dla farbiarzy tkanin (Wyrozumski 1974: 669). Wiedza na temat *spectrum* zastosowań barwników może ulec zmianie dzięki wynikom analiz chemicznych i badań archiwaliów.

Farbiarstwo z użyciem substancji pochodzących od roślin, a w mniejszym zakresie od zwierząt, jest dawnym wynalazkiem ludzkości, rozwijającym się zwłaszcza na terenach o bogatej wegetacji, który szybko jednak znalazł zastosowanie we wszystkich strefach klimatycznych. W dużej mierze barwieniu tkanin poświęcone są receptury zawarte w papirusach tebańskich (Stawicki 1987). Organiczne substancje barwiące zachowują się w materiale archeologicznym w szczególnych warunkach, w bagnach lub przeciwnie – w miejscach suchych. Ich stabilność ma związek ze stabilnością ich podłoża.

Barwienie tkanin to proces łączenia barwnika z włóknem w kąpieli barwiącej. Finalny efekt barwny zależy od wielu czynników, związanych z cechami surowca (gatunek rośliny, rodzaj barwnika, jego koncentracja, część rośliny), z porą roku (liście najlepiej zbierać latem, a korzenie wiosną lub jesienią) i ze sposobami jego pozyskiwania (napar, odwar, działanie na zimno lub na gorąco, stopnień rozdrobnienia, cedzenie, . Barwnik roślinny składa się z wielu substancji chemicznych (por. wyżej), których wzajemne proporcje nadają określony odcień barwie, a zależą od gatunku rośliny i warunków klimatycznych, nawet w jednym sezonie. Przykładem niech będzie kraplak otrzymywany z korzeni marzanny (rodzaj *Rubia*), w którego skład wchodzi alizaryna (główny składnik barwiący), ale także purpuryna, pseudopurpuryna, rubiadyna i co najmniej 22 inne składniki (Schweppe i Winter 1997).

Barwa tkanin zależy także od rodzaju barwników w mieszaninie, modyfikacji kąpieli barwiącej (użycie miękkiej wody, wprowadzenia kwasów, alkaliów lub soli modyfikujących odczyn kąpieli, mydła), użycia zapraw tkanin (środków bejcujących), rodzaju użytego naczynia (kotły żelazne, miedziowe), uprzedniego przygotowania tkaniny (wybielenia), rodzaju podłoża (wełna, płótno, jedwab, inne; barwienia tkanin spilśnionych lub nie, bądź skłębionych dla celowo niepełnego zabarwienia), rodzaju splotu (pewne elementy splotu trudniej się wybarwiają), barwy własnej podłoża, wreszcie sposobu barwienia (a może ich być sporo i mogą być wyrafinowane) (Długosz-Rygiel 2003; Görlich 2015; Grupa 2012; Turnau 1987; Tuszyńska 1986).

Ze względu na sposób barwienia tkanin barwniki dzielą się na bezpośrednie, zaprawowe, kadziowe i reaktywne (Schmid-Przewoźna 2020; Tuszyńska 1986). Pierwsze z nich, czyli barwiące bez stosowania substancji dodatkowych (zaprawowych), nie są zbyt trwałe. Roślina dająca takie możliwości to np. krokosz barwierski (płatki kwiatu). Drugie, reprezentowane przez największą grupę, muszą współdziałać z zaprawami (por. niżej). Rodzaj i ilość zaprawy, a także sposób prowadzenia procesu barwienia jest ważnym czynnikiem decydującym o finalnej barwie. Barwniki kadziowe nie rozpuszczają się w wodzie, konieczna jest kąpiel surowca w roztworze o określonym odczynie. W tej grupie znajdują się bardzo ważne substancje barwiące: indygo i purpura tyryjska. Ostatnia grupa, czyli barwniki reaktywne, trwale wiążą się z włóknem, są to np. barwniki uzyskiwane z porostów – znane z niezwykle barwnych ubiorów mieszkańców Laponii. Liczne porosty, których szczątki zidentyfikowano na stanowiskach górnopaleolitycznych można zobaczyć w Muzeum Historii Naturalnej w Wiedniu. Być może, obok innych celów, służyły one do barwienia odzieży.

Barwienie w większości przypadków wymagało stosowania zapraw. Były to substancje modyfikujące powierzchnię podłoża tak, aby barwnik wniknął w nie i dał trwały efekt kolorystyczny. Rodzaj zaprawy modyfikował też barwę, np. z marzanny barwierskiej przy zastosowaniu ałunu uzyskiwano barwę jasnoczerwoną z żółtawym odcieniem, a po zastosowaniu ałunu i kamienia winnego – czerwień o odcieniu różowym lub jasnokarmazynowym. Zaprawami były substancje mineralne i organiczne: ałun, potaż, kamień winowy, grynszpan, siarczan żelazawy (witriol żelazawy), ocet, wapno, sól kuchenna, węglan sodu, kwas cytrynowy, mocz, sole glinu, siarczan miedzi (witriol miedziowy), wodorotlenek cynowy i wodorotlenek żelazowy (Długosz-Rygiel 2003; Grupa 2012; Schmid-Przewoźna 2020; Stawicki 1987; Turnau 1987; Tuszyńska 1986). Substancje te, podobnie jak pigmenty i barwniki, były przedmiotami handlu, czasem konfliktów zbrojnych. Substancje o określonych parametrach pochodziły z określonych źródeł. Bywały one stosowane także w innych celach, np. ałuny do wyrobu szkieł i garbowania skór (Borgard i in. 2005), potaż w wyrobie szkieł.

Każda strefa klimatyczna charakteryzuje się obecnością specyficznych roślin zawierających substancje barwne (a także lecznicze) o swoistym stężeniu i modyfikacjach składu. Na przykład na obszarze śródziemnomorskim jest to przywleczona wraz z pasożytem koszenilą, dającym barwnik czerwony, opuncja (*Opuntia ficus-indica*), alkanna barwierska (*Alkanna tinctoria*), ze skórki korzenia której otrzymuje się czerwoną alkaninę służącą m.in. do barwienia likierów i kosmetyków, kocanka włoska (*Helichrysum italicum*) – z jej kwiatów otrzymuje się żółty barwnik do włókien (kocanki uprawiane są obecnie w Polsce jako rośliny lecznicze i przyprawowe) i rzepień kolczasty (*Xanthoim spinosum*) będący źródłem żółtego barwnika (Polese 2009). Wykorzystanie lokalnych surowców w różnych ośrodkach potwierdzano w badaniach (Grupa 2012, tam dalsza literatura), ale należy pamiętać, że siedliska roślin zmieniają się: wspomniany rzepień jest w Polsce antropofitem (gatunkiem obcego pochodzenia). Bogactwo rodzajów i gatunków mniej znanych i potencjalnych roślin barwierskich dalece wykracza poza najczęściej wymieniane w opracowaniach archeometrycznych i archeologicznych. Przykładem służy drewno leszczyny barwiące na czarno, czy korzeń szczawiu żółtego barwiący na żółto.

Barwniki w znacznie większym stopniu niż pigmenty ulegają przemianom barwnym. W sedymencie zachodzi rozkład biochemiczny (działanie mikroorganizmów oraz odczyn środowiska, przy czym szczególnie niekorzystny jest kwaśny) oraz reakcje ze składnikami otoczenia, np. związkami żelaza i taninami. Negatywną rolę odgrywa obecność wilgoci. Istotny wpływ na stabilność barwników miało światło, a w malarstwie – użycie odpowiedniego spoiwa –nie nadawały się np. do techniki fresku z powodu silnie alkalicznego otoczenia. Trwałość zabarwienia (głównie o tkaninach tutaj mowa) zależała także od jakości utrwalenia koloru. Deterioracji ulegają barwniki wyposażenia trumiennego wskutek oddziaływania substancji uwalniających się z rozkładających się ciał – oryginalne barwy mają szansę zachować się w niszach izolowanych od tych wpływów. Zaplamienia wynikające z działalności mikroorganizmów i korozji metalowych elementów (w tym owijek nici) dodatkowo zaciemniają pierwotny obraz (Drążkowska 2008). Niekorzystne zmiany kolorystyczne mogą obejmować szerokie spektrum barw, np. od niebieskiej przez zieloną do żółtej (Grupa 2012).

Odbarwieniu ulegają przedmioty zabarwione w sposób naturalny. Wśród nich wymienić można muszle, pióra, włosy i włosie, w tym np. czarną wełnę, skamieniałości budzące zainteresowanie swoim wyglądem, wzorzyste skorupki jaj (Cronyn 2005). W szczególnych przypadkach, np. izolacji powierzchni skamieniałości przez minerały ilaste, barwny ornament może przetrwać nawet kilkanaście milionów lat ido złudzenia przypominać formy współczesne (Pilarz 2012).

Wśród barwników sławę i cenę zyskiwały te najbardziej trwałe, mniej trwałe wypierane były z rynku przez lepsze odpowiedniki. W taki sposób znikał z Europy urzet zastępowany przez indygo (Grupa 2012; Schweppe 1997) oraz czerwiec polski, który szybko zastąpiony został przez koszenilę. Kermes z korzeni marzanny przegrywał w konkurencji z koszenilą, później (od XIX w.) z syntetyczną alizaryną (Schweppe i Winter 1997) czy z czerwieniami uzyskiwanymi z owadów w Egipcie, po rozprzestrzenieniu się na tym terenie islamu (Długosz-Rygiel 2003).

Chemia barwników organicznych, rozwijająca się od drugiej połowy XIX w., niewyobrażalnie wzbogaciła świat substancji barwnych. W 1868 r. powstała syntetyczna czerwona alizaryna, a w 1870 – syntetyczne niebieskie indygo. I choć już wcześniej umiano otrzymywać barwiące syntetyczne substancje, to jednak od tego momentu datuje się przełom w ich produkcji. Mogą one budzić zainteresowanie archeologów jako substancje konserwatorskie i fałszujące.

Problem badań proweniencji substancji barwnych

Poszukiwanie, pozyskiwanie i przeróbka surowców do wyrobu substancji barwiących to działania związane z cechami kulturowymi i technologicznymi określonych społeczności (np. moda na określone barwy i substancje, zasięg eksploracji środowiska). Z tego powodu budzą uzasadnione zainteresowanie i podlegają badaniom proweniencji. Ich podstawą jest definiowanie wspólnych cech substancji barwiących i potencjalnych surowców, cech charakterystycznych (dystynktywnych), o dobrze rozpoznanej zmienności i relatywnie łatwo mierzalnych. Badania proweniencji zawsze rozpoczynają się od rozpoznania substancji barwnej i określenia jej cech.

W przypadku pigmentów mamy do czynienia z minerałami, substancjami przetworzonymi lub syntetycznymi (tab. 1). Analiza pochodzenia każdego rodzaju wstępnie rozpoznanej substancji wymaga indywidualnego podejścia: koncentracji na charakterystycznych dla niej cechach. Może być ich więcej niż jedna. Przykładowo dla nieprzetworzonego hematytu są to cechy krystalitów, które w zależności od jego genezy różnią się wielkością i kształtem oraz uporządkowaniem struktury. Ponadto do cech dystynktywnych tego minerału należą jego skład chemiczny i rodzaj faz towarzyszących. Dla hematytu najsilniejszą cechą dystynktywną jest pierwsza z wymienionych. Ulegnie ona zmianie po przegrzaniu minerału, w stopniu zależnym od oddziałującej temperatury i czasu. Zmiany te są do pewnego stopnia przewidywalne (Trąbska 2015). Z kolei w badaniach ziemi zielonej szczególnie istotne jest zdefiniowanie jej składu mineralnego. Cynober i vermilion ujawniają swoje pochodzenie dzięki izotopom siarki (Tsantini i in., 2018). Ułatwieniem badań pochodzenia pozostaje obecność minerałów płonych pozostałych po przetwarzaniu, sytuacja ta dotyczy np. ultramaryny, ale też innych pigmentów (ryc. 2d).

Podobnie istotne jest poszukiwanie źródeł pochodzenia barwników. Wiele substancji barwiących pozyskiwano z roślin lokalnych lub miejscowego surowca zwierzęcego (np. czerwiec polski), ale dla najbardziej wymagających realizacji barwierskich czy malarskich substancje barwiące lub już zabarwione przedmioty, szczególnie tkaniny, sprowadzane były z renomowanych plantacji lub ośrodków wytwórczych. Badanie tego problemu opiera się o analizę surowca roślinnego identyfikowanego na stanowiskach archeologicznych (po wykluczeniu możliwości alternatywnego stosowania jako leczniczego surowca zielarskiego), analizę źródeł pisanych, wreszcie o bezpośrednią analizę materiału w laboratoriach chemicznych i konserwatorskich. Analizy chemiczne przeprowadzane metodami chromatograficznymi umożliwiają rozdzielenie substancji barwnej na składniki, charakterystyczne dla określonych grup roślin (por. niżej). W ten sposób można je przyporządkować tradycji rzemieślniczej danego obszaru. Należy jednak pamiętać o zróżnicowaniu składu barwników w zależności od środowiskowych czynników wzrostu rośliny, co niekiedy utrudnia identyfikację źródła.

HISTORIA BADAŃ

Badania substancji barwiących jako przedmiotu handlu i zastosowania praktycznego odbywały się, odkąd subtancje te weszły w użytek. Kupcy i użytkownicy kierowali się doświadczeniem i intuicją, ale w niektórych przypadkach na pewno stosowano metody odpowiadajace naszym współczesnymnaszych kryteriom, a więc metody naukowe, oparte na doświadczeniach alchemicznych i dokładnej obserwacji, których szczegółów niestety nie znamy. Wiele z nich dotarło jednak do naszych czasów w przekazach zawartych w źródłach pisanych. Wiadomym jest na przykład, że alchemicy arabscy byli w stanie odróżnić minię od lithargitu. Badania warstw barwnych stanowią jednak odrębny problem. Prawdopodobnie pionierem nowoczesnych badań malowideł był John Haslam, brytyjski lekarz i chemik, który w 1800 r. zidentyfikował niektóre substancje barwiące (vermilion, czerwoną ochrę, biel i czerwień ołowiową, zielone verdigris) użyte w średniowiecznych malowidłach ściennych zabytków Londynu (Rees-Jones 1990). Od tej pory metody stosowane w chemii, a następnie w mineralogii, począwszy od analizy mokrej, a skończywszy na instrumentalnej, rozpoczęły swoją karierę w badaniach warstw barwnych. Dzięki trwającym kilkadziesiąt lat studiom poszczególnych obszarów i kultur (np. malarstwa starożytnego Egiptu (Lucas i Harris 2012 –pierwsze wydanie ukazało się na początku XX w.) czy zagadnień (np. fałszerstw) zgromadzona została bogata literatura przedmiotu (np. Colombini i in., 2022).

BADANIA SUBSTANCJI BARWNYCH – PROCEDURY I METODY

Identyfikacja substancji barwiących (pigmentów, barwników i kompozytów – lak) jest wciąż zadaniem trudnym, a to ze względu na niewielką dostępność materiału, bardzo niewielki rozmiar cząstek, obecność innych substancji: spoiw, werniksów, wtórnych naskorupień oraz innych substancji barwnych („karmin przyciemnisz czernią, rozjaśnisz bielą ołowiową", za: Wyrozumski 1974). Niektóre pigmenty rozcierano w organicznej substancji, np. cynober ucierano z jedną częścią żółtka i dwiema wody (Wyrozumski 1974). Utrudnieniem mogą być zabarwienia wprowadzone przez naprawy i przemalówki, które generują skomplikowane postępowanie badawcze wymagające konieczności połączenia metod przeznaczonych do badań substancji nieorganicznych (krystalicznych lub bezpostaciowych) oraz organicznych.

Pigmenty i barwniki podlegają odrębnym procedurom badawczym, w których jednak pewne elementy pozostają wspólne. Laki (kompozyty) badane są z użyciem metod przeznaczonych dla obu typów substancji, organicznych i nieorganicznych. Pigmenty i inne nieorganiczne składniki malowideł badane są podobnie jak minerały (np. składniki gruntów) lub nieorganiczne substancje bezpostaciowe. Szczegółowy opis każdego minerału oraz dane identyfikacyjne zawarte są w internetowych bazach *mindat* (www.mindat.org), rruff (https://rruff.info), w każdym podręczniku mineralogii szczegółowej (np. Bolewski i Manecki 1993) oraz w artykułach dostępnych w wyszukiwarkach naukowych. Dane takie, wraz z opisami historii zastosowań wybranych pigmentów i ich pochodzenia, zestawiono też w publikacji autorki niniejszego tekstu (Trąbska 2021).

Najbardziej miarodajne informacje o rodzaju substancji barwiących i substancji im towarzyszących pochodzą z badań konserwatorskich i archeometrycznych. Cenne dane uzupełniające można uzyskać z analizy źródeł pisanych i właściwej ich interpretacji. Są to traktaty technologiczne, starożytne i nowożytne, akta sądowe, innej natury akta prawne, dokumenty o charakterze korespondencji branżowej i prywatnej.

Procedura badawcza przedmiotów barwionych barwnikami (substancjami organicznymi) rozpoczyna się w momencie kontaktu z materiałem, w kontekście muzealnym, wykopaliskowym lub innym. Do kwestii tej można podejść na kilka sposobów: jak do analizy materiału roślinnego i zwierzęcego, który mógł być potencjalnym źródłem barwnika, jak do analizy elementów procesu technologicznego związanego z wytwarzaniem i aplikowaniem barwnika, wreszcie jak do analizy barwnika znajdującego się na podłożu. Aspekty związane z pierwszym przypadkiem zostały szczegółowo omówione przez M. Lityńską-Zając i K. Wasylikową (2005). Drugi i trzeci aspekt wymaga potraktowania podłoża i barwnika ze szczególną ostrożnością ze względu na wyjątkową podatność tychże na zniszczenie w trakcie eksploracji. Problem ten podnoszony jest przez konserwatorów obiektów organicznych (np. Drążkowska 2008: 25).

Materiał z powodzeniem pobrany i zabezpieczony w miarę możliwości pod względem ochrony mikrobiologicznej, gdy sytuacja tego wymaga, podlega najpierw obserwacjom makro- i mikroskopowym. Subiektywna analiza barwy umożliwia jej określenie i wskazanie istnienia oraz przyczyn obecności barw wtórnych lub odbarwień. Istnieją możliwości obiektywnego opisu barw. Do tego celu stosuje się znormalizowane skale barwne (np., ang. *International Federation of Rock Art Organizations*, IFRAO; wzorniki Munsella; niem. *Deutsche Industrie Norm*, DIN; system barw Ostwalda). Istnieją na rynku mierniki zabarwienia gleb i sedymentów skalibrowane według którejś z powszechnie używanych skal. Sposoby zapisu barwy w układach współrzędnych (franc. *Commision Internationale de l'Éclairage,* CIE) i inne opisane są w podręcznikach fizyki. Wszystkie metody stosowane do identyfikacji pigmentów i barwników charakteryzują się swoistymi ograniczeniami, dlatego najbardziej celowe jest stosowanie kilku, a na pewno więcej niż jednej. Opisy metod oraz sposoby interpretacji wyników opisane zostały w licznych podręcznikach i artykułach archeometrycznych.

Podstawowe obserwacje wszystkich barwnych powierzchni i przedmiotów prowadzi się za pomocą mikroskopu stereoskopowego wspomagającego oględziny gołym okiem. Mikroskop cyfrowy, szczególnie w wersji przenośnej, umożliwia odkrycie mikrośladów pigmentów lub barwników. Dzięki takim zabiegom wiele budowli i rzeźb uważanych za pozbawione warstw barwnych odzyskało w trakcie rekonstrukcji bogatą kolorystykę. Wstępna obserwacja umożliwia określenie wzajemnej relacji warstw malarskich, obecności procesów przemian barw oraz cech podłoża.

Mikroskop polaryzacyjny do światła przechodzącego, a czasem też odbitego, służy do identyfikacji pigmentów oraz do ustalenia szczegółów stratygrafii, gdy możliwe jest wykonanie płytki cienkiej (szlifu), zgładu bądź też preparatu proszkowego. Do ich wykonania wystarcza bardzo niewielka ilość próbki. Preparatyka jest niszcząca, ale tak przygotowaną próbkę można wykorzystać do dalszych badań, np. metodą spektroskopii Ramana lub mikroskopii skaningowej z mikroanalizatorem

rentgenowskim (SEM/EDS). Identyfikacja pigmentów i substancji im towarzyszących opiera się na zdefiniowaniu ich podstawowych cech optycznych i morfologicznych, analogicznie jak podczas badań mineralogicznych: barwy interferencyjnej, dwójłomności, pleochroizmu, kąta wygaszania światła, reliefu, pokroju oraz obecności stref reakcji ze spoiwem. Obserwacje z zastosowaniem tego rodzaju mikroskopii umożliwiają też uzyskanie informacji o obecności i rodzaju składników niemineralnych, np. o rodzaju włókien pochodzących z barwionych tkanin, intencjonalnych dodatków do gruntów czy pozostałości pędzli. Możliwe jest odróżnienie włókien roślinnych od włosia zwierzęcego. Metoda pozwala też na zaobserwowanie innych składników, np. ziaren skrobi, która czasem używana była do fałszowania substancji barwiących, o czym wspominają autorzy wspomnianych powyżej traktatów.

Konieczne uzupełnienia badań mikroskopowych pod mikroskopem do światła spolaryzowanego przeprowadzane są z zastosowaniem mikroskopu skaningowego (ang. *scanning electron microscope/energy dispersive spectrometry*, SEM/EDS). Dzięki omiatającej próbkę wiązce elektronów (skanowaniu) umożliwia on ogląd powierzchni materiału pod dużym powiększeniem z jednoczesną analizą chemiczną w mikroobszarze, czyli w ściśle określonym, interesującym dla badacza, punkcie pomiarowym. Zróżnicowanie technik pomiarowych umożliwia dostosowanie metody do określonego rodzaju materiału i preparatu (Dziadur i Mikuła 2016). Badania można prowadzić na próbce trójwymiarowej (ziarnie pigmentu czy fragmencie włókna) lub na preparacie płaskim (szlifie lub zgładzie). Uzyskanie kontrastowego obrazu wymaga napylenia próbki materiałem przewodzącym (najczęściej grafitem lub złotem) lub prowadzenia obserwacji w trybie niskiej próżni. Szczegóły analityczne powinny być zawsze skonsultowane z osobą wykonującą pomiary. Analiza chemiczna EDS umożliwia nie tylko uzyskanie informacji o składzie chemicznym pigmentów i gruntów, ale także o barwnikach: substancjach fałszujących i rodzajach substancji zaprawowych, gdy takie były stosowane. Badane są także cechy morfologiczne i chemiczne innych składników, np. włókien, włosia, skrobi czy zanieczyszczeń pochodzących z sedymentu. W szczególnych przypadkach (np. przepalonych ochr) stosuje się transmisyjne mikroskopy elektronowe (TEM, transmission electron microscope, HRTEM, elektronowy mikroskop transmisyjny wysokiej rozdzielczości: high resolution TEM). Jest to jednak procedura rzadka ze względu na skomplikowany sposób przygotowywania prób do pomiarów.

W niektórych przypadkach uzasadnione jest zastosowanie spektroskopii UV-VIS (lub UV-Vis, różnica tylko w zapisie, jest to ta sama metoda) czyli spektroskopii w ultrafiolecie (UV) i świetle widzialnym (VIS). Kształt widma pozwala odróżnić materię naturalną od syntetycznej o identycznym składzie fazowym i chemicznym, zidentyfikować substancje przetworzone (np. przepalone ochry i związki manganu) i skład farb złożonych z wielu substancji. Zakres standardowy spektroskopii UV-VIS obejmuje 200 do 800 nm. Wynik otrzymuje się w postaci widma, na którym wprost proporcjonalny wpływ na intensywność pasm ma stężenie substancji i grubość warstwy pochłaniającej. Promieniowanie UV-VIS może jednak inicjować reakcje chemiczne w niestabilnych substancjach (Białecka-Florjańczyk i Włostowska 2003), ponadto analiza jest utrudniona w przypadkach destrukcyjnych przemian substancji barwiących oraz występowania mieszanin (ta uwaga dotyczy wszystkich metod).

Spektrometria w podczerwieni (ang. *Fourier transform infrared,* FTIR) w różnych odmianach, w tym umożliwiających analizę pojedynczych ziaren czy niewielkich zabarwionych powierzchni, jest stosowana do badań substancji organicznych (zatem także spoiw) i nieorganicznych. Promieniowanie podczerwone pobudza cząsteczki budujące substancję do określonego rodzaju drgań rozciągających i zginających. W rezultacie na widmie pojawia się pasmo, którego położenie oznacza się za pomocą liczby falowej (liczba drgań fali świetlnej na 1 cm) [cm^{-1}]. W starszej literaturze spotyka się długości fali wyrażone w nanometrach. Obecność wielu substancji, generujących liczne, nakładające się pasma utrudnia interpretację (tak jest zresztą we wszystkich metodach). Niemniej jednak istniejące bazy danych umożliwiają zwykle identyfikację substancji lub przynajmniej grupę, do której ona należy. Widma w podczerwieni wyizolowanych składników kraplaka różnią się, ale identyfikacja ich w mieszaninie nie jest łatwa (Schwepp i Winter 1997). Jeśli jest to możliwe, to dla identyfikacji składników barwników zdecydowanie częściej stosuje się metody chromatograficzne. Niektórych substancji nie da się „zobaczyć" w spektroskopii w podczerwieni, co wynika z braku momentu dipolowego i jest rezultatem obecności wiązań symetrycznych (moment dipolowy to iloczyn wielkości ładunków elektrycznych i odległości między nimi). Wtedy stosuje się kolejną, opisaną niżej metodę.

Spektroskopia Ramana jest metodą uzupełniającą dla spektroskopii w podczerwieni, podobnie jak ona może być stosowana jednocześnie dla związków organicznych i nieorganicznych. Na widmach widoczne są substancje, których nie da się zobaczyć na widmach FTIR. Wersje aparatury wyposażone w mikroskop umożliwiają pomiar widma na powierzchniach pigmentów i barwników. Widmo powstaje wskutek rozpraszania światła monochromatycznego (generowanego przez laser o odpowiednio dobranej mocy, czyli długości fali promieniowania) przez próbkę. Warunkiem zareagowania próbki jest zmiana polaryzowalności w trakcie wzbudzania (polaryzowalność to miara podatności cząsteczki na indukowanie momentu dipolowego) (Silverstein i in., 2007). Energia lasera może zniszczyć niektóre substancje podatne na przemiany fazowe i chemiczne. Ponadto uzyskanie informacji o substancjach kryptokrystalicznych bywa trudne – kształt widma może nie pozwalać na identyfikację substancji. Czasem obecność zjawiska fluorescencji uniemożliwia rejestrację większości pasm. Utrudnieniem są też warstwy przesłaniające substancję barwną, np. werniks czy produkty korozji (destrukcji). Pomiary wymagają zatem współpracy z doświadczonym analitykiem, dzięki któremu właściwie zostanie dostosowana zarówno modyfikacja metody, jak i moc lasera odpowiednia dla określonego rodzaju materiału. Dostępnych jest sporo publikacji z zamieszczonymi widmami referencyjnymi pigmentów oraz uwagami na temat zakresu stosowalności tej bardzo dobrze sprawdzającej się w badaniach pigmentów metody (np. Bersani i Lottici 2016). Spektroskopia Ramana posłużyła m.in. do identyfikacji barwników zastosowanych w średniowiecznych manuskryptach, a w pracy temu poświęconej opisano też procedurę mikropróbkowania (Melo i in., 2016).

Analizy fazowe substancji krystalicznych przeprowadzane są metodą rentgenowskiej analizy dyfrakcyjnej (ang. *X-ray Diffraction*, XRD). Jeśli ilość próbki to umożliwia (dotyczy to np. surowców), to stosowana jest proszkowa odmiana tej metody XRPD (ang. *X-ray Powder Diffraction*). W innych przypadkach konieczne jest posłużenie się którąś z technik umożliwiających analizę pojedynczego kryształu (np. za pomocą kamery Gandolfiego) lub wykorzystanie promieniowania synchrotronowego, umożliwiającego skolimowanie wiązki do bardzo niewielkiej średnicy. Działanie metody polega na ugięciu promieni X o określonej długości na ścianach kryształu oraz ich wzmocnieniu (interferencji), dzięki czemu dla każdej substancji krystalicznej uzyskuje się zbiór pików dyfrakcyjnych, dla niej charakterystycznych. Interpretację przeprowadza się w oparciu o istniejące bazy danych, stanowiące wyposażenie każdego laboratorium. Obecność wielu substancji oraz niewielka koncentracja którejś z nich utrudnia interpretację. Warto zauważyć, że bieg elektronów w synchrotronie i zakłócanie go w określonych miejscach powoduje emisję także innych rodzajów promieniowania, wykorzystywanych w badaniach mikromateriałów (np. promieniowanie podczerwone lub UV-VIS).

Analizy chemiczne mogą być przeprowadzane na materiale organicznym i nieorganicznym. Ilość próbki oraz wymagany zakres informacji warunkują dobór odpowiedniej metody. Najczęściej stosowana jest wspomniana wyżej spektroskopia EDS w połączeniu z obserwacją obrazu pod mikroskopem skaningowym. Większe możliwości w wykrywaniu pierwiastków dają m.in. różne techniki i metody: rentgenowska analiza fluorescencyjna (ang. *X-ray Fluorescence spectroscopy*, XRF), neutronowa analiza aktywacyjna (ang. *Neutron Activation Analysis,* NAA), *Proton Induced X-ray Emission/Proton Induced Gamma Emission,* PIXE/PIGE), spektrometria mas z jonizacją w plazmie indukcyjnie sprzężonej po ablacji laserowej (ang. *Laser Ablation-Induced Coupled Plasma-Mass Spectrometry*, LA-ICP-MS). Niektóre z tych metod są nieniszczące (p-XRF, czyli *portable* XRF, PIXE/PIGE) lub mikroniszczące (LA-ICP-MS).

Spektroskopia mas (ang. *mass spectroscopy*, *mass spectrometry,* MS) może być stosowana jako samodzielna metoda lub w sprzężeniach z innymi metodami, zwłaszcza chromatograficznymi. Umożliwia identyfikację substancji organicznych i nieorganicznych, tzw. jonorodników powstałych wskutek oddziaływania substancji z elektronami o dużej energii. Przeprowadzone uprzednio w postać gazową, rozdzielane są one w polu magnetycznym według stosunku masy do ładunku. Otrzymuje się tzw. widmo masowe, które jest charakterystyczne dla danego związku. W widmie znajdują się też pasma izotopowe pochodzące od izotopów pierwiastków obecnych w substancji. Próbki cynobru ze stanowisk japońskich okresów Yayoi i Kofun (IV w. p.n.e.-IV w. n.e) poddane zostały badaniom tą metodą w celu określenia składu izotopów siarki i porównaniu ich do analogicznego parametru charakteryzującego japońskie i chińskie złoża cynobru. Próbki ze złóż pobrane zostały w starannie wybranych miejscach w celu określenia stopnia zmienności składu izotopowego. Badania wykazały pochodzenie cynobru z różnych złóż (Kawano i in. 2014).

Najważniejszą grupą metod sprawdzającą się w identyfikacji barwników i organicznej części barwnych substancji kompozytowych są metody chromatograficzne: chromatografia gazowa (ang. *gas chromatography*, GC), chromatografia cieczowa (ang. *high performance liquid chromatography* HPLC) oraz rzadziej chromatografia cienkowarstwowa (ang. *thin layer chromatography*, TLC). Chromatografia została wprowadzona do analityki chemicznej w 1903 r. dzięki pracom rosyjskiego chemika Michaiła Cwieta, który swoje badania prowadził na Uniwersytecie Warszawskim (Witkiewicz i Kałużna-Czaplińska 2017). Nieco zmodyfikowane doświadczenie Cwieta, a jednocześnie najprostsza wersja chromatografii, chromatografia bibułowa, jest przedmiotem eksperymentalnych zajęć uczniów profilu biologiczno-chemicznego w liceach ogólnokształcących. Jeden z przykładów demonstracji podstaw metody jest następujący: do naczynia z alkoholem etylowym wkłada się zmiażdżone zielone liście. W naczyniu ustawia się pionowo dowolną prostą konstrukcję, do której przymocowana jest bibuła. Rozpuszczalnik (eluent) przemieszcza się (rozwija się) w górę bibuły. Po kilkudziesięciu minutach okazuje się, że pozornie jednorodny chlorofil składa się z chlorofilu A i chlorofilu B. Osadza się on w różnych odstępach czasu (tzw. czasu retencji) na bibule w postaci rozmytych pasków. Położenie paska pozwala zidentyfikować dwa rodzaje zielonego barwnika. Wszystkie wymienione techniki chromatograficzne bazują na tym schemacie. Wynik otrzymuje się na chromatogramie, który ma postać wybarwionego nośnika lub wykresu – ten ostatni sposób jest zdecydowanie bardziej rozpowszechniony. Na wykresie widoczne są piki w osi czasu. Interpretacji – jakościowej i ilościowej – podlega położenie piku oraz jego powierzchnia. Metody chromatograficzne są obecnie często łączone z innymi, dającymi szersze możliwości badawcze, np. ze spektroskopią mas czy spektroskopią w podczerwieni (Witkiewicz i Kałużna-Czaplińska 2017).

Spektrometria mas sprzężona z plazmą wzbudzaną indukcyjnie z mikrobróbkowaniem za odparowania laserowego (ang. *Laser Ablation Induced Coupled Plasma–Mass Spectrometry*, LA-ICP-MS) jest dla warstw barwnych bardzo atrakcyjną metodą badawczą. Mikroskopijne ilości próbki są odparowywane za pomocą lasera, aerozol kierowany jest do plazmy, zjonizowane w niej cząstki kierowane są do spektrometru mas, gdzie ulegają rozdzieleniu i skierowaniu do detektora (Jurowski i Piekoszewski 2015). Metoda znajduje zastosowanie w identyfikacji specyficznych składników pigmentów, w tym ich zanieczyszczeń (Svorová Pawełkowicz i in., 2021).

Prawie wszystkie wymienione powyzej metody badawcze znalazły swój wyraz w urządzeniach przenośnych, umożliwiających wykonywanie analiz *in situ*.

PRZYKŁADY BADAŃ

Badania warstw barwnych i ich składników zastosować można do uzyskania informacji różnej natury, co wykazano w tekście. W szczególności jest to identyfikacja surowców i techniki wykonania malowidła, co w miarę postępu badań nad określonym typem przedmiotów będzie mogło doprowadzić do uzyskania szerokiego kontekstu informacyjnego. Przykładem są badania farb na powierzchniach fragmentów amfor zaliczanych do kręgu scytyjskiego i odkrytych w Chotyńcu (woj. podkarpackie) (Czopek i in., 2021). Na niektórych z tych ułamków zachowały się ornamenty pasowe o barwie czerwonej w odcieniach pomarańczowoczerwonym (większość) i różowoczerwonym, ciemnoczerwonym/brązowym oraz czarnym. Niekiedy zaobserwowano jedynie ślady czerwonej farby w postaci drobnych, punktowych skupień. Fakt ten wyraźnie wskazuje na konieczność uważnej obserwacji powierzchni, także z udziałem lupy oraz unikanie bezrefleksyjnego mycia fragmentów ceramiki. Jedna ze skorup pokryta była cienką warstewką białej, niewapnistej glinki – zdobieniem o charakterze angoby. Badania pozwoliły na identyfikację różnic w mikromorfologii dwóch rodzajów czerwonych farb, w szczególności stopnia ich ziarnistości. Bardziej ziarnista jest farba czerwonoróżowa, za co odpowiadają grudki hematytu. Skład chemiczny tych farb jest niemal taki sam. Ponadto na niektórych naczyniach w farbach – wydawałoby się jednolitych, bo jasnoczerwonych – odkryto obecność wielokrotnego nanoszenia substancji barwiącej o podobnym, choć nie identycznym składzie. Być może były to korekty, wynikające ze warsztatowych „niedoróbek", a może samego naczynia wielokrotnie używano, wskutek czego uległo nieco podniszczeniu – rozwiązanie tych kwestii musi pozostać dalszych obserwacji, w tym archeologicznych. Ważne jest pojawienie się pytań otwierających dalsze obszary badawcze. W aspekcie surowcowym wszystkie omawiane farby wykonane zostały z „glinek" żelazistych o charakterze smektytu lub smektytu/illitu, bogatszych w żelazo niż masa

ceramiczna. W farbie brązowej i czarnej znalazła się ponadto substancja organiczna, wpływająca na redukcję związków żelaza Fe(III) do Fe(II). W niektórych farbach zarejestrowano obecność fosforu i potasu w niewielkich ilościach, ale wyższych niż w podłożu masy ceramicznej. Wskazuje to na możliwość celowego użycia topnika dla ułatwienia spieczenia farby z podłożem. Farby (ze wspomnianym wyżej wyjątkiem) są kryptokrystaliczne i bardzo dobrze przylegają do podłoża – zostały wykonane odrębnie i starannie (Trąbska i in., 2023). Biała glinka zdobiąca powierzchnię jednego z fragmentów z badanego zespołu został przebadany metodą FTIR/ATR (spektroskopia w podczerwieni w technice całkowitego wewnętrznego odbicia, Fourier Transform Infrared/Attenuated Total Reflection spectroscopy). Porównanie kształtu widma (położenia oraz szerokości pasm) z danymi zawartymi w bazach danych i w literaturze wskazuje, że użyto „glinki" niskożelazistej o składzie smektytowym lub smektytowo/illitowym (Trąbska i Szajna 2020). Dzięki temu możemy wyobrazić sobie warsztat garncarski z VII/VI w. p.n.e, umiejscowiony gdzieś w Jonii, gdzie obok garncarza ustawiono glinianie pojemniki z przygotowanymi już farbami.

Na powierzchniach wewnętrznych niektórych naczyń z Chotyńca zaobserwowano obecność białych i szarokremowych naskorupień. Na ogół nie tworzyły one ciągłych warstw, ich grubość była zróżnicowana, co przy oglądzie makroskopowym sugerowało, że są to pozostałości po substancjach wypełniających amfory. Tego rodzaju naskorupienia nierzadko przypominają do złudzenia warstwy barwne, choć na wewnętrznej stronie naczyń ich obecność byłaby nieoczywista. Badania SEM/EDS ujawniły skład chemiczny tych kryptokrystalicznych warstw z zaskakującym wynikiem: wśród związków fosforu i wapnia zidentyfikowano ołów lub srebro. Ich odrębne morfologicznie fazy nie są widoczne przy zastosowanych powiększeniach. Ołów i srebro są znanymi pierwiastkami bakteriobójczymi, pierwszego z nich w postaci węglanu lub octanu tradycyjnie dodawano w starożytności do win dla poprawienia ich smaku (efekt słodzący) i nadania trwałości (Trąbska i in., 2021).

Dla podkreślenia odmienności morfologicznej przy niemal identycznym składzie chemicznym i podobnym mineralnym, warto spojrzeć na całkowicie odmienny obraz warstw malarskich w podszkliwnych malowidłach XVII-wiecznej ceramiki z niektórych warsztatów podkarpackich, zwłaszcza z Miechocina, obecnie dzielnicy Tarnobrzega. Ornamenty namalowane są na podłożu białej lub (rzadziej) ciemnoczerwonej angoby. Składy mineralne angob białych różnią się proporcją składników ilastych i pyłu kwarcowego. Angoby ciemnoczerwone oraz podobnej barwy ornamenty złożone są z drobnoziarnistej żelazistej zendry kowalskiej. Dokładna analiza tych ziaren z zastosowaniem metody SEM/EDS ujawniła różne proporcje krzemianu żelaza i tlenku (lub tlenków) żelaza (ze względu na barwę interpretuje się go jako hematyt lub mieszaninę hematytu i magnetytu, analiza fazowa dałaby ścisłą odpowiedź na pytanie o rodzaj fazy). Farba jasnoczerwona charakteryzuje się odmienną morfologią i składem chemicznym: jest to spieczona kryptokrystaliczna, wysokożelazista „glinka" o składzie smektytu lub smektytu/illitu (Trąbska i Nawrot 2020). Poczynione obserwacje wskazują, że w podkarpackich warsztatach ceramiczno-glazurniczych stosowano starannie przygotowane pigmenty i farby, być może dokonywano zakupu u wyspecjalizowanych sprzedawców. Więcej światła na rozwikłanie zagadnień dystrybucji tych surowców rzucić mogą badania archiwalne.

Badania pigmentów pozwalają na identyfikację fałszerstw, np. „średniowiecznych" miniatur wykonanych przez tzw. Hiszpańskiego Fałszerza, osoby do dziś niezidentyfikowanej. W zakupionych przez jedno z brytyjskich muzeów malowidłach oprócz cynobru, czerni węglowej, bieli i czerwieni ołowiowej oraz indygo – pigmentów i barwnika używanych w wiekach średnich, wykryto współczesne lub prawie współczesne pigmenty: żółcień chromową, zieleń Scheelego, zieleń szmaragdową, syntetyczną ultramarynę. Metody badawcze, które zastosowano w tym przypadku to spektroskopia Ramana (określenie składu fazowego) oraz rentgenowska spektroskopia fluorescencyjna (XRF, określenie składu chemicznego) (Burgio i in. 2009). Jako ciekawostkę nadmienić można, że realizacje malarskie tej tajemniczej postaci same w sobie są już traktowane jak dzieła sztuki i osiągają na rynku kolekcjonerskim wysokie ceny.

W badaniach barwników na tkaninach koptyjskich z IV i V w., które wciąż zachowują żywe barwy, zastosowano następującą procedurę badawczą: obserwację tkanin pod lupą, wstępne analizy rodzaju barwników za pomocą UV-VIS, selekcję prób, pobranie prób, ekstrakcję substancji barwnych za pomocą gorącej kąpieli w określonych odczynnikach chemicznych (zatem metoda wymagała zniszczenia próbki), rozdzielenie składników i ich identyfikację za pomocą metody HPLC (High Performance

Liquid Chromatography). Identyfikację grup barwników zapewniło zastosowanie wzorców; na razie nie ma niestety markerów, które umożliwiałyby rozpoznanie gatunku rośliny. Dzięki tym badaniom zidentyfikowano składniki kraplaka rozpowszechnione w tkaninach starożytnego Egiptu i później stosowane w tradycji rzemieślniczej Koptów: alizarynę, rubiadynę i purpurynę. Obok kraplaka wskazano imitację purpury, mieszaninę, w której skład wchodziła apigenina, luteolina i chryzoeriol, pochodzące prawdopodobnie z mieszaniny kraplaka i indygo lub urzetu (Karapanagiotis i in., 2021). Kwestia wzorców jest kluczowa – laboratorium musi dysponować jak największą ich liczbą. Niemniej jednak identyfikacja nie zawsze jest możliwa, np. w przypadku użycia nieznanego do tej pory „niszowego" barwnika, a także wskutek procesów destrukcji.

Systematyczne badanie malowanych powierzchni z określonego kontekstu rodzi możliwość formułowania wniosków wykraczających poza aspekty technologiczne. Przykładem (jednym z wielu) są badania materiałów malarskich z szeroko pojętego starożytnego Egiptu. Dzięki badaniom serii prób, a nie poprzestawaniu na wynikach pojedynczych analiz, można określić rodzaje substancji malarskich stosowanych dla zdobienia określonej grupy przedmiotów, np. modeli statków (Hühnerfuss i in., 2006). W tym przypadku zastosowano metodę TXRF (Total Reflection X-ray Fluorescence spectroscopy) do analizy nikłej ilości próbki (poniżej 1 μg). W rezultacie uzyskano nie tylko wiedzę o rodzaju substancji barwnych, ale także o ich zróżnicowaniu w czasie. Ten ostatni aspekt pozostaje szczególnie istotny nie tylko dla archeologów, ale także dla historyków sztuki – inicjuje bowiem pytania o zmiany zwyczajów technologicznych i kulturowych. W bieli ołowiowej zastosowanej w podkarpackich ikonach z XV-XVIII w. udowodniono zróżnicowanie tego pigmentu w dwóch grupach: w wiekach XV i XVI oraz XVII i XVIII, a także stwierdzono pochodzenie ołowiu ze źródeł innych niż śląsko-małopolskie. Pomogły w tym badania pierwiastków śladowych metodą INAA (Instrumental Neutron Activation Analysis) (Pańczyk i in., 2006). Badania składników warstw barwnych w aspekcie śledzenia centrów ich pozyskiwania oraz dróg handlowych jest istotnym składnikiem analiz tych substancji. W niektórych przypadkach niewystarczające okazuje się dopasowanie cech charakterystycznych oraz cech surowców pochodzących z określonych źródeł (np. rodzaju pierwiastków śladowych czy rodzaju i koncentracji związków chemicznych w barwnikach). Niejednoznaczność wnioskowania wypływać może z eksploatacji różnych złóż (także upraw) w niewielkim odstępie czasu, słabo uchwytnym w źródłach, mieszaniu półsurowców i gotowych substancji barwiących pochodzących z różnych źródeł (np. Zucchiati i in., 2006). Przykładem badań proweniencyjnych gruntów malarskich, warstw równie ważnych jak warstwa barwna, jest praca dotycząca pochodzenia ikon z XIV-XVI w., znajdujących się w zbiorach Muzeum Narodowego w Krakowie. Na podstawie obserwacji zespołów nanoskamienałości spora część ikon przypisana została surowcowi pochodzącemu z okolic Chełma koło Lublina, pojedynczym – wskazano proweniencję bałkańską lub południowokarpacką oraz prawdopodobnie ze środkowej Rusi (Kędzierski i Kruk 2018).

PODSUMOWANIE (POTENCJAŁ BADAWCZY)

Spektrum zagadnień, jakie może być wyjaśnione całkowicie lub częściowo dzięki badaniom warstw malarskich, w szczególności ich składu oraz technologii wykonania, jest szerokie, czego dowodzą przytoczone powyżej przykłady. W aspekcie badań archeologicznych identyfikacja substancji barwiących oraz innych cech powierzchni barwnej ma na celu rozróżnienie zabarwienia antropogenicznego, naturalnego i korozyjnego (wietrzeniowego) oraz wykrycia przyczyn takiego stanu rzeczy. Gdy w tej kwestii zapadnie jednoznaczna ocena, wtedy informacje na temat cech warstw malarskich pozwalają ocenić autentyczność przedmiotu (problem jest niebanalny w przypadku obiektów znajdujących się od jakiegoś czasu w repozytoriach muzealnych). Kwestia ta dotyczyć może także zabytków pozyskiwanych w trakcie prac wykopaliskowych: sztuka fałszowania (a jest to często umiejętność wysokiej próby) nie jest wynalazkiem współczesności. Następnie przejść można do badań pozostających ściśle w obszarze badawczym: osadzenia uzyskanych rezultatów w kontekście chronologii, kultury, warsztatów malarskich i ich wzajemnych kontaktów. Możliwe jest wykrycie faktu ponownego wykorzystania materiałów malarskich w odmiennych kontekstach czasowych i kulturowych. Identyfikowana jest technologia (np. badania nad najwcześniejszymi procesami przetwarzania pigmentów, tzn. celowym rozdrabnianiem do określonych frakcji czy przepalaniem), pochodzenie surowców, w tym zakres penetracji terenu, zaawansowanie techniki górniczej, miejsca i zakres uprawy roślin barwierskich. Substancje barwiące były zawsze towarami kosztownymi i transportowanymi

na dalekie odległości, stąd podejmowane są próby rekonstrukcji dróg i wskazania ważnych ośrodków handlowych. W niektórych przypadkach możliwe staje się datowanie dzięki wprowadzeniu do obiegu określonego pigmentu lub barwnika. Bardzo ważna staje się możliwość porównania wyników badań z treściami traktatów malarskich i dalsze analizy z tego wynikające. Należy podkreślić, że rozwój metod badawczych w zakresie badań optycznych, fazowych, chemicznych, w tym izotopowych, pozwalający analizować coraz mniejsze próbki, prowadzi do odkrywania nieznanych do tej pory w świecie pigmentów i barwników substancji, czego należy spodziewać się także w przyszłości.

LITERATURA

Bersani, D., Lottici, P.P. 2016. Raman spectroscopy of minerals and mineral pigments in archaeometry. *Journal of Raman Spectroscopy* 47(5): 499–530.

Białecka-Florjańczyk, E., Włostowska, J. 2003. *Chemia organiczna*. Warszawa.

Bolewski, A., Manecki, A. 1993. *Mineralogia szczegółowa*. Warszawa.

Borgard, P., Brun, J-P., Picon, M. (red.) 2005. *L'alun de Méditerranée. Colloque International. Centre Jean Bérard, Centre Camille Jullian*. Naples-Aix-en-Provence.

Burgio, L., Clark, R.J.H., Hark, R.R. 2009. Spectroscopic investigation of modern pigments on purportedly medieval miniatures by the 'Spanish Forger'. *Journal of Raman Spectroscopy* 40(12): 2031–2036.

Buzgar, N., Buzatu, A., Apopei, A-I., Ciotugă, V. 2014. In situ Raman spectroscopy at the Voroneț Monastery (16th century, Romania): New results for blue and green pigments. *Vibrational Spectroscopy* 72: 142–148.

Cennini Cennino. 1933. *Rzecz o malarstwie, czyli książka o sztuce*. Opracowanie Jan Zamoyski, Florencja.

Civici, N., Demko, O., Clark, R.J.H. 2005. Identification of pigments used on late 17th century Albanian icons by total reflection X-ray fluorescence and Raman microscopy. *Journal of Cultural Heritage* 6(2):157–164.

Colombini, M.P., Degano, I., Nevin, A. (red.). 2022. *Analytical chemistry for the study of paintings and the detection of forgeries*. Cham.

Cronyn, J.M. 2005. *The Elements of archaeological conservation*. London-New York.

Czech-Błońska, R., Miśta, E. 2017. Najnowsze wyniki archeometrycznych badań nietypowych paciorków siarczku arsenu znalezionych na wczesnośredniowiecznym cmentarzysku w Bodzi k. Włocławka. *Abstrakt – XVII konferencja Analiza Chemiczna w Ochronie Zabytków*. Warszawa.

Czopek, S., Trybała-Zawiślak, K., Trąbska, J., Trybalska, B., Adamik-Proksa, J., Burghardt, M., Ocadryga-Tokarczyk, E., Tokarczyk,T., Rajpold, W. 2021. The first finding of a Greek amphora from Poland. *Praehistorische Zeitschrift* 96(1): 156–172.

Davison, S., Newton, R.G. 2003. *Conservation and restoration of glass*. London–New York.

Dioskorides, 2000. *De materia medica. Being an herbal with many other medicinal materials: written in Greek in the first century of the common era. A new indexed version in modern English.* Johannesburg.

Długosz-Rygiel, K. 2003. Barwniki stosowane w koptyjskim włókiennictwie. *Studia i Materiały Archeologiczne* 11: 105–139.

Doerner, M. 1975. *Materiały malarskie i ich zastosowanie*. Warszawa.

Drążkowska, A. 2008. *Odzież grobowa w Rzeczypospolitej w XVII i XVIII wieku*. Toruń.

Drobnik, J. 2021. *Historia botaniki farmaceutycznej*. Warszawa.

Dziadur, W., Mikuła, J. 2016. *Mikroskopia elektronowa. Tom II. Mikroskopia skaningowa*. Kraków.

Eastaugh, N., Walsh, V., Chaplin, T., Siddal, R. 2005. *Pigment Compendium. A Dictionary of historical pigments*. Amsterdam-Tokyo.

Feynman, R.P., Leighton, R.B., Sands, M. 2022. *Feynmana wykłady z fizyki. Tom 1.2. Optyka, termodynamika, fale*. Warszawa.

Freestone, I., Meeks, N., Higgit, C. 2007. The Lycurgus Cup – A Roman nanotechnology. *Gold Bulletin* 40: 270–277.

Görlich, A. 2015. *Wielowątkowe piękno. Techniki dekoracyjne tkanin japońskich*. Kraków.

Grabska, S., Kaczmarek, B. 2019. *Kosmetyki kolorowe*, (w:) A. Sionkowska (red.), *Chemia kosmetyczna. Wybrane zagadnienia*. Toruń.

Gronowska, J. 1997. *Podstawy fizykochemii barwników*. Toruń.

Grupa, M. 2012. *Wełniane tekstylia pospólstwa i plebsu gdańskiego (XIV-XVII w.) i ich konserwacja*. Toruń.

Hühnerfuss, H., von Bohlen, A., Kurth, D. 2006. Characterization of pigments and colors used in ancient Egyptian boat models. *Spectrochimica Acta. Part B: Atomic Spectroscopy* 61(10-11): 1224–1228.

Jurowski, K., Piekoszewski, W. 2015. *Spektrometria mas sprzężona z plazmą wzbudzaną indukcyjnie z mikrobróbkowaniem za odparowania laserowego*. Kraków.

Kawano, M., Takeuchi, A., Takahaschi, K., Imazu, S., Minami, T., 2014. Determination of sources of vermilion used in Japanese burial mound of Yayoi and Kofun Periods. *Iron and Steel Institute of Japan International* 54(5): 1155–1158.

Karapanagiotis, J., Abdel-Kareem, O., Kamaterou, P., Mantzouris, D. 2021. Identification of Dyes in Coptic Textiles from the Museum of Faculty of Archaeology, Cairo University. *Heritage* 4: 3147–3156.

Kędzierski, M., Kruk, M.P. 2018. Similarity and provenance of underpainting chalk grounds based on their nannofossils assemblages cluster analysis. *Journal of Cultural Heritage* 34, 13–22.

Komorowska, E., Stanulewicz-Skrzypiec, D. (red.). 2014. *Barwa w języku, literaturze i kulturze*, tomy I – V. Szczecin.

Kvavadze, E., Bar-Yosef, O., Belfer-Cohen, A., Boaretto, E., Jakeli, N., Matskevich, Z., Meshveliani, T. 2009. 30,000-year-old wild flax fibers. *Science* 325(5946): 1359.

Lityńska-Zając, M., Wasylikowa, K. 2005. *Przewodnik do badań archeobotanicznych*. Poznań.

Losos, L. 1991. *Techniki malarskie*. Warszawa.

Lucas, A., Harris, J. 2012. *Ancient Egyptian materials and industries*. New York.

Łapot, W. 2004. *Optyka kryształów dla geologów i gemmologów*. Katowice.

Łapot, W. 2000. *Gemmologia szczegółowa*. Katowice

Łapot, W. 1999. *Gemmologia ogólna*. Katowice.

Manecki, A., Wrzak, J. 2011. *Wzory i obrazy natury ukryte w kamieniu*. Lesko.

Melo, M.J., Nabais, P., Guimarães, M., Araújo, R., Castro, R., Oliveira, M.C., Whitworth, I., 2016. Organic dyes in illuminated manuscripts: a unique cultural and historic record. *Philosophical Transactions of Royal Society A* 374: 20160050. http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2016.0050.

Nowotny, W. 1978. *Technologia zdobienia szkła*. Warszawa.

Ożarowski, A. 1976. *Ziołolecznictwo. Poradnik dla lekarzy*. Warszawa.

Pańczyk, E., Walis, L., Giemza, J. 2006. Application of INAA to identify lead white in icons from the 15th-18th centuries from south-eastern Poland. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 278(2): 527–532.

Paul, A.L.D., Isnard, S., Wawryk, C.M., Erskine, P.D., Echevarria, G., Baker, A.J.M., Kirby, J.K., van der Ent, A, 2021. Intensive cycling of nickel in a New Caledonian Forest dominated by hyperaccumulator trees. *The Plant Journal* 107: 1040–1055.

Pilarz, M. 2012. *Stratygrafia mikropaleontologiczna osadów miocenu obszaru krakowsko-oświęcimskiego*. Rozprawa doktorska obroniona na Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.

Polese, J.-M. 2009. *Fleurs de Méditerranée*. Aix-en-Provance.

Rees-Jones, S.G. 1990. Early experiments in pigment analysis. *Studies in Conservation* 35(2): 93–101.

Rozwadowski A. 2009. *Obrazy z przeszłości. Hermeneutyka sztuki naskalnej*. Poznań.

Schmid-Przewoźna, K. (red.) 2020. *Barwienie metodami naturalnymi. Rośliny barwierskie i ich potencjał*. Poznań.

Schweppe, H., 1997. *Indigo and Woad*, (w:) E. West Fitz-Hugh (red.), *Artists' Pigments. A handbook of their history and characteristics. Volume 3*. New York-Oxford, 81-98.

Schweppe, H., Winter, J., 1997. *Madder and Alizarin*, (w:) E. West Fitz-Hugh (red.), *Artists' Pigments. A handbook of their history and characteristics. Volume 3*. New York-Oxford, 109-142.

Silverstein, R.M., Webster, F.X., Kiemle, D.J. 2007. *Spektroskopowe metody identyfikacji związków organicznych*. Warszawa.

Stawicki, S. 1987. *Papirusy tebańskie. Antyczne źródło wiedzy o technikach artystycznych*. Wrocław-Warszawa-Kraków-Gdańsk-Łódź.

Svorová Pawełkowicz, S., Wagner, B., Kotowski, J., Żukowska, G.Z., Gołębiowska, B., Siuda, R., Jokubauskas, P. 2021. Antimony and nickel impurities in blue and green copper pigments. *Minerals* 11: 1236. https://doi.org/10.3390/min11111236.

Teofil Prezbiter. 2009. *Diversarum Artium Schedula i inne średniowieczne zbiory przepisów o sztukach rozmaitych*. Przekład: S. Kobielus OSB. Tyniec.

Teofrast. 1963. *Teofrast. Pisma filozoficzne i wybrane pisma przyrodnicze*. Przekład: D. Gromska, J. Schnayder. Warszawa.

Trąbska, J. 2021. *Barwny świat pigmentów mineralnych – od prehistorii do wieku XVIII*. Kraków.

Trąbska, J., Ostachowicz, B., Skała, P., Trybalska, B. 2023. Badania archeometryczne fragmentów naczyń toczonych, w tym amfor, ze stanowiska Chotyniec (masy ceramiczne, warstwy barwne, naskorupienia), (w:) S. Czopek (red.), *Raport chotyniecki. Analizy specjalistyczne (badania 2018-2023)*. Rzeszów, 209-320.

Trąbska, J., Trybalska, B. 2017. *The residue filling the lines of ornament*, (w:) T. Płonka, K. Kowalski (red.): *Rusinowo. The symbolic culture of foragers in the Late Palaeolithic and the Early Mesolithic*. Wrocław, 147-161.

Trąbska, J. 2015. *Mikrostrukturalne przesłanki dla oceny pochodzenia i przetworzenia czerwonych surowców żelazistych („ochr") na przykładzie wybranych stanowisk paleolitycznych*. Rzeszów.

Trąbska, J., Nawrot, J. 2020. *Badania archeometryczne półmajoliki z Miechocina*. Maszynopis, Uniwersytet Rzeszowski, Instytut Archeologii.

Trąbska, J., Szajna, W. 2020. *Badania białej „glinki" na powierzchni fragmentu naczynia z zespołu amfor i naczyń toczonych ze stanowiska Chotyniec*. Maszynopis, Uniwersytet Rzeszowski, Instytut Archeologii.

Trąbska, J., Oliva, M., Gaweł, A., Trybalska, B. 2015 (2016). Dolni Vestonice I female grave (DV 3). Red colourants and other components of the burial fil lup and grave floor. *Anthropologica et Praehistorica* 126: 161–178.

Trąbska, J., Trybalska, B, 2014. True and fake red layers on the objects of archaeological and historical context: microscopic observations. *Geology, Geophysics and Environment* 40(2): 241–254.

Tsantini, E., Minami, T., Takahashi, K., Cau Ontiveros, M.A. 2018. Analysis of sulphur isotopes to identify the origin of cinnabar in the Roman wall paintings from Badalona. *Journal of Archaeological Science. Reports* 18: 300–307.

Turnau, I. 1987. *Historia europejskiego włókiennictwa odzieżowego od XIII do XVIII w*. Wrocław-Warszawa-Kraków-Gdańsk-Łódź.

Tuszyńska, W. 1986. *Farbowanie barwnikami naturalnymi*. Warszawa.

Watchman, A.L., David, B., McNiven, I.J., Flood, J.M. 2000. Micro-archaeology of engraved and painted rock surface crusts at Yiwarlarlay (the Lightning Brothers site), Northern Territory, Australia. *Journal of Archaeological Science* 27: 315–325.

Werner, J. 1989. *Podstawy technologii malarstwa i grafiki*. Warszawa-Kraków.

Winter, J., 1997. Gamboge.(w:): E. West Fitz-Hugh. (red.), *Artists' Pigments. A handbook of Their History and Characteristics*. *Volume 3*. New York-Oxford, 143-152.

Witkiewicz, Z., Kałużna-Czaplińska, J. 2017. *Podstawy chromatografii i technik elektromigracyjnych*. Warszawa.

Witruwiusz. 1999. *O architekturze ksiąg dziesięć*. Przekład: K. Kumaniecki. Warszawa.

Zucchiati, A., Bouquillon, A., Katona, I., d'Allessandro, A. 2006. The 'Della Robbia Blue': A case study for the use of cobalt pigments in ceramics during the Italian Renaissance. *Archaeometry* 48(1): 131–152.

Traktaty:

Wyrozumski, J. 1974. Średniowieczne kompendium wiedzy o barwnikach. *Kwartalnik Historii Kultury Materialnej* 22(4): 663–671.

Źródła internetowe:

https://colour-index.com, dostęp: marzec 2023.

https://rruff.info, dostęp: styczeń 2023.

https://sjp.pl, dostęp: kwiecień 2023.

www.mindat.org, dostęp: luty 2023.





Odciski tekstyliów w glinie

Agata Ulanowska, Magdalena Przymorska-Sztuczka

Analiza tekstyliów archeologicznych lub inaczej tekstyliów wykopaliskowych omówiona została w pierwszym tomie *Mikroprzeszłości* przez Marię Cybulską oraz Annę Drążkowską (2021: 387–404). W tym tomie skupiamy się na specyficznej formie zachowania tekstyliów, jaką są ich odciski w glinie.

WPROWADZENIE, PODSTAWOWE TERMINY I DEFINICJE

Termin „tekstylia" pochodzi od łacińskiego słowa *texere* (tkać) i w tradycyjnym znaczeniu odnosi się wyłącznie do wyrobów wytwarzanych technikami tkackimi. Jednak w archeologii włókiennictwa termin ten ma szersze zastosowanie – jest on określeniem generycznym definiującym wszystkie wyroby włókiennicze wykonane z elementów elastycznych przy użyciu rozmaitych technik. Zgodnie z tą definicją tekstyliami są więc same nitki i sznurki oraz wyroby tworzone z użyciem jednego tylko systemu elementów konstrukcyjnych, np. dzianiny, lub z dwóch i więcej systemów konstrukcyjnych, jak tkaniny czy plecionki. Istnieją różne klasyfikacje tekstyliów, których podstawą może być struktura wyrobu, czyli liczba elementów konstrukcyjnych i sposób ich wiązania (por. Emery 1980), lub techniki produkcji, takie jak techniki tworzenia nitek (np. przędzenie), siatek, dzianin i tkanin (por. Seiler-Baldinger 1994). Leksykon polskich terminów włókienniczych obejmujący nazwy etnograficzne i historyczne opracowany został przez Martę Michałowską (2006).

Tekstylia archeologiczne lub tzw. tekstylia wykopaliskowe to pozostałości wyrobów włókienniczych pozyskanych w wyniku eksploracji. Z reguły są to bardzo niewielkie fragmenty o zniszczonych powierzchniach i brzegach, których stan zachowania zależy od warunków klimatycznych i glebowych opisanych w pierwszym tomie *Mikroprzeszłości* (Cybulska i Drążkowska 2021: 388–389). W Europie najczęściej są one znajdowane w kontekstach grobowych, gdzie przetrwaniu sprzyjały warunki ograniczonego dostępu tlenu oraz kontakt z przedmiotami metalowymi; do o wiele rzadszych należą natomiast znaleziska tekstyliów na stanowiskach osadniczych. Trzeba zatem pamiętać, że tekstylia wykopaliskowe reprezentują niewielką tylko próbkę wyrobów włókienniczych używanych przez dawne społeczności.

Istotnym uzupełnieniem naszej wiedzy są negatywowe odciski tekstyliów zachowane w glinie. Ze względu na szczególną formę negatywu utrwalonego w materii nieorganicznej, odciski są nierzadko

DOI: 10.64158/3n7uwrrz1z

jedynymi pozostałościami wyrobów włókienniczych z najdawniejszej przeszłości, zwłaszcza dla okresu neolitu i epoki brązu, z których pochodzi ograniczona liczba tekstyliów wykopaliskowych.

Od okresu neolitu po nowożytność odciski powszechnie występują na ceramice, ale można je też znaleźć na przypadkowo wypalonych obiektach, takich jak np. gliniane plomby stosowane we wczesnych praktykach stemplowania w Grecji epoki brązu. Plomby zabezpieczały dostęp do drzwi pomieszczeń, do skrzyń, naczyń czy koszy w magazynach, a także na podobieństwo bulli autoryzowały dokumenty. Stemplowane obiekty, w tym sznurki i tkaniny, odciskały się na ich spodach, lub w przypadku bulli – w ich wnętrzach (por. Ulanowska 2021). Oprócz gliny odciski tekstyliów znajdowane są okazjonalnie w zaprawie gipsowej, jak np. zachowane na freskach egejskich odciski sznurków, które wyznaczały w mokrym tynku pomocnicze linie proste (Vakirtzi i in. 2018) oraz w ziemi (por. Unruh 2007; Siennicka 2015-2016).

Odciski na ceramice mogą odzwierciedlać techniczny aspekt użycia tekstyliów w produkcji naczyń, czego przykładem są ślady mat, plecionek lub tkanin zachowanych na dnach oraz brzuścach. Służyły one jako podstawki do formowania naczyń, szmatki do wygładzania powierzchni, czy do przenoszenia mokrych jeszcze wyrobów.

Celowe odciskanie tekstyliów mogło pełnić funkcję dekoracyjną: w ceramice kultury sznurowej trójwymiarowa, wizualnie atrakcyjna struktura sznurków oraz łatwość z jaką można było za ich pomocą odciskać ornamenty wykorzystana została do zdobień wybranych powierzchni naczyń (por. Grömer i Kern 2010; Grömer 2023). W polskiej literaturze przedmiotu naczynia z odciskami tekstyliów, bez względu na sposób ich powstania, określane bywają łącznie jako „ceramika tekstylna" (por. Silska 2012: 102; Schaefer-Di Maida 2017: 25; Lasak 2014: 148).

Podsumowując, odciski tekstyliów w glinie dokumentują najrozmaitsze wyroby włókiennicze, takie jak sznurki, maty, plecionki, tkaniny, itp., które używane były w życiu codziennym w odmiennych celach: jako podkładki, produkty do mocowania, obwiązywania, zawieszania, owijania, przechowywania, ale także jako obiekty o walorach dekoracyjnych. Szeroka użyteczność tego typu tekstyliów oraz podobnych wyrobów, jak np. koszyki, maty czy nawet rzemyki, ich wielofunkcyjne zastosowanie oraz częsty związek z innymi rzemiosłami (garncarstwo, metalurgia) lub praktykami gospodarczymi i administracyjnymi (przechowywanie, stemplowanie), znajduje odzwierciedlenie we wspólnym mianie „tekstyliów technicznych".

ZARYS HISTORII BADAŃ NAD ODCISKAMI TEKSTYLIÓW W POLSCE

Analizy odcisków tekstyliów na ceramice pochodzącej z kontekstów wiązanych ze społecznościami neolitycznymi i z epoki brązu, a także porównawcze prace doświadczalne, są prowadzone w Polsce od ok. 25 lat. Należy zaznaczyć, że pierwsze, bardzo ogólne opracowanie fragmentów ceramiki naczyniowej ze śladami tekstyliów pochodzących z obszaru Górnego Śląska, wykonał już w 1927 r. Józef Kostrzewski, ale do około 2000 r. zainteresowanie odciskami było znikome. We wcześniejszych publikacjach traktowano je pobieżnie, ograniczając się często jedynie do krótkiej wzmianki o ich odkryciu, czasem tylko podając splot, ale bez szczegółowych analiz dotyczących średnicy i kierunku skrętu przędzy (np. Ząbkiewicz-Koszańska 1958: 272; Miśkiewicz i Węgrzynowicz 1974: 189). Szerzej omówiła odciski Teresa Łaszczewska w publikacji *Zarys historii włókiennictwa na ziemiach polskich do końca XVIII wieku* (1966), gdzie obok narzędzi i zmineralizowanych resztek tkanin, odciski stanowiły podstawę ogólnej charakterystyki wytwórczości tekstylnej w pradziejach. W latach 90. ubiegłego wieku badania nad odciskami tekstylnymi zaczął rozwijać Andrzej Sikorski w ówczesnym Instytucie Prahistorii UAM (1998: 191; 2000: 271; 2002; 2003; 2010a; 2010b: 49; 2016a; 2016b; 2018; 2021; Michałowski i Sikorski 2005; Kośko i in., 2010). Do grona osób badających tę szczególną formę zachowania zabytków włókienniczych w późniejszych latach dołączyli także inni badacze (por. Podkańska 2012; Silska 2012; Maik 2014; Antosik i Słomska 2014; Kaczmarek 2015, 2023a, 2023b; Schaefer-Di Maida 2017; Słomska-Bolonek 2022).

Badania odcisków tekstyliów opierają się przede wszystkich na ich analizach makro- i mikroskopowych, często wspomaganych przez wykonanie pozytywów w masie plastycznej (Łaszczewska 1966: 33; Sikorski 2000: 191; 2010: 50, 53; Michałowski i Sikorski 2005: 177). Z czasem wprowadzono także do badań metody archeologii eksperymentalnej poprzez wytwarzanie wyrobów tekstylnych z różnych surowców i różnymi technikami, a następnie odciskanie ich w glinie oraz porównywanie uzyskanych negatywów z odciskami na ceramice pradziejowej. Pozwoliło to na znaczne poszerzenie zakresu pozyskiwanych informacji, szczególnie w odniesieniu do dawnych technik produkcji (Podkańska 2012: 207; Sikorski 2016a: 507–508, por.

Ulanowska 2021; 2023). Obecnie, prace doświadczalne są już standardem w badaniach nad odciskami tekstyliów (Sikorski 2010: 53; Kaczmarek 2015: 274; 2023a: 15). Należy jednak nadmienić, że pierwsze eksperymenty w odniesieniu do odcisków sznurowych na ceramice kultury pucharów lejkowatych przeprowadził jeszcze w latach 30. XX w. Władysław Maciejewski z ówczesnego Instytutu Prehistorycznego Uniwersytetu Poznańskiego (Jażdżewski 1936: 250). Tradycja badania negatywów tekstylnych metodami archeologii eksperymentalnej w ośrodku poznańskim ma więc już blisko 90 lat.

W kręgu zainteresowania Agaty Ulanowskiej znajdują się odciski tekstylne pochodzące z obszaru Egei. Nowożytne kopie egejskich pieczęci i stemplowanych plomb, łącznie z wybranymi kopiami ich spodów i przekrojów, zbierane są systematycznie od lat 50. XX w. w ramach monumentalnego przedsięwzięcia jakim jest *Corpus der minoischen und mykenischen Siegel* (CMS), realizowany obecnie na Uniwersytecie w Heidelbergu. Cel CMS to publikacja wszystkich – liczonych w dziesiątkach tysięcy – pieczęci egejskich[1], podczas gdy A. Ulanowska zajmuje się publikacją setek tekstyliów odciśniętych w trakcie praktyk stemplowania (por. baza danych „Textiles and Seals", moduł z odciskami: https://data.textileseals.uw.edu.pl/textile_impressions/search, dostęp 15.06. 2023).

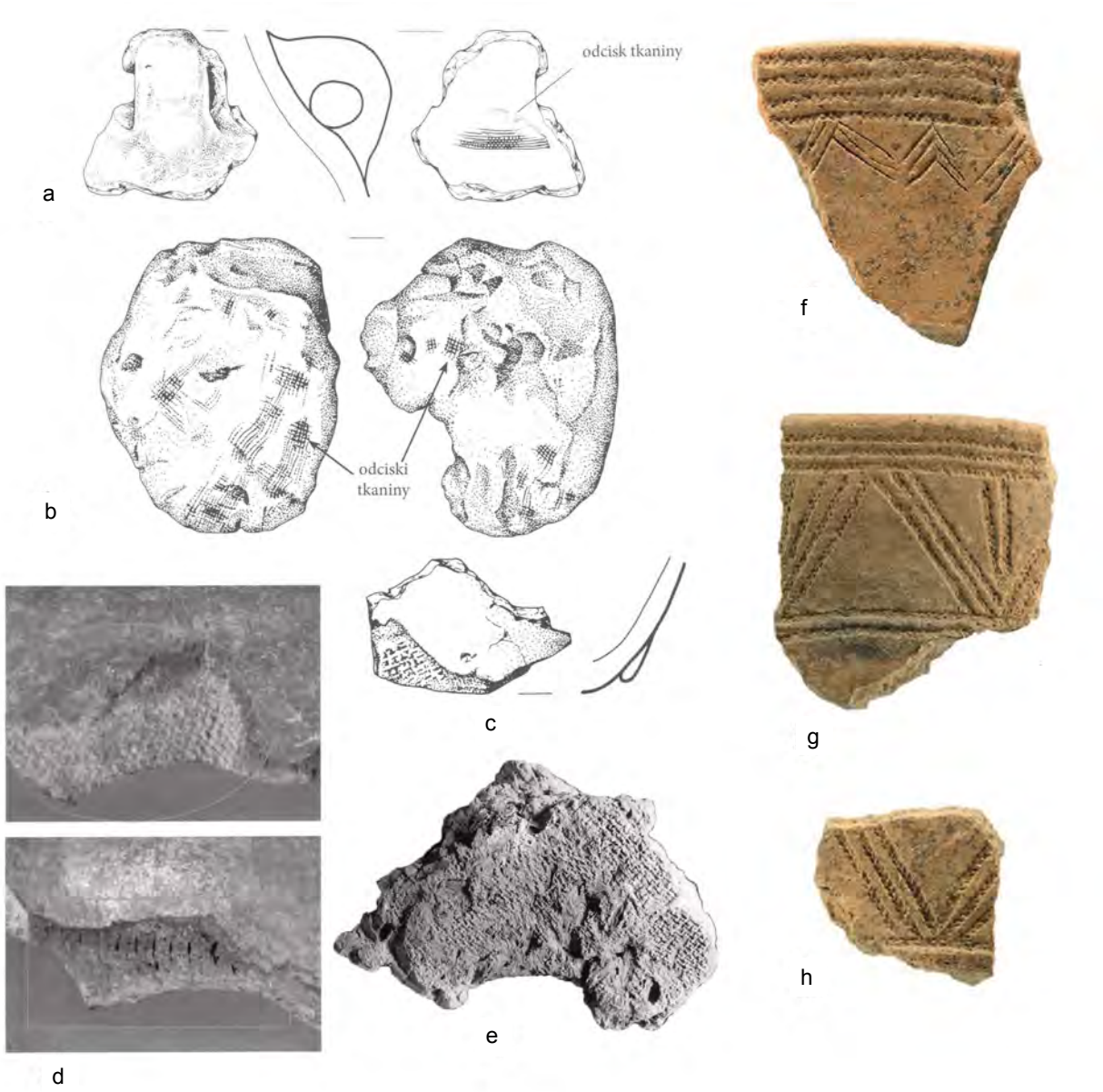
Badania nad relacjami pomiędzy tekstyliami i praktykami stemplowania, ujmowanymi w szerszym spektrum z uwzględnieniem odcisków tekstyliów na glinianych bullach z Anatolii i Mezopotamii oraz ikonografii pieczęci, kontynuowane są przez akcję COST EuroWeb: „Europe through Textiles. Network for an integrated and interdisciplinary Humanities" (CA 19131, https://euroweb.uw.edu.pl/). Nowy projekt badawczy A. Ulanowskiej pt. „Badania odcisków tekstyliów w glinie z III i II tys. p.n.e.: ku zaawansowanym protokołom badawczym i dokumentacyjnym w oparciu o studia przypadków z różnych kontekstów użytkowania tekstyliów" (akronim ExplorTIC, SONATA BIS 13, UMO-2023/50/E/HS3/00094), ma na celu usystematyzowanie metod badawczych oraz wiedzy o użytkowaniu tekstyliów również w oparciu o znaleziska z terenów Polski. Duża liczba nowych danych umożliwi szeroką skalę badań porównawczych oraz uchwycenie długofalowych zmian w technologii włókienniczej. Sukcesywnie zwiększa się też liczba opracowań dotyczących negatywów tekstylnych ze średniowiecza i czasów nowożytnych. Nadal istnieje potrzeba intensyfikacji prac eksperymentalnych, w szczególności powiększenia kolekcji próbek referencyjnych, co pozwoli na metodyczne uszczegółowienie kryteriów rozpoznawania surowców włókienniczych i technik produkcji w oparciu o odciski.

ODCISKI TEKSTYLIÓW W MATERIALE ARCHEOLOGICZNYM Z OBSZARU POLSKI – KRÓTKI PRZEGLĄD

Jednym z najstarszych odcisków tekstylnych z obszarów Polski jest negatyw na wewnętrznej powierzchni naczynia należącego do grupy brzesko-kujawskiej, odkrytego na stanowisku w Brześciu Kujawskim, woj. kujawsko-pomorskie (ryc. 1a, Grygiel 2008: 206). Także z tym ugrupowaniem wiązane są odciski tkaniny wykonane w splocie krzyżowym na fragmencie ceramiki oraz bryle wypalonej gliny z osady w Konarach, także w woj. kujawsko-pomorskim (ryc. 1b, c, Grygiel 2008a: 1184–1185). Z materiałów ceramicznych ze stanowiska grupy pleszowsko-modlnickiej w Krakowie-Nowej Hucie-Cle, woj. małopolskie, pochodzą dwa bardzo dobrze zachowane odciski w dolnej części misy (ryc. 1d, Kaczanowska 2006: 108; Chmielewski 2009: 229, 274, 278). Są to negatywy tkaniny wykonanej w splocie płóciennym 1/1. Kolejne odciski tekstyliów zachowały się na bryłkach polepy i fragmentach naczyń kultury pucharów lejkowatych, odkrytych na stanowisku w Kietlicach, woj. opolskie, Łącku i Radziejowie Kujawskim, woj. kujawsko-pomorskie, Niedźwiedziu, woj. małopolskie (ryc. 1e), Tyńcu Małym, woj. dolnośląskie (Burchard i Lityńska-Zając 2002: 174; Chmielewski 2009: 232, 275), czy też w Mrowinie i Śremie, woj. wielkopolskie (ryc. 1 f-h, Sikorski 2018: 453; 2021: 391).

Na ceramice neolitycznej częściej jednak odkrywane są odciski sznurów niż tkanin. Stanowią one powszechny motyw zdobniczy, m.in. na naczyniach kultury pucharów lejkowatych (Kośko i in. 2010: 18; Sikorski 2021: 412). Ceramika zdobiona odciskami sznura była cechą wspólną społeczności schyłkowego neolitu i wczesnej epoki brązu, co skłoniło archeologów do określania ich wspólnym mianem kultury ceramiki sznurowej. Ornament tekstylny obecny był także w początkowych fazach epoki brązu m.in. na naczyniach wiązanych ze społecznościami unietyckimi (Kłosińska

[1] Pełna lista opublikowanych tomów (CMS I-XIII i CMS Beihefte 1–10) dostępna jest na stronie www Archiwum CMS, obecnie w Heidelbergu: https://www.uni-heidelberg.de/fakultaeten/philosophie/zaw/cms/cmsseries/theseries.html, dostęp 15.06.2023. Liczba odcisków pieczęci oraz plomb znajdujących się w archiwum CMS przekracza obecnie 12 000, wliczając odciski nieopublikowane (Krzyszkowska 2005: 1).



Ryc. 1. Odciski tekstylne na ceramice neolitycznej: a) Brześć Kuj. (za Grygiel 2008a: 254, ryc. 213), b, c) Konary (za Grygiel 2008b: 1206, ryc. 1028-3; 2008b: 1218, ryc. 1040-4), d) Kraków-Cło (za Kaczanowska 2007: 108), e) Niedźwiedź (za Burchard i Lityńska-Zając 2002: 164, fig. 2), f – h) Śrem (za Sikorski 2021: 406, ryc. 10.5)

1997: 46), a także kulturą mierzanowicką i trzciniecką (Skrzyniecka i in., 2022: 228). Ten typ dekoracji na ceramice naczyniowej bywał często traktowany także jako wyróżnik kultury przedłużyckiej (Gedl 1975: 62).

Interesującym zbiorem ok. 600 ułamków, w którym badacze wyróżnili szereg negatywów wyrobów tekstylnych (m.in. tkaniny, sznury, plecionki, siatki), są fragmenty ceramiki naczyniowej z Bruszczewa, woj. wielkopolskie (ryc. 2a, Silska 2012: 102; Podkańska 2012: 208; Schaefer-Di Maida 2017: 24), osady obronnej wiązanej z grupą kościańską kultury unietyckiej (Silska 2012: 237). Liczne fragmenty tzw. ceramiki tekstylnej odkryto także podczas badań archeologicznych osady kultury trzcinieckiej w Szczepidle, woj. wielkopolskie (ryc. 2 b–e, Sikorski 2016a: 503; Skrzyniecka i in., 2022: 228). Odciski tkanin na ułamkach naczyń z wczesnej epoki brązu odkryto także wśród materiałów z badań w Modlnicy i Zielonkach, woj. małopolskie (Bielenin 1957: 52–55; Łaszczewska 1966: 33).

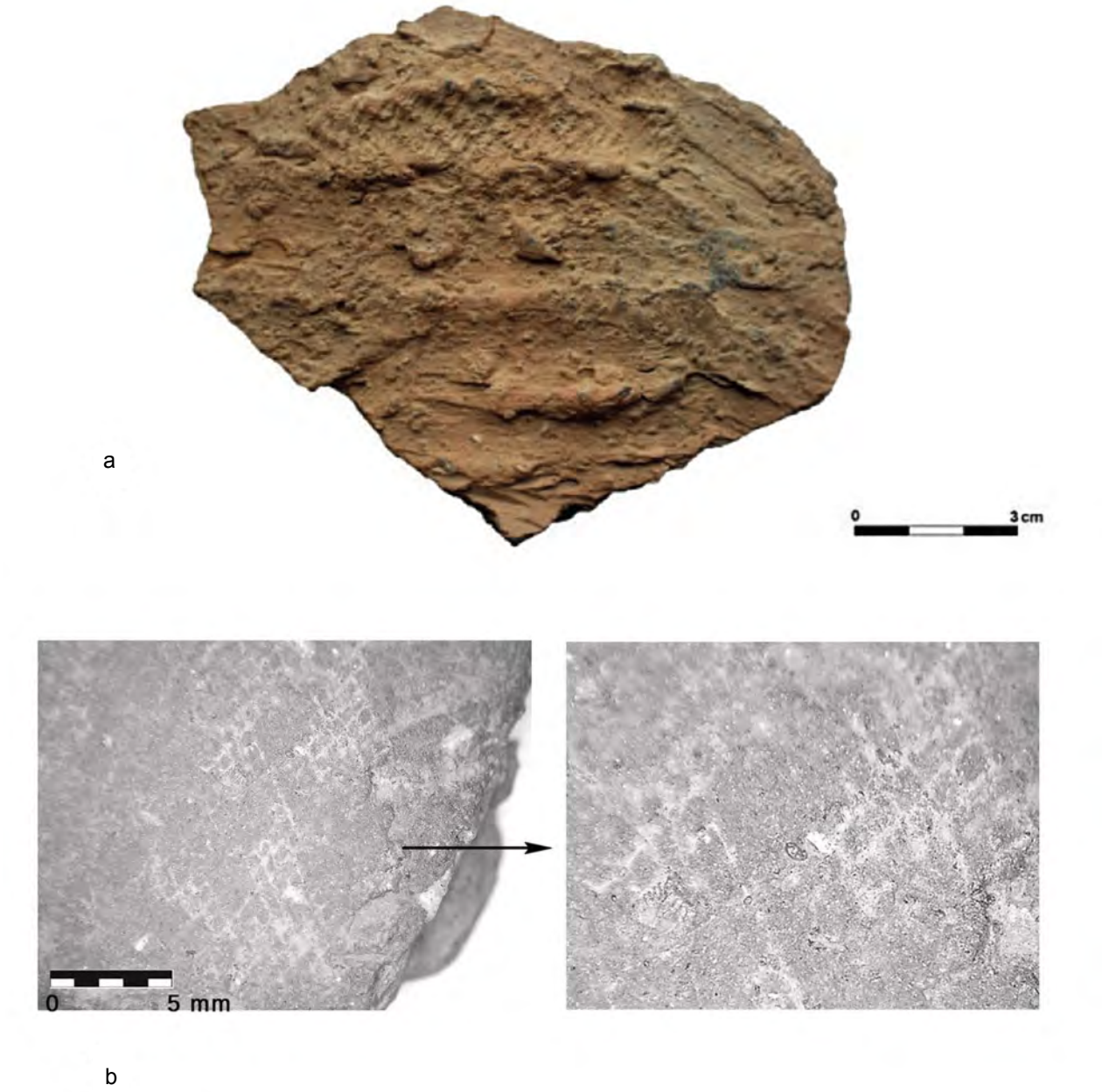
Z późnej epoki brązu i wczesnej epoki żelaza znane są przykłady odcisków tekstyliów, głównie tkanin, na ceramice naczyniowej i przedmiotach związanych



Ryc. 2. Odciski tekstylne na ceramice z wczesnej i środkowej epoki brązu: a) Bruszczewo (za Podkańska 2012: 208, ryc. 119), b – e) Szczepidło (za Skrzyniecka i in., 2022: 238, 241, 242, fig. 5, 11, 12)

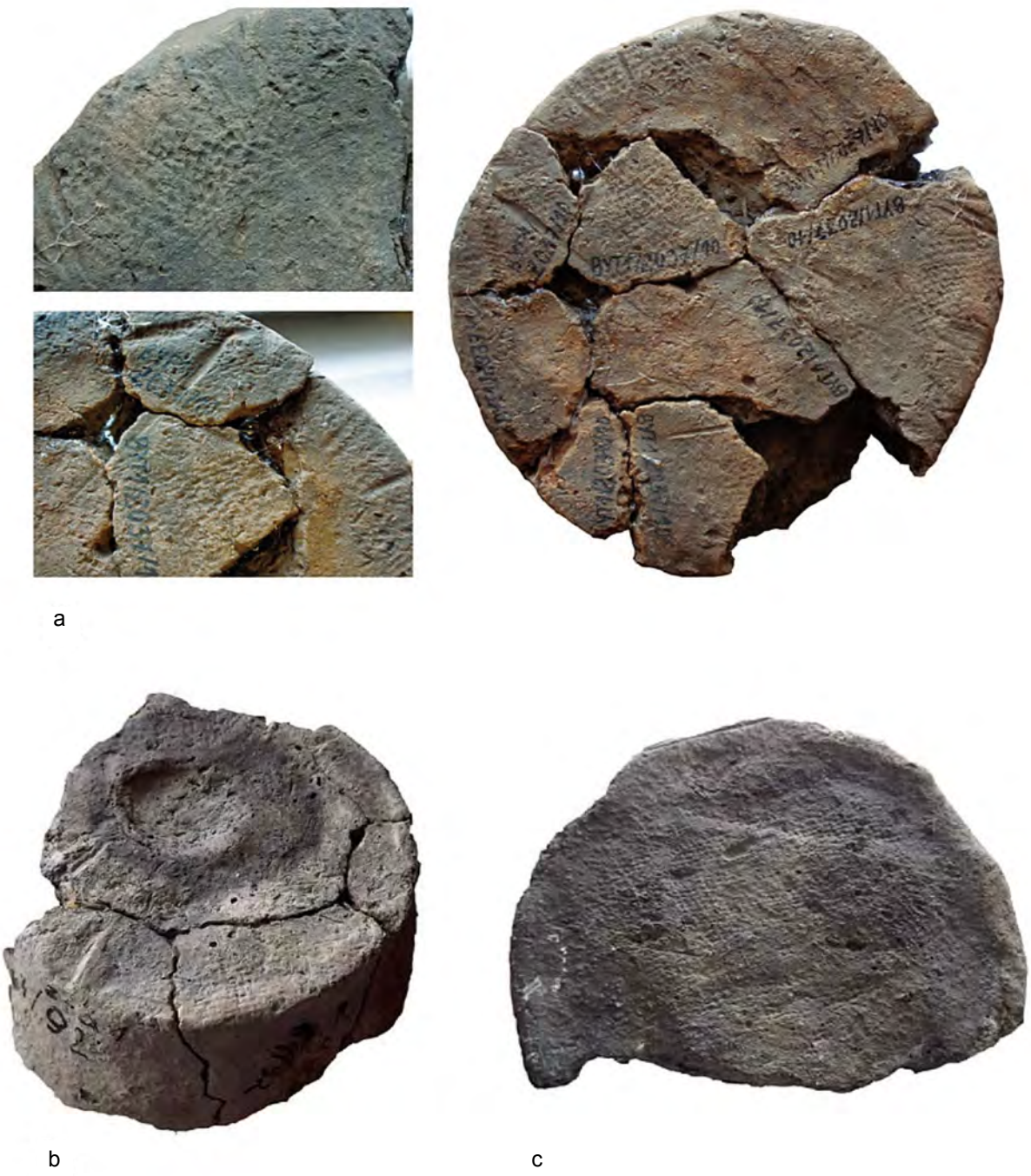
z odlewaniem brązu (tygle i formy), w tym m.in. z Kosina, woj. lubelskie (Miśkiewicz i Węgrzynowicz 1974: 189), Janówka, woj. mazowieckie (ryc. 3a, Słomska-Bolonek 2022), Sługocinka, woj. wielkopolskie (Krzyszowski i Sikorski 2010), Maciejowic, woj. mazowieckie (Maik 2014), Kałdusa, woj. kujawsko-pomorskie (ryc. 3 b, Przymorska-Sztuczka 2022: 108) i Bnina, woj. wielkopolskie (Fogel i Sikorski 2006). Wyjątkowym znaleziskiem wiązanym z kulturą łużycką jest natomiast negatyw tkaniny na paciorku szklanym, odkrytym w grobie ciałopalnym z cmentarzyska w Kietrzu, woj. opolskie. Powstał on podczas procesu kremacji zwłok, gdzie pod wpływem wysokiej temperatury paciorek stał się plastyczny, dzięki czemu odcisnęła się na nim przylegająca do niego tkanina (Łaszczewska 1966: 34). Choć odcisk jest niewielkich rozmiarów (zaledwie 0,5x0,5 cm), to badaczom udało się ustalić, że tkanina wykonana została w splocie płóciennym 1/1, z nici o średnicy ok. 0,3-0,5 mm, wykonanej najprawdopodobniej z surowca roślinnego (Antosik i Słomska 2014: 105–106).

Nader skromny zbiór odcisków tekstyliów datuje się na okres rzymski. Fragmenty z negatywem tkaniny odkryto w inwentarzu ceramicznym kultury przeworskiej w miejscowości Cichmiana, woj. wielkopolskie (Sikorski 2010: 709), a także na fragmencie polepy z Łęgonic, woj. mazowieckie (Liana 1971: 125; 2005: 268) i Otłoczyna, woj. kujawsko-pomorskie (Wiklak 1970: 129) oraz w zbiorze ceramiki kultury wielbarskiej z Ostródy, woj. warmińsko-mazurskie (Antosik i Zawilski 2017: 447).



Ryc. 3. Odciski tekstylne na ceramice z późnej epoki brązu/ wczesnej epoki żelaza: a) Janówek (za Słomska-Bolonek: 2022: 210, ryc. 1), b) Kałdus (za Przymorska-Sztuczka 2022: 109, ryc. 25).

Odciski tekstyliów nie są odkrywane jedynie na ceramice pradziejowej. Liczne ich przykłady znane są także z fragmentów naczyń datowanych na czasy wczesnego i późnego średniowiecza oraz nowożytności, m.in. z miejscowości Góra i Bytkowo, woj. wielkopolskie (ryc. 4a), Lutol Suchy, Nowa Wieś i Zawada (ryc. 4b), woj. lubuskie (por. Sikorski 1998: 191; 2002: 243; 2008: 375; 2014: 269; 2016b: 167). Przy czym należy tu wspomnieć, że negatywy tekstyliów z tych okresów odnajdywane są nie tylko na ceramice naczyniowej, ale także na kaflach piecowych, m.in. z Poznania, woj. wielkopolskie, czy Jarosławia, woj. podkarpackie (Dąbrowska 1987: 190–192; Dębska i in., 2012: 131; Antosik 2010), czy przedmiotach użytkowych, jak np. przęślik z Ostrowa Tumskiego, woj. wielkopolskie (Kępiński i Sikorski 2007: 119) czy wczesnośredniowieczne grzęzidła z Góry, woj. wielkopolskie (Sikorski 2000: 262).

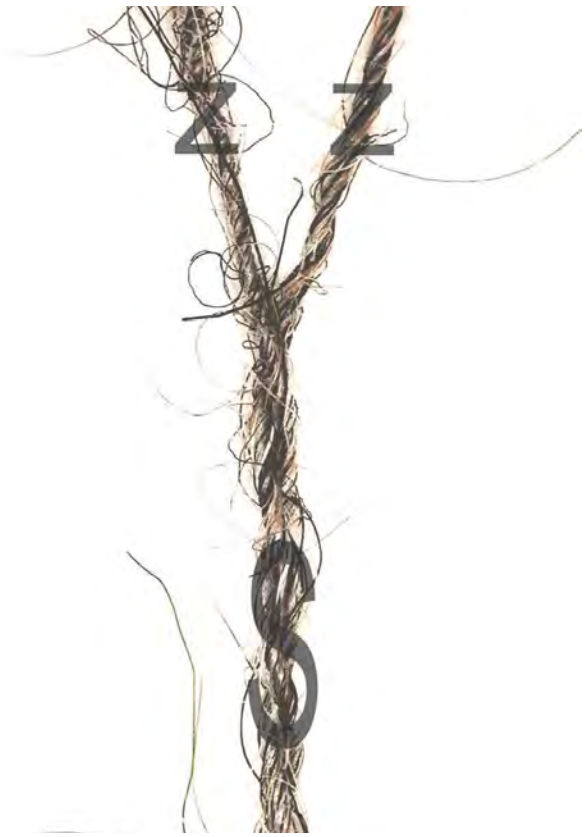


Ryc. 4. Odciski tekstylne na ceramice z wczesnego średniowiecza: a) Bytkowo (za Sikorski 2016: 168, ryc. 1), b, c) Zawada (za Sikorski 2014: 270–271, ryc. 1–2)

NATURA ODCISKÓW I WYZWANIA BADAWCZE

Odciski tekstyliów w glinie, obok zmiany formy, w której elastyczny produkt z surowców organicznych utrwala się w nieorganicznej i nieelastycznej matrycy, zawsze dokumentują negatyw oryginalnego wyrobu. Oznacza to, że niektóre parametry techniczne, jak kierunek skrętu włókien w nitkach czy sznurkach, widoczne są w lustrzanym odbiciu: nitka skręcona w kierunku „s" będzie utrwalona w odcisku jako z-skrętna (ryc. 5, por. poniżej *Analiza techniczna i pomocne narzędzia*). Wykonanie odlewów w silikonie lub odcisków w plastelinie przywraca pozytywowy wygląd odciśniętym

tekstyliom i ułatwia ich analizę techniczną. Odlewy z płynnych silikonów technicznych są dokładne, trwałe i elastyczne, ale ich zdejmowanie wymaga praktyki i łączy się z ryzykiem zniszczenia oryginalnego odcisku. Odciski w plastelinie są tanie, łatwe w wykonaniu i bezpieczniejsze dla zabytków, choć i tu resztki plasteliny mogą zachować się na glinianej powierzchni, a czasem mogą pozostawić po sobie tłusty ślad, jeśli nie zabezpieczymy powierzchni odpowiednimi, łatwo usuwalnymi powłokami. W porównaniu z silikonem technicznym, plastelina utrwala mniej szczegółów mikrostruktury tekstyliów (ryc. 6). Jest ona też bardziej podatna na zniekształcenia i zabrudzenia – do jej lepkiej powierzchni łatwo przyczepiają się pyłki, mikrowłókna i włoski, przez co odciski plastelinowe wymagają szczególnej uwagi w przechowywaniu.



Ryc. 5. Budowa nitki (A. Ulanowska)

Zniekształcenia odciśniętych wyrobów

Utrwalane w odciskach wyroby włókiennicze podlegają zniekształceniom. Skala ich deformacji, podobnie jak ostateczna czytelność odcisku są zależne od szeregu czynników wynikających z właściwości wyrobów i glinianej matrycy, takich jak:

- jakość i wilgotność masy glinianej: im lepsza, bardziej drobnoziarnista masa, tym mniejsze zniekształcenia, im wilgotniejsza lub suchsza glina tym mniejsza czytelność i większe zniekształcenia. Optymalną czytelność zapewnia masa gliniana o elastyczności zbliżonej do miękkiej skóry;
- skurcz gliny w trakcie suszenia i wypału, także zależny od jakości masy ceramicznej;
- elastyczność i twardość surowca włókienniczego oraz technika jego obróbki: mniej elastyczne, twardsze włókna pochodzenia roślinnego, jak łyko czy włókna z roślin o włóknistych łodygach oraz włosie, podlegają mniejszym zniekształceniom niż np. wysoce elastyczna, miękka wełna;
- elastyczność i przestrzenność tekstyliów: wyroby o wysokiej przestrzenności i wyraźnej strukturze pozostawiają czytelniejsze i mniej zniekształcone odciski niż wyroby płaskie i bardziej elastyczne;
- siła z jaką glina naciskała na wyrób i głębokość odcisków (por. Grömer i Kern 2010; Podkańska 2012: 209; Ulanowska 2020; 2021; 2023; Grömer 2023).

Współczesne próby odciskania tekstyliów w glinie dowodzą, że pomiary średnicy odciśniętych nitek mogą być zarówno większe, jak i mniejsze od oryginalnych. W eksperymentach przeprowadzonych przez A. Ulanowską różnica nie przekraczała 33% (2021: 115–118, tab. 1), ale wartość ta, ze względu na wspomnianą powyżej różnorodność czynników wpływających na zniekształcenie wyrobu, powinna stanowić jedynie przybliżony punkt odniesienia. W oparciu o te same eksperymenty, można zasugerować, że deformacje średnicy pojedynczo odciśniętych sznurków czy nitek są mniejsze niż deformacje nitek złączonych w wyrobach.

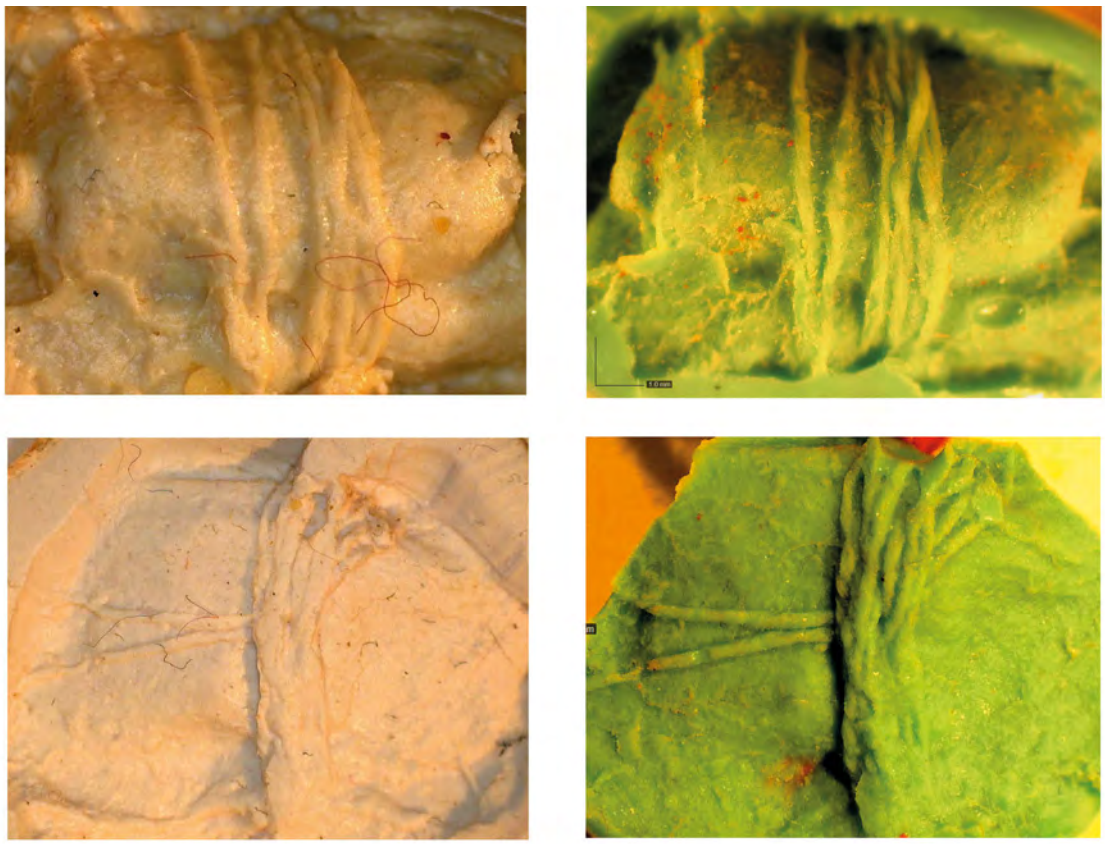
Rozpoznawanie surowców

Kolejne wyzwanie dla badaczek i badaczy stanowi próba identyfikacji surowców włókienniczych w oparciu o odciski tekstyliów (rozpoznawanie surowców w tekstyliach wykopaliskowych omówionow pierwszym tomie *Mikroprzeszłości,* Cybulska i Drążkowska 2021: 396). Dla większości negatywów na ceramice naczyniowej z terenów Polski próby te opierały się na subiektywnych spostrzeżeniach autorów analiz odnoszących się do ogólnego podobieństwa badanego odcisku do wybranego surowca. Jednak często brakuje informacji o tym, z jakich dokładnie surowców wykonywano kopie tekstyliów przeznaczone do eksperymentalnego odciskania (por. Silska 2012: 103; Kaczmarek 2015: 273; Ulanowska 2021: 119–122; Przymorska-Sztuczka 2022: 192). Z reguły mikrostruktura wskazująca na gładkie, relatywnie słabo skręcone

Tabela. 1. Zestawienie pomiarów odcisków negatywowych i pozytywowych na ceramice naczyniowej kultury pucharów lejkowatych z Wenecji (46/01, 64/01) i Wybranowa (6/06, 20/07) oraz na naczyniu kultury ceramiki sznurowej z Jaroszewa (49/09), pow. żniński

Nr inw.	Nr odcisku	Struktura wyrobu	Odcisk negatywowy				Odcisk pozytywowy			
			Skręt	Kąt skrętu	Grubość całego wyrobu	Grubość poszczególnych pasm	Skręt	Kąt skrętu	Grubość całego wyrobu	Grubość poszczególnych pasm
46/01	1	sznur trójdzielny	-	-	2,46	1,35-1,75	-	-	2,84	1,28-1,69
	2	sznur trójdzielny	-	-	3,4	1,58-1,91	-	-	3,37	1,47-1,98
	3	sznur trójdzielny	-	-	4	1,56-2,02	-	-	3,9	1,55-1,99
64/01	1	sznur trójdzielny	-	-	2,8	1,08-1,98	-	-	2,8	0,93-1,97
	2	sznur trójdzielny	-	-	3,28	1,17-1,99	-	-	3,14	0,97-1,94
	3	sznur trójdzielny	-	-	3,8	1,43-1,96	-	-	3,7	1,33-1,97
6/06	1	sznur dwudzielny	Z/2?	-	2,36	1,73-1,84	S/2?	-	1,99	1,43-1,62
	2	sznur dwudzielny	Z/2?	-	2,4	1,83-1,93	S/2?	-	2,2	1,58-1,79
	3	sznur dwudzielny	Z/2?	-	2,5	1,76-1,83	S/2?	-	2,42	1,56-1,80
20/07	1	sznur dwudzielny	Z/2s	-	2,45	1,60-1,64	S/2z	21-31	2,35	1,45-1,57
	2	sznur dwudzielny	Z/2s	-	2,35	1,60-1,67	S/2z	24-34	2,33	1,53-,1,58
49/09	1	sznur dwudzielny	Z/2s	20-22	1,23	0,82-1,23	S/2z	21	1,20	0,85-0,94
	2	sznur dwudzielny	Z/2s	19-22	1,19	0,72-1,12	S/2z	21	1,19	0,66-1,03
	3	sznur dwudzielny	Z/2s	20-23	0,96	0,69-0,89	S/2z	-	1,08	0,65-0,84
	4	sznur dwudzielny	Z/2s	20-23	1,35	0,90-1,25	S/2z	-	1,19	0,72-0,93
	5	sznur dwudzielny	Z/2s	18-21	1,29	0,80-1,22	S/2z	21	1,15	0,79-1,07
	6	sznur dwudzielny	Z/2s	19-22	1,06	0,66-1,04	S/2z	-	1,12	0,72-0,83
	7	sznur dwudzielny	Z/2s	21-23	1,29	0,86-1,23	S/2z	-	1,20	0,86-1,07
	8	sznur dwudzielny	Z/2s	18-21	1,23	0,78-1,04	S/2z	-	1,23	0,72-0,79

włókna i dość dobrze odznaczające się na powierzchni naczynia „ostre" krawędzie wyrobów, identyfikowane są jako odciski tekstyliów wykonanych z surowców roślinnych, np. lnu, pokrzywy, czy też w przypadku wyrobów plecionkarskich, różnych traw (por. Podkańska 2012: 212; Sikorski 2021: 412), rzadziej natomiast wskazuje się na użycie łyka drzew (Sikorski 2016a: 508). Dla negatywów tkanin, surowiec użyty do ich wyrobu oznaczany jest zwykle jako len (Maik 2014: 411; Sikorski 2014: 272). Jeśli chodzi o surowce pochodzenia zwierzęcego najczęściej wskazuje się wełnę owiec, ale także okrywę włosową kóz, a nawet dzikich zwierząt (jelenie, tury,

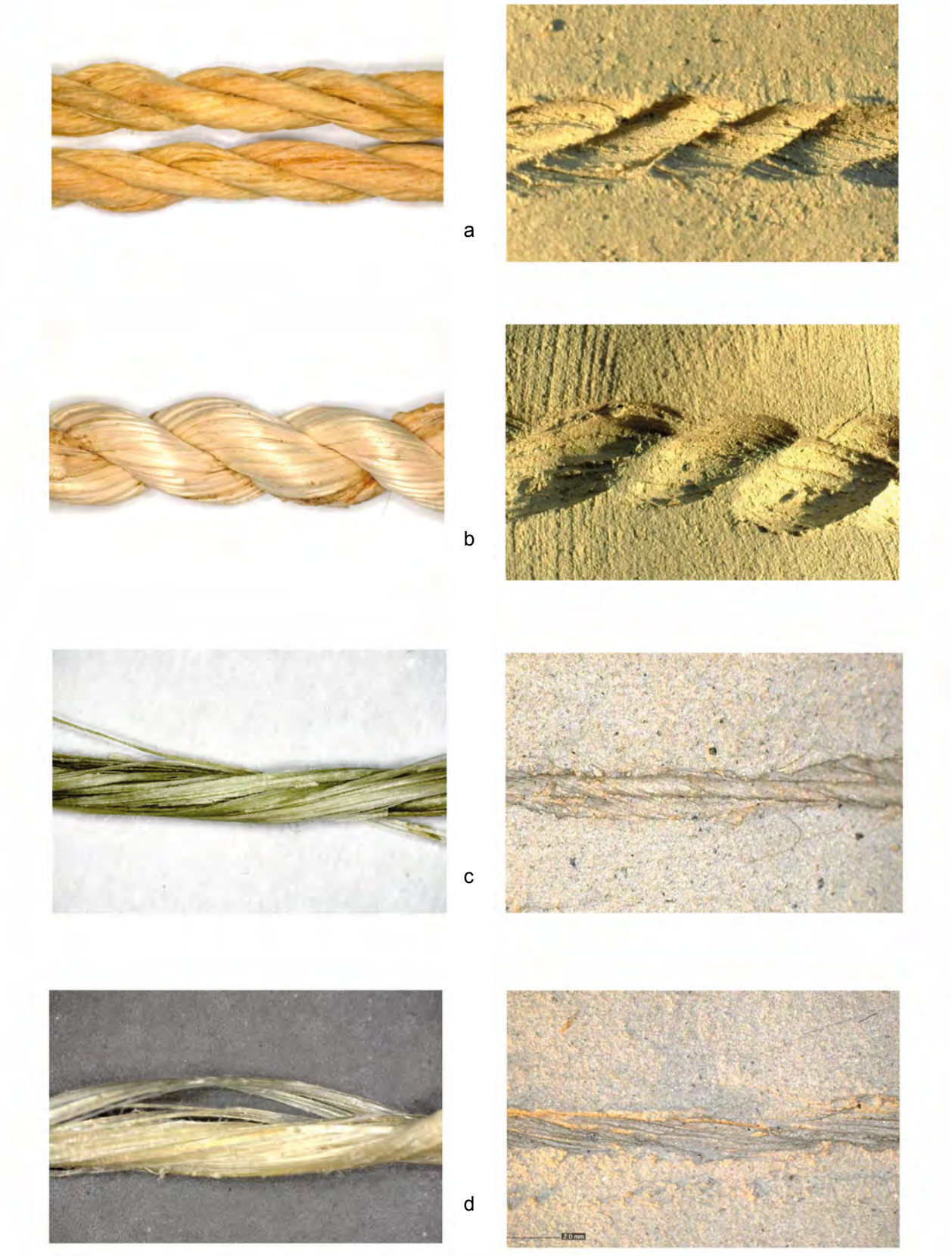


Ryc. 6. Porównanie jakości odcisku w plastelinie i odlewu w silikonie na przykładzie dwóch odcisków stemplowanych "pakietów" z Kato Zakros: KZ 03/02 (góra) i KZ 1144 (dół). Zdjęcia Dino-Lite A. Ulanowska, ©CMS Heidelberg

zające itp., Podkańska 2012: 212). Natomiast w przypadku odcisków tkanin wełnianych czasem przyjmuje się, że pozostawiają one bardziej „miękkie" ślady, tj. o niewyraźnych krawędziach (Maik 2014: 411; Kaczmarek 2015: 264; Przymorska-Sztuczka 2022: 192). W zestawieniach surowców tekstylnych pochodzenia zwierzęcego zwykle pomija się jelita i ścięgna.

W basenie Morza Śródziemnego włókna konopi, lnu, wełna owcy lub kozy, rzemyki, pióra, liście oraz trzciny rozpoznano jako prawdopodobne surowce dla tekstyliów odciśniętych na spodach glinianych plomb znajdowanych m.in. na stanowiskach Arslantepe i Kültepe w Anatolii (Laurito 2007b: 388; Andersson Strand i in., 2017: 90–91). Szerszy repertuar surowców pochodzenia zwierzęcego, takich jak skóry w formie rzemyków i pasków pergaminu, ale także jelita i ścięgna, zaproponowany został przez dwóch specjalistów w dziedzinie gliptyki: Waltera Müllera i Ingo Piniego, jako analogia dla cienkich i grubszych sznurków z glinianych plomb i wnętrz *noduli*, czyli nie plombujących bryłek ostemplowanej gliny pochodzących z Egei, m.in. z Knossos i Pylos (Müller 1997; Müller i Pini 1997). Identyfikacja poparta została szeregiem eksperymentów, w których różne surowce odciskano w glinie, plastelinie i silikonie, a następnie analizowano z użyciem mikroskopu optycznego.

Pomimo rozlicznych prób identyfikacji surowców włókienniczych w oparciu o odciski tekstyliów, kryteria rozpoznawania włókien często pozostają niejasne lub nieścisłe. Z reguły opierają się one na ogólnym podobieństwie mikrostruktury odcisku i określonego surowca. Jednakże liczba dostępnych surowców włókienniczych oraz technik ich przetwarzania, które w istotny sposób wpływały na wygląd włókien, była w przeszłości bardzo duża, co powoduje, że stworzenie miarodajnej bazy referencyjnej jest trudne, jeśli w ogóle możliwe. Ponadto nawet w przypadku dobrze udokumentowanych eksperymentów archeologicznych, nie zawsze wiadomo dlaczego wybrano takie, a nie inne współczesne próbki referencyjne, jak np. konopie dla porównań ze sznurkami z Grecji epoki brązu, ani jak przetworzono surowce z tych próbek: np. mechanicznie czy ręcznie? czy włókna pozyskano w wyniku roszenia, moczenia, czy bezpośrednio z suchej łodygi? Nie wiadomo także jakie cechy włókien zdecydowały o ich finalnej



Ryc. 7. Wybór włókien/wyrobów pochodzenie roślinnego i zwierzęcego w zestawieniu z ich odciskami: a) łyko z lipy, b) pałka szerokolistna, c) pokrzywa, d) ścięgna jelenia. Zdjęcia Dino-Lite A. Ulanowska

identyfikacji: długość włókna? szerokość? określony typ włóknistej mikrostruktury?

Powyższe wątpliwości doprowadziły do stworzenia kolejnej bazy referencyjnej, która uwzględniałaby różnice wynikające ze sposobu pozyskiwania włókien i obejmowała rzadziej wykorzystywane w eksperymentach surowce pochodzenia zwierzęcego, np. jelita i ścięgna (Ulanowska 2021). Współczesne próbki pochodzące z wyboru roślin z włóknistą łodygą (len, pokrzywa), łyka lipowego, niezidentyfikowanych gatunków wikliny, końskiego włosia, włosów kozy, wełny, ścięgien jelenia, jelit świni i barana, wyprawionej skóry wołowej, koziej i sarniej oraz futra sarniego i koziego, były analizowane pod kątem serii wyodrębnionych cech charakterystycznych: ogólnego wyglądu powierzchni, jej mikrostruktury, przekroju, typowych śladów zużycia oraz wyglądu zakończenia włókna (por. Ulanowska 2021: 121, tab. 2). Porównanie tych cech w oglądzie mikroskopowym próbki oraz jej odcisku w glinie dowodzi, że różne typy włókien, w tym włókna pochodzenia roślinnego i zwierzęcego, mogą pozostawiać podobne ślady w glinie (ryc. 7). Ponadto wziąwszy pod uwagę wspomniane wyżej zniekształcenia odcisków, identyfikacja konkretnych włókien w oparciu o ich odciski w glinie jest, w większości przypadków, niemożliwa. Wyjątkiem są surowce o bardzo charakterystycznej budowie i mikrostrukturze, takie jak pióra, witki wikliny, powierzchnie skórzane oraz futra, ale i tu odcisk z reguły nie pozwala na bardziej precyzyjną identyfikację gatunku. Dla pozostałych surowców A. Ulanowska proponuje klasyfikacje opisowe, jak np. „włókna o długich, wąskich pasmach", „włókna o długich, szerokich pasmach", „wiązki pojedynczych długich włókien", czy „wiązki pojedynczych krótkich włókien", które zostały zdefiniowane dla grup surowcowych zidentyfikowanych na odciskach tekstyliów ze spodów glinianych plomb z Egei (https://data.textileseals.uw.edu.pl/textile_impressions/search, dostęp 15.06.2023). W niektórych przypadkach identyfikacja techniki produkcji może, o czym niżej, wskazywać pośrednio na roślinne pochodzenie surowców skategoryzowanych opisowo.

POMOCNE NARZĘDZIA I ANALIZA TECHNICZNA

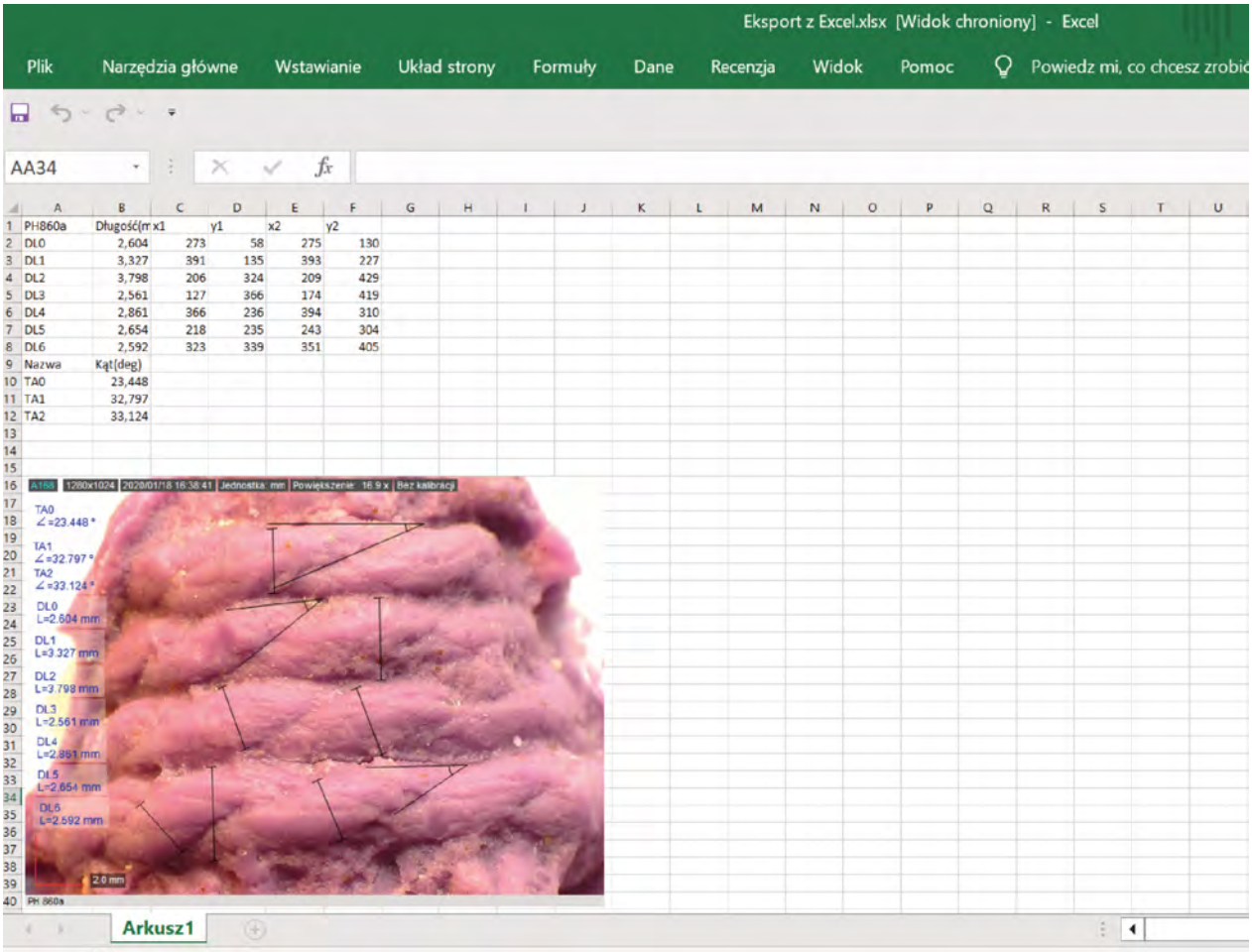
Podobnie jak tekstylia wykopaliskowe, tak i odciski tekstyliów mogą być badane makroskopowo, jednak bardziej szczegółowe informacje dotyczące ich mikrostruktury stają się dostępne dopiero po powiększeniu. Do uzyskania dużych zbliżeń wykorzystać można aparaty fotograficzne z obiektywami makro. Szczególnie obiecującą formą dokumentacji są zdjęcia wykonywane techniką obrazowania z przekształceniem odbicia (ang. *Reflectance transformation imaging*, RTI, por. Frank 2015) – oddają one bardzo dobrze plastyczność odcisków, ale nie pozwalają na precyzyjne zdejmowanie pomiarów. Pozyskiwanie zarówno zdjęć, jak i pomiarów koniecznych w analizie technicznej umożliwia oprogramowanie przenośnych mikroskopów cyfrowych typu Dino-Lite. Ze względu na ich niewielką wagę i rozmiary, szybkość i łatwość podłączenia oraz obsługi, mikroskopy cyfrowe są często wybieranymi urządzeniami, pomimo że jakość zdjęć jest gorsza w porównaniu z aparatami fotograficznymi. Zastosowanie skaningowego mikroskopu elektronowego (Grömer i Kern 2010) oraz skanowania 3D (Ulanowska 2020: „3-D scanning of casts with textile impressions in the CMS Archive Heidelberg", https://textileseals.uw.edu.pl/outreach/, dostęp: 15.06.2023) ma, jak dotąd, charakter eksperymentalny.

Podstawy analizy technicznej

Analiza odcisków tekstylnych jest wykonywana w sposób analogiczny do analizy tekstyliów wykopaliskowych (por. Cybulska i Drążkowska 2021: 396–400). Prowadzona jest od szczegółu do ogółu: poczynając od identyfikacji surowca (por. powyżej), przez analizę pojedynczych elementów konstrukcyjnych, takich jak nitki, identyfikację splotu lub ściegu oraz określenie parametru oddającego gęstość nitek w wyrobie, mierzonego przez liczbę wszystkich nitek w cm^2 powierzchni, po ewentualną dekorację oraz ślady zużycia. W wyrobach zszywanych analizie podlegają także szwy (budowa nitki, typ szwu) oraz, jeśli różne tkaniny czy tekstylia zostały zszyte razem, wszystkie wykorzystane tekstylia osobno.

Pomiary zdejmowane przy użyciu cyfrowych mikroskopów typu Dino-Lite wymagają kalibracji. Wykonuje się ją z użyciem skali kalibracyjnej i funkcji kalibrowania, która, w zależności od modelu mikroskopu, pozwala na mniejszą lub większą automatyzację tego procesu. Stosowanie zdefiniowanych profili kalibracji, które odpowiadają najczęściej używanym powiększeniom zapewnia najwyższą dokładność pomiarów.

W przypadku nitek mierzy się zarówno średnicę, jak i kąt skrętu włókien. Kierunek skrętu, konwencjonalnie określany literami „s" i „z" dla nitek pojedynczych oraz „S" i „Z" dla nitek złożonych (inaczej wielokrotnych), może być rozpoznany makroskopowo (ryc. 5). Jeśli nitki były dwojone lub trojone, mierzy się średnice i kąty skrętu wszystkich pojedynczych nitek oraz ostateczną średnicę i kąt skrętu nitki wielokrotnej. Ponieważ dawne tekstylia wytwarzane były ręcznie i średnica oraz, mierzona przez kąt skrętu, ścisłość z jaką



Ryc. 8. Import pomiarów z mikroskopu typu Dino-Lite do Excel. A. Ulanowska

skręcano włókna mogą się różnić w tej samej nitce, rekomenduje się zdejmowanie serii pomiarów dla każdej nitki. Liczba pomiarów zależy od rozmiaru i stanu zachowania badanego wyrobu, ale dobre praktyki wypracowane przez uczestników akcji EuroWeb CA 191131 zalecają, jeśli to możliwe, pobranie co najmniej pięciu pomiarów z każdego systemu nitek: https://www.youtube.com/watch?v=YUwBW7iZoWg&t=5038s, dostęp: 28.08.2024. W kolejnym etapie analizy, równomierność nitek oraz gęstość splotu w tekstyliach określane są w oparciu o średnią, medianę lub różnicę między pomiarami minimalnymi i maksymalnymi. Kąt skrętu analizuje się w przedziałach: skręt do 10° określany jako bardzo słaby, między 11°-25° jako słaby, między 26°-45° jako średni, a między 46°-90° jako ścisły (por. Gleba i Harris 2018, ryc. 7).

Mikroskopy cyfrowe typu Dino-Lite umożliwiają funkcję eksportu wszystkich pomiarów wraz z dokumentującym je zdjęciem do pliku Excel (ryc. 8). Czyste zdjęcia lub zdjęcia z pomiarami i notatkami, które wprowadza się w ramkach u dołu fotografii, mogą być eksportowane w różnych formatach plików graficznych. Maksymalna rozdzielczość zdjęć zależy od modelu mikroskopu.

Głównym problemem w badaniach odcisków tekstyliów z użyciem mikroskopu cyfrowego pozostaje duża przestrzenność odcisków, utrudniająca uzyskanie na ekranie komputera głębi i równomiernej ostrości. Poprawę głębi umożliwia zastosowanie oświetlenia bocznego, które jeśli zostanie odpowiednio skierowane, wydobywa trójwymiarowość odcisku i może stworzyć iluzję widoku pozytywowego. Na rynku dostępne są specjalistyczne zestawy dwóch lampek bocznych do mikroskopów cyfrowych, ale podobną funkcję pełnią znacznie tańsze lampki USB – należy tylko sprawdzić, czy ich światło nie interferuje z oprogramowaniem mikroskopu. Z doświadczenia autorek wynika, że najlepsze efekty daje zastosowanie światła bocznego kierowanego na badany obiekt z prawego górnego rogu,

pod kątem nie większym niż 45°. Poprawę głębi można uzyskać poprzez zmianę kapturków zakładanych na głowice mikroskopów cyfrowych, których zestaw dołączany jest do urządzeń typu Dino-Lite. Największą głębię daje najdłuższy kapturek, ale jego użycie wyklucza pracę z dużym powiększeniem.

Niektóre z modeli mikroskopów cyfrowych posiadają regulowaną polaryzację. Jest to funkcja bardzo przydatna w badaniach powierzchni błyszczących, w przypadku odcisków tekstyliów istotna tylko przy pracy z ich pozytywami wykonanymi w plastelinie. Przy pracy z nowożytnymi pozytywami w plastelinie i silikonie istotny jest też kolor kopii. Z dostępnego zestawu kolorów płynnego silikonu technicznego, A. Ulanowska rekomenduje kolory zielony i purpurowy/fioletowy. Również w przypadku plasteliny, wybór tych dwóch kolorów polepsza czytelność obrazu uzyskiwanego przez mikroskopy cyfrowe.

Rozpoznawanie technik produkcji

Budowa nitek, sznurków i tekstyliów informuje o technice produkcji, choć przy badaniu wyrobów włókienniczych należy pamiętać, że ten sam typ produktu mógł być wykonany przy użyciu różnych narzędzi, a nawet technik. Na przykład splot płócienny można wypleść na ramie, utkać na krosnach do krajek, jak bardko czy tabliczki, lub na krosnach dużych rozmiarów, takich jak krosno poziome ziemne, ciężarkowe czy dwuwałowe. Rozpoznanie technik produkcji na podstawie odcisków tekstyliów jest trudniejsze w porównaniu do tekstyliów wykopaliskowych, ponieważ obok zmiany stanu zachowania, utracona została możność oglądu wszystkich stron odciśniętych wyrobów. Nieczytelna jest także każda dekoracja, która powstawała przy użyciu różnokolorowych nitek.

W przypadku nitek i sznurków, na technikę produkcji wskazują mikrostruktura włókien, równomierność skrętu oraz liczba pojedynczych elementów konstrukcyjnych. Pasma włókien tworzące cienkie nitki o nierównomiernej średnicy i słabo skręconych, cieńszych odcinkach oraz mocno skręconych zgrubieniach, sugerują technikę splatania (ang. *splicing*, ryc. 9a), która uznawana jest za najstarszą technikę formowania nitek i sznurków z surowców roślinnych, jak np. łyka drzew i włókna ze słabo lub nieprzetworzonych łodyg roślin włóknistych (Gleba i Harris 2018). Identyfikacja techniki splatania pośrednio wskazuje na roślinne pochodzenie włókien. Na badanych odciskach cienkich nitek z datowanych na epokę brązu centrów administracyjnych na Krecie, takich jak Chania, Malia, Aghia Triada czy Kato Zakros, technika splatania najczęściej łączy się z grupą surowcową identyfikowaną jako „włókna o długich, wąskich pasmach" (https://data.textileseals.uw.edu.pl/textile_impressions/search?production_technique=31&min_d_FROM=&min_d_TO=&twist_ang_FROM=&twist_ang_TO=&action=search, dostęp 28.08.2024). Przędzenie sugerują nitki z wiązek krótkich lub dłuższych pojedynczych włókien, bardziej równomiernie skręconych na całej długości nitki (ryc. 9b). Technikę skręcania sugerują sznurki łączone w regularnych, równych skrętach z dwóch pojedynczych elementów (ryc. 9c).

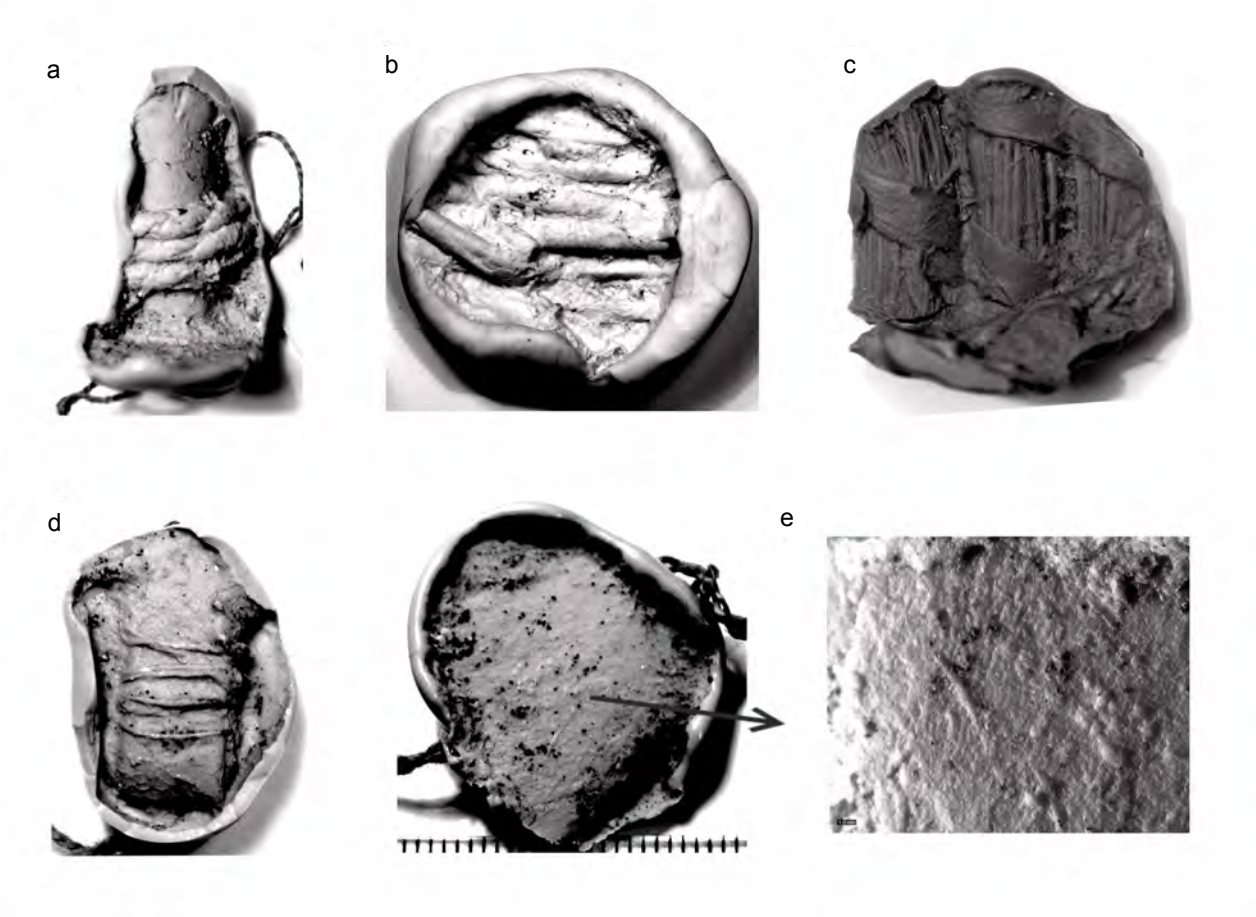
Identyfikacja takich technik, jak tkanie, oplatanie (ang. *twining*), plecenie (np. mat), wyplatanie (np. koszyków), opiera się na analizie liczby i sposobu wiązania elementów konstrukcyjnych (ryc. 10). Rozpoznanie określonej techniki pozwala na lepsze zrozumienie natury, a nawet liczby odciśniętych wyrobów, czego przykładem może być sprang. Technika ta polega na splataniu założonych na ramę nici osnowy przy pomocy palców (Collingwood 1974: 31–32). Charakterystyczną jej cechą jest jednoczesne tworzenie się splotu u góry i u dołu ramy. Wyróżniający dla tej techniki jest więc moment styku obu części wyrobu. W sprangu wykorzystuje się trzy sposoby łączenia ze sobą osnowy: wzajemne skręcenie dwóch nici w kierunku „Z" lub „S", przeplatanie (jak w splocie płóciennym), splatanie z dwóch nici przeplatanych i lekko skręcanych jednocześnie (Collingwood 1974: 31; Michałowska 2006: 368). Powyższe sposoby łączenia osnowy mogą być uzyskane także innymi metodami, np. przy pomocy igły (Collingwood 1974: 34), dlatego też należy zachować ostrożność przy rozpoznawaniu sprangu w tekstyliach wykopaliskowych i ich odciskach w glinie, jeśli nie jest zachowany moment styku. Ponadto przy próbie określania liczby i rodzaju wyrobów, które pozostawiły po sobie negatywy w glinie, trzeba pamiętać o dużej elastyczności sprangu. W zależności od stopnia rozciągnięcia ten sam produkt będzie miał inną liczbę nici na 1 cm oraz inną strukturę (Podkańska 2012: 209; Przymorska-Sztuczka 2022: 38). W związku z tym, jeśli odciski sprangu na jednym zabytku różnią się gęstością, nie musi to wcale oznaczać, że są śladami po różnych wyrobach.

WYBRANE PRZYKŁADY BADAŃ NAD ODCISKAMI TEKSTYLNYMI Z OBSZARU POLSKI

Na potrzeby niniejszej publikacji i w celu zaprezentowania omówionych powyżej podstaw analizy technicznej,

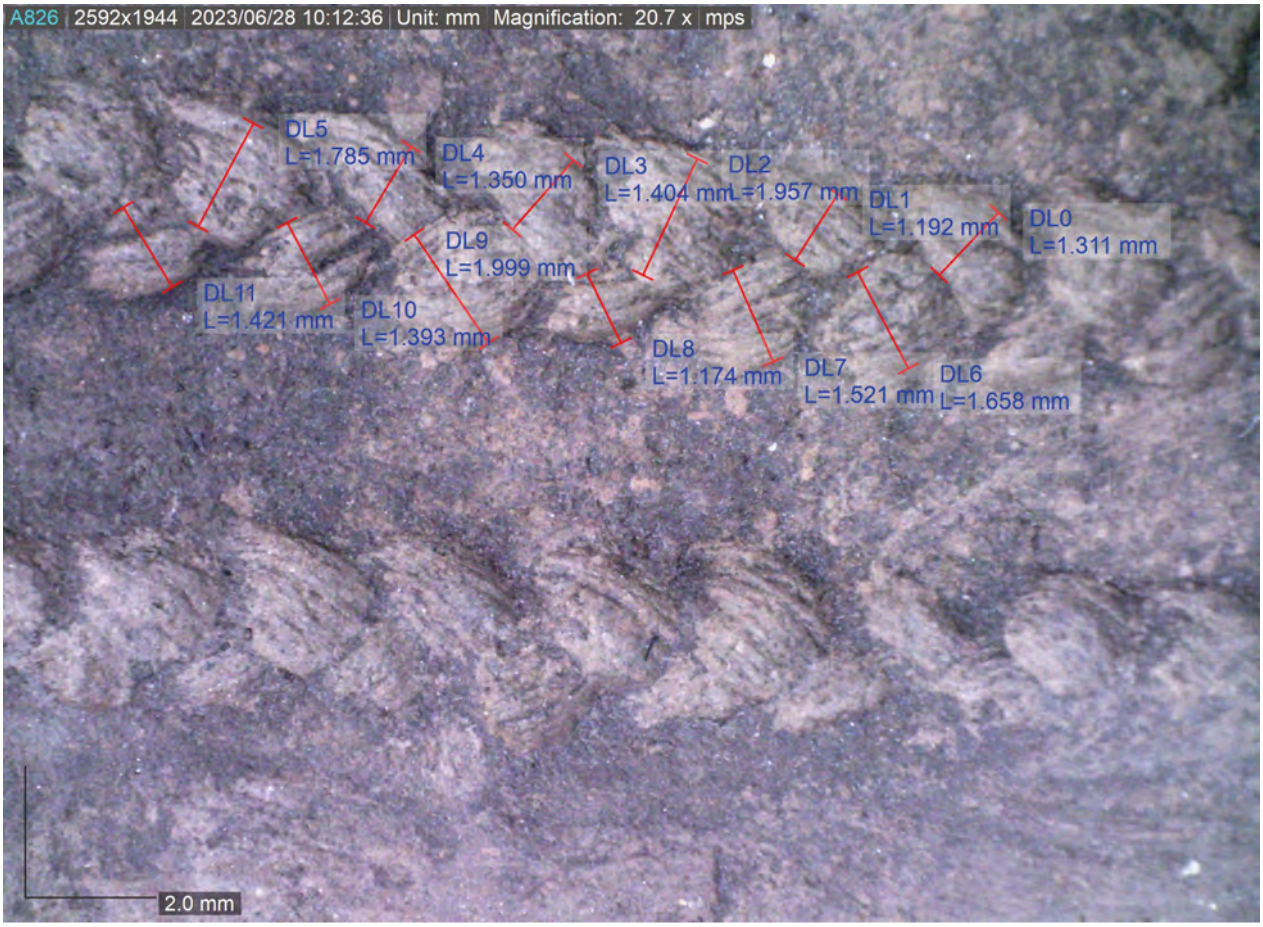


Ryc. 9. Identyfikacja technik wytwarzania nitek i sznurków na odciskach ze spodów glinianych plomb w Grecji: a) możliwe splatanie – AT 516, b) możliwe przędzenie – KZ 1130, c) możliwe skręcanie – PH 704. Zdjęcia Dino-Lite A. Ulanowska, ©CMS Heidelberg



Ryc. 10. Wybór spodów glinianych plomb z Grecji epoki brązu: a) zamknięcie na sznurek i kołek z Fajstos (PH 790), b) wiklinowe zamknięcie naczynia z Lerna (L 4.4394), c) fragment maty z Fajstos (PH 825o), d) przewiązany "pakiet" ze zwitku pergaminu z Agia Triada (AT 516) e) zamknięcie naczynia z fragmentem odciśniętej tkaniny (PH 764). Zdjęcia nie w skali A. Ulanowska, ©CMS Heidelberg

wybrano pięć fragmentów ceramiki naczyniowej z odciskami tekstyliów oraz jedno naczynie zachowane prawie z całości. Cztery fragmenty należały do naczyń społeczności kultury pucharów lejkowatych, które pochodzą z badań przeprowadzonych w 2001 r. na stan. 6 w Wenecji oraz, w latach 2006–2007, na stan. 46 w Wybranowie, oba pow. żniński, woj. kujawsko-pomorskie. Piąty to ułamek ceramiki późnośredniowiecznej, należący do zespołu odkrytego w XIX w. w miejscowości Łączek, pow. kartuski, woj. pomorskie. Wybrane



Ryc. 11. Pomiary grubości pasm odcisku sznura trójdzielnego wykonane na fragmencie ceramiki kultury pucharów lejkowatych z Wenecji, pow. żniński. Zdjęcia Dino-Lite M. Przymorska-Sztuczka

naczynie przynależy natomiast do materiału ceramicznego wiązanego ze schyłkowo neolitycznymi ugrupowaniami kultury ceramiki sznurowej i pochodzi z badań prowadzonych na stan. 27 w Jaroszewie, pow. żniński, woj. kujawsko-pomorskie.

Analizy mikroskopowe przeprowadziła Magdalena Przymorska-Sztuczka przy pomocy mikroskopu Dino Lite Edge model AM7515MZT. Wszystkie pomiary zestawiono w tabeli poniżej (tab. 1). Odciski na dwóch fragmentach ceramiki neolitycznej (nr inw. 46/01 i 64/01, ryc. 11) wykonane zostały przy pomocy trójdzielnego sznura, uplecionego w warkocz charakterystyczny dla zdobnictwa naczyń kultury pucharów lejkowatych. Dwa sznury odciśnięte są równolegle do przebiegu krawędzi naczynia po wewnętrznej stronie przy wylewie, trzeci ułożony jest po skosie pod nimi. Pozostałe dwa odciski wykonano przy pomocy sznura dwudzielnego po stronie zewnętrznej naczynia (nr inw. 6/06 i 20/07). Na jednym ułamku były to trzy odciski ułożone pod skosem, na drugim natomiast zachowały się dwa. Ze względu na niewielkie rozmiary analizowanych fragmentów nie można stwierdzić, czy oryginalnie odciski te znajdowały się w górnej części brzuśca czy też w części przykrawędnej. Najpierw wykonano pomiary negatywów, następnie pozytywów odciśniętych w masie plastycznej.

Na odciskach sznurów trójdzielnych wyraźnie zaznaczona jest struktura włóknista poszczególnych pasm. Występujący w trzech miejscach odcisku delikatny skręt „z", jest raczej wynikiem lekkiego skręcania pasm przy pleceniu warkocza, niż skrętem nadanym włóknom podczas splatania lub przędzenia pasma, ponieważ w innych miejscach włókna w pasmach układają się równolegle. Średnice poszczególnych pasm oscylują między 1,35 a 2,02 mm dla fragmentu o nr 46/01 i od 1,08 do 1,99 mm dla ułamka o nr 64/01 (ryc. 11). Natomiast łączna szerokość odcisków sznurów trójdzielnych zamykała się w przedziale od 2,46 do 4 mm (por. tab. 1). Najmniejszą szerokość miały negatywy znajdujące się najbliżej wylewu,

najwyższą te ułożone pod skosem. Różnice szerokości nie muszą jednak wskazywać na używanie trzech sznurów o różnych średnicach, ale mogą wynikać także z różnej siły z jaką osoba wykonująca zdobienie odciskała sznur, np. chcąc uniknąć zniekształceń wylewu. Nieco odmiennie przedstawiają się wyniki analiz odcisków pozytywowych w masie plastycznej. Pomiary wykonane na pozytywach dały nieco niższe wyniki niż ich negatywowe odpowiedniki (poza dwoma przypadkami, por. tab. 1), jednak różnice te sięgały maksymalnie do 15% wartości. Struktura włóknista poszczególnych pasm była lepiej widoczna na ceramice niż na pozytywie wykonanym w masie plastycznej.

Na pozostałych dwóch fragmentach naczyń ceramicznych widoczne są natomiast z-skrętne odciski sznura dwudzielnego. Średnice sznurów na obu ułamkach zawierają się w przedziale między 2,36 a 2,5 mm, natomiast dla poszczególnych pasm są to wartości od 1,6 do 1,93 mm (por. tab. 1). Wartości te są więc dość spójne. Na odciskach niewidoczny jest skręt poszczególnych włókien. Również i w tym przypadku wyniki pomiarów wykonanych na pozytywach odciśniętych w masie plastycznej dają nieco niższe wartości. Łączne średnice sznurów dwudzielnych miały wartości od 1,99 do 2,42 mm, dla poszczególnych pasm był to przedział między 1,43 a 1,8. Dobrze widoczny skręt poszczególnych pasm widoczny był jedynie na odcisku pozytywowym z fragmentu nr 20/07 (ryc. 12), gdzie oryginalny sznur wykonany został w skręcie S/2z. Kąt skrętu pasm wyniósł od 21° do 34°. Dobrze widoczne poszczególne długie włókna mogą sugerować użycie roślin włóknistych do wyrobu sznura.

Zachowane prawie w całości naczynie przekazane do analizy to pucharek o wysokości ok. 8 cm (nr inw. 49/09, ryc. 13). Ornament w postaci ośmiu dookolnie biegnących odcisków sznura dwudzielnego umieszczony jest na szyjce naczynia. Wszystkie odciski posiadają skręt „z". W niektórych miejscach negatywów widoczna jest struktura włóknista z widocznym skrętem „s". Zatem odcisk Z/2s na naczyniu stanowi negatyw sznura w skręcie S/2z. Odciski miały średnią grubość od 0,96 do 1,35 mm, natomiast wartości dla poszczególnych pasm oscylowały w granicach pomiędzy od 0,66 do 1,23 mm (por. tab. 1). Kąt skrętu natomiast zawierał się pomiędzy 18° a 23°, tak więc był on stosunkowy niewielki. Pomiary pozytywowe wykonane na odciskach w masie plastycznej również w tym przypadku były nieco niższe. Średnia grubość sznura wyniosła od 1,08 do 1,23 mm, a grubości poszczególnych pasm zamykały się między 0,65 a 1,07 mm. Kąt skrętu w masie plastycznej był jednak mniej widoczny niż na fragmencie ceramiki, dlatego też udało się go zmierzyć jedynie dla trzech odcisków pozytywowych – wyniósł 21°.

Analizowany negatyw odcisku tkaniny o wielkości 1,5x2 cm, znajduje się na wewnętrznej powierzchni naczynia późnośredniowiecznego odkrytego w miejscowości Łączek (zbiory Muzeum Okręgowego w Toruniu, ryc. 14). Odciśnięta tkanina utkana została w splocie płóciennym 1/1. Ze względu na dobrze widoczne, indywidualne długie włókna, jest prawdopodobne, że wykonano ją z surowców roślinnych, nie można jednak określić czy były to włókna lniane, konopne czy pokrzywowe. Dla opisu budowy tkaniny wyróżniono system 1. oraz system 2., ze względu na brak cech umożliwiających identyfikację wątku i osnowy. Gęstość nici na 1 cm w negatywie wyniosła ok. 11 nitek w systemie 1. oraz 7 w systemie 2. Odciski nici w systemie 1. miały zróżnicowaną średnicę od 0,5 do 0,9 mm. Negatyw nici w systemie 2. odcisnął się słabiej, wydaje się, że jego średnica oscylowała pomiędzy 0,7 a 1 mm. Kierunek skrętu odcisku przędzy w systemie 1. to „z", natomiast w systemie 2 „s", a więc oryginalna tkanina, która pozostawiła analizowany ślad, musiała być wykonana z nici s-skrętnych w systemie 1. oraz z-skrętnych w systemie 2. Kąt skrętu dla przędzy obu układów nieco się różnił. Dla systemu 1. wynosił 26° do 28°, dla systemu 2. był mniejszy i wyniósł ok. 20° do 22°. Z pewną ostrożnością można więc założyć, że cieńsze i mocniej skręcone nici systemu 1. mogły stanowić osnowę, natomiast nieco grubsze i słabiej skręcone nici systemu 2. były nićmi wątku. Odcisku w masie plastycznej nie wykonano.

ZNACZENIE TEKSTYLIÓW JAKO ŹRÓDEŁ WIEDZY O DAWNYCH SPOŁECZNOŚCIACH

Analiza techniczna tekstyliów jest tylko jednym z elementów badań nad dawnym włókiennictwem. Pozostałości tekstyliów są zwykle nieliczne i przez to niewystarczające dla pełnego zrozumienia społeczno-ekonomicznej roli włókiennictwa w dawnych gospodarkach i uchwycenia innowacji, kierunków wpływów i zapożyczeń, trybów organizacji produkcji, w tym specjalizacji, itp. Dlatego archeologia włókiennictwa stosuje podejście multidyscyplinarne, w którym obok tekstyliów wykorzystywane są wszystkie dostępne źródła wiedzy, takie jak pozostałości narzędzi, warsztatów/pracowni, źródła paleośrodowiskowe, pisane i ikonograficzne, oraz właściwe dla odmiennych typów źródeł metody badań.

Pozostałości tekstyliów i ich odcisków w glinie są jednak szczególnie ważne, ponieważ to one dostarczają



Ryc. 12. Pomiary grubości sznura dwudzielnego na fragmencie ceramiki kultury pucharów lejkowatych z Wybranowa, pow. żniński, wykonane na odcisku pozytywowym w masie plastycznej. Zdjęcia Dino-Lite M. Przymorska-Sztuczka

bezpośrednich informacji o wykorzystywanych surowcach i sposobach ich przetwarzania, konkretnych technikach włókienniczych, poziomie technicznym wytwórstwa i ewentualnej specjalizacji rzemieślniczej, oraz o warunkowanych przez kulturę preferencji estetycznych dla określonych rodzajów surowców i wyrobów. Wszystkie te informacje umożliwiają zdefiniowanie „kultury włókienniczej" charakteryzującej dawne społeczności (por. Harris 2012; Gleba 2017).

Dysponując liczebnymi zbiorami danych (tzw. „big data"), możliwe staje się również prześledzenie innowacji w technologii włókienniczej, w tym zmian w wyborze wykorzystywanych surowców. Dobrym przykładem takich możliwości są wspomniane już badania nad odciskami ze spodów glinianych plomb z Egei. Opublikowany przez A. Ulanowską zespół 769 nowożytnych kopii glinianych plomb z odciskami, po raz pierwszy pozwolił na uchwycenie zmian w parametrach technicznych i wyborze wyrobów włókienniczych, stosowanych w praktykach stemplowania z różnych stanowisk z epoki brązu (Ulanowska 2020, 2021; https://data.textileseals.uw.edu.pl/textile_impressions/search, dostęp: 15.06.2023. Odciski z plomb dostarczyły również wiedzy o technikach wytwórczych nieznanych ze znalezisk tekstyliów wykopaliskowych, takich jak splatanie czy plecenie ozdobnych nitek.

Z obszarów Polski największym, jak dotąd, przeanalizowanym zbiorem odcisków tekstyliów jest zespół ponad 600 fragmentów ceramiki z Bruszczewa, kulturowo przynależących do ugrupowań unietyckich. Analizy tego materiału pozwoliły na wyróżnienie dużej liczby wyrobów tekstylnych wykonanych przy pomocy rozmaitych technik. Autorki badań M. Podkańska (2012) oraz S. Schaefer-Di Maida (2017) rozróżniły w badanym zbiorze odciski tkanin o splocie płóciennym i jego pochodnych, skośnym, a także tkaniny o splotach wzorzystych z motywami rombów i zygzaków, z dodatkowym wątkiem, różnego rodzaju frędzle i siatki, w tym sprang. Dzięki analizom przeprowadzonym na tak dużym zespole odcisków, znacząco wzrosła



Ryc. 13. Naczynie z ornamentem sznurowym z Jaroszewa, pow. żniński. M. Przymorska-Sztuczka



Ryc. 14. Fragment ceramiki późnośredniowiecznej z odciskiem tkaniny z Łączka, pow. kartuski. W. Ochotny

wiedza o różnorodności technik włókienniczych znanych we wczesnej epoce brązu.

PODSUMOWANIE

Odciski tekstylne znajdujące się na przedmiotach glinianych stanowią wartościową kategorię źródeł w badaniach nad dawnym włókiennictwem. Dla niektórych okresów, w szczególności neolitu i wczesnych faz epoki brązu na ziemiach polskich, stanowią one główne źródło wiedzy o wyrobach i technikach włókienniczych. Ponadto, dostarczają informacji o różnorodnych kontekstach użytkowania tekstyliów, np. w relacji z innymi rzemiosłami, jak przy produkcji ceramiki i w metalurgii, czy też w praktykach magazynowania i stemplowania, jak np. w basenie Morza Śródziemnego. Ornamenty z odciśniętych wyrobów włókienniczych, głównie sznurów, informują o walorach estetycznych i zapewne symbolicznych tych tekstyliów. Jednakże odciski tekstyliów w glinie dopiero niedawno zwróciły uważniejszą uwagę archeologów. Pełne wykorzystanie potencjału badawczego tej grupy zabytków wymaga ujednolicenia metodologii, w tym metod eksperymentalnych oraz intensywnych i porównywalnych publikacji indywidulanych odcisków. Pozwoliłoby to na przeprowadzenie analiz ilościowych i statystycznych oraz uchwycenie ewentualnych zmian i innowacji we włókiennictwie na poziomie lokalnym i regionalnym w kontekście tzw. długiego trwania, czyli długiej perspektywie czasu. Częściowe wypełnienie tej luki badawczej stanowi cel wspomnianego wyżej projektu „Badania odcisków tekstyliów w glinie z III i II tys. p.n.e.: ku zaawansowanym protokołom badawczym i dokumentacyjnym w oparciu o studia przypadków z różnych kontekstów użytkowania tekstyliów" oraz jeden z celów nowego projektu współkierowanego przez A. Ulanowską pt. „TEXTile digitisAtlon tooLs and mEthodS for cultural heritage", akronim TEXTaiLES, 101158328, realizowanego w ramach programu Horyzont Europa. Oba będą realizowane w latach 2024–2027.

PODZIĘKOWANIA

Za udostępnienie do badań fragmentów naczyń ceramicznych z odciskami z Jaroszewa, Wenecji i Wybranowa autorki dziękują serdecznie Sz. Nowaczykowi z Muzeum Archeologicznego w Biskupinie. Podziękowania należą się również M. Sosnowskiemu z Wdeckiego Parku Krajobrazowego za udostępnienie do analiz fragmentu ceramiki późnośredniowiecznej z miejscowości Łączek. Dostęp do kolekcji CMS w Heidelbergu był możliwy dzięki uprzejmości dyrektora Archwium CMS, prof. Diamantisa Panagiatopoulosa.

LITERATURA

Andersson Strand, E., Breniquet, C., Michel, C. 2017. Textile imprints on bullae from Kültepe, (w:) F. Kulakoğlu, G. Barjamovic (red.), *Movements, resources, interaction. Proceedings of the 2nd Kültepe International Meeting 26–30 July 2015, Studies dedicated to Klass Veenhof*. Turnhout, 87–104.

Antosik, Ł. 2010. Odcisk tekstylny z fragmentu kafla znalezionego w Jarosławiu. *Rocznik Przemyski* 46(2): 131–134.

Antosik, Ł., Słomska, J. 2014. Tekstylia z okresu halsztackiego z terenu Opolszczyzny. *Opolski Rocznik Muzealny* 20: 103–109.

Antosik, Ł., Zawilski, P. 2017. Odciski wyrobów włókienniczych na naczyniu kultury wielbarskiej pochodzącym ze stanowiska XXV w Ostródzie, woj. warmińsko-mazurskie, (w:) A. Marciniak-Kajzer, A. Andrzejewski, A. Golański, S. Rzepecki, M. Wąs (red.), *Nie tylko krzemienie. Not only flints. Studia ofiarowane prof. Lucynie Domańskiej w 45-lecie pracy naukowej i w 70 rocznicę urodzin*. Łódź, 447–450.

Bielenin, K. 1957. Osady z wczesnej epoki brązu w Modlnicy i Zielonkach w pow. Kraków. *Sprawozdania Archeologiczne* 4: 49–56.

Burchard, B., Lityńska-Zając, M. 2022. Plant remains from a Funnel Beaker Culture site at Niedźwiedź, Słomniki commune, Małopolska province. *Acta Paleobotanica* 42/2: 171–176.

Chmielewski, T.J. 2009. *Po nitce do kłębka… O przędzalnictwie i tkactwie młodszej epoki kamienia w Europie Środkowej*. Warszawa.

Collingwood, P. 1974. *The Techniques of Sprang*, New York.

Cybulska, M., Drążkowska, A. 2021. Tekstylia, (w:) A. Kurzawska, I. Sobkowiak-Tabaka (red.), *Mikroprzeszłość. Badania specjalistyczne w archeologii*. Poznań, 387–405.

Dąbrowska, M. 1987. *Kafle i piece kaflowe w Polsce do końca XVIII wieku*. Wrocław-Warszawa-Kraków-Gdańsk-Łódź.

Dąbrowski, J., Mogielnicka-Urban M. 2014. *Zespół osadniczy kultury łużyckiej w Maciejowicach, pow. garwoliński, woj. mazowieckie*. Warszawa.

Dębska, I., Poklewska-Koziełł, M., Sikorski, A. 2012. Odciski tkanin na ceramice budowlanej i kaflach z badań przy ul. Posadzego 5, (w:) H. Kóčka-Krenz (red.), *Poznań we wczesnym średniowieczu* 8: 131–145.

Emery, I. 1980. *The Primary Structures of Fabric*. Waszyngton.

Fogel, J., Sikorski, A. 2006. Odciski tekstyliów na glinianych przyborach odlewniczych z osady ludności kultury łużyckiej w Bninie (pow. poznański, woj. wielkopolskie), stan. 2b. *Sprawozdania Archeologiczne* 58: 512–518.

Frank, E. 2015. Lights, camera, archaeology: Documenting archaeological textile impressions with reflectance

transformation imaging (RTI), (w:) A. Getts, E. Shaefer, C. Zaret (red.), *The textile speciality group postprints. Papers delivered at the textile subgroup session, American Institute for Conservation of Historic & Artistic Works, 43rd Annual Meeting – Textiles Specialty Group, May 2015*. Textile Speciality Group Postprints 25, 11–42.

Gedl, M. 1975. *Kultura przedłużycka*. Wrocław–Warszawa–Kraków.

Gleba, M. 2017. Tracing textile cultures of Italy and Greece in the early first millennium BC. *Antiquity* 91(359): 1205–1222, doi:10.15184/aqy.2017.144.

Gleba, M., Harris, S. 2018. The first plant bast fibre technology: identifying splicing in archaeological textiles. *Archaeological and Anthropological Sciences* 11(9): 2329–2346, doi: 10.1007/s12520-018-0677-8.

Grömer, K., Kern, D. 2010. Technical data and experiments on corded ware. *Journal of Archaeological Science* 37: 3136–3145.

Grömer, K. 2023. Cross-craft interaction between cordage and pottery in Central Europe, 2600–1600 BC, (w:) J. Banck-Burgess, E. Marinova-Wolff, D. Mischka red. *The Significance of Archaeological Textiles Papers of the International Online Conference 24th–25th February 2021. THEFBO Volume II*. Forschungen und Berichte zur Archäologie in Baden-Württemberg Band 28. Wiesbaden, 129–140, doi. https://doi.org/10.29091/9783752002911.

Grygiel, R. 2008. *Neolit i początki epoki brązu w rejonie Brześcia Kujawskiego i Osłonek. Tom II/1. Środkowy neolit. Grupa brzesko-kujawska kultury lendzielskiej*. Łódź.

Grygiel, R. 2008a. *Neolit i początki epoki brązu w rejonie Brześcia Kujawskiego i Osłonek. Tom II/2. Środkowy neolit. Grupa brzesko-kujawska kultury lendzielskiej*. Łódź.

Harris, S. 2012. From the parochial to the universal: comparing cloth cultures in the Bronze Age. *European Journal of Archaeology* 15/1: 61–97.

Kaczanowska, M. (red.). 2006. *Dziedzictwo cywilizacji naddunajskich: Małopolska na przełomie epoki kamienia i miedzi*. Kraków.

Kaczmarek, M. 2015. Sznur czy tekstylia? Analiza tekstylna ornamentu odciskanego na ceramice funeralnej społeczności niżowych III tysiąclecia przed Chr. *Fontes Archaeologici Posnanienses* 51: 263–281.

Kaczmarek, M. 2023a. Preserved in clay: Ornamentation of Late Neolithic ceramic funerary vessels. *Archaeological Textile Review* 65: 4–29.

Kaczmarek, M. 2023b. Basketry rediscovered: Technological analysis and classification of the Neolithic basketry impressions from the Polish Lowland, (w:) S. Lipkin, E. Ruhl, K. Wright (red.), *Interdisciplinary Approaches to Research of North and Central European Archaeological Textiles. The Proceedings of the North European Symposium for Archeological Textiles (23rd–26th August 2021 in Oulu)*. Monographs of the Archaeological Society of Finland 12: 21–36.

Kamińska, J., Turnau, J. (red.). 1966. *Zarys historii włókiennictwa na ziemiach polskich do końca XVIII wieku*. Wrocław-Warszawa-Kraków.

Kępiński, M., Sikorski, A. 2007. Odciski tkaniny „produkcyjnej" na przęśliku z Ostrowa Tumskiego w Poznaniu (stan. 9/10). *Wielkopolskie Sprawozdania Archeologiczne* 8: 119–125.

Kłosińska, E. 1997. *Starszy okres epoki brązu w dorzeczu Warty*. Wrocław.

Kośko, A., Sikorski A., Szmyt, M. 2010. „Corded" and „cordlike" ornamentation in the Vistula and Dnieper interfluvial region in the 5th-4th mill. BC. Introduction to interdisciplinary research, (w:) A. Kośko, M. Szmyt (red.), *„Cord" ornaments on pottery in the Vistula and Dnieper interfluvial region: 5th-4th mill. BC.* Baltic-Pontic Studies 15. Poznań, 13–48.

Kostrzewski, J. 1927. Materiały do pradziejów Górnego Śląska. *Przegląd Archeologiczny* 3(3): 209–213.

Krzyszkowska, O. 2005. *Aegean seals: An introduction*. Bulletin of the Institute of Classical Studies Supplement 85, London.

Krzyszowski, A., Sikorski, A. 2010. Fragmenty tkanin ze Sługocinka (stan. 13). *Wielkopolskie Sprawozdania Archeologiczne* 9: 111–124.

Lasak, I. 2014. Materiał ruchomy z osady kultury łużyckiej, (w:) M. Masojć (red.), *Obozowiska, osady, wsie*. Wrocław-Widawa 17. Wrocław, 89–158.

Laurito, R. 2007. Ropes and textiles, (w:) M. Frangipane (red.), *Arslantepe. Cretulae: An early centralised administrative system before writing*. Rome, 381–394.

Liana, T. 1971. Łęgonice. *Informator Archeologiczny. Badania 1970*. Warszawa, 125.

Liana, T. 2005. Osada z młodszego okresu rzymskiego w Łęgonicach, pow. grójecki, *Wiadomości Archeologiczne* 57 (2004-2005): 241–280.

Łaszczewska, T. 1966. Pradzieje włókiennictwa, (w:) J. Kamińska, I. Turnau (red.), *Zarys historii włókiennictwa na ziemiach polskich do końca XVIII wieku*. Wrocław-Warszawa-Kraków, 21–63.

Maik, J. 2014. Odciski tkanin na popielnicach kultury łużyckiej z cmentarzyska w Maciejowicach, (w:) J. Dąbrowski, M. Mogielnicka-Urban (red.), *Zespół osadniczy kultury łużyckiej w Maciejowicach, pow. garwoliński, woj. mazowieckie*. Warszawa, 411–414.

Michałowska, M. 2006. *Leksykon włókiennictwa*. Warszawa.

Michałowski, A., Sikorski, A. 2005. Ornament sznurowy na ceramice ludności kultury amfor kulistych z Poznania-Nowe Miasto (stan. 314). *Folia Praehistorica Posnaniensia* 13/14: 175–214.

Miśkiewicz, J., Węgrzynowicz, T. 1974. Cmentarzyska kultury łużyckiej z Kosina, pow. Kraśnik (stanowiska I, II, III). *Wiadomości Archeologiczne* 39(2): 131–204.

Müller, W. 1997. Terminologie und Typologie der Tonplomben, (w:) W. Müller, J.-P. Olivier, I. Pini, A. Sakellariou (red.), *Die Tonplomben aus dem Nestorpalast von Pylos*. Mainz, 53–66.

Müller W., Pini I. 1997. Die ‚Schnüre' in den Plomben und die Gegenstandsabdrücke, (w:) W. Müller, J.-P. Olivier, I. Pini, A. Sakellariou (red.), *Die Tonplomben aus dem Nestorpalast von Pylos*. Mainz, 67–69.

Podkańska, M. 2012. Odciski tekstylne na ceramice, (w:) P. Silska (red.), *Wczesnobrązowa osada obronna w Bruszczewie. Badania 1964-1968*. Poznań, 207–213.

Przymorska-Sztuczka, M. 2022. *Gospodarka włókiennicza późnej epoki brązu i wczesnej epoki żelaza w Wielkopolsce, na Kujawach i ziemi chełmińskiej*, Biskupin.

Schaefer-Di Maida, S. 2017. „Textilkeramik" – Textileindrücke auf bronzezeitlicher Keramik vom Fundplatz Bruszczewo. *Światowit* 56: 23–42.

Seiler-Baldinger, A. 1994. *Textiles: a classification of techniques*. Washington.

Siennicka, M. 2015-2016. Étude d'empreintes de textile, (w:) A. Philippa-Touchais, N. Papadimitriou, G. Touchais (red.), La Deiras, *Bulletin de Correspondance Héllenique* 139–140: 837–838.

Sikorski, A. 1998. Wyniki analiz tkanin odciśniętych na ceramice z osady wczesnośredniowiecznej w Nowej Wsi, st. 12 (43a), (w:) R. Mazurowski (red.), *Archeologiczne badania ratownicze wzdłuż trasy gazociągu tranzytowego, Ziemia lubuska*. Poznań, 191–195.

Sikorski, A. 2000. Analiza tkanin znalezionych na grzęzidłach z Góry, gm. Pobiedziska, byłe woj. poznańskie. Aneks. *Wielkopolskie Sprawozdania Archeologiczne* 5: 271–272.

Sikorski, A. 2002. Analiza odcisków tkanin na IX-XI-wiecznej ceramice naczyniowej z Góry, gm. Pobiedziska, woj. wielkopolskie, stan. 1. *Folia Praehistorica Posnaniensia* 10/11: 243–254.

Sikorski, A. 2003. Nie tylko o tekstyliach wykopaliskowych z Wielkopolski. *Wielkopolski Biuletyn Konserwatorski* 2: 123–142.

Sikorski, A. 2008. Odciski zszywanej tkaniny na wczesnośredniowiecznym dnie naczynia z Lutola Suchego pod Międzyrzeczem, (w:) B. Gruszka (red.), *Ad Oderam fluvium. Księga dedykowana pamięci Edwarda Dąbrowskiego*. Zielona Góra, 375–383.

Sikorski, A. 2010a. Dna z odciskami tkanin, (w:) J. Bednarczyk, J. Kabaciński, A. Kośko (red.), *Osadnictwo Kotliny Kolskiej. Archeologiczne badania ratownicze na trasie autostrady A2*. Poznań, 709–713.

Sikorski, A. 2010b. More than just "cords" on Neolithic ceramic ware: an outline of microscopic identification for "corded ornamentation". Some thoughts on research methods, (w:) A. Kośko, M. Szmyt (red.), *„Cord" ornaments on pottery in the Vistula and Dnieper interfluvial region: 5th-4th mill. BC*. Baltic-Pontic Studies 15. Poznań, 49–56.

Sikorski, A. 2014. Odciski tkanin na dnach naczyń z Zawady, stan. 1, gm. Zielona Góra, (w:) B. Gruszka (red.), *Wczesnośredniowieczna osada w Zawadzie, stan. 1, gm. Zielona Góra. Studia interdyscyplinarne*. Zielona Góra, 269–274.

Sikorski, A. 2016a. Odciski tekstylne na ceramice z epoki brązu ze Szczepidła, gm. Krzymów, woj. wielkopolskie, stan. 17, (w:) P. Makarowicz (red.), *Szczepidło. Osada metalurgów kultury mogiłowej nad Wartą,* Archaeologia Bimaris – Monograe 9. Poznań, 503–519.

Sikorski, A. 2016b. Odciski tkanin na fragmentach naczyń wczesnośredniowiecznych z osady w Bytkowie, stan. 1, gm. Rokietnica, woj. wielkopolskie. *Raport* 11: 167–170.

Sikorski, A. 2018. Odciski „tekstylne" na fragmentach ceramiki kultury pucharów lejkowatych, (w:) M. Szmyt (red.), *Mrowino, stanowisko 3. Późny neolit nad środkową Wartą*. Bibliotheca Fontes Archaeologici Posnanienses 22. Poznań, 453–467.

Sikorski, A. 2021. Wytwórczość tekstylna w osadzie ludności kultury pucharów lejkowatych na stanowisku 8 w Śremie, (w:) M. Szmyt (red.), *Śrem, stanowisko 8. Późny neolit nad środkową Wartą*. Poznań, 391–415.

Silska, P. 2012. Rozdział 4. *Ceramika*, (w:) P. Silska (red.), *Wczesnobrązowa osada obronna w Bruszczewie. Badania 1964–1968*. Poznań, 71–114.

Skrzyniecka, W., Makarowicz, P., Silska, P. 2022. Textile-impressed pottery from Bronze Age settlement in Szczepidło, Poland. *Sprawozdania Archeologiczne* 74(2): 227–248.

Słomska-Bolonek, J. 2022. Analiza odcisku tkaniny ze stanowiska XI w Janówku, pow. legionowski, (w:) B. Kaczyński, *Janówek, stanowisko XI. Osada i cmentarzysko z wczesnej epoki żelaza*. Warszawa, 209–216.

Spantidaki, S. 2016. *Textile production in classical Athens*, Ancient Textiles Series 27, Oxford-Philadephia.

Ulanowska, A. 2020. Textile uses in administrative practices in Bronze Age Greece: New evidence of textile impressions from the undersides of clay sealings, (w:) M. Bustamante-Álvarez, E.H. Sánchez López, J. Jiménez Ávila (red.), *PURPUREAE VESTES VII. Textiles and dyes in Antiquity. Redefining Ancient textile handicraft. Structures, tools and production processes*. Granada, 413–424.

Ulanowska, A. 2021. Tekstylia i pieczęcie. O relacjach pomiędzy produkcją włókienniczą a praktykami stemplowania w Grecji epoki brązu oraz o zupełnie nowych danych z odcisków glinianych pieczęci. *Przegląd Archeologiczny* 69: 111–135. doi: 10.23858/pa69.2021.2555.

Ulanowska, A. 2023. Why not wool? Evidence for the raw material and technical uses of textiles based on imprints on the undersides of clay sealings from Bronze Age Greece, (w:) J. Banck-Burgess, E. Marinova-Wolff, D. Mischka (red.), *The Significance of archaeological textiles papers of the International Online Conference 24th-25th February 2021*. THEFBO Volume II, 165–178, doi. https://doi.org/10.29091/9783752002911.

Unruh, J. 2007. Ancient Textile Evidence in Soil Structures at the Agora Excavations in Athens, Greece, (w:) C. Gillis, M.-L. Nosch (red.), *Ancient Textiles: production, crafts and society*, Ancient Textiles Series 1. Oxford, 167–172.

Wiklak, H. 1971. Otłoczyn stan. 1. *Informator Archeologiczny. Badania 1970*. Warszawa, 129.

Vakirtzi, S., Georma, F., Karnava, A. 2018. Beyond textiles: alternative uses of twisted fibres and evidence from Akrotiri, Thera. *Światowit* 56: 75–88.

Ząbkiewicz-Koszańska, H. 1958. Cmentarzysko kultury łużyckiej w Łodzi-Rudzie Pabianickiej. *Przegląd Archeologiczny* 10: 237–285.

Źródła internetowe:

Ulanowska, A., 2020: 3-D scanning of casts with textile impressions in the CMS Archive Heidelberg, https://textileseals.uw.edu.pl/outreach/, dostęp: 15.06.2023.

https://data.textileseals.uw.edu.pl/textile_impressions/search, dostęp: 15.06.2023.

Ulanowska, A., 2022: https://textileseals.uw.edu.pl/outreach/, dostęp: 15.06.2023.





Zmineralizowane pozostałości materiałów organicznych

Aldona Kurzawska, Iwona Sobkowiak-Tabaka

WPROWADZENIE

Materiały organiczne rzadko zachowują się na stanowiskach archeologicznych z powodu działania wielu czynników, głównie środowiskowych. Ich przetrwanie do naszych czasów zależy od kontekstu archeologicznego, warunków tafonomicznych, obecności węglanu wapnia, czy kontaktu z innymi materiałami, takimi jak przedmioty wykonane ze stopów metali.. W szczególnych warunkach chemicznych i mikroklimatycznych proces rozkładu materiałów organicznych może zostać znacząco przyspieszony, ale też spowolniony, a nawet całkowicie zahamowany. Ogromny potencjał badawczy mają materiały organiczne zachowane tylko dzięki procesom mineralizacji, szczególnie w kontakcie z metalowymi przedmiotami. Obecnie nowoczesna aparatura badawcza pozwala na szczegółowe analizy takich pozostałości i pozyskanie informacji o materiałach organicznych, których wcześniej nie badano lub nawet nie zauważano. Archeolodzy coraz częściej już w trakcie eksploracji dostrzegają obecność materiału organicznego przy zabytkach metalowych i dostarczają te pozostałości do oceny specjalistom jeszcze przed przekazaniem zabytków do fachowej konserwacji (różne produkty korozji są zazwyczaj w trakcie zabiegów konserwatorskich usuwane). Taka analiza z wykorzystaniem nowoczesnych mikroskopów jest szczególnie istotna zarówno dla identyfikacji obecności materiałów organicznych, jak i przeprowadzenia analiz śladów traseologicznych, które przetrwały dzięki procesom korozji (por. D. Sych, w tym tomie).

W rozdziale przedstawiamy potencjał badań nad zmineralizowanymi pozostałościami organicznymi, które obecnie dostrzegane są najczęściej wśród zabytków metalowych odkrywanych w różnych kontekstach archeologicznych.

HISTORIA BADAŃ

Rozwój technik mikroskopowych w badaniach archeologicznych oraz ich zastosowanie w analizie zabytków

DOI: 10.64158/dlyk9w4lu3

wykonanych ze stopów miedzi przyczyniły się do intensyfikacji badań nad pozostałościami materiałów organicznych, zachowanych w produktach korozji. Tego rodzaju analizy zyskały szczególną popularność w badaniach nad tekstyliami, zarówno na świecie (m.in. Sawbridge i Ford 1987; Chen i in., 1998; Peška i in., 2006; Möller-Wiering 2011; Grömer i Grassberger 2018; Davies i Harris 2023), jak i w Polsce (m.in. Maik 2012; Grupa 2017; Przymorska-Sztuczka 2021; Józefowska i in., 2023; Maik i in., 2023; Słomska-Bolonek 2024).

Przetrwanie rozkładających się materiałów organicznych, takich jak tkaniny, drewno, pozostałości roślin, owadów, a nawet ludzkiej skóry, nie jest wyjątkowym zjawiskiem, a wspomniane materiały mogą pozostawiać trwałe ślady w produktach korozji zabytków ze stopów miedzi i żelaznych. Jest to na tyle częste zjawisko, że stanowiło temat wielu kluczowych badań np. nad tekstyliami archeologicznymi (Bender Jørgensen 1992; Banck-Burgess 1999; Rast-Eicher 2008; Fisher 2010; Gleba 2017). Rosnąca liczba badań nad tym zagadnieniem skłoniła w 2006 r. J. Peška i jego współpracowników do wydzielenia nowej subdyscypliny archeologii, którą nazwano „archeologią pozostałości materiałów organicznych", a która skupia się na analizie materiałów organicznych zachowanych w produktach korozji metali (Peška i in., 2006). Systematyczne badanie produktów korozji odkrywanych zabytków metalowych, zwłaszcza w połączeniu z analizą śladów zużycia (np. Caricola i in., 2022), zwiększa potrzebę precyzyjnej identyfikacji materiałów, np. tkanin, nawet przy ich szczątkowym zachowaniu. Takie podejście badawcze zakłada, że każdorazowo w produktach korozji analizowanych zabytków mogły przetrwać materiały organiczne, które należy poddać analizie oraz odpowiednio zadokumentować przed przeprowadzeniem jakichkolwiek działań mających na celu oczyszczenie czy konserwację.

Z uwagi na stan zachowania zmineralizowanych pozostałości, poszukiwano metod analitycznych pozwalających je zidentyfikować czy oszacować ich stan zachowania w przypadku chociażby dalszego postępowania z zabytkami (konserwacja). Wśród zastosowanych metod już w latach 90. XX w. oprócz powszechnie wykorzystywanych do analiz tekstyliów mikroskopów optycznych i elektronowych (por. Drążkowska i Cybulska 2021) stosowano FTIR (por. Proch i Niedzielski, w tym tomie) do identyfikacji organiki w zmineralizowanych pozostałościach. Przeprowadzone analizy pokazały ponadto, że szczególnie tekstylia zachowane w postaci pseudomorfoz rzadko są całkowicie zmineralizowane, a identyfikacja włókien jako białkowe czy celulozowe jest nadal możliwa, nawet a identyfikacja włókien jako białkowe czy celulozowe jest nadal możliwa, nawet w przypadku niewielkich fragmentów (Gillard i in., 1993).

Prowadzone badania wielokrotnie pokazały potencjał poznawczy analiz zmineralizowanych pozostałości organicznych, wśród których dominują opracowania materiałów pochodzących ze specyficznego kontekstu archeologicznego jakim są pochówki (James i in., 2009; Grömer i Grassberger 2018). Badania archeologiczne cmentarzysk dostarczyły wielu unikatowych znalezisk materiałów organicznych, wśród których oprócz tkanin znalazły się również pozostałości, skór, futra/włosia, skóry i włosów ludzkich, a także owadów biorących udział w rozkładzie materii organicznej.

KATEGORIE BADANYCH MATERIAŁÓW

W archeologii „materiał organiczny" to każda biodegradowalna substancja zawierająca węgiel, która pochodzi z/od organizmów żywych, takich jak rośliny, zwierzęta czy ludzie, i która przetrwała na stanowisku archeologicznym. Do tego typu materiałów zaliczamy m.in. makroskopowe szczątki roślin, szczątki kostne, skórę, ścięgna, sierść, włosy, włókna, drewno, muszle, a także pozostałości w postaci różnych substancji np. tłuszczów i olejów. Materiały organiczne mają ogromny potencjał poznawczy zarówno w badaniach przeszłego środowiska naturalnego, jak i badaniu dawnych społeczności. Wszystkie mogą w specyficznych warunkach przetrwać w warstwach archeologicznych, zarówno w nieznacznie tylko naruszonej formie lub zwęglone, jak i w postaci dyskutowanych tutaj form zmineralizowanych. Rzadko dotąd badane zmineralizowane pozostałości organiczne, zachowane przy zabytkach metalowych, są obecnie coraz częściej dostrzegane jako wartościowy materiał badawczy.

Zabytki metalowe występują w różnych kontekstach archeologicznych, takich jak obiekty osadowe, dna zbiorników wodnych, osady organiczne (np. torfy), pochówki oraz celowe depozyty zwane skarbami. Na terenie Polski najstarsze takie przedmioty zostały odkryte na stanowiskach neolitycznych (ok. 4400 BC). Początkowo były to głównie ozdoby z miedzi, np. paciorki, zawieszki, zausznice i spiralki, blaszki z zagiętymi końcami, rzadziej siekierki czy metalowe sztylety (Budd i in., 2020; Grygiel 2008; Wilk 2006). We wczesnej (ok. 2400 BC) i właściwej epoce brązu

zestaw surowców (metali) powiększył się o stopy miedzi (brąz) oraz wyjątkowo ozdoby wykonane ze złota (ozdoby) (Budziszewski i in. 2016). W repertuarze ozdób pojawiły się dodatkowo bransolety, naramienniki, szpile, zapinki, napierśniki, a wśród uzbrojenia znajdowano również miecze czy umba tarcz. Metale wykorzystywano również do produkcji innych kategorii przedmiotów, takich jak naczynia, przedmioty codziennego użytku (np. brzytwy, siekiery), narzędzia rolnicze (np. sierpy) oraz jako elementy uprzęży końskiej (np. Kaczmarek i in., 2021; Szczurek i Kaczmarek 2022). W VII w. p.n.e. zaczęto dodatkowo używać żelaza, z którego wytwarzano głównie narzędzia i elementy uzbrojenia (Kaczanowski i Kozłowski 1998). Do produkcji ozdób obok stopów miedzi stosowano także metale szlachetne, najczęściej srebro, a znacznie rzadziej złoto. Z dwóch ostatnich kruszców odlewano, a później wybijano pierwsze na ziemiach polskich monety (celtyckie, np. Rudnicki i in., 2009), które dość często odkrywane są podczas badań wykopaliskowych, poszukiwań z użyciem detektora metalu oraz przypadkowo, np. na polach podczas orki. Złoto i srebro wykorzystywano w późniejszych okresach również do pokrywania cienką warstwą przedmiotów wykonanych z innych surowców czy mniej cennych metali, zarówno w celach estetycznych, jak i dla imitacji prawdziwych kruszców, co zabezpieczało je również przed korozją i utlenianiem (zabieg stosowany również współcześnie w jubilerstwie).

Na większości z wymienionych przedmiotów metalowych, jeśli w składzie pierwiastkowym zabytków wystąpiła miedź lub żelazo (oprócz złota/srebra), mogą znajdować się pozostałości materiałów organicznych, które w momencie depozycji zalegały w ich pobliżu. Mogą to być pozostałości tekstyliów, odzieży, sznurków, rzemyków, elementów skórzanych, roślin, a w przypadku pochówków również np. włosów i wielu innych. Materiały organiczne zachowują się wtedy najczęściej w zmineralizowanej formie tzw. pseudomorfoz, a w wyjątkowych przypadkach w stanie częściowej mineralizacji lub niezmineralizowanym.

PSEUDOMORFOZY I ICH POWSTAWANIE

Pseudomorfozy (w geologii, mineralogii, petrografii, paleontologii) to termin opisujący minerały lub związki mineralne, które występują w nietypowej formie (układzie krystalicznym). Powstają one w wyniku procesu substytucji, w którym wygląd i wymiary pozostają niezmienne, ale oryginalny minerał jest zastępowany przez inny z powodu zmiany, substytucji chemicznej, rozpuszczenia i ponownego wypełnienia, zmian strukturalnych lub inkrustacji. Typowym przykładem są skamieniałości, które często powstają w wyniku pseudomorficznego zastąpienia szczątków organicznych substancją mineralną. Jednym z przykładów jest tu skamieniałe drewno, w którym wszystkie włókna celulozowe zostały zastąpione krzemionką, łącznie z tymi w korze. Pseudomorfozy mogą powstawać w wyniku osadzania jednego minerału na powierzchni kryształów innego. Pseudomorfozy powstające w wyniku zmiany mogą być tworzone na kilka sposobów jednym z nich jest przekształcenie wewnętrznej struktury krystalicznej bez zmiany składu chemicznego (te pseudomorfozy nazywane są paramorfami, np. gdy aragonit przekształca się w kalcyt) (Manecki i Muszyński 2008).

Pseudomorfozy w archeologii (często za ang. *pseudomorphs* nazywane pseudomorfami) to pośrednie (zmineralizowane) formy materiałów organicznych, które zostały utworzone najczęściej z produktów korozji metali lub w obecności węglanu wapnia w środowisku otaczającym rozkładający się materiał organiczny (Vollmer 1974; Cybulska i Maik 2007; Reifarth i Drewello 2011; Cybulska i Drążkowska 2021).

W przypadku materiałów archeologicznych pseudomorfozy powstają w wyniku zmian właściwości fizyko-chemicznych materiałów organicznych, spowodowanych różnorodnymi czynnikami, które wpływają także na stan i formę zachowania tych materiałów. D. Gillard i S.M. Hardman (1996) wymieniają następujące z nich:

- różne właściwości fizyczne i chemiczne materiałów organicznych;
- rodzaj metali/stopów, z których wykonane są przedmioty przylegające do materiałów organicznych, a co za tym idzie – różne mechanizmy korozji oraz jej produkty;
- domieszki różnych substancji w materiale organicznym, które mają wpływ na ich strukturę i stan zachowania np. wykorzystanie barwników i substancji utrwalających kolor w materiałach tekstylnych, skórzanych lub obecność folii metalowej w strukturze materiałów;
- charakterystyka środowiska, w którym znajdują się materiały organiczne (rodzaj gleby, dopływ/brak powietrza, wartość pH, aktywność mikrobiologiczna (Solazzo i in., 2014), itp. Niewielka degradacja mikrobiologiczna może przyspieszać proces mineralizacji, ponieważ naruszona nawet nieznacznie powierzchnia materiałów organicznych zwiększa ich podatność

na wnikanie jonów metali. Niestety w większości przypadków degradacja mikrobiologiczna prowadzi do całkowitego zniszczenia materiałów.

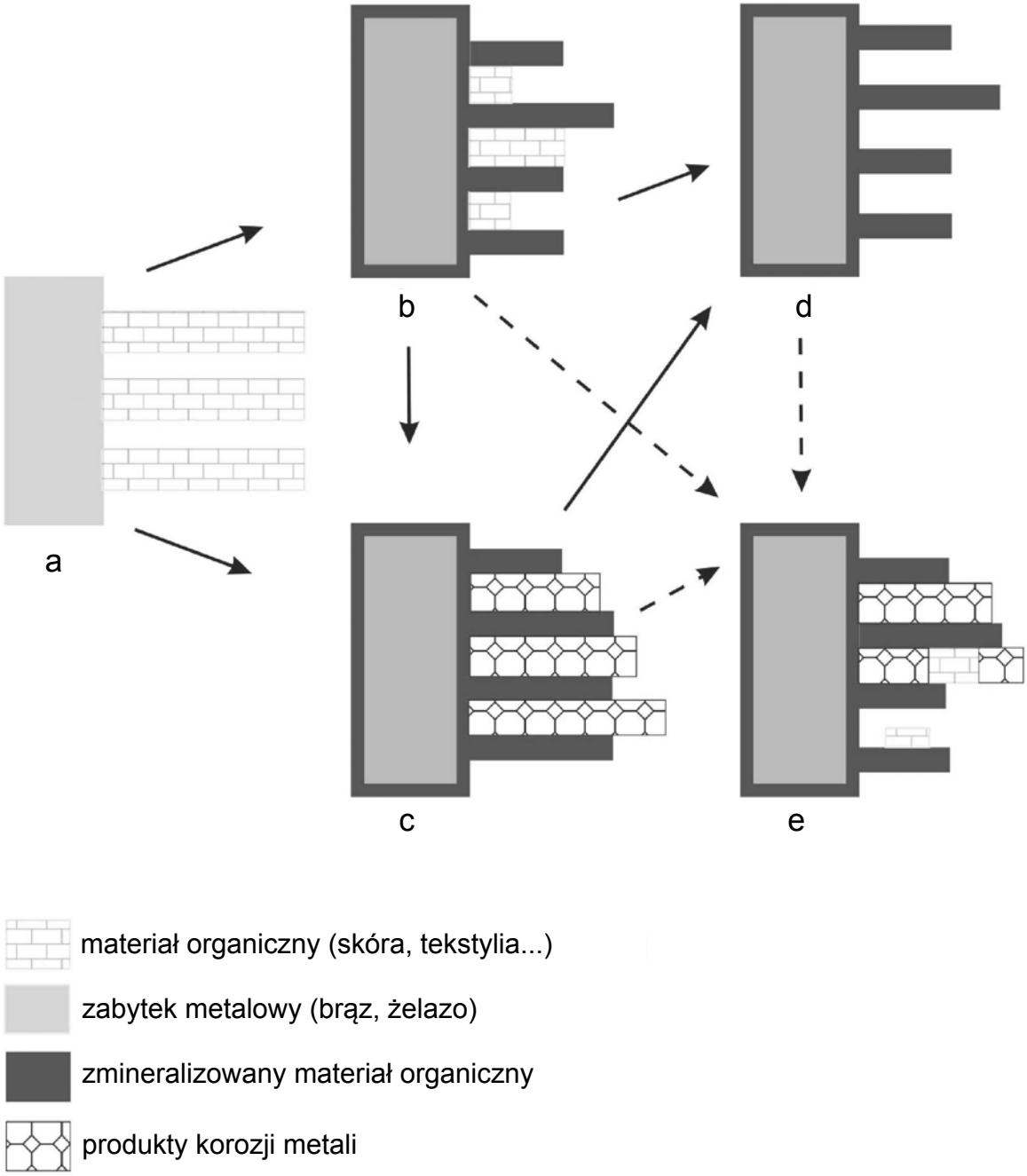
Całość procesów fizycznych, chemicznych i biologicznych wpływających na rozkład materii organicznej nazywamy procesem starzenia. Wymienione czynniki mają znaczący wpływ na ten proces, a wśród nich wyróżnia się mineralizację, która umożliwia przetrwanie w postaci pseudomorfoz, podatnych na szybki rozkład materiałów organicznych w kontekście archeologicznym. Choć zazwyczaj zachowują się jedynie niewielkie fragmenty (czasami tylko kilka mm^2), są one szczególnie cenne dla poznania aktywności człowieka w przeszłości tych obszarów geograficznych oraz w okresach chronologicznych, z których materiały organiczne nie zachowały się lub nie miały szansy przetrwać (Jakes i Howard III 1986). Pseudomorfozy zachowują kształt materiałów organicznych, takich jak włókna, włosy, tekstylia, pióra czy skóry, a także owadów biorących udział w rozkładzie materii organicznej, ponieważ są zastępowane przez związki mineralne pochodzące z artefaktów metalowych. Tracą jednak oryginalny kolor i zazwyczaj wyglądają mało estetycznie. W przypadku pseudomorfoz powstałych dzięki mineralizacji z udziałem węglanu wapnia, szansę przetrwania mają barwniki, często obecne w tekstyliach (James i in., 2009).

PROCES MINERALIZACJI

Na podstawie analiz materiałów z pochówków z epoki brązu odkrytych na terenie Czech i Austrii (Peška i in., 2006) zaproponowano schemat opisujący proces oraz etapy mineralizacji materiałów organicznych w kontekstach archeologicznych. Zwrócono również uwagę, że mineralizacja może przebiegać w różny sposób, a pozostałości materiałów organicznych mogą przetrwać w formie niezmienionej, jako pseudomorfozy oraz odciski w warstwie korozji zabytków metalowych (Peška i in., 2006). Na ryc. 1 przedstawiono poszczególne etapy mineralizacji związane z różnymi rodzajami pozostałości organicznych występujące na stanowiskach archeologicznych. W pierwszym etapie (ryc. 1a) zawsze dochodzi do kontaktu między przedmiotem metalowym a materiałem organicznym. Znajdujące się w pobliżu zabytki metalowe uwalniają jony metali do otaczającego środowiska. Najczęściej są to miedź, żelazo, ołów czy srebro (Jakes i Howard III 1986). Materiał organiczny w kontakcie z metalem może zostać pokryty warstwą korozji (ryc. 1b). W tym przypadku korozja nie pokrywa dużej powierzchni materiału, a jedynie pewien obszar, organika może przetrwać bez naruszenia struktur, czyli chemicznie niezmieniona. Na tym etapie może również dojść do częściowej lub kompletnej mineralizacji materiału organicznego (ryc. 1c). Jony metali przenikają do materiałów organicznych i reagują z dostępnymi cząsteczkami wody oraz innymi substancjami chemicznymi (takimi jak grupy HCO_3). W wyniku tych reakcji tworzą się osady mineralne, które zastępują organiczne komponenty materiałów organicznych (Jakes i Howard III 1986). Struktura biochemiczna ulegając więc stopniowej, całkowitej przemianie, przekształca się w produkty korozji – w ten sposób powstają pseudomorfozy. W trakcie tego procesu mogą również powstać odciski rozkładających się materiałów organicznych na powierzchni przedmiotów metalowych lub w produktach korozji (ryc. 1d). Co ciekawe, bardzo często efekty tych różnych procesów współwystępują w jedynym kontekście/zapisie archeologicznym (ryc. 1e).

W wyniku mineralizacji powstają różne pseudomorficzne struktury, które naśladują pierwotne materiały organiczne. Choć różnią się od oryginałów kolorami i estetyką, często zachowują ich kształt oraz strukturę, co nadaje im unikalną wartość badawczą. Każdy materiał organiczny zbudowany z różnych substancji, podlega degradacji i mineralizacji, ale proces ten przebiega w nieco odmienny sposób w zależności od specyfiki materiału. Na stan zachowania zmineralizowanych pozostałości wpływa także ich unikalna budowa i skład. Mimo szeroko zakrojonych badań nad mechanizmem mineralizacji, prowadzonych z wykorzystaniem zaawansowanych technik, takich jak skaningowa mikroskopia elektronowa (ang. *scanning electron microscope,* SEM), spektroskopia w podczerwieni (ang. *Fourier transform infrared spectroscopy*, FTIR), enzymatyczny test immunosorbcyjny (ang. *enzyme-linked immunosorbent assay*, ELISA) oraz tomografia komputerowa (ang. *computed tomography*, CT), proces ten nie jest jeszcze w pełni poznany (Good 2001; Margariti 2019; Jia i in., 2024). Wiemy, że obejmuje on kilka etapów, w tym transport wodny biobójczych kationów metali oraz substancji rozpuszczonych ze środowiska, degradację makromolekularną, utratę krystaliczności we włóknach organicznych oraz samą mineralizację (Jakes i Howard III 1986; Foxhall 2017; Reynaud i in., 2020).

Celuloza, obecna np. we włóknach lnu, łączy jony metali poprzez zastąpienie protonu w grupie karboksylowej oraz poprzez tworzenie związków kompleksowych z grupami hydroksylowymi. W przypadku



Ryc. 1. Różne stopnie zachowania materii organicznej (na podstawie Peška i in., 2006, ryc. 1)

włókien jedwabiu jony metali wiążą się z końcowymi grupami NH2 aminokwasów, jeśli spełnione są odpowiednie warunki pH. Następnie połączone jony tworzą związki kompleksowe z wolnymi końcowymi grupami karboksylowymi, ponieważ grupa karboksylowa jest anionowa i przyciąga kationy metali. Wiązanie jonów metalicznych przez włókna jedwabiu jest również ułatwione dzięki kompleksowej interakcji z połączeniami aminowymi w strukturze cząsteczki białka. Ma to znaczący wpływ zarówno na degradację tych materiałów, jak i na stopień ich zachowania jako zmineralizowanych pozostałości (patrz niżej: „rodzaje włókien tekstylnych").

METODY BADAŃ

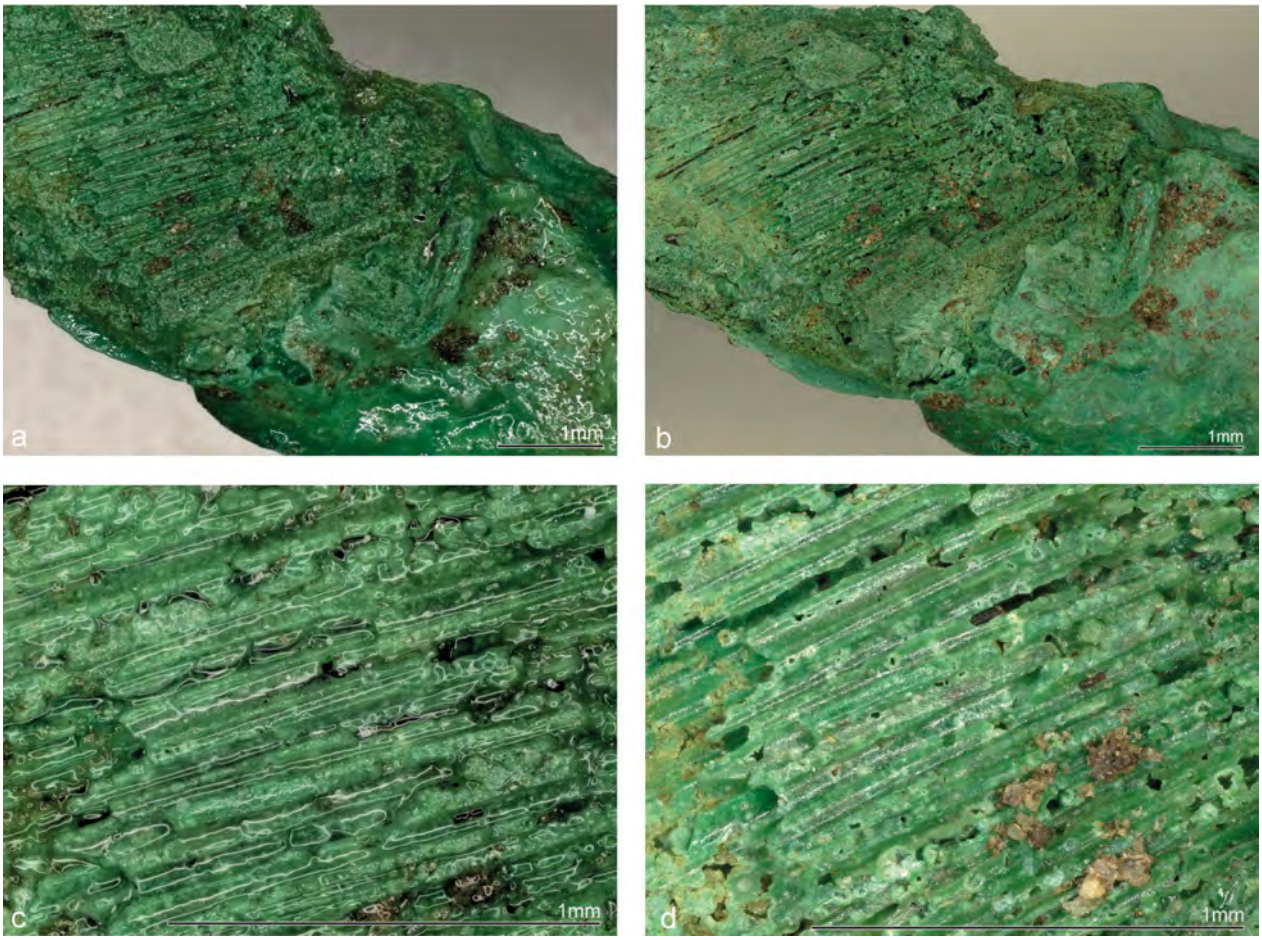
Na stanowisku

Wszystkie działania podjęte na stanowisku archeologicznym w trakcie trwających prac wykopaliskowych mają kluczowe znaczenie zarówno dla zachowania materiałów organicznych, jak i późniejszych specjalistycznych analiz laboratoryjnych. Szczególną uwagę należy zachować w przypadku eksploracji obiektów/warstw, w których podejrzewamy przetrwanie materiałów organicznych, w strefie występowania zabytków metalowych, ale nie tylko. Istotne znaczenie ma szereg czynności podjętych już na stanowisku, a składają się na nie szczegółowa dokumentacja położenia odkrytych pozostałości, należyte zabezpieczenie zabytków często wraz z przylegającymi do nich materiałami organicznymi i dostarczenie ich w nienaruszonym stanie do specjalistycznych laboratoriów. Mając świadomość różnego stanu zachowania materiałów organicznych, zdecydowanie nie należy na stanowisku archeologicznym podejmować żadnych czynności związanych z ich oczyszczaniem. Najlepszym rozwiązaniem, nawet gdy nie jesteśmy pewni z powodu zabrudzeń czy przy zabytkach przetrwały materiały organiczne czy nie, jest zabezpieczenie ich na stanowisku wraz z otaczającą ziemią, staranne zapakowanie (chroniąc materiał przed nowymi warunkami środowiska oraz uszkodzeniami mechanicznymi) i dostarczenie w takiej formie do laboratorium. Na pewno pośpieszne czyszczenie, moczenie w wodzie, przecieranie palcami, polewanie wodą, czy szorowanie takich zabytków, jest niewskazane (por. Majorek-Lipowicz, w tym tomie).

Faza analityczna – laboratorium i pracownie specjalistyczne

Dostarczone do pracowni czy laboratorium materiały podlegają wstępnej ocenie. Inne postępowanie będzie dotyczyło materiałów oczyszczonych czy poddanych już zabiegom konserwatorskim, a inne gdy dostarczone zabytki zalegają w osadzie lub nie były wcześniej oczyszczone. Podjęte działania z próbkami czy zabytkami wymagającymi wstępnego oczyszczenia będą uzależnione od rodzaju pozostałości, z którymi mamy do czynienia. Metody postępowania z tekstyliami i zabytkami metalowymi zostały opisane szczegółowo przez M. Cybulską i A. Drążkowską (2021) oraz w tym tomie przy okazji omawiania konserwacji zabytków archeologicznych przez M. Majorek-Lipowicz i traseologii metali przez D. Sycha. Działania mające na celu identyfikację materiału organicznego przed przekazaniem zabytków do konserwacji polegają często na zabezpieczeniu próbek do analiz oraz wykonaniu opisu i dokumentacji (zdjęciowej z wykorzystaniem mikroskopów) pozostałości materiałów organicznych.

Materiały zmineralizowane czy częściowo zmineralizowane i oczyszczone z zabrudzeń nadają się do dalszych analiz. Ich podstawą jest obserwacja mikroskopowa w celu rozpoznania pozostałości, sporządzenia opisu i dokumentacji, wykonania pomiarów oraz identyfikacji materiału organicznego. Do analiz pseudomorfoz wykorzystywane są dokładnie te same metody stosowane w przypadku konkretnych kategorii materiałów organicznych, które nie podlegały mineralizacji. Zastosowanie mają tu mikroskopy optyczne, stereoskopowe, cyfrowe, mikroskopy metalograficzne oraz SEM. Każdorazowo oceniany jest też stan zachowania materiałów organicznych i określany stopień mineralizacji. Gdy materiały organiczne uległy jedynie częściowej mineralizacji poszukiwane są obszary w badanych materiałach, w których mamy do czynienia z oryginalną materią organiczną, co ma szczególne znaczenie dla identyfikacji surowca. Z takich obszarów mogą zostać pobrane próbki do dalszych analiz. Zmineralizowane materiały organiczne zachowane jako przywry przy zabytkach metalowych analizujemy zawsze razem z zabytkiem, gdyż próby odspojenia mogą zniszczyć zachowane szczątki uniemożliwiając tym samym ich dalszą analizę. Jeśli zabytki zostały pokryte preparatami wzmacniającymi ich strukturę (impregnatami), w miejscach występowania pozostałości organicznych należy, w konsultacji z osobą, która wykonała konserwację, oczyścić je odpowiednimi rozpuszczalnikami. Czynność ta powinna być wykonana w dalszej części prowadzonej analizy, aby przygotować obszar niezbędny do badań mikroskopowych. Takie działanie często umożliwia obserwację powierzchni zachowanych pseudomorfoz i lepszą ich dokumentację z zastosowaniem mikroskopu cyfrowego (powierzchnia zabytku przestaje błyszczeć i dlatego widać więcej szczegółów) (ryc. 2). Opcja wyboru kąta, mocy oświetlenia czy zastosowanie polaryzatora uwydatnia pewne cechy materiałów umożliwiając ich identyfikację. Ponadto przy kombinacji różnych ustawień mikroskopów możliwe jest uzyskanie obrazu negatywowego czy pozytywowego analizowanych pozostałości. Ostatnim etapem analiz każdorazowo powinno być zastosowanie SEM, dające często jedyną możliwość dokładnej identyfikacji pozostałości materiałów organicznych. Mikroskopy optyczne niestety nie są w stanie często uchwycić istotnych dla identyfikacji struktur



Ryc. 2. Przykład zabytku pokrytego impregnatem (a, c) i po zdjęciu impregnatu w miejscu zachowanych pseudomorfoz (b, d) (fot. A. Kurzawska)

(ryc. 3a), które będą natomiast bardzo dobrze widoczne, przy zastosowaniu SEM (ryc. 3b). Dzięki wykorzystaniu detektorów elektronów wtórnych (ang. *secondary electron*, SE) (w przypadku próbek napylonych) oraz elektronów wtórnie rozproszonych (ang. *backscattered electron,* BSE), skaningowy mikroskop elektronowy umożliwia obserwację nierówności powierzchni oraz struktur w bardzo dobrej rozdzielczości i głębi ostrości oraz wykonanie pomiarów o dużej dokładności.

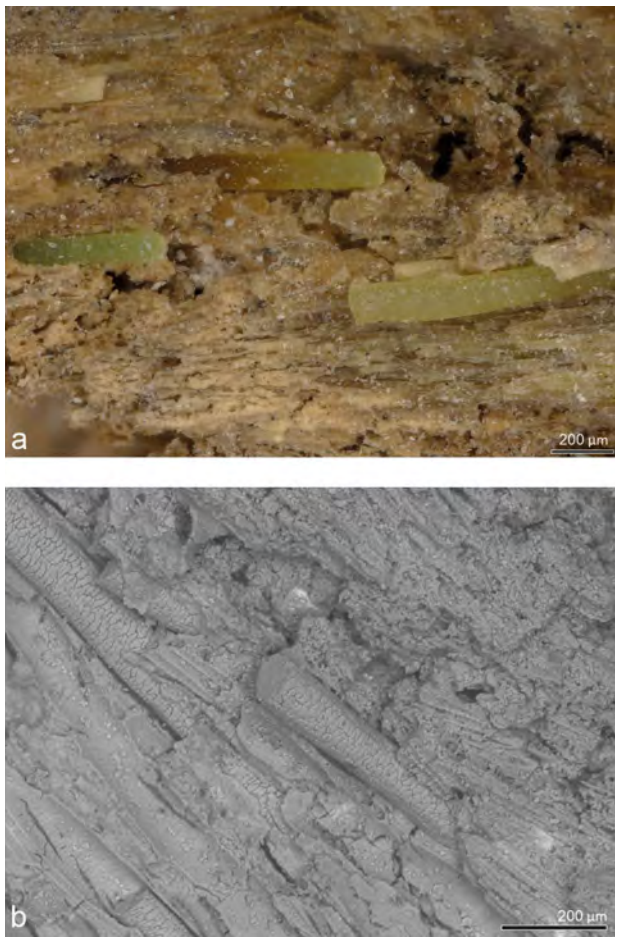
W prowadzonych analizach istotne są materiały referencyjne (w postaci zdjęć mikroskopowych i mikrofotografii SEM) oraz kolekcje porównawcze (ryc. 4). Niestety dotychczas niewiele materiałów organicznych zachowanych w postaci pseudomorfoz i ich struktur, widocznych jedynie na mikrofotografiach SEM, zostało udokumentowanych i opisanych w ten sposób. Informacje tego typu znajdują się zazwyczaj w artykułach o różnej tematyce (np. Moskal-del Hoyo i Badal Garcia 2009; Przymorska-Sztuczka i in., 2024). Choć w ostatnich latach pojawia się coraz więcej opracowań specjalistycznych (np. Catlin i Gryson 2004; Rast-Eicher 2016; Tóth 2017). Tworzenie kolekcji porównawczych zarówno preparatów materiałów organicznych, jak i ich mikrofotografii SEM jest niezwykle istotne dla dalszej pracy z tą specyficzną kategorią materiałów archeologicznych.

Tekstylia

Zmineralizowane tekstylia są najczęściej rozpoznawanym rodzajem pseudomorfoz, dlatego zostaną tu szczegółowo omówione (por. m. in. Peška i in., 2006; Möller-Wiering 2011; Maik 2012; Przymorska-Sztuczka 2020; Słomska-Bolonek i Antosik 2022; Józefowska i in., 2023; Maik i in., 2023). Są one widoczne na zabytkach zazwyczaj w postaci wydatnych zgrubień (por. ryc. 2 i 5). Ich opracowanie umożliwiają badania mikroskopowe, pozwalające na identyfikację rodzaju włókien oraz analizę technologiczną

fragmentów wyrobów włókienniczych (por. Cybulska i Drążkowska 2021).

Zmineralizowane tkaniny mogą występować w dwóch postaciach – negatywowej i pozytywowej. Analiza obu form dostarcza różnych informacji. Forma pozytywowa struktury pseudomorficznej powstaje, gdy stężenie jonów metali jest na tyle niskie, że wnikają one do włókien tworząc nowe wiązania, produkty korozji stopniowo zastępują strukturę organiczną włókna tworząc ich replikę wykonaną w całości lub częściowo z produktów korozji (ryc. 6 a-d). Takie pozytywowe odciski mogą dostarczać informacji dotyczących rodzaju włókien, ich skrętu, grubości nici czy faktury materiału tekstylnego (Jakes i Howard III 1986).



Ryc. 3. Zmineralizowane włókna wełny; a – zdjęcie wykonane mikroskopem cyfrowym; b – mikrofotografia SEM, na zdjęciu widoczna charakterystyczna dla wełny struktura włókien (fot. A. Kurzawska)

Forma negatywowa (Ryc. 6a, b, e) powstaje wówczas, gdy jony metali w bezpośrednim sąsiedztwie włókien występują w wysokim stężeniu, na tyle by przekroczyć granicę rozpuszczalności, co sprzyja ich wytrącaniu się na powierzchni włókna w postaci warstwy korozji. Procesy fizyczne, chemiczne i mikrobiologiczne powodują degradację włókien pod warstwą korozji, które tworzą struktury puste w środku (włókna zachowane są wówczas w postaci rurek pustych w środku) (Jakes i Howard III 1986; Gillard i in., 1994; Gillard i Hardman 1996).

Stopień mineralizacji włókien i rodzaj zachowanych form może znacząco różnić się w obrębie tego samego fragmentu materiału tekstylnego (por. wyżej „pseudomorfozy"), w zależności od fizycznych i chemicznych właściwości samych włókien (np. inaczej zachowują się włókna zwierzęce inaczej roślinne) czy rodzaju stopu metali.

Odciski negatywowe powstają głównie w przypadku artefaktów żelaznych, podczas gdy pozytywowe formy występują najczęściej przy zabytkach ze stopów miedzi (ryc. 6). W przeciwieństwie do miedzi, żelazo ma niskie właściwości biobójcze, co sprawia, że nie chroni włókien przed degradacją mikrobiologiczną. Dlatego prawdopodobieństwo powstania pozytywowej formy w przypadku żelaza jest niskie, chyba że jony żelaza przenikną do włókien i zastąpią materiał organiczny, co często zdarza się w silnie zasadowej lub kwaśnej glebie. Szybkie tempo korozji żelaza, w połączeniu z bardzo niską rozpuszczalnością soli żelaza, uniemożliwia wręcz tworzenie pozytywowych odcisków. Produkty krystalizują na powierzchni włókna, zanim jony metali zdążą przeniknąć do jego wnętrza (Jakes i Howard III 1986).

Rodzaje włókien tekstylnych

Włókna tekstylne ze względu na pochodzenie można podzielić na cztery główne grupy (za Janaway 1985; Emery 1980; Przymorska-Sztuczka 2022) (Ryc. 8a, b, c, d):

a) Włosy zwierzęce, które zbudowane są głównie z białka – keratyny.
b) Jedwab, który jest produkowany przez gąsienice różnych gatunków motyli i zbudowany jest z dwóch białek: fibroiny i serycyny.
c) Włókna roślinne zbudowane z celulozy, otrzymywane z nasion, owoców (bawełna, kokos), łodyg (len, konopie, pokrzywa), liści, kory i korzeni.
d) Włókna mineralne, jak azbest oraz różne metale (najczęściej stopy miedzi, srebro i złoto).

Podczas gdy tkaniny wełniane często zachowują się w dość dobrym stanie, znaleziska lniane są znacznie rzadsze. Dotyczy to również włókien



Ryc. 4. Zdjęcia włókien roślinnych z kolekcji porównawczej ArcheoMikroLab Wydziału Archeologii UAM (zdjęcia kolorowe – mikroskop cyfrowy; zdjęcia w skali szarości – mikrofotografie SEM): a, b, c – fragment sznurka z łyka lipy; d, e, f – fragment sznurka z nieoczyszczonych włókien lnu; g, h, i – fragment sznurka z łyka wierzby (fot. A. Kurzawska)

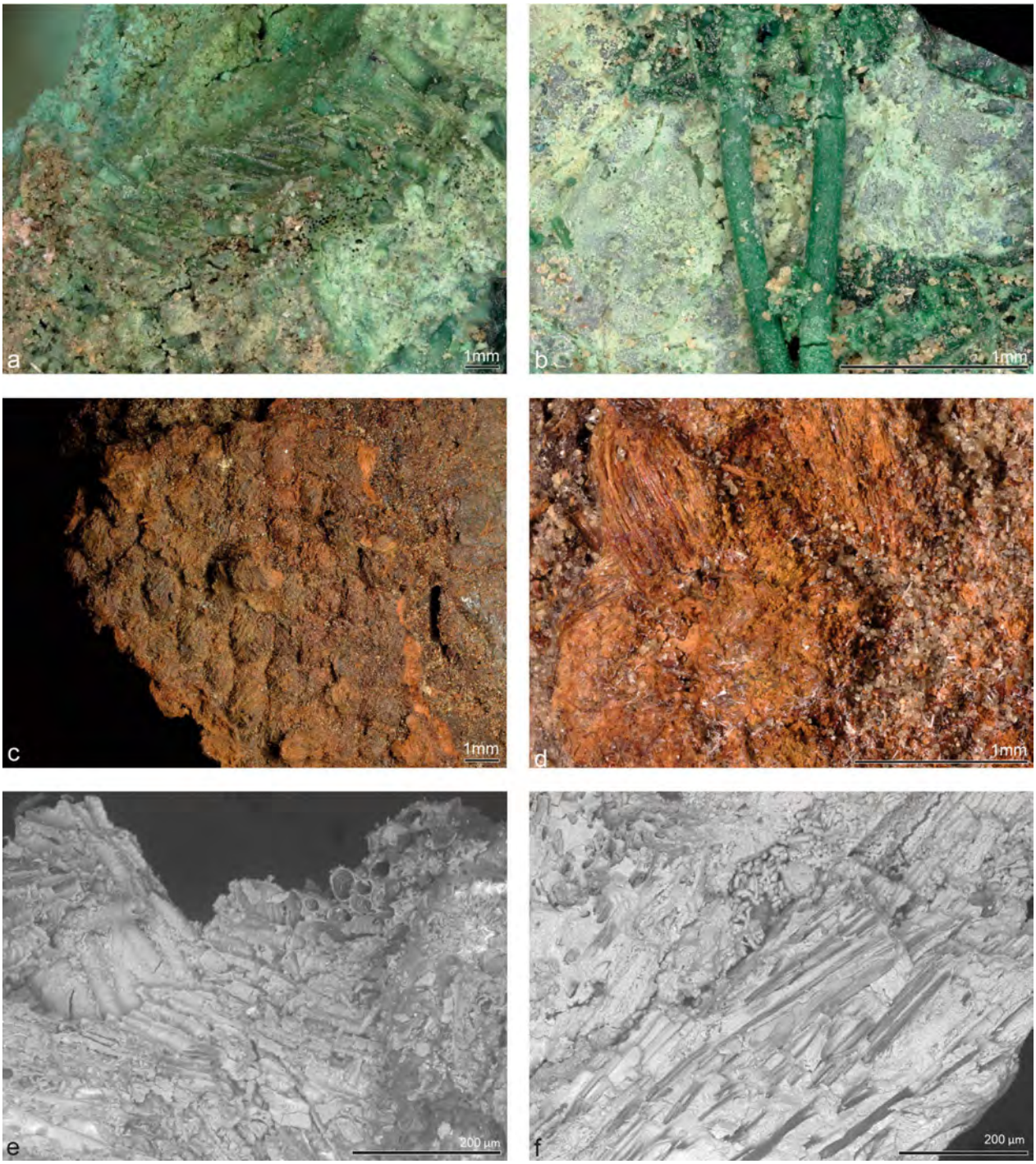
zmineralizowanych zachowanych w formie pseudomorfoz przy zabytkach metalowych. Wynika to z różnic w składzie włókien: włókna zwierzęce, zbudowane głównie z białka, są bardziej odporne na rozkład niż włókna roślinne, składające się z celulozy. Len i inne włókna celulozowe lepiej zachowują się w warunkach zasadowych, podczas gdy włókna białkowe, np. wełna, mają większą szansę przetrwać w środowisku lekko kwaśnym. Podatność lub odporność tkanin z włókien roślinnych na biodegradację zależy od ich budowy, zawartości celulozy, ligniny i innych składników. Na przykład bawełna jest mniej podatna na działanie mikroorganizmów niż len. Chociaż włókna zwierzęce, takie jak jedwab i wełna, nie są tak podatne na degradację jak roślinne, mogą zostać zaatakowane przez mikroorganizmy, szczególnie w środowisku ciepłym i wilgotnym. Jedwab wśród włókien tekstylnych jest stosunkowo odporny na biodegradację. Uszkodzenia mikrobiologiczne włókien objawiają się głównie przebarwieniami, plamami, kruchością



Ryc. 5. Zabytki odkryte w obiekcie nr 12 na stanowisku nr 17 w Mirosławiu: a – obiekt 12 Mirosław, widoczne pozostałości materiałów organicznych na zabytkach; b – kółko z nawiniętą zmineralizowaną nitką; c – sprzączka pasa z fragmentem zmineralizowanej tkaniny (fot. A. Michałowski, A. Skowronek, M. Bether)

włókien i ich niską wytrzymałością na rozciąganie. Len i bawełna są znacznie bardziej podatne na atak bakterii w wilgotnych warunkach i rzadko mają szansę przetrwać w warunkach panujących na stanowiskach archeologicznych (np. Janaway 1983, 1985, 1989; Sibley i Jakes 1984; Chen i in., 1998; Peška i in. 2006; Grömer i Grassberger 2018; Davis i Harris 2023).

Zmineralizowane pozostałości tekstylne to stosunkowo częste znalezisko szczególnie przy zabytkach metalowych odkrywanych na stanowiskach archeologicznych. Jak już wspomniano jedne z pierwszych materiałów organicznych, które zachowały się dzięki mineralizacji przy ozdobach z miedzi, odkryto na terenie Polski w pochówkach z końca okresu neolitu (patrz niżej). Najwięcej jednak znalezisk tekstylnych pochodzi z eksplorowanych pochówków szkieletowych bogato wyposażonych w ozdoby z epoki brązu i żelaza. Dobrym przykładem studiów nad takimi znaleziskami jest podjęta próba identyfikacji tekstyliów zachowanych przy zabytkach z brązu odkrytych w Mirosławiu (woj. wielkopolskie) na stanowisku 17 (Michałowski 2017). W jednym z pochówków społeczności wielbarskiej (datowanym na II w. n.e.) pod kurhanem nr 4 (obiekt nr 12) przy odkrytych ozdobach zachowały się zmineralizowane tekstylia. Na fibuli, sprzączce i małym kółku z brązu zachowały się pozostałości najprawdopodobniej odzieży zmarłej kobiety: tkaniny z lnu (ryc. 9 a-b) oraz wełny (ryc. 9 c-h), fragmenty

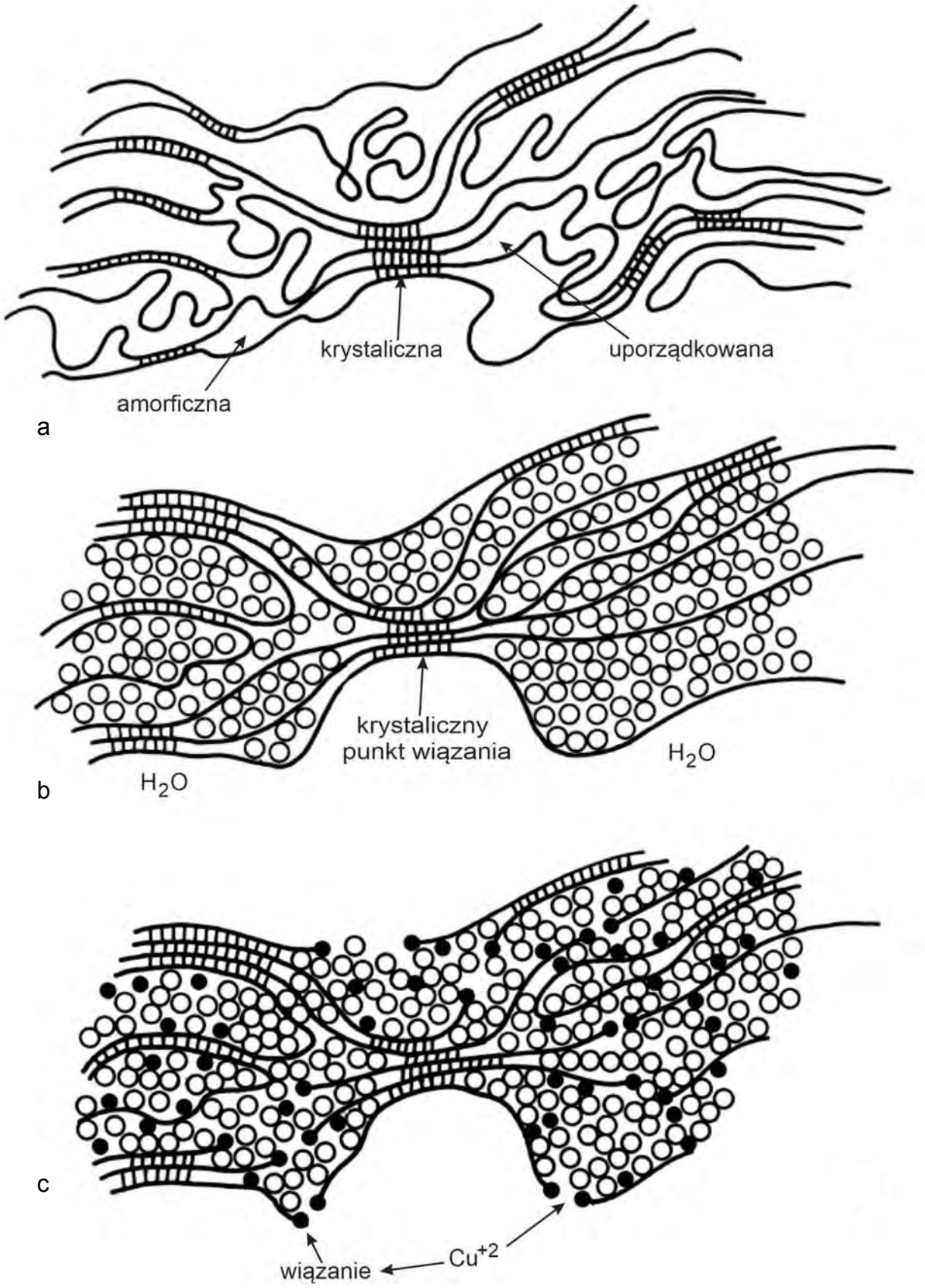


Ryc. 6. Przykłady pseudomorfoz, form negatywowych i pozytywowych włókien zachowanych przy zabytkach ze stopów miedzi (a, b, e i f) oraz żelaznych (c i d)

nici, którą przyszyto do fragmentu odzieży kółko (ryc. 5b i 9 e-f) oraz fragmenty sznurka w uszku wisiora opasanego z bursztynem (ryc. 9 g-h). Materiał badany był już po konserwacji zabytków.

Drewno, łyko i kora

Trudne do zidentyfikowania, choć stosunkowo często spotykane pozostałości drzew i krzewów to łyko, drewno oraz kora. Znajdowane są one zarówno przy ozdobach metalowych jako resztki tkanin, sznurków



Ryc. 7. Wewnętrzna struktura białka lub celulozy włókien tekstylnych: a – w stanie suchym; b – nasiąknięta wodą; c – nasączona roztworem korozyjnym (na podstawie Jakes i Howard III 1986)



Ryc. 8. Przykładowe rodzaje włókien z kolekcji ArcheoMikroLab na Wydziale Archeologii UAM: a-b – wełna (współczesna, owca wrzosówka); c-e – kokon jedwabnika *Bombyx morii*; f-g – włókna oczyszczonego lnu; h-i – włókna bawełny (fot. A. Kurzawska)

czy pasków, jak i w różnego rodzaju przedmiotach użytkowych, np. narzędziach tkackich. Drewno było wykorzystywane jako materiał na oprawy narzędzi metalowych (np. rękojeści noży, pochwy mieczy), natomiast łyko i kora służyły do produkcji różnorodnych pojemników. Często znajdują się przy zabytkach metalowych w postaci częściowo zmineralizowanej, co niekiedy pozwala na ich dokładniejszą identyfikację. Jeśli drewno jest zachowane w stosunkowo dobrym stanie, to możliwe jest oznaczenie jego gatunku, natomiast kora i łyko nie charakteryzują się najczęściej występowaniem cech diagnostycznych, co sprawia, że tylko w nielicznych przypadkach możliwe jest ich rozpoznanie.

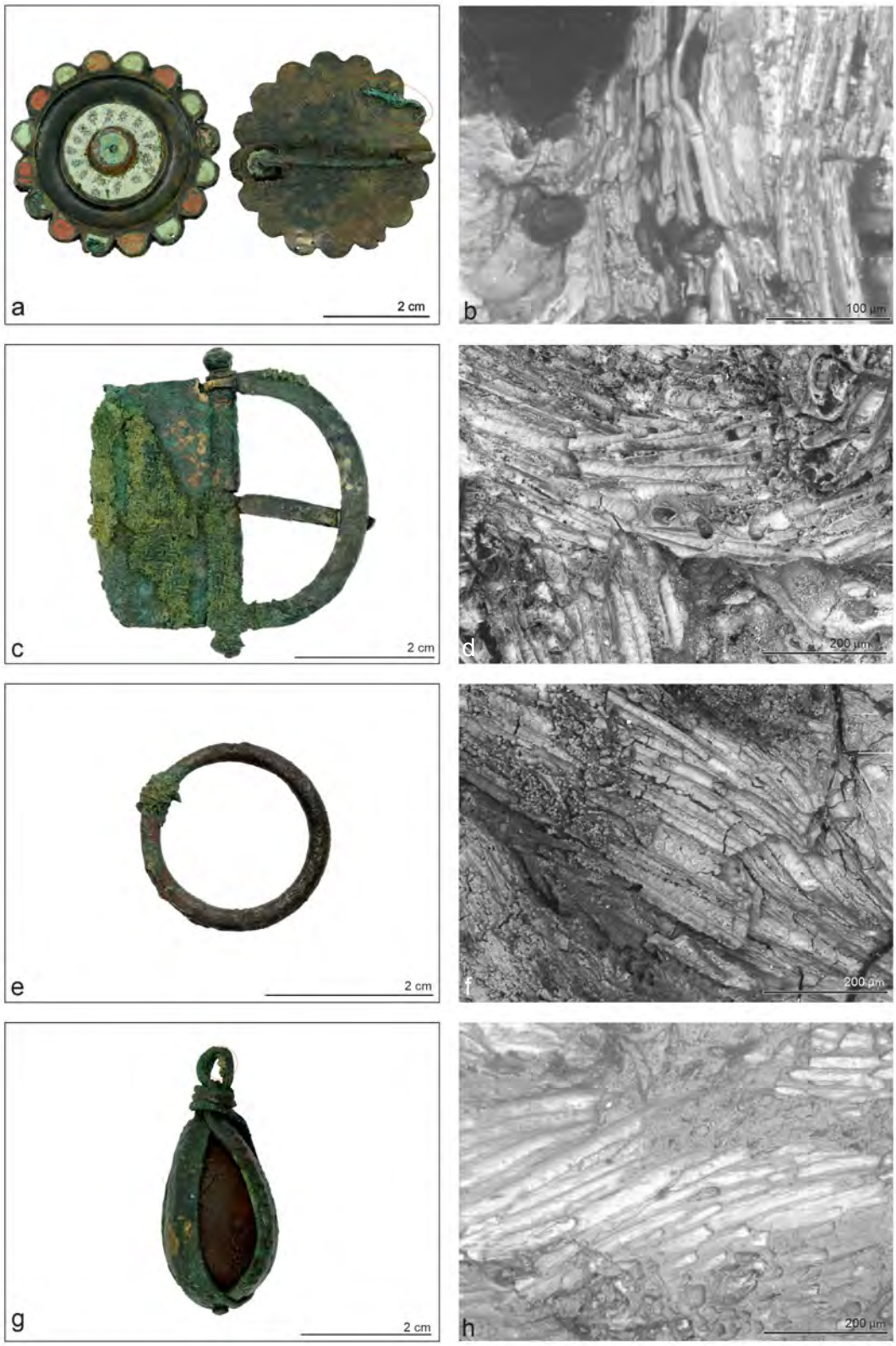
Jak dotąd najstarsze udokumentowane pozostałości łyka z terenu Polski (2500–2300 BC), stwierdzono przy miedzianych blaszkach odkrytych w dwóch pochówkach społeczności kultury ceramiki sznurowej w Dębianach (woj. świętokrzyskie) na stanowisku nr 4 i w Proszowicach (woj. małopolskie) na stanowisku nr 17. Prostokątne blaszki stanowiły element ozdoby głowy – diademu. Zamocowano je na opasce z materiału organicznego, która dzięki analizom mikroskopowym i porównawczym została zidentyfikowana jako pasek łyka brzozy (ryc. 10). Bardzo podobny materiał – również z łyka brzozy, służący do zaczepienia metalowej ozdoby głowy pochodził z grobu ciałopalnego kultury łużyckiej w Opatowie na Śląsku (Moskal-del Hoyo i Badal Garcia 2009). Pozostałości sznurków wykonanych z łyka odkryto dotychczas przynajmniej na dwóch stanowiskach w Polsce. Z późnej epoki brązu pochodzi znalezisko ze stanowiska Kaliska I (woj. pomorskie): fragment sznurka znalezionego przy brązowej falerze (Przymorska-Sztuczka 2021). W skarbie kultury łużyckiej z Susza (woj. warmińsko-mazurskie) również natrafiono na pozostałości sznurków z łyka, zachowane wewnątrz brązowych tulejek, będących ozdobą uprzęży końskiej lub rodzaju pasa – dekoracji odzieży (skarb został przekazany do Muzeum Regionalnego w Suszu i kontekst odkrycia nie jest do końca znany) (Przymorska-Sztuczka i in., 2024). Niestety, brak cech diagnostycznych na zachowanych pozostałościach sznurków z łyka uniemożliwił ich dokładniejszą identyfikację.

Fragmenty drewna częściej są odkrywane przy narzędziach. Dobrym przykładem takich znalezisk z terenu Polski są akcesoria tkackie, jak np. hak wrzeciona oraz pozostałości przęślicy odkryte w jednym z pochówków na stanowisku 4 w Mirosławiu. Przy tych narzędziach z brązu zachowały się częściowo zmineralizowane fragmenty drewna, zidentyfikowane przez M. Moskal-del Hoyo jako trzmielina (*Euonymus* sp.). Drewno trzmieliny ze względu na dużą twardość i małą łupliwość było szczególnie chętnie wykorzystywane w konstrukcji wrzecion w okresie rzymskim i we wczesnym średniowieczu (Cywa 2016; Brown 2020). Ze stanowiska Kaliska II (woj. pomorskie) pochodzi natomiast fragment patyczka z drewna jesionowego (*Fraxinus* sp.), z nanizaną spiralną taśmą brązową (przedmiot liturgiczny?) (Szczurek i Kaczmarek 2022, tabl. 70A i 70B).

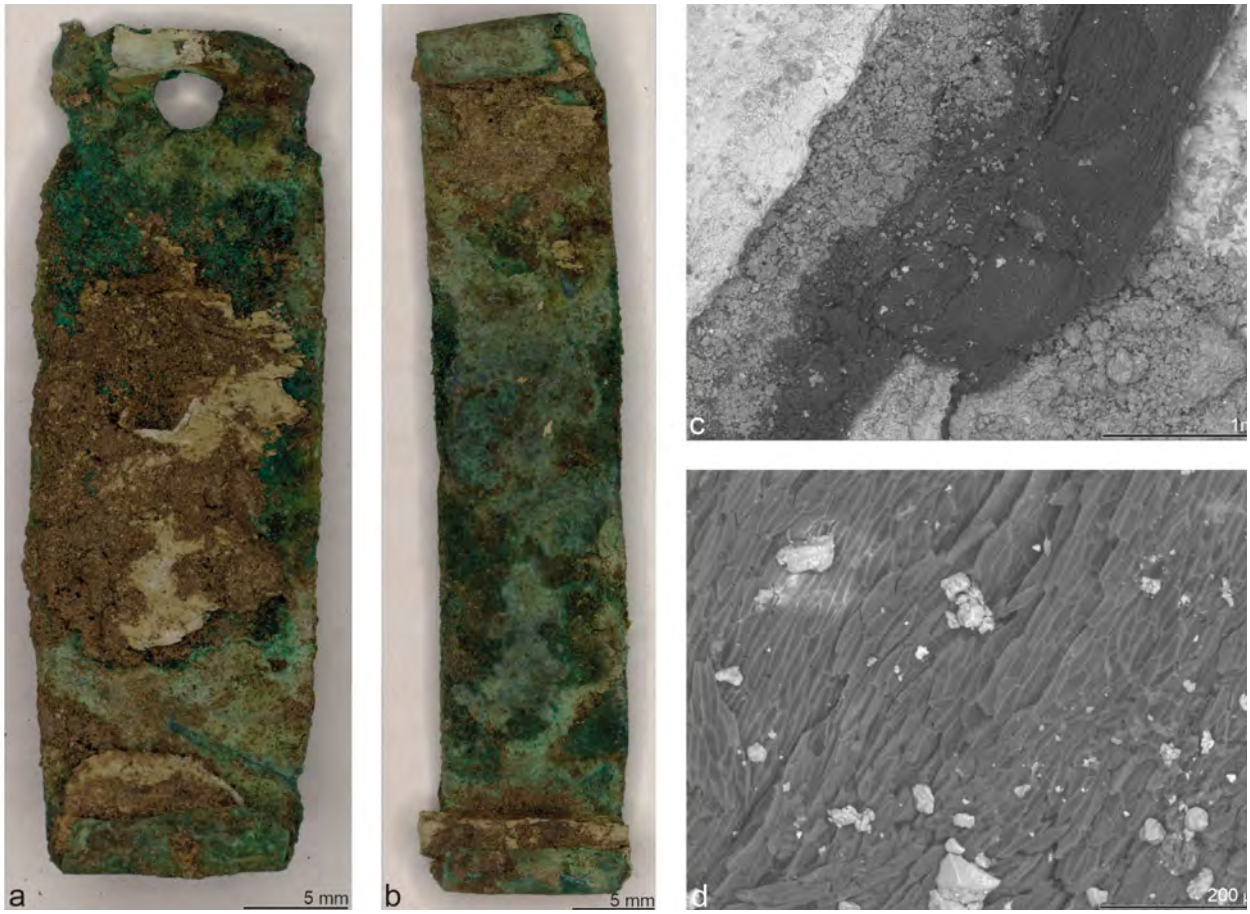
Skóra, ścięgna i włosy

Obok włókien tekstylnych i drewna w pradziejowych i wczesnośredniowiecznych pochówkach odkryć można pozostałości skóry zwierzęcej, powszechnie wykorzystywanej do produkcji różnej kategorii przedmiotów od odzieży, obuwia, przez sakiewki/pojemniki aż po różnego typu rzemienie (por. A. Kowalska, w tym tomie). Pozostałości wyrobów skórzanych, które odkrywane są przy przedmiotach metalowych często występują już tylko w formie zmineralizowanej – jako pseudomorfozy, stąd ich dokładna identyfikacja rzadko jest możliwa. Przykładem tego typu znalezisk, które zidentyfikowano jako pozostałość po skórzanych rzemieniach, odkryto np. na końcówkach napierśników ze skarbu Kaliska I (ryc. 12; Kaczmarek i in., tabl. 10B). Skórzane elementy odkryto również na stanowisku Kaliska II przy falerach oraz brązowym mieczu (pozostałości prawdopodobnie pochwy) (Szczurek i Kaczmarek 2022). Analogiczne znaleziska udokumentowano na ozdobach ze stanowisk Franzhausen II (Austria) i Kyjovice (Czechy) (Peška i in., 2006). Więcej o znaleziskach skór znajduje się w rozdziale A. Kowalskiej, w tym tomie.

Do zupełnie wyjątkowych materiałów, z którymi mamy do czynienia niezwykle rzadko, należą pozostałości ścięgien zwierzęcych, które w pradziejach wykorzystywano do produkcji sznurków czy nici. Obok znalezisk produktów odzwierzęcych do osobliwych pseudomorfoz należą również skóra i włosy ludzkie (ryc. 13). Na takie pozostałości można natknąć się badając ozdoby metalowe z pochówków, które miały bezpośredni kontakt z ciałem. Najczęściej tego typu znaleziska można zidentyfikować na ozdobach, które noszono bezpośrednio na skórze czy włosach. Elementów takich należy szukać po wewnętrznej stronie bransolet, pierścionków oraz zawieszek. Zmineralizowane pozostałości włosów często występują przy ozdobach głowy, a najczęściej na spiralkach,



Ryc. 9. Pozostałości zmineralizowanych włókien tekstylnych na zabytkach odkrytych na stanowisku nr 17 w Mirosławiu: a-b – fibula i zachowane przy niej fragmenty włókien lnu; c-d – sprzączka z pasa oraz fragment zachowanej przy niej zmineralizowanej tkaniny wełnianej; e-f – kółko z fragment zmineralizowanych włókien wełny – prawdopodobnie nić owinięta była wokół kółka (ślad przyszycia?); g-h – wisior opasany, w uszku zmineralizowane fragmenty sznurka z włókien wełny. Zdjęcia zabytków: M. Bether/A. Skowronek; mikrofotografie SEM: A. Kurzawska

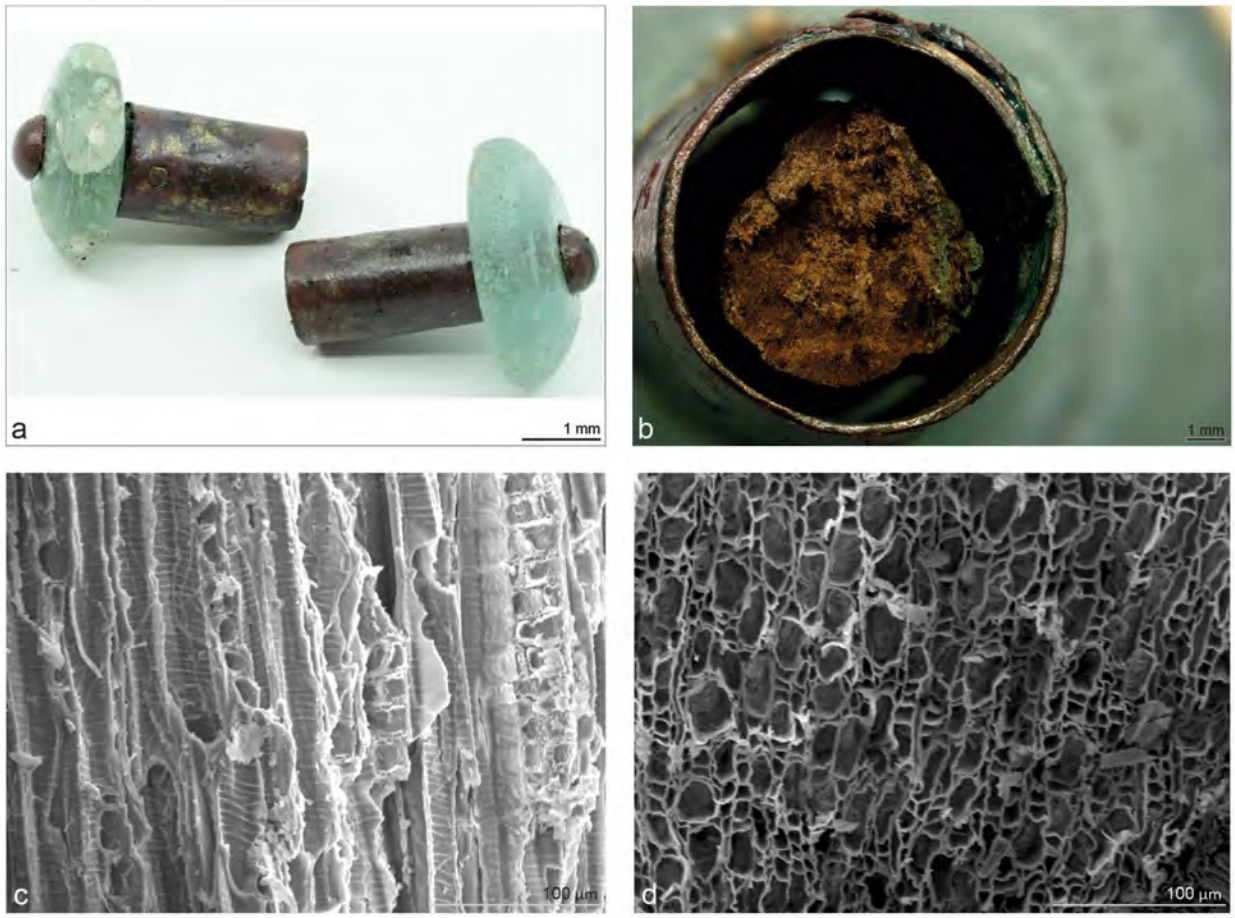


Ryc. 10. Blaszki miedziane tworzące diadem z pozostałościami łyka brzozy odkryte na stanowisku 17 w Parkoszowicach: a-b – fotografie dwóch blaszek z widocznymi pozostałościami organicznymi, c-d – mikrofotografia SEM pozostałości organicznych – łyka brzozy (fot. I. Sobkowiak-Tabaka)

które zdobiły włosy. Ze względu na swoją delikatną strukturę, skóra najczęściej zachowuje się na przedmiotach wykonanych ze stopów miedzi, które tworzą stabilną, trwałą warstwę korozji, pokrywającą powierzchnię zabytków. W tej warstwie często utrwalają się odciski tekstury skóry, takie jak linie papilarne, zmarszczki czy pory. W niektórych przypadkach możliwe jest dostrzeżenie na nich szczegółowych cech dermatoglificznych oraz innych charakterystycznych właściwości powierzchniowych skóry (Grömer i Grassberger 2018).

Pozostałości ludzkiej skóry zostały udokumentowane na zabytkach kultury ceramiki sznurowej z terenu Polski, w tym na odkrytej w grobie w Parkoszowicach lunuli (ryc. 13a-c). Tego rodzaju pseudomorfozy znane są również z austriackich stanowisk, takich jak Großgmain (wczesna epoka brązu) (Grömer 2016), Mauer an der Url (grób 6, datowany na IV w. n.e.) czy Gattendorf (grób 113 z X w. n.e.) (Grömer i Grassberger 2018), a także ze stanowiska Hulìn w Czechach (Peška i in., 2006).

Do zdecydowanie częstszych znalezisk należą pozostałości ludzkich włosów, które zazwyczaj identyfikowane są na ozdobach głowy, takich jak opaski, diademy, kółeczka czy spiralki. Tego typu ślady zostały odkryte jako zmineralizowane pozostałości w warstwie korozji na brązowej spiralce pochodzącej z grobu nr 4 ze stanowiska nr 6 w miejscowości Husynne Kolonia (woj. lubelskie) (MH/A/1537) (ryc. 13e). Charakterystyczne dla tego rodzaju znalezisk jest równoległe ułożenie włókien-włosów (bez struktur typowych dla tekstyliów) oraz widoczna w obrazowaniu SEM powierzchnia o strukturze charakterystycznej dla włosów ludzkich. W przypadku omawianego artefaktu substancja konserwująca, pokrywająca całą jego powierzchnię, została usunięta w miejscu występowania pseudomorfoz, aby umożliwić analizę tych pozostałości. Dzięki badaniom mikroskopowym możliwe było jednoznaczne zidentyfikowanie włókien



Ryc. 11. Pozostałości trzmieliny (*Euonymus* sp.) odkryte wewnątrz brązowych tulejek – ozdobnych zakończeniach przęślicy (fot. M Bether), a – zakończenia przęślicy; b – pozostałości zmineralizowanego drewna – trzonu przęślicy, wewnątrz brązowej tulejki c – przekrój styczny drewna; d - przekrój poprzeczny drewna (identyfikacja M. Moskal-del Hoyo; fot. A. Kurzawska, I. Sobkowiak-Tabaka)

jako włosy ludzkie (ryc. 13e-f). Podobne znaleziska włosów ludzkich odkryto także na zawieszce z grobu 113 w Gattendorf (grób 113) (Grömer i Grassberger 2018) oraz na bransolecie ze stanowiska Trstěnice (Peška i in., 2006).

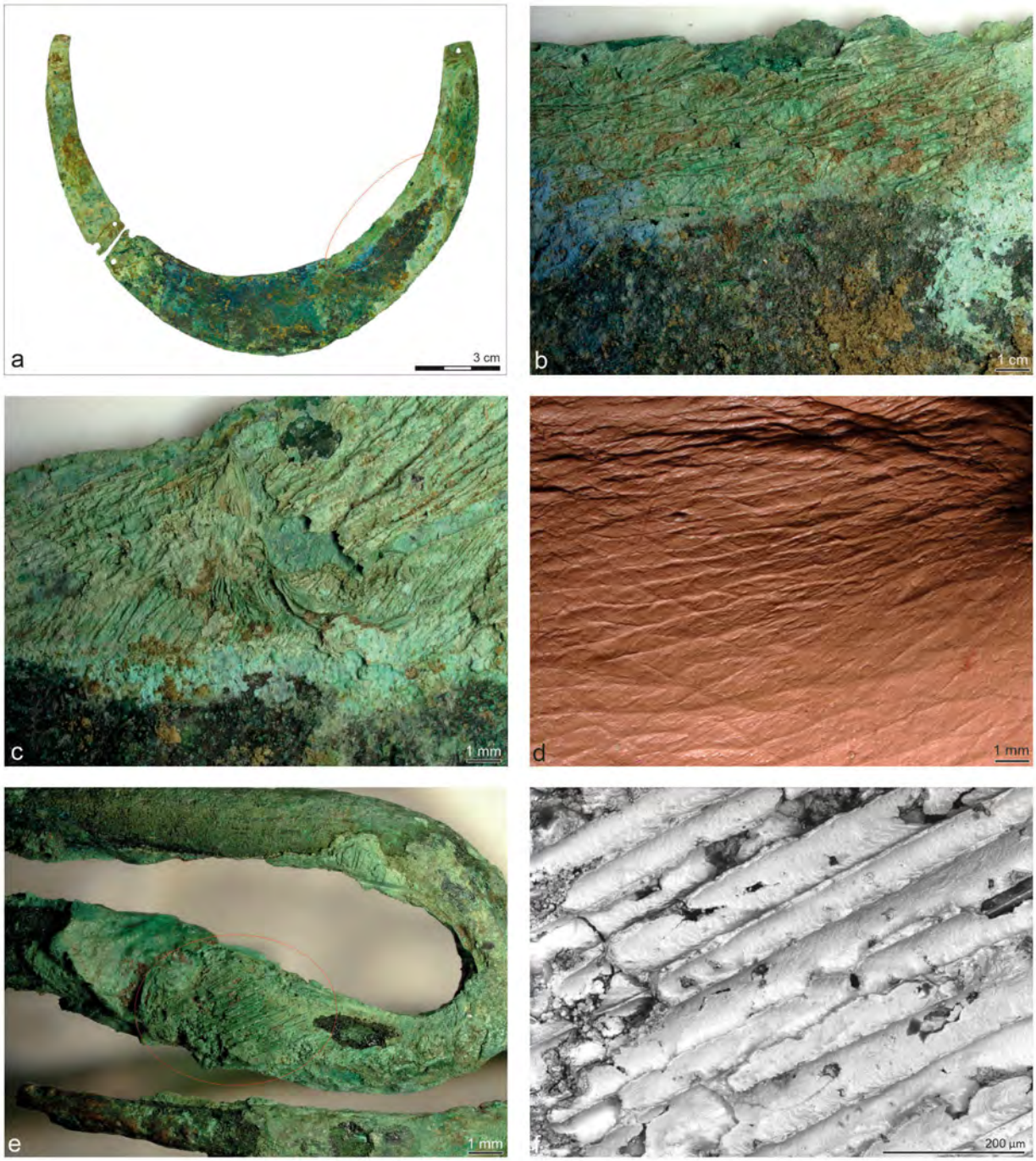
OWADY

W trakcie badań pochówków szkieletowych na stanowiskach archeologicznych czy w kryptach, często wśród odkrywanych przedmiotach metalowych natrafiamy na szczątki owadów związanych z procesem rozkładu – towarzyszących zwłokom (ludzkim lub zwierzęcym), a także ektopasożytów, takich jak wszy, pluskwy czy pchły (por. Kadej i in., 2021) (ryc. 14). Spośród owadów najczęściej spotykane w postaci pseudomorfoz na zabytkach metalowych są przedstawiciele muchówek (Diptera), a głównie ich osłonki poczwarkowe (puparia) (Ryc. 14 b, d). Inne szczątki owadów zachowują się wyjątkowo rzadko. Stopień ich rozdrobnienia i deformacji znacząco wpływa na możliwość dalszej analizy, ponieważ fragmenty pozbawione cech taksonomicznych nie mogą być dokładnie oznaczone (Kadej i in., 2021). Niemniej jednak takie szczątki są często identyfikowane na zabytkach metalowych z pochówków, podczas obrazowania mikroskopowego (SEM). Jednym z wielu przykładów są ostatnie badania prowadzone przez autorki nad ozdobami z miedzi pochodzących z pochówków wiązanych z kulturą ceramiki sznurowej i odkrytych w Łuczycach i Parkoszowicach (woj. małopolskie). Zmineralizowane dzięki korozji, pozostałości owadów widoczne były na powierzchniach wszystkich analizowanych ozdób (ryc. 14). Analogiczne znaleziska zabytków metalowych ze szczątkami owadów odkryto również na czeskich stanowiskach Hulìn i Holubice, datowanych na 2200-1800 BC (Peška i in.,





Ryc. 12. Pozostałości skóry zwierzęcej zachowanej na końcach napierśnika, skarb z Kalisk I: a – końce napierśników; b – powiększony obraz zmineralizowanych pozostałości (fot. A. Kurzawska)

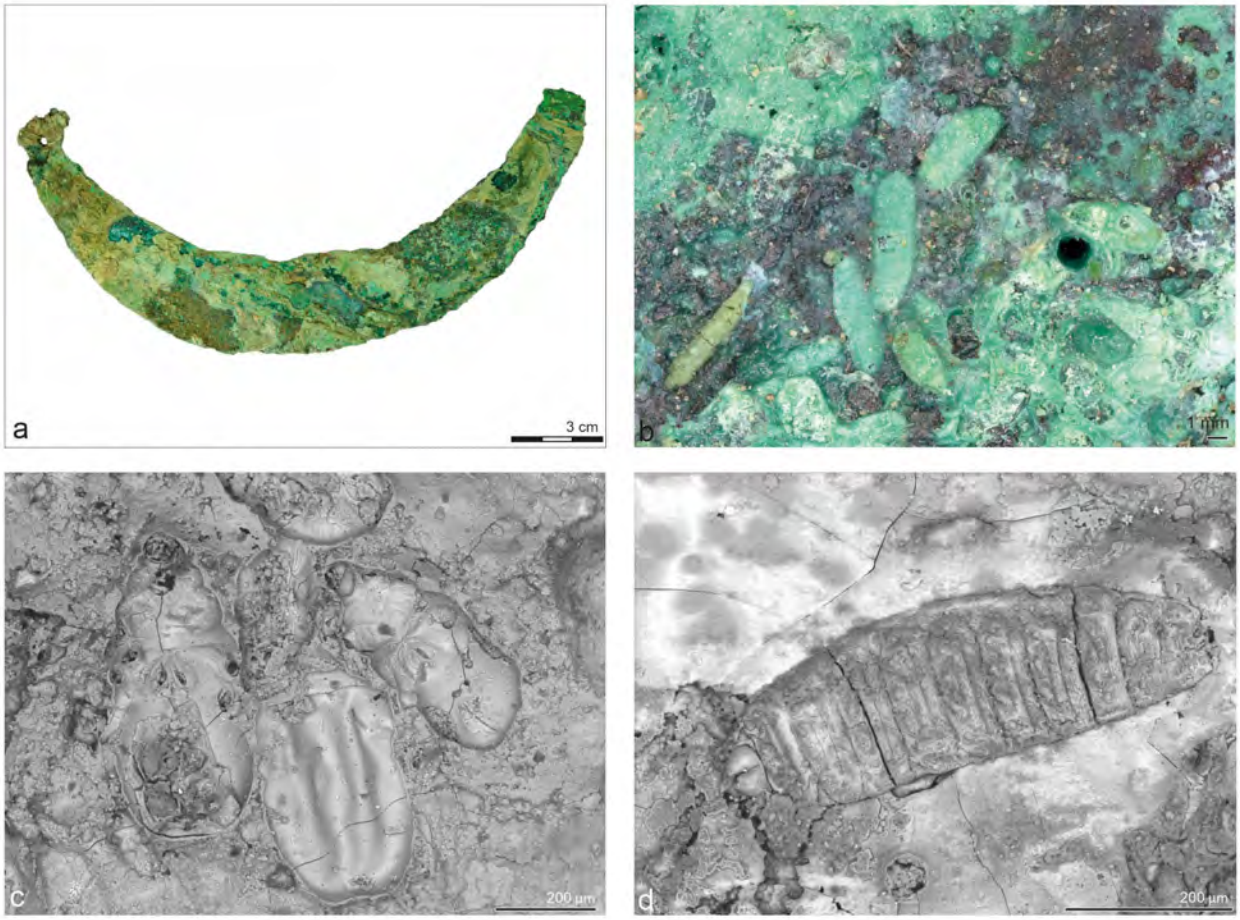


Ryc. 13. Przykład zmineralizowanych pseudomorfoz skóry ludzkiej: a – lunula z Parkoszowic stan. 17; b-c – zdjęcie pozostałości skóry; d – współczesny odcisk skóry ludzkiej w glinie; e – spiralka z grobu odkryta na stanowisku nr 6 w Husynne Kolonia (Muzeum im. ks. Stanisława Staszica w Hrubieszowie MH/A/1537); f – mikrofotografia SEM pseudomorfoz włosów ludzkich odkrytych na spiralce (fot. Maciej Gembicki, I. Sobkowiak-Tabaka, A. Kurzawska)

2006). Zmineralizowane pozostałości ektopasożytów (roztoczy oraz gnid wszy odzieżowej) odkryto na tekstyliach w dwóch grobach wczesnośredniowiecznych na cmentarzysku w Thunau koło Gars w Dolnej Austrii (Grömer i in., 2017; Grömer i Grassberger 2018).

PODSUMOWANIE

Pomimo zazwyczaj małych rozmiarów zachowanych struktur organicznych na zabytkach ze stopów metali, zmineralizowane pozostałości materiałów organicznych doskonale zachowują ich kształt i morfologię, stanowiąc



Ryc. 14. a – Przykład zmineralizowanych pozostałości owadów na lunuli odkrytej w grobie na stanowisku nr 2 w Łuczycach: a – lunula; b-d – zmineralizowane pozostałości owadów (fot. M. Gembicki, I. Sobkowiak-Tabaka, A. Kurzawska)

cenne źródło wiedzy zarówno o wykorzystywanych materiałach w przeszłości, jak i o tafonomii danego kontekstu archeologicznego. Badania tej specyficznej formy materiałów organicznych dostarczają informacji na temat wykorzystania przez człowieka surowców, które często nie zachowują się lub są trudne do uchwycenia w materiałach archeologicznych. Zmineralizowane pozostałości organiczne często stanowią integralną część powierzchniowej warstwy korozji zabytków, stąd potrzeba badania ich przed właściwym procesem konserwacji zabytków. Dostęp do nowoczesnych laboratoriów wyposażonych w mikroskopy optyczne, cyfrowe i elektronowe umożliwia przeprowadzenie wnikliwych analiz tych pozostałości. Dzięki intensywnym badaniom przeprowadzonym w ostatnich latach, obserwujemy wyraźny wzrost liczby i szczegółowości danych dotyczących znalezisk materiałów organicznych, w tym z najwcześniejszych okresów prehistorii. Rośnie również świadomość potencjału tego typu badań wśród archeologów, co znajduje odzwierciedlenie w zwiększonym pozyskiwaniu omawianych źródeł podczas wykopalisk oraz ich przekazywaniu do szczegółowych analiz jeszcze przed procesem konserwacji zabytków. Ważnym wsparciem w badaniach tej kategorii źródeł są kolekcje porównawcze materiałów oraz ich cyfrowa (mikroskopowa) dokumentacja. Tworzenie szerokich baz danych, zarówno materiałów referencyjnych, jak i poprawnie zidentyfikowanych pozostałości z wykopalisk, zdecydowanie ułatwiłoby pracę nad tą kategorią źródeł.

PODZIĘKOWANIA

Składamy serdeczne podziękowania Idze Fabiszak, Annie Hyrchale, Maciejowi Kaczmarkowi, Andrzejowi Michałowskiemu, Marcinowi M. Przybyle, Grzegorzowi Szczurkowi, Agacie Sztyber, Piotrowi Włodarczakowi i Markowi Żółkiewskiemu za udostępnienie zabytków do badań. Dziękujemy również Magdalenie Moskal-del Hoyo za identyfikację drewna

ze stanowiska w Mirosławiu oraz Margaricie Glebie za weryfikację identyfikacji części pseudomorfoz.

LITERATURA

Banck-Burgess, J. 1999. Hochdorf IV. *Die Textilfunde aus dem späthallstattzeitlichen Fürstengrab von Eberdingen-Hochdorf (Kreis Ludwigsburg) und weitere Grabtextilien aus hallstatt- und latènezeitlichen Kulturgruppen*. Forschungen und Berichte zur Vor- und Frühgeschichte in Baden-Württemberg 70. Stuttgart.

Bender Jørgensen, L. 1992. *North European textiles until AD 1000*. Aarhus.

Brown, J. 2020. *Farmsteads and funerary sites: The M1 junction 12 improvements and the A5–M1 Link Road, Central Bedfordshire. Archaeological investigations prior to construction 2011 & 2015-16.* Oxford.

Budd, C., Bogucki, P., Lillie, M., Grygiel, R., Lorkiewicz, W., Schulting, R. 2020. All things bright: copper grave goods and diet at the Neolithic site of Osłonki, Poland. *Antiquity* 94(376): 932–947, https://doi.org/10.15184/aqy.2020.102.

Budziszewski, J., Jarosz, Libera, J., Szczepanek, A., Witkowska, B., Włodarczak, P. 2016. Kurhany ze stanowiska 30 w Stryjowie, pow. krasnostawski, (w:) P. Jarosz, J. Libera, P. Włodarczak (red.), *Schyłek neolitu na Wyżynie Lubelskiej*. Kraków, 381–409.

Catling, D., Grayson, J. 2004. *Identification of vegetable fibres*. London.

Chen, H.L., Jakes, K.A., Foreman, D.W. 1998. Preservation of archaeological textiles through fibre mineralization. *Journal of Archaeological Science* 25: 1015–1021.

Caricola, I., Charles, A., Tirillò, J., Charlton, F., Barton, H., Breglia, F., Rossi, A., Deforian, M.Ch., De Mariinis, A.M., Harris, S., Pellegrini, A., Scacchetti, F., Boccuccia, P. Miari, M., Dolfini, M. 2022. Organic residue analysis reveals the function of bronze age metal daggers. *Scientific Report* 12, 6101, https://doi.org/10.1038/s41598-022-09983-3.

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.

Cywa, K. 2016. Znaczenie użytkowe drewna *Euonymus* sp. w średniowiecznej Polsce. *Fragmenta Floristica et Geobotanica Polonica* 23(2): 321–347.

Davis, M., Harris, S. 2023. Textiles in a Viking Age hoard: Identifying ephemeral traces of textiles in metal corrosion products. *Journal of Archaeological Science: Reports* 48: 103796, https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2022.103796.

Drążkowska, M., Cybulska, A. 2021. Tekstylia, (w:) A. Kurzawska, I. Sobkowiak-Tabaka (red.), *Mikroprzeszłość. Badania specjalistyczne w archeologi*i. Poznań, 387–404.

Emery, I. 1980. *The Primary structures of fabric*. Waszyngton.

Fischer, A. 2010. Current examinations of organic remains using variable pressure scanning electron microscopy [VP-SEM], (w:) E. Andersson Strand, M. Gleba, U. Mannering, C. Munkholt, M. Ringgaard (red.), *North European Symposium for Archaeological Textiles X*. Oxford, 57–62.

Foxhall, L. 2017. The fabric of society: recognising the importance of textiles and their manufacture in the ancient past. *Antiquity* 91: 808–811.

Gillard, R.D., Hardman, S.M., Watkinson, D.E. 1993. Recent advances in textile studies using FTIR microscopy, (w:) N.H. Tennent (red.), *Conservation science in the UK: textile studies using FTIR spectroscopy*. London, 71–76.

Gillard, D., Hardman, S.M. 1996. Investigation of fiber mineralization using Fourier transform infrared microscopy, (w:) M.V. Orna (red.), *„ARCHAEOLOGICAL CHEMISTRY" Organic, inorganic and biochemical analysis, American Chemical Society Symposium Series 625*. Washington, 173–186.

Gillard, D., Hardman, S.M., Thomas, R.G., Watkinson, D.E. 1994. The mineralization of fibres in burial environments. *Studies in Conservation* 39(2): 132–140.

Gleba, M. 2017. Tracing textile cultures of Italy and Greece in the early first millennium BC. *Antiquity* 144: 1205–1222, https://doi.org/10.15184/aqy.2017.144.

Good, I. 2001. Archaeological textiles: a review of current research. *Annual Review of Anthropology* 30(1): 209–26.

Grömer, K. 2016. The art of Prehistoric Textile Making. Austrian Science Fund (FWF). Wien, https://doi.org/10.26530/oapen_604250.

Grömer, K., Nowotny, E., Obenaus, M. 2017. Simple linen, patterned fabrics and silk textile. Textile culture on the south border of Great Moravia: Thunau in Lower Austria, (w:) M. Bravermanová., H. Březinová, J. Malcolm-Davies, (red), *Archaeological textiles – links between past and present*. NESAT XIII, Liberece-Praha, 95–106.

Grömer, K., Grassberger, M. 2018. Organic remains from archaeological contexts. Forensic taphonomy applied to prehistoric and early medieval inhumation graves. *Neues Jahrbuch für Geologie und Palaontologie-Abhandlungen. 8th International Meeting on Taphonomy and Fossilization* 2: 203–216.

Grygiel, R. 2008. *Neolit i początki epoki brązu w rejonie Brześcia Kujawskiego i Osłonek. T. II. Cz. 2. Środkowy neolit. Grupa brzesko-kujawska kultury lendzielskiej*. Łódź.

Grupa, M. 2017. Wool textiles from the Roman Period at the site of Grudna, Poland. *Światowit* 56: 137–145.

Jakes, K. A., Howard III, J.H., 1986. Replacement of protein and cellulosic fibers by copper minerals and the formation of textile pseudomorphs, (w:) H.L. Needles, S.H. Zeronian (red.), *Historic textile and paper materials conservation and characterization, developed from a symposium at the 188th meeting of the American Chemical Society*. Washington, 277–287.

James, M. A., Reifarth, N., Mukherjee, A. J., Crump, M. P., Gates, P. J., Sandor, P., Robertson, F., Pfälzner, P. and Evershed, R. P. 2009. High prestige royal purple dyed textiles from the Bronze Age royal tomb at Qatna, Syria. *Antiquity* 83(322): 1109–1118.

Janaway, R. 1983. Textile fibre characteristics preserved by metal corrosion: The potential of S.E.M. studies. *The Conservator* 7(1): 48–52.

Janaway, R. 1985. Dust to dust: the preservation of textile materials in metal artefact corrosion products with reference to inhumation graves. *Science and Archaeology* 2: 29–34.

Janaway, R.C. 1989. Corrosion preserved textiles: Mechanisms, bias and interpretation, (w:) R.C. Janaway, B. Scott, B. (red.), *Evidence preserved in corrosion products: new fields in artifact studies, United Kingdom. Institute for Conservation Occasional Paper 8*. London, 21–29.

Jia, R., Zheng, H., Chen, H., Feng M., Jiao J., Kang X., Yu J., Wang B., Zhang Z., Zhou Y., Peng Z. 2024. Archaeological textiles preserved by copper mineralization. *Heritage Science* 12: 312, https://doi.org/10.1186/s40494-024-01418-8.

Józefowska, A., Kamszyek L., Żygadło L. 2023. Textiles from the Hallstatt period cemetery in Domasław, Wrocław district (Poland). Textile symbolism of the funeral rite. *Documenta Praehistorica* 50: 446–468, https://doi.org/10.4312/dp.50.7.

Kaczanowski, P., Kozłowski, J.K. 1998. *Najdawniejsze dzieje ziem polskich (do VII w.)*. Kraków.

Kaczmarek, M., Szczurek, G., Krzysiak, A. 2021. *Kaliska I. Skarb przedmiotów metalowych z późnej epoki brązu na Pomorzu*. Poznań.

Kadej, M., Konwerski, Sz., Hałuszko, A. 2021. Archeoentomologia, (w:) A. Kurzawska, I. Sobkowiak-Tabaka (red.), *Mikroprzeszłość. Badania specjalistyczne w archeologii*. Poznań, 131–152.

Maik, J. 2012. *Włókiennictwo kultury wielbarskiej*. Łódź.

Maik, J., Łuczkiewicz, P., Kleemann, J. 2023. Tekstylia z cmentarzyska kultury wielbarskiej w Malborku-Wielbarku, stan. 1 (5). *Archeologia Polski* 68: 161–179, https://doi.org/10.23858/APol68.2023.005

Manecki, A. i Muszyński, M. 2008. *Przewodnik do petrografii*. Kraków.

Margariti, Ch. 2019. The application of FTIR microspectroscopy in a non-invasive and non-destructive way to the study and conservation of mineralised excavated textiles. *Heritage Science* 7: 63, https://doi.org/10.1186/s40494-019-0304-8.

Michałowski A. 2017. Grób „księżniczki" z kurhanu 7 na stan. 37 w Mirosławiu, pow. pilski, woj. wielkopolskie, (w:) A. Michałowski, M. Strawa, R. Bartkowiak, M. Teska (red.), *Archeologia sarbskich lasów*. Sarbia, 113–122.

Moskal-del Hoyo, M., Badal Garcia E. 2009. Botanical analysis of an organic matter object found in the urn grave 1395 from the Opatów necropolis (Kłobuck, Silesia). *Sprawozdania Archeologiczne* 61: 243–256.

Möller-Wiering S. 2011. *War and worship textiles from 3rd to 4th-century AD weapon deposits in Denmark and Northern Germany*. Oxford, Oakville.

Peška, J., Králík, M., Selucká, A. 2006. Residua a otisky organických látek v korozních produktech mědi a jejích slitin Pilotní studie. *Památky Archeologicke* 97: 5–46.

Przymorska-Sztuczka, M. 2020. Pozostałości włókien roślinnych, (w:) J. Gackowski, P.H. Dąbrowski (red.), *Znalezisko gromadne przedmiotów metalowych kultury łużyckiej w Brudzyniu, pow. żniński, VI Sprawozdanie Biskupińskie, Archeologia Epok Brązu i Żelaza. Studia i materiały* 3, Biskupin-Toruń, 171–174.

Przymorska-Sztuczka, M. 2021. Analiza fragmentów sznurka ze skarbu przedmiotów brązowych z Kalisk, pow. szczecinecki, woj. zachodniopomorskie, (w:) M., Kaczmarek, G. Szczurek, A. Krzysiak A. *Kaliska I. Skarb przedmiotów metalowych z późnej epoki brązu na Pomorzu*. Poznań, 407–409.

Przymorska-Sztuczka, M., Gackowski, J., Kowalski, Ł., Garbacz-Klempka, A., Kamiński, D., Szczepański, Ł. 2024. A metal hoard from Susz provides new evidence for the use of bast cordage during the Lusatian period in Poland. *Journal of Archaeological Science: Reports* 60, https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2024.104856.

Rast-Eicher A. 2016. *Fibres. Microscopy of archaeological textiles and furs*. Budapest.

Reifarth, N., Drewello, R. 2011. Textile Spuren in der Königsgruft Vorbericht zu ersten Ergebnissen und dem Potential zukünftiger Forschungen, (w:) P. Pfälzner (red.), *Interdisziplinäre Studien zur Königsgruft, Interdisziplinäre Studien zur Königsgruft von Qatna*, Qatna Studien I. Wiesbaden, 469–482.

Reynaud, C, Thoury, M, Dazzi, A, Latourc, G, Scheel, M., Li, J.Y., Thomas, A., Moulhérat, Ch., Didier, A., Bertrand, L. 2020. In-place molecular preservation of cellulose in 5,000-year-old archaeological textiles. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117(33): 19670–19676.

Rudnicki, M., Miłek, S., Ziąbka, L., Kędzierski A. 2009. Mennica celtycka pod Kaliszem. *Wiadomości Numizmatyczne* 53(2): 103–145.

Sawbridge, M., Ford, J.E. 1987. *Textile fibres under the microscope*. Manchester.

Sibley, L. R., Jakes, K. A. 1984. Survival of protein fibers in archaeological contexts. *Science and Archaeology* 26, 17–27.

Słomska-Bolonek, J. 2024. Textiles from the Late Bronze Age and the Early Iron Agein the Vistula and Oder River Basin – Poland. *Przegląd Archeologiczny* 72: 117-152.

Słomska-Bolonek, J., Antosik, Ł. 2022. (w:) M. Michnik, K. Dzięgielewski (red.), *Cmentarzysko z wczesnej epoki żelaza w Świbiu na Górnym Śląsku*, t. 2. Gliwice, 216–237.

Solazzo, C., Rogers, P.W., Weber, L., Beaubien, H.F., Wilson, J., Collins, M. 2014. Species identification by peptide mass fingerprinting (PMF) in fiber products preserved by association with copper-alloy artefacts. *Journal of Archaeological Scienc*e 49: 524–535.

Tóth, M. 2017. *Hair and fur. Atlas of Central European mammals*. Budapest.

Vollmer, J. 1974. Textile pseudomorphs on Chinese bronzes, (w:) I. Emory (red.), *Roundtable on museum textiles*. Washington, 170–174.

Wilk, S. 2006. Graves of the Lublin-Volhynian Culture at site 2 in Książnice, district of Busko Zdrój 2001/2002, 2003 exploration seasons. *Sprawozdania Archeologiczne* 58: 247–270.





Archeoskórnictwo

Anna B. Kowalska

WPROWADZENIE

Termin „archeoskórnictwo" nie pojawił się dotąd w polskiej literaturze przedmiotu, chociaż badania nad wyrobami ze skóry, zwłaszcza z okresu średniowiecza, mają już długą tradycję sięgającą okresu przedwojennego. Znaczenie skór zwierzęcych w życiu codziennym mieszkańców wszystkich stref klimatycznych, od początku cywilizacji do czasów współczesnych, w świetle dotychczasowych badań archeologicznych, etnograficznych, etnologicznych i kostiumologicznych, jest niepodważalne. Przez całe tysiąclecia na wszystkich kontynentach ludzie reprezentujący różne kultury doskonalili metody przetwarzania surowych pokryć różnych zwierząt lądowych i wodnych w tworzywo spełniające ich oczekiwania oraz potrzeby – te codzienne, utylitarne, a także estetyczne. Proste metody zabezpieczania skór przed gniciem, jak: dymienie, wędzenie i suszenie, z czasem zostały zastąpione świadomym wprowadzaniem czynników utrwalających – tłuszczów roślinnych i zwierzęcych, minerałów i garbników roślinnych. Zróżnicowany jakościowo materiał był wykorzystywany wszechstronnie, w niemal wszystkich dziedzinach życia począwszy od odzieży do wyposażenia wnętrz i transportu.

CZYM JEST ARCHEOSKÓRNICTWO?

Pierwszy człon *archeo-* w sposób jednoznaczny wskazuje na związek z przeszłością, czymś dawnym, prehistorycznym, starożytnym lub archeologicznym. Natomiast – *skórnictwo* to pozyskiwanie i przetwarzanie surowca oraz wytwarzanie przedmiotów w ramach wytwórczości domowej – na potrzeby własne, i rzemieślniczej – z przeznaczeniem na zbyt. Wyrażenie „archeoskórnictwo" obejmuje zatem nie tylko ogół czynności związanych z pozyskiwaniem i obróbką skór, ale też wyroby gotowe, odpady produkcyjne, narzędzia niezbędne w produkcji, miejsca obróbki skóry oraz sposoby utylizacji odpadów poprodukcyjnych. Archeoskórnictwo łączy archeologię z zoologią, naukę humanistyczną z przyrodniczą. Wymaga zatem stosowania metod badawczych właściwych obu tym dyscyplinom

DOI: 10.64158/heou7b6pe0

naukowym. Dotąd nie została wyodrębniona z archeozoologii, chociaż przedmiotem badań jest surowiec pozyskiwany ze zwierząt.

W polskiej literaturze przedmiotu pojawiają się dwa wyrażenia: wytwórczość bądź produkcja skórnicza albo skórzana, które często traktowane są synonimicznie. Należy jednak zwrócić uwagę, że „wytwórczość" to ogół czynności zmierzających do wytworzenia przedmiotu, „produkcja" ma szersze znaczenie. To nie tylko proces technologiczny, w którym wykorzystywane są urządzenia i maszyny, wytwarzanie masowe lub seryjne, ale też magazynowanie, dystrybucja i transport.

„Skórnictwo" lub „wytwórczość skórnicza" natomiast to ogół czynności związanych z pozyskiwaniem i wyprawą surowych skór zwierzęcych, częściej określane wspólnym mianem garbarstwa lub wyprawy (por. Samsonowicz 1982: 9 n.). „Wytwórczość skórzana" oznacza po pierwsze ogół czynności zmierzających do wykonania przedmiotów ze skóry garbowanej (SPP 1982: 694; SJP 1983: 239–240.), po drugie same produkty finalne w postaci różnorakich przedmiotów codziennego użytku. „Skórnictwo" ma zatem znaczenie nadrzędne (ryc. 1). Pod tym pojęciem kryje się zarówno garbarstwo, jak i wytwórczość skórzana. W przypadku przedmiotów pozyskiwanych metodami archeologicznymi zasadnym wydaje się także wprowadzenie do słownika pojęć: „skóra wykopaliskowa" lub „skóra archeologiczna" na określenie wszystkich znalezisk z tego surowca, niezależnie od stanu zachowania i funkcji – jako pojęcia najbardziej ogólnego i nadrzędnego.

ZARYS HISTORII BADAŃ NAD SKÓRĄ WYKOPALISKOWĄ

Przedmioty skórzane pozyskiwane metodami archeologicznymi od dawna są przedmiotem badań i studiów na całym świecie – w Polsce od ponad ośmiu dekad. Wraz z rozwojem archeologii i przyrostem ilościowym źródeł zmieniało się podejście badaczy do problematyki skórnictwa – od prostej konstatacji występowania w materiałach wykopaliskowych przedmiotów wykonanych ze skóry zwierzęcej, przez najbardziej oczywiste podziały funkcjonale, po rozbudowane systemy typologiczne wybranych grup przedmiotów. We wszystkich krajach rozwój badań nad dawnym garbarstwem opierał się początkowo na ustaleniach z zakresu etnografii oraz na współczesnych podręcznikach do garbarstwa i szewstwa. Obecnie niektóre z dawnych dogmatycznych ustaleń funkcjonujących w literaturze od dziesięcioleci doczekały się krytyki na podstawie wyników specjalistycznych analiz opartych na nowoczesnych technologiach (np. Gräf 2015).

Z satysfakcją należy odnotować także wzrost zainteresowania tak „nieatrakcyjnymi" źródłami, jak odpady powstające w produkcji skórniczej i skórzanej, które są podstawą studiów nad organizacją pracy, wyposażeniem i lokalizacją pracowni oraz warsztatów produkcyjnych w przypadku badań nad średniowieczem i okresem nowożytnym (np. Buśko 1999; Blusiewicz 2017; Kowalska 2017a; Wywrot-Wyszkowska 2017, 2019; por. też Skuza 2008) oraz nad mikroszczątkami wyrobów skórzanych datowanych ogólnie na pradzieje, z wyposażenia pochówków i skarbów (np. Lampe 1982; Rząska, Walenta 2017; Kowalska, Maik, Słomska 2019; Blajer, Kozłowska 2021: 241; Kaczmarek, Szczurek, Krzysiak 2021).

W Polsce, podobnie jak w całej Europie, niezmiennie dużym zainteresowaniem badaczy cieszy się przede wszystkim skórzane obuwie, szczególnie licznie występujące w nawarstwieniach kulturowych miast o średniowiecznej metryce, w studniach-latrynach i wszędzie tam, gdzie istnieją dogodne warunki sprzyjające przetrwaniu wyrobów z surowców organicznych (w torfowiskach, wrakach statków, zamkniętych pomieszczeniach bez dostępu powietrza, jaskiniach, grobowcach). Coraz częściej w literaturze przedmiotu pojawiają się również opracowania przedmiotów skórzanych z okresu nowożytnego, a nawet współczesności (np. Drążkowska 2007a, 2007b, 2009, por. też 2011; Jakimowicz, Rodzik 2008; Ceynowa 2009; Cnotliwy 2014; Kowalska 2019a).

Zupełnie inny charakter mają badania nad skórami pradziejowymi. Pomijam tu znaleziska wyrobów ze skóry odkrywanych na obszarach znajdujących się w strefie klimatu suchego i gorącego (np. ostatnio Nicolle 2024). W Polsce, w klimacie umiarkowanym ciepłym, najczęściej są to niewielkie fragmenty zintegrowane z przedmiotami metalowymi lub szczątki wyrobów, których funkcji można się jedynie domyślać. W takich przypadkach zasadnicze znaczenie mają analizy pozwalające na identyfikację gatunkową skóry.

Wraz z przyrostem liczby materiałów wykopaliskowych i ich stopniowym wprowadzaniem do obiegu naukowego, czy to na stronach internetowych placówek naukowych, stowarzyszeń i organizacji, czy też w postaci monografii źródłowych i opracowań

SKÓRNICTWO			
wytwórczość skórnicza		wytwórczość skórzana	
pozyskiwanie skór zwierzęcych	garbarstwo/wyprawa	wytwarzanie przedmiotów ze skóry garbowanej	miejsca obróbki skóry garbowanej

Ryc. 1. Czym jest skórnictwo

pojedynczych, często spektakularnych wyrobów skórzanych, wzrasta zainteresowanie tą kategorią źródeł, pojawiają się też prace na temat metodyki badań nad przedmiotami skórzanymi i ich wciąż niewykorzystanego potencjału poznawczego (Kaźmierczyk 1970; Milewska 1977, 1980, 1989/1990; Eberle 1984; 1985; Wywrot 1995; Wywrot-Wyszkowska 2008; Kowalska 2010). Duże znaczenie dla zrozumienia funkcjonowania wyrobów skórzanych w przeszłości ma archeologia eksperymentalna (por. ostatnio Kamper 2020; Klek 2024).

Rozpoznanie gatunków skór, ustalenie dawnych sposobów pozyskiwania i garbowania pokryć zwierzęcych, wiek i płeć ubitych zwierząt, sposoby magazynowania skór surowych, skór garbowanych oraz funkcja i dystrybucja wyrobów gotowych to tylko niektóre z zagadnień, których wyjaśnienie lub przybliżenie wykracza poza możliwości warsztatowe archeologii i wymaga współpracy z historykami, historykami sztuki, zoologami, fizykami i chemikami. Wszystkie wymienione zagadnienia wiążą się z „archeoskórnictwem", które obejmuje swym znaczeniem szerokie spektrum zagadnień związanych ze skórą i powinno na stałe zostać wprowadzone do słownika pojęć archeologicznych, tak jak na stałe zagościły w nim wyrażenia „archeozoologia", „archeobotanika" czy „archeometalurgia" .

KRÓTKI ZARYS ROZWOJU I KIERUNKÓW BADAŃ NAD SKÓRĄ WYKOPALISKOWĄ W POLSCE

W rozwoju problematyki badawczej nad dawnym skórnictwem rysuje się dość wyraźnie kilka etapów wpisujących się w ogólny trend rozwoju archeoskórnictwa w Europie. Etapy te wyznaczone są stopniem zaawansowania prac wykopaliskowych i ilością źródeł dostępnych do badań, przyjmowaniem odpowiednich w stosunku do pozyskanego materiału metod badawczych, wdrażaniem badań interdyscyplinarnych oraz przydatnością przedmiotów skórzanych w zaawansowanych studiach nad problematyką społeczną i gospodarczą. Do tej pory w Polsce pojawiło się wiele zróżnicowanych merytorycznie prac poświęconych głównie średniowiecznej wytwórczości skórniczej i skórzanej. Mowa tu przede wszystkim o pracach powojennych (zarys problematyki badań archeologicznych nad średniowiecznym skórnictwem na ziemiach polskich wraz z przeglądem literatury do roku 2008 patrz: Kowalska 2009a; por. także Kurnatowska 1997; Kajzer 2001: 198 n.), choć pierwsze omówienia skóry archeologicznej zaczęły pojawiać się już w literaturze przedwojennej.

Cechą charakterystyczną wczesnego podejścia do zagadnień wytwórczości skórniczej było ograniczenie do okresu średniowiecza i wyrobów łatwo dających się zidentyfikować. Ich obecność decydowała o konstatacji uprawiania szewstwa – na podstawie znalezisk obuwia, rymarstwa – na podstawie pasów, siodlarstwa – ze względu na rozpoznanie siodła itd. Wszystkie wyroby skórzane były zaś podstawą do stwierdzenia istnienia zaawansowanego garbarstwa jako odrębnej gałęzi wytwórczości (Kostrzewski

1947, 1949a, 1949b, 1960; Hensel 1952, 1956, 1965, 1987; por. też Rybakov 1948). W ten sposób powstało, a następnie utrwaliło się przekonanie o istnieniu w ośrodkach wczesnośredniowiecznych pracowni szewskich, rymarskich, garbarskich funkcjonujących na wzór późnośredniowiecznych warsztatów rzemieślniczych skórników określonych specjalności (por. np. Tandecki 2009).

Do wyrobów na potrzeby własne, tzw. domowe, zaliczane były przedmioty gorszej jakości, choć konsekwentnie utrzymywano twierdzenie o dobrej znajomości metod obróbki surowej skóry zwierzęcej. Takie podejście wynikało z braku samodzielnych metod badawczych archeologii oraz dostatecznie dużej bazy źródłowej. Stosunkowo skromna liczba materiałów wykopaliskowych nie stanowiła odpowiedniej podstawy nie tylko do badań nad ewolucją samych wyrobów ze skóry, ale też szerszych analiz stosunków społeczno-gospodarczych ocenianych przez pryzmat źródeł materialnych (por. np. Kamińska, Nahlik 1958; Woźnicka 1961; Olczak 1968; Cnotliwy 1973; Suchodolski 1974; Dzieduszycki 1982; por. też Kurnatowska 1983: 13; Kurnatowski, Kurnatowska 2004).

Za prekursora badań nad wytwórczością skórniczą i skórzaną, a także udziału i znaczenia garbowanych skór zwierzęcych w gospodarce ośrodków wczesnośredniowiecznych należy uznać Zdzisława Rajewskiego. W 1939 roku badacz ten przedstawił znaleziska z wykopalisk w Gnieźnie, a także wykazał ich przydatność w rekonstrukcji zagadnień społeczno-gospodarczych w okresie „wczesnodziejowym". Pracą tą wyznaczył kierunki badań nad dawnym skórnictwem, przez które należy rozumieć znaleziska datowane na średniowiecze, w tym nad gatunkami skór, garbarstwem, rozwojem technik wytwórczych oraz rozwojem stylistycznym wyrobów. Wskazał także na potrzebę współpracy archeologów z zoologami w zakresie oceny gatunkowej skór.

Badania nad skórą wykopaliskową polegały przede wszystkim na analizie typologicznej i funkcjonalnej oraz makroskopowej ocenie cech morfologicznych prowadzącej do określenia gatunku skóry. Rozwój badań nad skórnictwem (i ogólnie materiałami masowymi) przyniosło przyjęcie odpowiednich metod badawczych (por. ostatnie podsumowania na ten temat Kurnatowska 1997; Kajzer 2001: 198 n.) odpowiadających specyfice znalezisk archeologicznych (Kurnatowska 1983: 6–7).

W okresie powojennym prace nad średniowiecznym skórnictwem kontynuował przede wszystkim Henryk Wiklak na podstawie obfitych znalezisk z Gdańska (1959, 1960, 1967a, 1968). Co istotne, badacz ten podjął nowe zagadnienia, takie jak pozyskiwanie i dystrybucja surowca, lokalizacja miejsc wytwórczości w obrębie ośrodka i ocena charakteru wytwórczości – domowej lub o charakterze rzemieślniczym. Na tym etapie badań nad skórnictwem nastąpiło przewartościowanie znaczenia źródeł materialnych w studiach nad produkcją rzemieślniczą w miastach średniowiecznych opartych dotąd jedynie na źródłach pisanych (por. Tymieniecki 1955; Rębkowski 2008).

Ostatnie pięćdziesięciolecie przyniosło ogromny przyrost ilościowy źródeł, zwłaszcza w wyniku prac ratowniczych w miastach, w ich historycznych centrach. Do obiegu naukowego wprowadzane są stopniowo także materiały z dawnych wykopalisk w ważnych ośrodkach wczesnośredniowiecznych (np. w Kołobrzegu–Budzistowie (Kołobrzeg 2007), Szczecinie (Szczecin 2011), Wolinie (Wolin 2013), Międzyrzeczu (Międzyrzecz 2015), Ujściu (Kowalska 2017b), Santoku (Santok 2019) i Kruszwicy (Kruszwica 2023). Trzeba jednakże zaznaczyć, że tylko nieliczne kolekcje wczesno- i późnośredniowieczne doczekały się opracowań kompleksowych.

Należą do nich materiały kołobrzeskie z miasta lokacyjnego (Wywrot-Wyszkowska 2008), szczecińskie z badań ośrodka wczesno- (Kowalska 2010, 2013b) i późnośredniowiecznego (Kowalska 2013a) oraz wolińskie z okresu funkcjonowania ośrodka wczesnośredniowiecznego (Wojtasik 1960, 1963; Kowalska 1999, 2003, 2006, 2008, 2009b, 2013c, 2019c; Cnotliwy 2004). W przypadku lokacyjnego Kołobrzegu monografia (Wywrot-Wyszkowska 2008) prezentująca wybrane aspekty socjotopograficzne z życia miasta została poprzedzona szeregiem prac źródłowych, w których Autorka nie tylko zaprezentowała niezwykle bogaty materiał wykopaliskowy, ale też zaproponowała metody badań i klasyfikacji wyrobów i odpadów produkcyjnych z okresu późnego średniowiecza (Wywrot 1995, 1996, 1997; Wywrot-Wyszkowska 1998, 1999, 2000, 2002, 2003 oraz 2009, 2010a, 2016). Warsztat ten wykorzystała w opracowaniach materiałów wykopaliskowych z późnośredniowiecznego Gdańska (Wywrot-Wyszkowska 2010b).

Znaczny postęp w studiach nad dawnym skórnictwem przyniosły analizy zoologiczne materiałów archeologicznych Teresy Radek (1980, 1986, 1987, 1996, 1997, 1998, 1999). Połączenie wyników badań archeologicznych i zoologicznych stało się normą postępowania badawczego, a osiągane rezultaty pozwoliły na poszerzenie kręgu zagadnień

oraz podejmowanie studiów porównawczych (por. Kowalska 2010).

Sporo miejsca w polskiej literaturze przedmiotu zajmują kwestie rozwoju podstawowej dziedziny, bez której nie byłby możliwy rozwój pozostałych gałęzi wytwórczości skórzanej – skórnictwa, powszechniej nazywanego garbarstwem (Samsonowicz 1982: 11). Sprawą o znaczeniu podstawowym w skórnictwie jest odpowiednie przygotowanie i przystosowanie surowych pokryć zwierzęcych do wyrobu konkretnych, zróżnicowanych funkcjonalnie przedmiotów, za pomocą szeregu skomplikowanych zabiegów fizycznych i chemicznych zachodzących w procesie wyprawy roślinnej (Turnau 1975a: 8). Przedmioty ze skór utrwalanych prostymi metodami, w tym także metodą tłuszczową, nie mają szans przetrwania, ulegają bowiem całkowitemu rozkładowi. Mowa tu oczywiście o wyrobach lub ich fragmentach, które można zidentyfikować makroskopowo. W przypadku miejskich nawarstwień kulturowych obfitujących w różnorakie ślady biologiczne poszukiwanie mikrośladów skór garbowanych nie znajduje uzasadnienia. Przetrwanie wyrobów ze skór utrwalonych przez wędzenie, suszenie czy wyprawionych tłuszczowo jest możliwe jedynie w skrajnych warunkach, takich jak pokrywa lodowa (neolityczny „Człowiek z lodu", Püntener, Moss 2010), brak dostępu powietrza i wilgoci (obuwie z epoki brązu w jaskini, Pinhasi *i in.* 2010) czy suche warunki panujące w grobowcach egipskich (Veldmeijer 2019).

Inaczej w przypadku mikrowłókien skóry zintegrowanych z elementami z innych surowców organicznych i nieorganicznych, odkrywanych w pochówkach pradziejowych i wczesnośredniowiecznych. Poddawane szczegółowym analizom ujawniają szereg istotnych informacji. W jednym z grobów w Kosyniu na cmentarzysku z początków epoki brązu na szczątkach drewna odkryto ślady pokrycia skórą licem na zewnątrz. Pomiędzy drewnem a grudkami spalenizny widoczna była strzępiasta struktura uznana za mizdrę. Usytuowanie próbki skłoniło do ostrożnej sugestii, że mogą to być pozostałości skórzano-drewnianej pochewki (Kowalska *i in.* 2019: 187 n.).

Na podstawie tak zachowanych szczątków nie jest możliwe określenie sposobu garbowania, podobnie jak w przypadku szczątków skór odkrytych na wczesnośredniowiecznym cmentarzysku w Bodzi (Kowalska 2015, 2016) i innych cmentarzyskach z tego okresu (Radek 2006). Nie przeprowadzono też badań DNA, które mogłyby ujawnić gatunek zwierzęcia, jak w przypadku próbek wyrobów ze skarbu z późnej epoki brązu odkrytego w miejscowości Kaliska (Kaczmarek *i in.* 2021). Należy zaznaczyć, że szczątki wyrobów skórzanych odkrywanych w skarbach czy pochówkach pradziejowych w stosunku do znalezisk średniowiecznych są rzadkie. Jak dotąd nie podjęto jednakże odrębnych studiów nad tym zagadnieniem (por. np. Blajer i Kozłowska 2021,:241).

SKÓRA ZWIERZĘCA

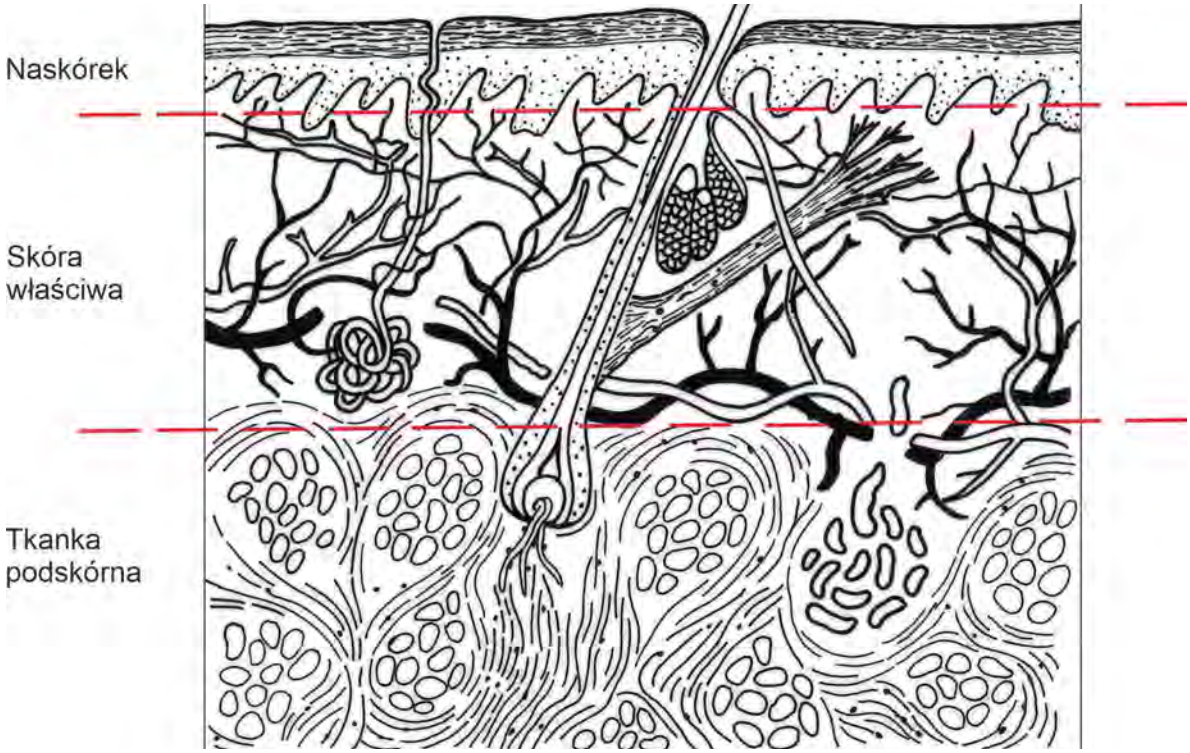
Już w najstarszych pracach na temat średniowiecznego skórnictwa pojawiały się uwagi na temat gatunków skór. Podkreślano zwłaszcza użytkowanie pokryć zwierząt domowych i dziko żyjących. Przynależność gatunkowa była oceniana (i jest nadal) głównie na podstawie obserwacji cech morfologicznych.

Skóra zwierzęca składa się z trzech zasadniczych warstw: naskórka (warstwy zewnętrznej, *epidermis*), skóry właściwej (*cutis vera*) oraz tkanki podskórnej (*hypodermis*) (ryc. 2). Z punktu widzenia wytwórczości skórzanej najważniejsza jest skóra właściwa zbudowana z tkanki łącznej i sprężystych włókien kolagenowych, które zapewniają rozciągliwość. Pod względem składu chemicznego składa się z białek, lipidów i wody.

Naskórek i warstwa podskórna są usuwane w trakcie wstępnych czynności garbarskich. W zależności od płci, gatunku, miejsca na ciele skóra właściwa ma różną grubość. Składa się z dwóch zasadniczych warstw: brodawkowatej, zbitej i włóknistej, oraz siateczkowatej, zbudowanej z bardziej zbitych pęczków włókien. To właśnie skóra właściwa jest poddawana czynnościom garbarskim.

Podstawowa wiedza na temat technik garbarskich – wyprawy, czyli procesów technologicznych, w wyniku których skóra surowa jest przekształcana w tworzywo do wyrobu przedmiotów skórzanych, pochodzi z badań etnograficznych i współczesnych podręczników garbarstwa (SJP 1999, t. III, 776; Zalewski 1938; Krzywicki 1947; Porankiewicz 1947; Poradnik garbarza 1953; Lasek 1954; Persz 1965, 1972; Pitner 1968; Chojnowski i Sikora 1970).

Pierwszy etap to skórowanie, czyli zdjęcie powłoki z ubitego zwierzęcia, a następnie oczyszczanie, usunięcie włosa od strony licowej i resztek mięsa oraz tłuszczu od strony mizdry, oczyszczanie tzw. golizny, garbowanie właściwe i wykańczanie. Źródła archeologiczne nie dostarczają informacji na temat



Ryc. 2. Schemat budowy skóry

najprostszych metod zabezpieczania surowych skór przed zepsuciem, np. w postaci dymienia nad ogniskiem czy suszenia na słońcu. Proste sposoby jeszcze współcześnie stosowano na wsiach w tzw. domowej lub przydomowej działalności na rzecz własnego gospodarstwa (Moszyński 1967: 353–355) w formie np. solonych drożdży, domowego piwa, otrębów pszenicznych, a do wyrobów rymarskich – tłuszczy zwierzęcych lub roślinnych (Pietkiewicz 1928: 272 n.; Jasiewicz 1960: 175 n.; Moszyński 1967: 353; Poppe 1974: 134–138; Turnau 1983: 7; por. też np. Räf 2000: 242; na temat garbarstwa ludowego por. także Łęga 1933; Jasiewicz 1960, 1964; Moszyński 1967; Gaj-Piotrowski 1975 oraz Turnau 1975b, tam obszerna literatura przedmiotu, także obcojęzyczna; Samsonowicz 1982). Przedmioty z tak wyprawionej skóry nie są trwałe i niewielkie jest prawdopodobieństwo ich przetrwania w materiałach archeologicznych (Radek 1996: 287). Najskuteczniejsza, choć czaso- i pracochłonna, była wyprawa z użyciem różnych roślin i ich części (np. kory lub korzeni).

W rozwoju badań nad skórą wykopaliskową ważne kwestie przynależności gatunkowej skór rozwiązywane są metodami niearcheologicznymi. Wiąże się z tym również ocena stopnia zaawansowania garbarstwa – prawidłowości lub nieprawidłowości przeprowadzania kolejnych czynności w wielostopniowym procesie wyprawy roślinnej (por. Rajewski 1939: 109–113; Hołubowicz 1956: 130; Wojtasik 1960: 183–185; Wiklak 1959, 1960: 12; 1967b: 140; 1969, tab. 2 i s. 475–517; 1988; Kaźmierczyk 1970: 218 n.; Eberle 1971, 1984: 199; Samsonowicz 1974: 633–653, 1982: 25–37; Rutkowska-Płachcińska 1978; Oborska 1977, tab. 1; Turnau 1983: 7–12; por. też 1975a; Hensel 1987: 289–291; Radek 1980, 1986, 1987, 1996, 1997, 1998, 1999; Moździoch 1990: 124; Kowalska, Radek 2015; Drążkowska 2000: 189).

W polskiej literaturze przedmiotu, zwłaszcza starszej, stosunkowo często pojawiała się opinia o wczesnym usamodzielnieniu się skórnictwa (wyprawy) i wyodrębnieniu z ogółu zajęć w osobną dziedzinę wytwórczości. Przez „wczesne" należy tu rozumieć najstarsze fazy średniowiecza. Podstawą takiego rozumowania była z jednej strony wysoka, zazwyczaj jednak organoleptyczna ocena jakości skór wykorzystywanych w produkcji (Rajewski 1939: 103 n.; Kostrzewski 1949a: 243 n.; Hensel 1952: 135–136; Wiklak 1957: 79; 1959, 1960: 10–19 i 28–29, 1967b: 166–168, 1969: 139–144). Nie prowadzono w tym czasie badań nad pozostałościami wyrobów nieokreślonych funkcjonalnie oraz nad mikroszczątkami z okresów pradziejowych.

W przypadku wytwórczości wczesnośredniowiecznej argumentem przemawiającym na korzyść wczesnego podziału zajęć skórniczych na odrębne specjalności czy „rzemiosła" była organizacja osad służebnych (Garbary, Szewce) w obrębie ziem objętych władztwem wczesnopiastowskim, a także ocena zapotrzebowania na skórę i produkty wytwórczości skórzanej w różnych sferach życia codziennego (Samsonowicz 1982; por. też Hartley 1931). Te dogmatyczne ustalenia dopiero w ostatnich latach poddane zostały krytyce w oparciu o wyniki analiz fizykochemicznych.

POZYSKIWANIE SUROWYCH SKÓR

Ekspertyzy zoologiczne cech morfologicznych potwierdzają wykorzystywanie w wytwórczości skórzanej skór zwierząt domowych oraz dziko żyjących, w tym także ryb (Vávra 2024). Na tej podstawie można odtworzyć strukturę gatunków oraz podjąć próbę oceny metod i stopnia zaawansowania technik garbarskich i wytwórczych w przypadkach, gdy cechy takie nie zostały zatarte np. wskutek użytkowania przedmiotów lub niewłaściwego przechowywania w magazynach archeologicznych. W niektórych przypadkach możliwa jest także ocena wieku zwierzęcia oraz określenie miejsca pobrania skóry do wykonania konkretnego przedmiotu (por. Reed 1972; Groenman-van Waateringe 1984: 16–1; Mould *i in.* 2003: 3215).

W ośrodkach wczesnośredniowiecznych dominowały przedmioty wykonane ze skór zwierząt domowych – bydła, kóz i owiec, sporadycznie koni. Wykorzystywano także pokrycia zwierząt niehodowlanych, takich jak: sarny, jelenie czy łosie, sporadycznie natomiast zwierząt mięsożernych oraz ryb, a także: psów, kotów, wydr i bobrów, ponadto fok i morświnów w ośrodkach pomorskich. W miastach lokacyjnych także zdecydowanie przeważają skóry bydlęce, kozie i owcze nad powłokami zwierząt łownych. W miejskich warstwach kulturowych nie mają szans przetrwania przedmioty ze skór drobnych futerkowców, takich jak: wiewiórki, lisy, zające czy sobole, których skóry utrwalane były metodą tłuszczową – garbowanie skór typowo futrzarskich przebiega nieco inaczej niż skór licowych (Lasek, Persz 1985: 225 n.; por. też Poppe 1974: 140–141) i pozostawia znacznie mniej uchwytnych archeologicznie śladów. Do rzadkości należą ponadto znaleziska wyrobów ze skór wyprawianych z włosem. Trudno też ustalić, czy mamy do czynienia ze skórą futrzarską czy może niewłaściwym odwłosieniem. Badania laboratoryjne dowiodły, że średniowieczni wytwórcy wyrobów wieloczęściowych, jak na przykład obuwia, znając właściwości poszczególnych rodzajów skór unikali łączenia materiałów o różnych parametrach fizycznych (Radek 1997: 209–212; Wywrot 1996: 244–245), ale znane są przypadki łączenia w jednym wyrobie różnych gatunków skór – w fazie wytwarzania i napraw uszkodzonych wyrobów (Kowalska 2010: 36).

Z punktu widzenia estetyki, z uwagi na ładny wygląd lica, najlepsze były skóry kozie. Dotychczasowe badania nad strukturą gatunkową skór zwierzęcych wykazały jednak pewne lokalne różnice. We wczesnośredniowiecznych ośrodkach pomorskich, w Szczecinie, Gdańsku i Wolinie, przeważały przedmioty wykonane ze skór bydlęcych i kozich, a w Kołobrzegu – Budzistowie kozie nad bydlęcymi i z rodzin jeleniowatych. W stosunkowo niskim odsetku wystąpiły tam natomiast skóry owcze. Ponadto znaleziono szczątki przedmiotów wykonanych z pokryć zwierząt żyjących w środowisku wodnym – foki, bobra lub wydry.

W ośrodkach śląskich, w Opolu i Wrocławiu, stwierdzono przewagę skór owczych nad bydlęcymi, przy czym we Wrocławiu odsetki skór bydlęcych i owczych były wyrównane (por. też Radek 1980: 66; por. też Groenman-van Waateringe 1988: 142). Skóry kozie i zwierząt łownych częściej wykorzystywano w wytwórczości skórniczej w ośrodkach położonych w interiorze obecnej Polski, zwłaszcza w X–XI wieku (Wywrot-Wyszkowska, Radek 2007: 216; por. też Makowieccy 2007: 261 n.). Analizy wyrobów skórzanych odkrywanych w miastach późnośredniowiecznych zazwyczaj wykazywały zdecydowanie najwyższy odsetek skór bydlęcych (Eberle 1979: 113; Przybyszowska 1979; Wiklak 1993: 76), z których wykonywano przede wszystkim obuwie. Znacznie rzadziej stosowano w produkcji szewskiej skóry owcze, końskie i kozie, a wyjątkowo świńskie i zwierząt łownych (Eberle 1979: 113).

WSTĘPNE OCZYSZCZENIE SKÓRY I MOCZENIE (NAMOK)

Obróbce garbarskiej poddawano skóry zróżnicowane jakościowo. Niezależnie od okoliczności pozyskania – we własnym gospodarstwie, poza osadą, na terenie osady – wszystkie wymagały właściwych

warunków przechowywania i wstępnego zabezpieczenia przed gniciem. Zaraz po zdjęciu z ubitego zwierzęcia skóra narażona jest na działanie czynników atmosferycznych, owadów, pleśni i grzybów. Przykłady obrabiania niewłaściwie zabezpieczonego surowca pochodzą ze Szczecina. Wyprawie został poddany surowiec zaatakowany pleśnią (Kowalska 2010: 39). Najwłaściwsze jest zatem jak najszybsze przystąpienie do wstępnych czynności garbarskich lub odpowiednie przygotowanie do transportu do miejsca, w którym istnieją optymalne warunki. Skóry surowe powinny być przechowywane w przewiewnym miejscu, najlepiej w stanie rozwieszonym, na czas zależny między innymi od warunków atmosferycznych. Świadectwem takiego postępowania w materiałach archeologicznych są duże, nieregularne otwory po mocowaniu do ram widoczne na ścinkach z brzegów skóry. Pozostawianie skór surowych (tzw. zielonych) zbyt długo bez zabezpieczenia przyspieszało gnicie i miało bezpośredni wpływ na jakość lica po odwłosieniu (Radek 1996: 285–286).

Garbarstwo jest gałęzią wytwórczości wykorzystującą potężne ilości wody (por. Keene 1982 oraz Serjeantson 1989), nawet do ok. 60 dm^3 na 1 kilogram surowej skóry. W fazie wstępnej potrzebna jest woda bieżąca, najlepiej o dość wartkim nurcie, który obmywa z krwi, gnoju i wszelkich innych zanieczyszczeń. Namok wymagał natomiast zbiorników z wodą stojącą lub płynącą leniwie. Ze względu na potrzebę takich specyficznych warunków oraz na ostry odór rozkładających się skór wstępnej obróbki dokonywano najczęściej poza obrębem gęsto zaludnionych ośrodków wczesnośredniowiecznych i miast lokacyjnych.

ŁUGOWANIE

O estetycznym wyglądzie skóry właściwej decyduje tzw. gładkość lica, czyli brak sfałdowań i uszkodzeń. Warstwa podskórna, zwana także warstwą przymięsną, ulega częściowemu zniszczeniu podczas procesu garbarskiego. To, co z niej pozostaje, potocznie nazywa się warstwą mizdrową lub mizdrą. Strzępy usuniętej warstwy mizdrowej nazywa się odzierkami – z nich wyrabiać można klej. Nie mniej ważna jest informacja na temat ilości wody zawartej w surowej skórze zwierzęcej (ok. 65%, a w przypadku skór zawierających więcej tłuszczu poniżej 65%). Usunięcie w trakcie wstępnych czynności garbarskich tzw. wody kapilarnej jest procesem odwracalnym, usunięcie wody tzw. micelarnej (wewnątrzkomórkowej) jest trwałe i powoduje obniżenie wartości skóry (Lasek, Persz 1985).

Oczyszczone wstępnie skóry należało poddać dokładniejszej obróbce polegającej na usunięciu włosia od strony licowej oraz resztek mięsa i tłuszczu od strony mizdry. Wykonanie tych czynności możliwe było dzięki wcześniejszym zabiegom zapewniającym rozluźnienie nasady włosa i spęcznienie tkanki skórnej – tzw. ługowaniu. W średniowieczu najczęściej do tego celu wykorzystywano wapno i popiół nakładany na skóry ułożone włosem do góry (por. Samsonowicz 1982, tab. 5), chociaż ze źródeł pisanych wiadomo, że stosowano także roztwory niektórych drzew, roztwór soli, a nawet mocz (Cherry 1991: 296).

Z badań archeologicznych wiadomo, że ługowanie w płytkich kadziach lub dołach (Cherry 1991: 297, por. też Serjeantson 1989: 135; Borkowski 2006; na temat znalezisk pracowni garbarskich także Kaźmierczyk 1958: 54–58; 1970: 217–223; Kostrzewski 1962: 216; Wojtasik 1960: 159–208; Wiklak 1969: 479–481; Buśko 1999: 92–95; Wywrot-Wyszkowska 2000: 245–246) odbywało się w pobliżu miejsc zamieszkania, nawet w miastach o znacznej gęstości zaludnienia, np. w Gdańsku (Wiklak 1959: 267; 1969: 479; Hołowińska 1967: 228 n.) i we Wrocławiu (Kaźmierczyk 1970: 222 n.), chociaż w trakcie ługowania wydzielają się gazy, nie tylko uciążliwe, ale też niebezpieczne dla ludzi i zwierząt. W efekcie niewłaściwie przeprowadzonego ługowania (przechowywania i/lub transportu) mogło dochodzić do powstawania tzw. luźnego lica, niezwiązanego z resztą skóry właściwej (Kowalska 2010: fot. 2, 3).

ODWŁASIANIE I MIZDROWANIE

Ługowanie powodowało rozluźnienie nasady włosów. Skóra tak przygotowana była gotowa do przeprowadzenia kolejnego etapu, jakim było mechaniczne odwłasianie, czyli usuwanie włosów z lica, oraz mizdrowanie – usuwanie resztek mięsa i tłuszczu od strony przymięśniowej (Turnau 1975a: 45). Czynności te wykonywano specjalnymi żelaznymi narzędziami z dwoma drewnianymi uchwytami oraz gładzikami z drewna lub rogu (Wiklak 1959: 267; 1969: 480; Kaźmierczyk 1970: 228; Samsonowicz 1982: 48 n.; Serjeantson 1989, Fig. 4) na tzw. kozłach garbarskich – nachylonych pod odpowiednim kątem belkach lub ławeczkach (por. Jasiewicz 1964:

569 oraz z badań archeologicznych Izjumova 1959: 194; Wiklak 1959: 268; 1969: 479). Większość badaczy, omawiając mizdrowanie, powołuje się na miniaturę z XVI wieku zawartą w Kodeksie Behema (Samsonowicz 1982: 49, Mischke 1995; por. też Turnau 1966, Serjeantson 1989: fig. 2, 5).

W efekcie odwłasiania i mizdrowania uzyskiwano skóry wstępnie wyrównane, pozbawione tkanki mięsnej i tłuszczowej, ale też pokłady tłustej mizdry. Odpady po mizdrowaniu i odwłasianiu były wykorzystywane: sierść do produkcji wojłoku, mizdra na karmę dla trzody chlewnej lub jako nawóz do użyźniania gleby, odpowiednio wysuszona służyła jako składnik kleju lub „berlińskiego" bądź „pruskiego błękitu" – pigmentu o konsystencji proszku i ciemnoniebieskiej barwie. Z długiego końskiego włosia wykonywano sznurki. Utylizacji podlegała także kora (dębowa lub inna), która po wydobyciu z kadzi garbarskich służyła jeszcze jako karma dla bydła lub po prostu jako opał, zaś najdrobniejsze elementy osiadłe na dnie stawały się składnikiem spoiwa budowlanego (Kurbatov 2004: 8). Miejsca magazynowania surowych skór oraz jej wstępnej obróbki przyciągały owady żerujące w takich specyficznych warunkach. Z badań archeologicznych znane są odkrycia skupisk pancerzyków tych owadów wskazujące dokładnie, gdzie znajdowały się składowiska takiego surowca (Serjeantson 1989: 136).

Odwłasianie i mizdrowanie prowadziło do otrzymywania golizny, zwanej też dermą lub skórą właściwą. Tylko wprawny wytwórca mógł przygotować skórę bez zacięć i dziur, o równej grubości. Ze źródeł późnośredniowiecznych wiadomo, że czynności te wykonywali mistrzowie lub najstarsi czeladnicy (Turnau 1975a: 48). W materiałach archeologicznych świadectwami odwłasiania i mizdrowania są, oprócz pokładów sierści z wapnem, ślady zachowane na niektórych ścinkach z obrzeża skór pogrubione na końcach, z zachowanymi resztkami włosów, które można dostrzec bez analiz mikroskopowych. Są to z reguły ścinki niezbyt szerokie, często wydłużone, odkrawane od całego płata dopiero po zakończeniu wszystkich czynności związanych z garbowaniem właściwym. Charakterystyczne pogrubienie powstawało wskutek spychania tkanki mięsnej od środka ku krawędziom. Resztki włosia lub cebulek włosowych, wykrywane podczas badań mikroskopowych, jak już wyżej wspomniałam, mogą świadczyć o niedokładnej obróbce mechanicznej, choć nie można także wykluczyć celowego wykorzystywania skór niepełnowartościowych do wyrobu przynajmniej niektórych przedmiotów lub też ich części (Radek 1996: 286).

OCZYSZCZANIE I WYCISKANIE BRUDU. ODWAPNIENIE I WYTRAWIANIE

Golizna wciąż nie była surowcem gotowym do dalszego przetwarzania. Wymagała jeszcze oczyszczenia, odwapnienia i wytrawienia, czyli usunięcia (wypłukania) resztek substancji użytych podczas wstępnych czynności garbarskich (Turnau 1975a: 76; Samsonowicz 1982: 65 n.). Fizyczne pozostałości po tych zabiegach nie są jednak uchwytne w materiałach archeologicznych. Do usuwania pozostałego brudu, czyli odwapniania i wytrawiania, wykorzystywano w dawnym garbarstwie np. rozwodnione psie i drobiowe odchody. Tego typu czynniki nie pozostawiają oczywiście śladów materialnych. Jedynie ze zbiorów etnograficznych znane są tzw. granzowniki – drewniane narzędzia w postaci półokrągłej deski z głębokimi rowkami służące ostatecznemu odciskaniu brudu z oczyszczonych od strony lica i mizdry skór (GPE, 13–14).

Garbowanie garbnikami roślinnymi, wyżymanie

Oczyszczona golizna poddawana była garbowaniu właściwemu – tłuszczami i minerałami w białoskórnictwie, roślinami w czerwonoskórnictwie. Metodę roślinną uznaje się za najbardziej rozpowszechnioną w średniowieczu (Samsonowicz 1982: 52). Polegała ona na przetrzymywaniu oczyszczonych skór w roztworach wodnych garbników roślinnych zwanych brzeczkami roślinnymi w specjalnych, głębokich kadziach garbarskich (Turnau 1975a: 68). Wykorzystywano wiele gatunków roślin w zależności od spodziewanego efektu końcowego – pożądanej elastyczności, a także odpowiedniego zabarwienia, które można było uzyskać już na tym etapie przetwarzania. Przedmioty skórzane znane z wykopalisk mają barwę brunatną lub czarną. Należy pamiętać, że przez kilka stuleci spoczywały w środowiskach sprzyjających odbarwianiu, najczęściej bogatych w odpady organiczne z naturalnymi składnikami garbującymi (por. Kurbatov 2004: 10 n.; Cameron 2000: 10).

Pierwotny lub zbliżony do pierwotnego kolor można niekiedy zaobserwować np. w zagięciach

lub załamaniach przedmiotów. Są to odcienie brązu i czerwieni lub bliżej nieokreślone barwy jasne (Kowalska 1999: 222; 2019c). Odpowiednią kolorystykę można było osiągnąć dzięki zastosowaniu w garbowaniu właściwym kory świerkowej i brzozowej, pozwalającej uzyskiwać czerwienie, kora wierzbowa dawała generalnie kolory jasne, zaś dzięki dębowej skóry zyskiwały zabarwienie zielonkawo-żółte (Wiklak 1969: 478; Turnau 1975a: 58 n.; Samsonowicz 198:, 53). Niektóre średniowieczne przedmioty skórzane były dodatkowo barwione. Używano do tego celu soli i tlenków żelaza. Zróżnicowanie kolorystyczne, zwłaszcza obuwia, dobrze poświadczają źródła historyczne i ikonograficzne (Sieradzka 2003; Kurbatov 2004: 12, por. też Gutkowska-Rychlewska 1967; Żygulski jun. 1972; Gołębiowski 1983; Boucher 2004).

Ocenę poprawności wykonania wyprawy i wykończenia skóry w dużej mierze utrudnia fakt, iż analizowane przedmioty były po pierwsze użytkowane, po wtóre zalegały w warunkach sprzyjających zacieraniu się śladów pierwotnej obróbki.

DWOJENIE SKÓR

Dwojenie to czynność polegająca na dzieleniu skór w celu uzyskanie materiału cienkiego, przeznaczanego między innymi na wierzchy obuwia i wyroby galanteryjne. Dwoina skóry licowej współcześnie nazywa się skiwerem. Odpowiednie układanie dwojonych skór mizdrą do siebie i ich sklejanie (por. Samsonowicz 1982: 50) powodowało, że były one bardziej odporne na przenikanie wilgoci oraz przecieranie i rozciąganie (Turnau 1975a: 55).

W materiałach archeologicznych często znajduje się skóry całkowicie lub częściowo rozdwojone na lico i mizdrę, co nie ma związku z celowym dwojeniem. Najczęściej rozwarstwienie to jest spowodowane użytkowaniem wyrobów, ale w przypadku odpadów produkcyjnych należy uwzględnić pogorszenie jakości skór wskutek niewłaściwego wykonania którejś z czynności garbarskich (Turnau 1975a: 46; Samsonowicz 1982: 39). W literaturze przedmiotu wcześnie pojawiła się i następnie była powielana opinia, że skóry na wierzchy obuwia były dwojone i sklejane, zarówno grube bydlęce, jak i znacznie cieńsze kozie i owcze (Rajewski 1939: 103; Hołubowicz 1956: 132; Wojtasik 1960: 185; Wiklak 1969: 479; Romanow 1981: 170–172), a ścinki częściowo rozdwojone na lico i mizdrę miały świadczyć o niepełnym garbowaniu (Kaźmierczyk 1970: 219–221; por. też Nielsen 1991). Sprawa ta wymaga dalszych studiów.

CZYSZCZENIE, WYGŁADZANIE, NATŁUSZCZANIE

Ostatnim etapem przygotowania skóry do produkcji skórzanej jest wymywanie pozostałości garbników, natłuszczanie i wygładzanie. Zgarbowana skóra jest sztywna, a zatem łamliwa. Pozostawienie w warstwie licowej nadmiaru garbnika powoduje pękanie, ale natłuszczanie musi być przeprowadzane bardzo ostrożnie – skóra słabo natłuszczona jest nadal sztywna i łamliwa. Niekiedy proces ten na przemian z przesuszaniem musi być przeprowadzany kilkukrotnie.

ZABEZPIECZANIE SKÓR WYKOPALISKOWYCH I KONSERWACJA

Skóra wykopaliskowa zaraz po odkryciu powinna być poddana zabiegom zabezpieczającym, które poprzedzają konserwację w warunkach laboratoryjnych. W przypadku mikroszczątków wystarczy zapakowanie do niewielkiego pojemnika lub woreczka. Przedmioty skórzane masowo wydobywane z nawarstwień średniowiecznych najczęściej umieszczane są w foliowych woreczkach strunowych. Powinny przebywać w nich możliwie najkrócej, aby uniknąć pojawienia się pleśni i grzybów. Dobrym zwyczajem jest umieszczanie skór w naczyniach z wodą z dodatkiem środka grzybobójczego. W takich warunkach mogą oczekiwać na mycie i dalsze czynności zabezpieczające, inwentaryzację, analizy specjalistyczne i konserwację.

Trzeba zwrócić uwagę na właściwe mycie, najlepiej pod bieżącą wodą, bez używania twardych szczoteczek, łatwo bowiem zatrzeć ważne ślady np. po dekoracji oraz uszkodzić przedmiot mechanicznie. Niekiedy wyróżniające się przedmioty (dobrze zachowane, unikatowe, dekorowane itp.) po umyciu umieszczane są pomiędzy taflami szkła, co powoduje prostowanie zagięć. W takich przypadkach należy jednak zwracać uwagę na niebezpieczeństwo szybkiego pojawienia się pleśni. Skóry umyte i wciąż lekko wilgotne powinny być w takim stanie dokumentowane – opisywane, rysowane i fotografowane. Są też gotowe do podjęcia analiz mikroskopowych, a także do profesjonalnej konserwacji (por. Jagielska 2009; Jakimowicz i Rodzik 2009).

Codzienna praktyka odbiega od takiego idealnego wzorca postępowania. Badacze stosują różne metody prostego, i tym samym ekonomicznego, zabezpieczania skór wykopaliskowych, co nie oznacza, że są one szkodliwe. Najprostszą, najmniej praco- i czasochłonną, a zarazem najtańszą metodą jest całkowite dosuszenie i zapakowanie w papierowe torebki (Kurbatov 2004: 17). Skóra traci co prawda elastyczność i kurczy się, ale nie mają do niej dostępu pleśń i grzyby, pod warunkiem, że tak utrwalone przedmioty przechowywane są w suchym i przewiewnym pomieszczeniu o odpowiedniej temperaturze. W każdej chwili można skóry ponownie namoczyć – odzyskują wówczas swoją pierwotną postać i są gotowe do obserwacji pod mikroskopem.

Skuteczną metodą szybkiego i efektywnego zabezpieczania skór wykopaliskowych jest ich głębokie zamrażanie (Schnack 1992: 21 n.). Takie zamrożone skóry (wcześniej umyte) także są łamliwe, a ślady przypadkowego złamania łatwo pomylić z celowym odcięciem. Kilkukrotne suszenie lub zamrażanie skór powodować może wtórne spękanie warstwy licowej – błędna może być zatem ocena stanu zachowania lica lub sposobu jego pierwotnego opracowania, a także utrudniona, zafałszowana lub niemożliwa ocena gatunkowa.

Najskuteczniejsze są oczywiście metody laboratoryjne konserwacji polegające na usunięciu wody, którą zastępują substancje chemiczne (na przykład ostatnio Mould *i in.*, 2003: 3214 n.; Drążkowska i Grupa 2009; Drążkowska *i in.* 2011; por. też Śmiechowski 2015). Skóra pozostaje giętka i elastyczna, możliwe jest odczytanie cech morfologicznych, a zatem ocena zoologiczna. Zakonserwowane w ten sposób skóry mają także walor ekspozycyjny. Przechowywane w odpowiednich warunkach nie tracą swoich właściwości (np. nie kurczą się). Odpowiednich warunków przechowywania wymagają również mikroszczątki wyrobów skórzanych, które także nie powinny być narażone na obecność wilgoci lub nadmierne przesuszenie.

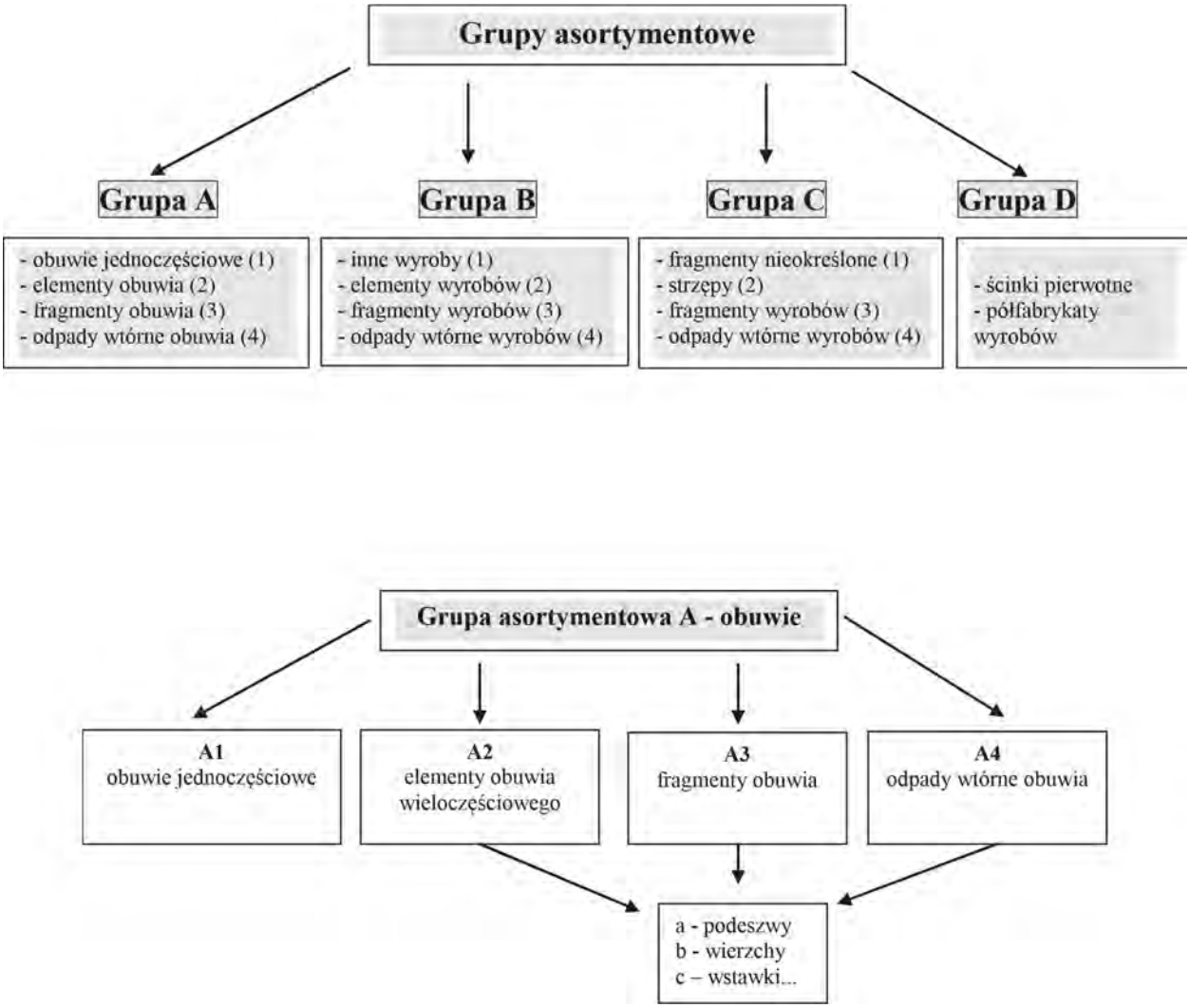
OPRACOWANIE ARCHEOLOGICZNE SKÓR WYKOPALISKOWYCH

Każdy z badaczy przyjmuje własne sposoby analizowania przedmiotów skórzanych, które podporządkowuje celowi studiów. Sposób bardziej zaawansowanego postępowania z materiałem zabytkowym zależy ponadto od takich czynników, jak m.in. liczebność zbiorów, zróżnicowanie asortymentowe, stan zachowania przedmiotów. Z reguły przy dużych liczebnie zbiorach wydzielane są grupy asortymentowe, w obrębie których przeprowadzane są dalsze czynności. Na podstawie wczesnośredniowiecznych materiałów źródłowych ze Szczecina zaproponowałam metody kwantyfikacji przedmiotów skórzanych i tworzenie grup asortymentowych dostosowane po pierwsze do materiałów bardzo liczebnych, po drugie do podjęcia studiów nad zjawiskami gospodarczymi. Przyjęłam założenie, że nie ma przedmiotów „mniej ważnych", wszystkie stanowić mogą cenne i niebagatelne źródło informacji w zależności od stawianych pytań. Hierarchia ważności przedmiotów (lub tylko ich cech) powinna zmieniać się w miarę postępu prac badawczych oraz rozpatrywanych zagadnień.

Pierwszy, najbardziej podstawowy podział źródeł polega na oddzieleniu wyrobów gotowych od fragmentów wyrobów, odpadów produkcyjnych i fragmentów nieokreślonych (ryc. 3). Pojęciem najbardziej ogólnym są „przedmioty skórzane", przez które należy rozumieć ogół znalezisk ze skóry garbowanej niezależnie od funkcji i stanu zachowania. Wśród nich nadrzędne znaczenie mają wyroby gotowe, zachowane w całości lub tylko uszkodzone, wykonane z jednego kawałka skóry (wyroby jednoczęściowe) lub złożone z elementów tworzących spójną całość.

Tym wyroby różnią się od „elementów wyrobów". W przypadku obuwia elementami takimi są: podeszwa, wierzch, wstawka – każda część składowa. Jeśli przetrwały tylko niewielkie części, np. tylko pięta podeszwy lub tylko lamówka, mamy do czynienia z „fragmentem wyrobu". Elementy i fragmenty wyrobów różnicuje liczba cech diagnostycznych. Na przykład podeszwa, która przetrwała w całości (lub jest nieznacznie uszkodzona), to element wyrobu, ale sam nosek podeszwy to tylko fragment wyrobu określonego funkcjonalnie. Obydwa te przedmioty należą do tej samej grupy asortymentowej, ale do różnych zespołów analitycznych ze względu na różną liczbę cech diagnostycznych. Mniejszą liczbę cech diagnostycznych mają różnorodne fragmenty, które można przyporządkować do określonego asortymentu, a minimalną – strzępy nieokreślonych wyrobów.

Osobną grupę analityczną tworzą odpady – uboczne produkty wytwórczości, nieprzydatne w miejscu i czasie, w którym powstały. Ścinki skór garbowanych, zaliczone do grupy odpadów pierwotnych, charakteryzują ślady odcinania widoczne na wszystkich krawędziach lub współwystępowanie



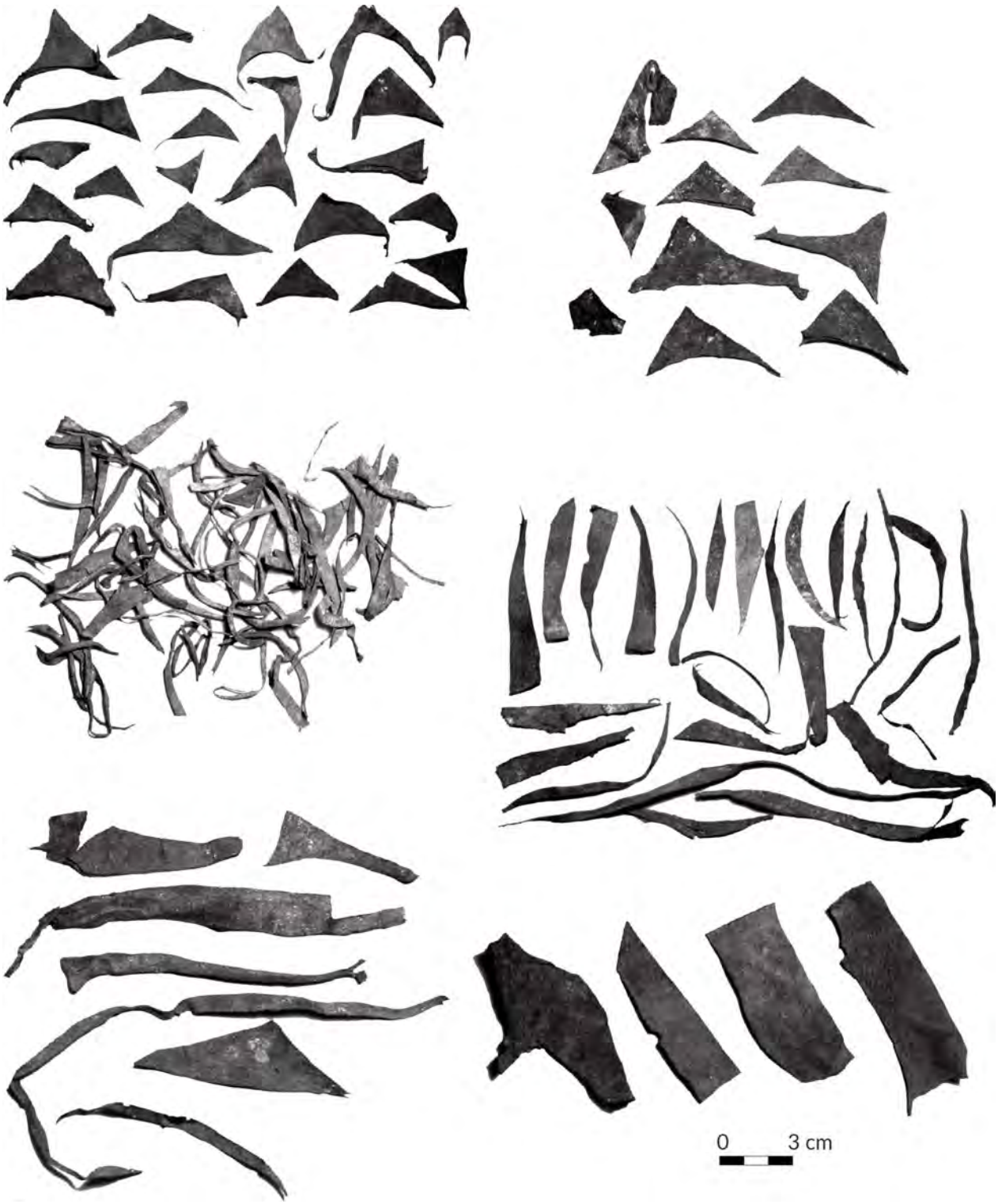
Ryc. 3–4. Zespoły analityczne przedmiotów skórzanych

śladów odcinania z krawędzią naturalną. Odpadami są także kawałki skór intencjonalnie odcięte od wyrobów lub elementów wyrobów, które na podstawie zachowanych cech (np. dziurek po szyciu) można łączyć z bliżej nieokreślonymi wyrobami.

Tak uporządkowane źródła – podzielone na grupy asortymentowe (zespoły analityczne) – stanowią podstawę do wyodrębniania podzespołów na podstawie cech wspólnych, zgodnie z przedstawionym schematem (ryc. 4). Jeśli grupa A to obuwie skórzane, w jej skład będą wchodzić wyroby gotowe, elementy i fragmenty wyrobów, a także odpady wtórne – wszystkie przedmioty będą miały cechy właściwe dla tej grupy asortymentowej, chociaż liczba cech będzie różna.

Zespoły analityczne mogą być tworzone w oparciu o różne kryteria, w zależności od rozpatrywanego problemu. Może nim być na przykład zbiór przedmiotów wykonanych z określonego gatunku skóry, zbiór przedmiotów ze śladami niedogarbowania, zbiór przedmiotów ze śladami częściowego rozdwojenia skóry itp. Kolejna możliwość to tworzenie „krzyżowe" zespołów analitycznych, na przykład przedmiotów z różnych grup asortymentowych ze śladami po określonym rodzaju szycia, przedmiotów zdobionych haftem, przedmiotów ze śladami napraw itp. (zob. Kowalska 2010, tabela 3).

Wyjaśnienie podstawowych kwestii terminologicznych i ustalenie zasad tworzenia zespołów analitycznych przybliża do problemu określenia liczby źródeł dostępnych do badań, w tym także statystycznych. Ogólna liczba przedmiotów zostaje ustalona w trakcie ewidencjonowania znalezisk. Podczas opracowań gabinetowych pojawiają się natomiast problemy związane z tworzeniem zespołów analitycznych.



Ryc. 5. Ścinki pierwotne i ścinki wtórne. Fot. A.B. Kowalska

Przykładem niech będzie przyszwa obuwia z zachowaną wstawką i fragmentem rzemyka – sznurowadła. Generalnie jest to jeden przedmiot, ale jego składowe mogą pojawić się w przynajmniej trzech zespołach analitycznych: wierzchów, wstawek i rzemieni. Wykonane zostaną przynajmniej trzy analizy zoologiczne lub składu pierwiastkowego. Następuje tym samym rozbieżność w liczbie przedmiotów

i ekspertyz. Uzyskujemy zatem przynajmniej trzy warianty kwantyfikacji.

Z innego typu sytuacją mamy do czynienia, gdy próbujemy określić minimalną liczbę wyrobów na podstawie części składowych w przypadkach, gdy nie jest możliwe zestawienie elementów w jedną całość lub gdy nie ma pewności, czy elementy pochodzą z jednego czy większej liczby wyrobów. I wreszcie problem kwantyfikacji przedmiotów, które mogą pochodzić z jednego wyrobu. Niekiedy udaje się połączyć elementy wyrobu, w wielu przypadkach mamy jednak do czynienia z pojedynczymi elementami, tylko hipotetycznie należącymi do jednego wyrobu.

Dynamikę przemian konstrukcyjnych znacznie ułatwia ustalenie relatywnie zbieżnych ilościowo, porównywalnych statystycznie zespołów źródeł analizowanych w różnych układach: horyzontalnych (warstwach kulturowych lub zespołach warstw) oraz wertykalnych (przedziałach chronologicznych), a także w ramach najmniejszych jednostek stratygraficznych.

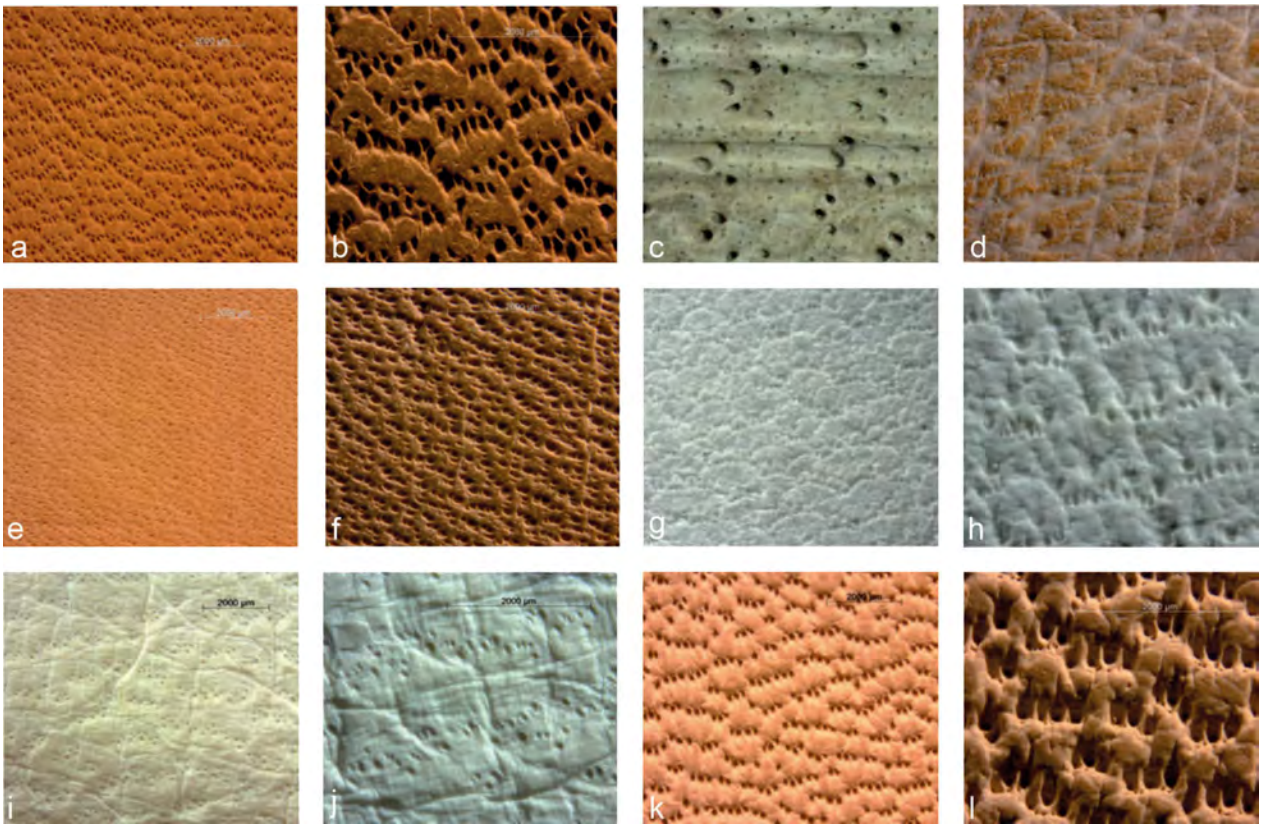
Ważnych informacji na temat technik wytwórczych stosowanych przy wyrobie przedmiotów skórzanych dostarczają odpady (ryc. 5). W początkowym okresie badań nad archeoskórnictwem nagromadzenie ścinków uważane było (i słusznie) za świadectwo istnienia pracowni lub warsztatu (por. Cehak-Hołubowiczowa 1954: 7; Wiklak 1959, 1960: 29; Szenicowa 1961: 84 oraz Cnotliwy 2004: 186; Andrzejewska 2009; Wywrot-Wyszkowska 2015). Wnikliwa analiza odpadów (wraz z analizami specjalistycznymi) pozwala jednakże na ustalenie asortymentu wyrabianych przedmiotów oraz stosowanych technik wytwórczych (por. Kowalska 2010, 2017a). W nowszej literaturze upowszechnił się podział ścinków wprowadzony przez Teresę Radek na odpady międzywzornikowe oraz przykrawędne (Radek 1998: 120), a także na pierwotne – skóry nieużywanej i wtórne – wcześniej użytkowanej (por. Kowalska 1999: 222; 2010: 52–59). Ścinki skórzane znalezione w nawarstwieniach lokacyjnego Kołobrzegu, tworzące bardzo liczebne kolekcje (łączone z konkretnymi warsztatami wytwórczymi), podzielone zostały na cztery podstawowe kategorie: ścinki surowe szewskie, surowe nieokreślone, z otworami i ścinki wtórne, a także odpady, na które składają się amorficzne strzępy (Wywrot 1996: 243). Ścinki wtórne natomiast, zdaniem Beaty Wywrot, to odpady ze śladami szwu (Wywrot 1996: 280). W praktyce rozróżnienie skóry używanej i nieużywanej w materiałach archeologicznych jest bardzo trudne, czasami wręcz niemożliwe (Wywrot-Wyszkowska, Radek 2007: 228).

Sprawą wciąż obecną w polskiej literaturze przedmiotu jest nazewnictwo przedmiotów skórzanych odkrywanych w trakcie wykopalisk, zwłaszcza obuwia. Trudność polega na tym, że do opisu obuwia stosunkowo prostego, złożonego z dwóch części – spodu i wierzchu, zaczęto stosować nomenklaturę zaczerpniętą ze współczesnych podręczników szewskich, omawiających obuwie o dużo bardziej skomplikowanej konstrukcji – zarówno podeszwy, jak i przyszwy (przegląd nazewnictwa stosowanego w dotychczasowej literaturze patrz Kowalska 2010: 104–107). Różnice w nazewnictwie podstawowych terminów związanych z obuwiem, technikami jego konstrukcji oraz sposobami szycia, a także innymi wyrobami i przedmiotami skórzanymi występujące w polskim piśmiennictwie są w wielu przypadkach bardzo znaczne. Niekiedy pod tym samym pojęciem kryją się zdecydowanie różne treści, w innych są to tylko niuanse (podsumowanie Kowalska w druku).

Jeszcze jedna ważna kwestia związana z archeoskórnictwem dotyczy klasyfikacji przedmiotów skórzanych, zwłaszcza obuwia średniowiecznego. Nie ma w polskiej literaturze jednolitego systemu klasyfikacyjnego, podobnie jak w przypadku nazewnictwa elementów składowych. Z pewnością nie stosuje się już systematyki opartej na nazwach staropolskich – ciżmy, trzewiki etc. (przegląd problematyki patrz Kowalska 2021).

IDENTYFIKACJA SKÓR WYKOPALISKOWYCH

Do wyrobu przedmiotów użytkowych, dawniej i obecnie, wykorzystuje się skóry tzw. licowe – pozbawione pokrywy włosowej i futrzarskie – wyprawione z włosem (ryc. 6.1 i 6.2). Dotychczasowe badania nad skórami archeologicznymi, przede wszystkim z okresu średniowiecza, dowodzą, że rodzaj wyprawy był dostosowywany do uzyskiwania materiału o zróżnicowanych parametrach właściwych dla konkretnych rodzajów wyrobów. Różnice w budowie warstwy siateczkowej różnych gatunków zwierząt skóry są bardzo znaczne. Zależą od płci, wieku, a w przypadku dużych zwierząt – także topografii skóry. Dlatego zasadnym jest dobór metod garbarskich odpowiednio do gatunku zwierzęcia lub nawet części skóry zwierząt dużych. Z drugiej strony



Ryc. 6. Lico skór garbowanych: a-b – bydlęce; c-d – świńska; e-f – owcze; g-h – kozia; i-j – cielęce; k-l – kozia (wg D. Okrągła b.r.w.), Skóra pod lupą, w: Skóra w obiektach muzealnych. *Ochrona zabytków* 4, 13–14

metody garbarskie należy dostosować do uzyskania skóry odpowiedniej grubości. Skóry podeszwowe twarde wymagają użycia świeżych wapnic w procesie wapnienia (Bieńkiewicz 1977: 245; Persz 1979: 108), odwrotnie niż w przypadku skór miękkich (Bieńkiewicz 1977: 245). Rozróżnienie twardych i miękkich skór wykopaliskowych przeprowadza się pod mikroskopem, analizując na przekroju skór kąt nachylenia w stosunku do lica przeważającej liczby pęczków włókien kolagenowych, oceniając równocześnie stopień zwartości włókien w pęczkach (Radek 2009: 141).

Stan zachowania przedmiotów skórzanych wydobywanych z warstw kulturowych i obiektów o zróżnicowanej funkcji i charakterze jest bardzo różny i zależy od wielu czynników, które często utrudniają obserwacje i wnioskowanie. Najważniejszymi z nich są warunki fizyczne i chemiczne wielowiekowego depozytu oprócz zastosowanych w przeszłości metod garbarskich. Przedmioty zdeponowane w niesprzyjających warunkach lub wykonane ze skór nieprawidłowo wyprawionych są najbardziej narażone na degradację i destrukcję. Nie bez znaczenia jest także stopień zniszczenia wyrobu w trakcie użytkowania.

Określenie gatunku zwierzęcia jest najczęściej przeprowadzane na podstawie cech taksonomicznych skór utrwalonych w trakcie wyprawy widocznych pod mikroskopem. Należą do nich: deseń lica, układ i rozmieszczenie otworów włosowych na licu, pokrój włókien mizdry w przekroju skóry oraz na powierzchni odmizdrowanej. Konieczny jest przy tym dostęp do materiałów porównawczych, tj. współcześnie wyprawionych skór licowych i futrzarskich różnych gatunków zwierząt, a także z osobników w różnym wieku i próbek skór z różnych okolic ciała. Ważne są także resztki włosów, które ze względu na wzór komórek powłoczki, typ rdzenia i kształt jego komórek oraz kształt przekroju poprzecznego mogą być pomocne w identyfikacji gatunkowej zwierząt domowych, a zwłaszcza żyjących dziko (Radek 2009: 138–139). Jak wcześniej wspomniałam, obecność włosów na wyrobach gotowych może świadczyć o wyprawie futrzarskiej, ale też

może być świadectwem nieprawidłowo przeprowadzonego odwłasiania. W przypadku odpadów z peryferyjnych części wygarbowanego surowca można założyć, że do nieprzydatnych w wytwórczości skórzanej elementów, takich jak obrzeża skór, nie przywiązywano wagi.

Warstwy skóry właściwej – brodawkowa (hialuronowa) i siateczkowa – różnią się przebiegiem włókien kolagenowych (Bieńkiewicz 1977: 17; Persz 1979: 21; Kuryszko i Zarzycki 1995: 278). Warstwa brodawkowa w trakcie wyprawy tworzy cienkie i błyszczące lico skóry, na którym widoczne są wypukłości i bruzdy tworzące deseń typowy dla określonego gatunku zwierzęcia, natomiast analiza nachylenia i otworów włosowych pozwala na określenie położenia badanego fragmentu na osi ciała (Radek 2009: 139). Archeolog określający makroskopowo wygląd lica wyrobów i odpadów może zaobserwować częściowe oddzielenie warstwy licowej. Może to wynikać z dwóch powodów: nieprawidłowo przeprowadzonych wstępnych czynności garbarskich lub być wynikiem użytkowania. W praktyce przedmioty wykopaliskowe z dobrze zachowanym licem często poddawane są jedynie ocenie makroskopowej na podstawie porównania desenia lica z inną, określoną gatunkowo próbką. Są to oczywiście ważne ustalenia, jednakże w studiach archeoskórniczych niewystarczające.

ANALIZY SPECJALISTYCZNE SKÓR WYKOPALISKOWYCH

Na obecnym etapie badań nad dawnym skórnictwem, gdy zostały wyjaśnione problemy terminologiczne i zawiłości związane z systematyką wyrobów skórzanych (nawet jeśli wciąż istnieją rozbieżności), konieczne jest podjęcie dalszych kroków zmierzających do wyjaśnienia dogmatycznych ustaleń funkcjonujących w literaturze przedmiotu od dekad, zwłaszcza w zakresie skórnictwa – wyprawy skór surowych. Znaczny postęp w tym obszarze badań związany ze współpracą archeologii z zoologią to dobry punkt wyjścia do zaangażowania nowoczesnych metod analitycznych z powodzeniem stosowanych w przypadku zabytków archeologicznych z surowców nieorganicznych – szkła, metali, kamienia. Wyniki tychże badań często dostarczają argumentów na poparcie tez niemożliwych do udowodnienia jedynie za pomocą archeologii, jak na przykład w przypadku srebra i ołowiu (por. Miśta-Jakubowska *i in.* 2023). Na konieczność korzystania z wyników badań wielu dyscyplin nauki, w tym chemii i fizyki, a także wykorzystywania do badań wszystkich pozostałości wytwórczości skórniczej, w tym odpadów i przedmiotów niezidentyfikowanych, w polskim piśmiennictwie już dawno zwróciła uwagę znakomita badaczka skór wykopaliskowych Teresa Radek (Radek 2009, 137–138).

Badania spektroskopowe w archeologii nie są nowością (por. Pytliński 1962; Lech i in., 1974; Manecki i Niewodniczański 1988; Miazga 2018; Niedzielski *i in.* 2020), ale w badaniach nad archeoskórnictwem – tak. Ręczny spektrometr fluorescencji rentgenowskiej umożliwia badania szerokiej gamy artefaktów archeologicznych, ceramiki, metali, obsydianu, nie był jednak dotąd używany do badania garbników zawartych w skórze. Największą zaletą tego typu badań jest nieinwazyjność oraz możliwość transportu aparatury na miejsce wykopalisk lub do magazynu. Projekt przebadania odpowiedniej liczby przedmiotów skórzanych pod tym kątem wchodzi dopiero w fazę realizacji w Muzeum Narodowym w Szczecinie. Do badań zostały wytypowane przedmioty datowane na różne fazy średniowiecza, z dobrze udokumentowanych i określonych chronologicznie nawarstwień kulturowych. Już pierwsza próba przeprowadzona na obiektach z IX i XIV stulecia ukazała istotne różnice w składzie pierwiastkowym, ale też liczne niebezpieczeństwa niepoprawnego wnioskowania.

Metoda ta, w moim odczuciu, daje realne szanse na podjęcie próby rozwikłania problemów wspomnianych wyżej i stawianie dalszych pytań. Pierwsze próby są obiecujące, choć metodologia tego typu badań jest wciąż w stadium początkowym. W badaniach materiałów szczecińskich wykorzystano techniki spektroskopowe XRF (ang. *X-ray fluorescence*) do analizy elementarnej – identyfikacji pierwiastków, oraz spektroskopię w podczerwieni FtiR (ang. *Fourier transform infrared spectroscopy*). Konieczne są dalsze badania na większych statystycznie próbach z różnych stanowisk o różnej chronologii. Tylko w ten sposób będzie możliwie stworzenie bazy pierwiastków i odpowiednia interpretacja danych. Warunkiem koniecznym jest prawidłowe rozpoznanie zanieczyszczeń i eliminacja pierwiastków ewidentnie związanych z warunkami depozytu, magazynowania i sposobu przechowywania, w tym konserwacji.

W ocenie stanu zachowania skór wykopaliskowych należy także brać pod uwagę możliwość zmian cech fizyko-chemicznych w efekcie tzw. wtórnego garbowania lub odwrotnie – wypłukiwania niektórych składników, co z kolei sprawia wrażenie niedogarbowania (por. Kaźmierczyk 1970; Nielsen 1991: 85) lub odgarbowania w przypadku wysokiego stężenia związków powstających w wyniku rozpadu białek – amoniaku i mocznika, które dyspergują garbniki zawarte w skórze (Radek 2006: 215). Wskazana jest prezentacja terenowych metod badawczych i w miarę najdokładniejszy opis kontekstu zalegania, najlepiej wraz z próbką gleby.

Miejsca wytwórczości skórzanej mogą być identyfikowane na przykład na podstawie koncentracji pancerzyków owadów żerujących i rozmnażających się w skórze (Serjeantson 1989: 136), natomiast sąsiedztwo związków żelaza może wpływać na zmianę barwy przedmiotów. Należy też zwrócić uwagę m.in. na obecność dużych ilości odpadów organicznych, np. kory drzew i mierzwy. Do kanonu powinien należeć opis sposobów zabezpieczania i konserwacji skór oraz warunków ich przechowywania, które także mogą wpływać na ocenę końcową (por. np. Groenman-van Waateringe 1984: 10 n.; Cherry 1991: 295–299; van den Berg, Groenman-van Waateringe 1992: 348; Cameron 2000: 12 n.; Mould i in., 2003: 3213 n.; por też Ceynowa 2012). Skład chemiczny przedmiotów wykopaliskowych jest daleki od pierwotnego, należy zatem zachować ostrożność interpretacyjną w ocenie garbników, uwzględniając wszystkie przedstawione wyżej czynniki wpływające na zmiany składu pierwiastkowego (Joyce 2011).

Jeśli chodzi o surowce organiczne, jedną ze współcześnie stosowanych metod jest analiza izotopów strontu wykorzystywana np. w badaniach nad dawnymi tkaninami (Frei 2010), a ściślej nad pochodzeniem surowców do ich produkcji (Frei i in., 2009a, 2009b). Tę samą metodę w stosunku do wyrobów skórzanych z okresu przedrzymskiego i okresu wpływów rzymskich zastosowała Julia Gräf (2015: 167 n.; Carnap-Bornheim i in. 2007), analizując materiały z dawnych odkryć archeologicznych w torfowiskach Schlezwiku-Holsztyna. Wyniki jej pilotażowych studiów są bardzo obiecujące, pomimo licznych ograniczeń wpływających na ocenę końcową, takich jak środowisko odkrycia, zanieczyszczenia czy zużycie przedmiotu (Gräf 2015: 173 n.).

PODSUMOWANIE

Badania nad skórą wykopaliskową w Polsce dotyczą przede wszystkim średniowiecza ze względu na zasób źródeł. Znaleziska pradziejowe to zazwyczaj niewielkie, szczątkowo zachowane fragmenty, których funkcję można określić jedynie na podstawie kontekstu odkrycia (np. szczątków taśm pasów zachowanych pod charakterystycznymi okuciami lub sprzączkami). Nie podlegają zatem analizie typologicznej, trudna jest także ocena zoologiczna, ale dzięki zastosowaniu współczesnych metod analitycznych mogą być kluczowe w ocenie gatunkowej, a być może też użytych technik garbarskich. Jedną z największych zagadek skórnictwa na ziemiach polskich jest bowiem kwestia początków świadomego garbarstwa roślinnego uprawianego na dużą skalę. W ośrodkach wczesnośredniowiecznych mamy już do czynienia z wyrobami wykonanymi z poprawnie opracowanego materiału i zróżnicowanymi funkcjonalnie. Kiedy i w jakich okolicznościach nastąpiło upowszechnienie czaso- i pracochłonnej, a jednocześnie najskuteczniejszej wyprawy roślinnej?

Jak w każdej dziedzinie wytwórczości, również w garbarstwie zmiany spowodowane rosnącymi potrzebami wynikały ze stopniowego zdobywania doświadczenia i świadomego wykorzystywania zasobów środowiska naturalnego, a także wymiany myśli w kontaktach międzykulturowych. Możliwość przybliżenia przetwarzania skór surowych w materiał o zróżnicowanych parametrach z użyciem tłuszczów, olejów, minerałów i roślin stwarza analiza składu pierwiastkowego skór archeologicznych. Badania spektroskopowe pozwalają na badania substancji organicznych i mineralnych zawartych w skórach, w tym także garbników (por. Miazga 2018). Są to badania nieinwazyjne zajmujące najwyżej kilka minut.

Problemem nie jest dostęp do odpowiedniej aparatury, lecz poprawne odczytanie uzyskanych danych – sekwencji pierwiastków chemicznych, które są nośnikami informacji o samym przedmiocie, jak i miejscu jego odkrycia, miejscu i sposobie przechowywania, działaniach konserwatorskich, a więc wszystkich czynnikach zewnętrznych, które miały wpływ na stan i zmiany przedmiotu wykopaliskowego. Problemem jest właściwa interpretacja wyników. Czy można na podstawie wyników badań składu pierwiastkowego określić, jakimi substancjami była utrwalona skóra zwierzęca? Jeśli tak, to czy jest możliwe określenie okresów przełomowych w historii

skórnictwa na ziemiach polskich? Czy na tej podstawie można określić np. potencjalną liczbę warsztatów skórniczych funkcjonujących w jednym ośrodku, kierując się używanymi garbnikami?

Ustalenie momentu wprowadzenia i upowszechniania metod garbarskich – tłuszczowej, mineralnej czy roślinnej – to wciąż zagadnienia oczekujące na rozwiązanie, nie tylko w Polsce. Do odkrycia skutków oddziaływania tłuszczów roślinnych i zwierzęcych na surowe pokrycia zwierzęce mogło dojść niezależnie w różnych miejscach na świecie (Mauch 2004; Driel-Murray 2016), podobnie jak w przypadku zastosowania komponentów roślinnych. Samo rozróżnienie metod garbowania po okresie wielowiekowego kontaktu wyrobów skórzanych ze środowiskiem depozytu uważane jest ze względu na zmiany fizykochemiczne za bardzo trudne, chociaż nie niemożliwe. Wdrażane są coraz bardziej skomplikowane metody badawcze (por. Why leather 2014) wymagające zaangażowania specjalistycznej aparatury i doświadczonych techników. Obecnie, jeśli pozwala na to stan zachowania struktury molekularnej, do identyfikacji gatunku zwierzęcia wykorzystuje się oprócz badań DNA metodę spektrometryczną, zwaną też kolagenowym lub peptydowym „odciskiem palców" (Hollemeyer *i in*. 2012). W ostatnich latach ta nowa metoda jest testowana zarówno podczas prac polowych, jak i w warunkach muzealnych (Driel-Murray 2000).

Interesujące dane zmieniające dotychczasowe postrzeganie dawnego garbarstwa przedstawiła ostatnio Theresa Emmerich Kamper (2020), która od wielu lat zajmuje się problematyką obróbki skóry i archeologią eksperymentalną. Efektem jej pracy jest obszerna kolekcja próbek skór garbowanych różnych zwierząt ukazująca skutki poszczególnych metod garbowania różnymi substancjami wraz z fotografiami i przekrojami. Są to nie tylko niezwykle cenne materiały porównawcze. Stanowią swoisty podręcznik pozwalający dostrzec ślady powstałe na różnych etapach procesu garbarskiego i porównać je ze śladami zachowanymi na skórach archeologicznych.

Jak ważne są ustalenia zoologiczne, nie tylko gatunkowe, ale też dotyczące miejsca pobrania skóry, jej jakości, stanu zachowania przed garbowaniem, pokazują analizy specjalistyczne Teresy Radek, która wnikliwie i szczegółowo bada każdy, najmniejszy nawet element i potrafi wyciągnąć wnioski daleko wykraczające poza prostą konstatację gatunku (Radek 1980, 1986, 1987, 1996, 1997, 1998, 1999, 2009, 2018; por. też Kowalska 2010: 31 n.). Druga sprawa to analiza archeologiczna, kulturowo-historyczna i kontekstowa, bo tylko wtedy możliwe jest wszechstronne i pełne wykorzystanie wniosków z każdego etapu postępowania badawczego, w tym także analiz zoologicznych.

Na rozwój badań nad archeoskórnictwem należy patrzeć z optymizmem. Są to badania żmudne i długotrwałe, ale dostarczają spektakularnych wyników pozwalających lepiej zrozumieć funkcjonowanie dawnych społeczności. Zachętą dla młodych i przyszłych badaczy powinien być ogromny zasób źródeł już oczekujących na podjęcie wszelkiego rodzaju analiz – od typologicznych po specjalistyczne, oraz możliwość krytyki źródeł i weryfikacji dawnych ustaleń z wykorzystaniem współczesnych technologii.

LITERATURA

Andrzejewska, A. 2009. Wykorzystanie surowców wtórnych oraz odpadów produkcyjnych w średniowiecznym Bytomiu. *Acta Archaeologica Historica* 18, 209–217.

Berg van den, T., Groenman-van Waateringe, W. 1992. Das Leder aus dem Umfeld des Lübecker Hafens. *Lübecker Schriften zur Archäologie und Kulturgeschichte* 18, 345–364.

Bieńkiewicz, K.J. 1977. *Fizykochemia wyprawy skór*. Warszawa.

Blajer, W., Kozłowska, D. 2021. Skarb z miejscowości Wąwelnica koło Szczecina. *Materiały Zachodniopomorskie NS* 17, 219–261.

Blusiewicz, K. 2017. Szewc czy garbarz? Interpretacja archeologicznych śladów produkcji skórniczej. *Archaeologia Historica Polona* 17, 201–220.

Borkowski, J. 2006. Pozostałości nowożytnego rzemiosła garbarskiego na stanowisku 94 w Słupsku, woj. pomorskie. W: M. Dworaczyk, A.B. Kowalska, S. Moździoch, M. Rębkowski (red.), *Świat Słowian wczesnego średniowiecza*. Szczecin–Wrocław, 315–327.

Boucher, F. 2004. *Historia mody. Dzieje ubiorów od czasów prehistorycznych do końca XX wieku*. Warszawa.

Buśko, C. 1999. Pracownia garbarska. *Wratislavia Antiqua* 1, 92–95.

Cameron, E. 2000. Sheaths and Scabbards in England AD 400-1100. *BAR British Series* 301, Oxford.

Carnap-Bornheim, C., Nosch, M.-L., Grupe, G., Mekota, A.-M., Schweissing, M.M. 2007. Stable strontium isotopic ratios from archaeological organic remains from the Thorsberg peat bog. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 21/,: 1541–1545.

Cehak-Hołubowiczowa, H. 1954. Trzewiki opolskie. *Dawna Kultura* 1: 7–13.

Ceynowa, B. 2009. Problem importu obuwia w Gdańsku w 1 połowie XVI w. na przykładzie znalezisk części butów

ze stanowiska Lastadia, (w:) H. Paner, M. Fudziński, Z. Borcowski (red.), *Stan badań archeologicznych miast w Polsce*. Gdańsk, 389-401.

Ceynowa, B. 2012. Conservation and restoration of leatherwork recovered from excavations in Gdańsk. W: E. Jabłońska, T. Kozielec (red.), *Parchment and leather heritage. Conservation-Restoration*. Toruń, 311-320. Cherry, J. 1991. Leather, (w:) J. Blair, N. Ramsay (red.), *English medieval industries, craftsmen, techniques, products*. London, 295–318.

Chojnowski, M., Sikora, E. 1970. *Pozyskiwanie i konserwacja skór surowych zwykłych*. Warszawa.

Cnotliwy, E. 1973. *Rzemiosło rogownicze na Pomorzu wczesnośredniowiecznym*. Wrocław–Warszawa–Kraków–Gdańsk.

Cnotliwy, E. 2004. Wyroby ze skóry z wykopu 5 na stanowisku 1 w Wolinie. *Materiały Zachodniopomorskie* NS I/1, 167–202.

Cnotliwy, E. 2014. *Archeologia Zamku Książąt Pomorskich w Szczecinie*. Szczecin.

Drążkowska, A. 2000. Wyroby skórzane. (w:) Z. Kurnatowska (red.), *Wczesnośredniowieczne mosty przy Ostrowie Lednickim*, t. 1. Mosty traktu gnieźnieńskiego. Lednica–Toruń, 189–199.

Drążkowska, A. 2007a. Obuwie typu mule wydobyte na Starym Mieście w Toruniu. *Materiały do Dziejów Kultury i Sztuki Bydgoszczy i Regionu* 12: 71–76.

Drążkowska, A. 2007b. Obuwie z połowy XVIII wieku wydobyte z krypty w kościele p.w. św. Józefa w Pułtusku. (w:) A. Henrykowska, R. Lolo (red.), *Pułtuskie osobliwości*. Warszawa, 37–50.

Drążkowska, A. 2009. Jedwabne obuwie wydobyte z krypt grobowych. *Pomorania Antiqua* 22: 223–232.

Drążkowska, A. 2011. *Historia obuwia na ziemiach polskich od IX do końca XVIII wieku*. Toruń.

Drążkowska, A., Grupa M. 2009. Próba przeprowadzenia rekonserwacji zabytków skórzanych przy wykorzystaniu techniki suszenia próżniowego w niskich temperaturach. *Sprawozdania Archeologiczne* 61: 407–417.

Drążkowska *et al*. 2011. Drążkowska, A., Grupa, M., Płóciennik, P., Rybka, K., Szatkowski, J., Zawadzka, A. 2011. Using vacuum freeze-drying for archaeological leather conservation. *Sprawozdania Archeologiczne* 63: 357–385.

Dzieduszycki, W. 1982. *Wczesnomiejska ceramika kruszwicka w okresie od 2 połowy X w. do połowy XIV w.* Wrocław–Warszawa–Kraków–Gdańsk–Łódź.

Eberle, L. 1971. Polskie rzemiosło skórzane w średniowieczu. Stan i kierunki poszukiwań. (w:+ Z. Kamieńska (red.), *Wyroby rzemieślnicze w Polsce w XIV–XVIII wieku*. Wrocław, 9–21.

Eberle, L. 1979. Zabytki skórzane z fosy Zamku Warszawskiego. *Rocznik Warszawski* 15: 113–123.

Eberle, L. 1984. Źródła do poznania technologii kroju i szycia średniowiecznego obuwia warszawskiego. *Kwartalnik Historii Kultury Materialnej* 32/2: 199–209.

Eberle, L. 1985. Źródła do poznania technologii kroju i szycia obuwia warszawskiego z XVI wieku. *Kwartalnik Historii Kultury Materialnej* 33/3: 199–214.

Frei, K.M. 2010. Provenance of Pre-Roman Iron Age textiles — methods development and applications*, Ph.D. thesis*. Faculty of Humanities, University of Copenhagen. Copenhagen.

Frei, K.M., Frei, R., Mannering, U., Gleba, M., Nosch, M.-L., Lyngstrøm, H. 2009. Provenance of Ancient Textiles – a Pilot Study Evaluating the Strontium Isotope System in Wool, *Archaeometry* 51/2: 252–276.

Frei, K.M., Skals, I., Gleba, M., Lyngstrøm, H., 2009. The Huldremose Iron Age Textiles, Denmark: an Attempt to Defi ne Th eir Provenance Applying the Strontium Isotope System. *Journal of Archaeological Science* 36: 1965–1971.

Gaj-Piotrowski, W. 1975. *Kultura materialna ludu z okolic Rozwadowa*, t. 1. Rzeszów.

Gołębiowski, Ł. 1983 (reprint). *Ubiory w Polszcze od najdawniejszych czasów aż do chwil obecnych sposobem dykcyonarza ułożone i opisane,* (pierwsze wydanie Kraków 1861). Warszawa.

GPE. *Folder Górnośląskiego Parku Etnograficznego*.

Groenman-van Waateringe, W. 1984. Die Lederfunde von Haithabu. *Berichte über die Ausgrabungen in Haithabu* 21.

Groenman-van Waateringe, W. 1988. Leather from medieval Svendborg. *The Archaeology of Svendborg* 5.

Gräf, J. 2015. Lederfunde der Vorrömischen Eisenzeit und Römischen Kaiserzeit aus Nordwestdeutschland. *Studien zur Landschafts- und Siedlungsgeschichte im südlichen Nordseegebiet* 7.

Gutkowska-Rychlewska, M. 1967. Patynki z Pyrzyc na tle mody obuwia średniowiecznego. *Rozprawy i Sprawozdania Muzeum Narodowego w Krakowie* 9: 33–41.

Hartley, D. 1931. *Medieval costume and life*. London.

Hensel, W. 1952. *Słowiańszczyzna wczesnośredniowieczna. Zarys kultury materialnej*. Poznań.

Hensel, W. 1956. *Słowiańszczyzna wczesnośredniowieczna. Zarys kultury materialnej*, wyd. 2. Poznań.

Hensel, W. 1965. *Słowiańszczyzna wczesnośredniowieczna. Zarys kultury materialnej*, wyd. 3. Warszawa.

Hensel, W. 1987. *Słowiańszczyzna wczesnośredniowieczna. Zarys kultury materialnej*, wyd. IV uzupełnione. Warszawa.

Hollemeyer, K., Altmeyer, W., Heinzle, E., Pitra, Ch. 2012. Matrix-assisted laser desorption/ionization time-of-flight mass spectrometry combined with multidimensional scaling, binary hierarchical cluster tree and selected diagnostic masses improves species identification of Neolithic keratin sequences from furs of the Tyrolean Iceman Oetzi. *Rapid Commun. Mass Spectrom* 26: 1735–1745.

Hołowińska, Z. 1967. Dzielnica rzemieślnicza z XIII i XIV wieku w Gdańsku. *Gdańsk Wczesnośredniowieczny* 6, 183–239.

Hołubowicz, W. 1956. *Opole w wiekach X–XII*. Katowice.

Izjumova, S.A. 1959. K istorii koževennogo i sapožnego remesl Novgoroda Velikogo, *Материалы и Исследования по Археологи СССР* 65/2: 193–222.

Jagielska, I. 2009. Zastosowanie liofilizacji do konserwacji zabytków skórzanych z badań archeologicznych. (w:) A.B. Kowalska, B. Wywrot-Wyszkowska (red.), *In gremio – in*

praxi. Studia nad średniowiecznym skórnictwem. Szczecin, 157–165.

Jakimowicz, B., Rodzik, I. 2008. Leather artefacts (Zabytki skórzane). (w:) W. Ossowski (red.), The General Carleton shipwreck, 1795 (Wrak statku Generał Carleton, 1795). Gdańsk, 2013–222.

Jakimowicz, B., Rodzik, I. 2009. Konserwacja i rekonstrukcja zabytków skórzanych. (w:) A.B. Kowalska, B. Wywrot-Wyszkowska (red.), *In gremio – in praxi. Studia nad średniowiecznym skórnictwem*. Szczecin, 147–155.

Jasiewicz, Z. 1960. Z etnograficznych badań nad rzemiosłem ludowym, (w:) *Dzieje ziemi słupeckiej*. Słupca, 175–178.

Jasiewicz, Z. 1964. Garbarstwo, (w:) J. Burszta (red.), *Kultura ludowa Wielkopolski*, t. 2. Poznań, 565–602.

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–Heildelberg–London, 193–202.

Kaczmarek, M., Szczurek G., Krzysiak A. 2021. Kaliska I. Skarb przedmiotów metalowych z późnej epoki brązu na Pomorzu. *Hyperborea* 6. Poznań.

Kajzer, L. 2001. Panorama badań wykopaliskowych ostatniego trzydziestolecia XX wieku. (w:) S. Skibiński (red.), *Polska na przełomie I i II tysiąclecia*. Poznań, 197–222.

Kamińska, J., Nahlik A. 1958. Włókiennictwo gdańskie X–XIII w., Łódź.

Kamper, T.E., 2020. *Determining prehistoric skin processing technologies. The macro and microscopic characteristics of experimental samples*. Leiden.

Kaźmierczyk, J. 1958. Sprawozdanie z badań w Nysie w 1958 r. *Śląskie Sprawozdania Archeologiczne* 1: 54–57.

Kaźmierczyk, J. 1970. *Wrocław lewobrzeżny we wczesnym średniowieczu*, t. 2, Wrocław–Warszawa–Kraków.

Keene, D.J. 1982. Rubbish in medieval towns, (w:) A.R. Hall, H.K. Kenward (red.), *Environmental archaeology in the urban context.* Council for British Archaeology Research Report 43, 26–30.

Klek, M. 2024. The arrow quiver of the Iceman. Reconstruction attempts and the special significance of the hide, (w:) A.B. Kowalska (red.), *In gremio – in praxi. Letaher without borders*. Szczecin, 13–39.

Kołobrzeg 2007. *Kołobrzeg. Wczesne miasto nad Bałtykiem*. Red. L. Leciejewicz, M. Rębkowski. *Origines Polonorum*, t. II. Warszawa.

Kostrzewski, J. 1947. *Kultura prapolska*. Poznań.

Kostrzewski, J. 1949a. *Kultura prapolska*, wyd. 2. Poznań.

Kostrzewski, J. 1949b. *Dzieje polskich badań prehistorycznych*. Poznań.

Kostrzewski, J. 1960. Kilka uwag o siodłach wczesnośredniowiecznych i współczesnych ludowych. *Slavia Occidentalis* 20: 59–65.

Kostrzewski, J. 1962. *Kultura prapolska*. Warszawa.

Kowalska, A.B. 1999. Wczesnośredniowieczne obuwie skórzane z Wolina. *Materiały Zachodniopomorskie* 45: 219–258.

Kowalska, A.B. 2003. Początki rzemiosła szewskiego we wczesnośredniowiecznym Wolinie, (w:) T. Galiński, E. Wilgocki (red.), *Res et fontes. Księga jubileuszowa dr. Eugeniusza Cnotliwego w 70. rocznicę urodzin*. Szczecin, 159–171.

Kowalska, A.B. 2006. Uwagi na temat wytwórczości szewskiej w Wolinie i Szczecinie w VIII–X wieku, (w:) M. Dworaczyk, A.B. Kowalska, S. Moździoch, M. Rębkowski (red.), *Świat Słowian wczesnego średniowiecza*. Szczecin–Wrocław, 197–209.

Kowalska, A.B. 2008. Shoemaking in Medieval Szczecin and Wolin. *Offa* 61/62: 435–454.

Kowalska, A.B. 2009a. Archeologia o średniowiecznym skórnictwie na ziemiach polskich. Zarys problematyki, (w:) A.B. Kowalska, B. Wywrot-Wyszkowska (red.), *In gremio – in praxi. Studia nad średniowiecznym skórnictwem*. Szczecin, 193–247.

Kowalska, A.B. 2009b. Dom szewca czy szewc w domu?, (w:) B. Gruszka (red.), *Ad Oderam fluwium, księga dedykowana pamięci Edwarda Dąbrowskiego*. Zielona Góra, 529–536.

Kowalska, A.B. 2010. *Wytwórczość skórzana we wczesnośredniowiecznym Szczecinie.* Szczecin.

Kowalska, A.B. 2011. Życie codzienne mieszkańców wczesnośredniowiecznego Szczecina w świetle źródeł archeologicznych, (w:) A.B. Kowalska; M. Dworaczyk, *Szczecin wczesnośredniowieczny. Nadodrzańskie centrum*. Warszawa, 302–308.

Kowalska, A.B. 2013a. *Wytwórczość skórzana w późnośredniowiecznej Dzielnicy Chyżyńskiej w Szczecinie*. Szczecin.

Kowalska, A.B. 2013c. Rzemiosło szewskie wczesnośredniowiecznego Wolina, (w:) B. Stanisławski, W. Filipowiak (red.), *Wolin wczesnośredniowieczny*. Warszawa, 201–235.

Kowalska, A.B. 2015. Costume Elements of Leather, (w:) A. Buko (red.) *Bodzia. A late Viking-Age Elite Cemetery in Central Poland*. Leiden-Boston, 272–287.

Kowalska, A.B. 2016. Skórzane elementy stroju w pochówkach na wczesnośredniowiecznym cmentarzysku w Bodzi, (w:) A. Buko (red.), *Bodzia. Elitarny cmentarz z początków państwa polskiego*. Warszawa, 253–264.

Kowalska, A.B. 2017a. Odpady produkcyjne jako źródła do badań nad organizacją wczesnośredniowiecznej wytwórczości skórzanej. *Archaeologia Historica Polona* 17: 181–200.

Kowalska, A.B. 2017b. Średniowieczne skórnictwo z pogranicza Wielkopolski i Pomorza w świetle znalezisk z Ujścia. *Materiały Zachodniopomorskie NS* 13: 145–174.

Kowalska, A.B. 2019a. Nowożytne wyroby skórzane, (w:) A.B. Kowalska (red.), *Civitas et urbs. Szczecin od średniowiecza do współczesności. Kwartał I*. Szczecin, 141–145.

Kowalska, A.B. 2019b. Przedmioty ze skóry, (w:) K. Zamelska-Monczak (red.), *Santok. Strażnica i klucz Królestwa Polskiego. Wyniki badań z lat 1958–1965*. Warszawa, 288–294.

Kowalska, A.B. 2019c. Artefacts made of Leather, (w:) M. Rębkowski (red.), *Wolin, the Old Town. Vol. II: Studies on Finds*. Szczecin, 245–291.

Kowalska, A.B. 2021a. Step by Step: How to Investigate Medieval Footwear. *Archaeologies* 17/1. https://doi.org/10.1007/s11759-021-09427-w

Kowalska, A.B. 2024. Problems of continuation of medieval manufacturing traditions in modern shoemaking based on archaeological finds in Szczecin. *Analecta Archaeologica Ressovia* 19: 143–156. DOI: 10.15584/anarres

Kowalska, A.B, Maik J., Słomska J. 2019. Pozostałe szczątki organiczne z Kosynia, (w:) J. Sobieraj (red.), *Początki epoki brązu na Warmii i Mazurach w świetle analiz* specjalistycznych. Olsztyn, 187–192.

Kowalska, A.B., Radek T. 2015. Uwagi na temat średniowiecznego garbarstwa w świetle źródeł archeologicznych. i analiz zoologicznych. Przykład Szczecina, (w:) A.B. Kowalska (red.), *In gremio – in praxi. Przedmioty skórzane na co dzień i od święta*. Szczecin, 227–246.

Kruszwica 2023. W. Dzieduszycki, J. Sawicka. Kruszwica wczesnośredniowieczna. *Origines Polonorum*, t. XVI. Warszawa.

Krzywicki, E. 1947. *Technologia garbarstwa*. Warszawa.

Kurbatov, A.V. 2004. Koževiennoje proizvodstvo Tveri XIII–XV *vv*. C-Пeтepбуг.

Kurnatowska, Z. 1983. Rozwój problematyki badawczej w archeologii wczesnego średniowiecza w Polsce. *Slavia Antiqua* 29: 1–21.

Kurnatowska, Z. 1997. Badania nad początkami państwa polskiego. Próba bilansu. *Slavia Antiqua* 38: 25–38.

Kurnatowska, Z., Kurnatowski, S. 2004. Możliwości poznawczego wykorzystania źródeł archeologicznych, (w:) S. Rosik, P. Wiszewski (red.), *Ad fontes. O naturze źródła historycznego*. Acta Universitatis Wratislaviensis" no. 2675, historia CLXX, 33–47.

Kuryszko, J., Zarzycki, J. 1995. *Anatomia mikroskopowa zwierząt domowych i człowieka*. Warszawa.

Lampe, W. 1982. Ückeritz. Ein jungbronzezeitlicher Hortfund von der Insel Usedom. Berlin. *Beiträge zur Ur- und Frühgeschichte der Bezirke Rostock, Schwerin und Neubrandenburg* 15.

Lasek, W. 1954. *Materiałoznawstwo skórzane*. Warszawa.

Lasek, W., Persz, T. 1985. *Technologia wyprawy skór, cz. 2. Wykończanie*. Warszawa.

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.

Łęga, W. 1933. *Ziemia malborska. Kultura ludowa*. Toruń.

Makowieccy, M. i D. 2007. Gospodarka zwierzętami we wczesnośredniowiecznym centrum osadniczym w Kołobrzegu–Budzistowie w świetle nowych badań archeozoologicznych, (w:) L. Leciejewicz, M. Rębkowski (red.), *Kołobrzeg. Wczesne miasto nad Bałtykiem*. Warszawa, 241–286.

Manecki, A., Niewodniczański, J. 1988. Rentgenowska analiza fluorescencyjna, (w:) A. Bolewski, W. Żabiński (red.), *Metody badania minerałów i skał* (II wyd.). Warszawa, 632–657.

Mauch, H. 2004. *Studien zur Lederstehllung am Beispiel des nördlichen Alpenraums. Von den Anfängen bis zur Neuzeit*. Stuttgart.

Miazga, B. 2018. Wyniki badań spektralnych średniowiecznych zdobionych zabytków, (w:) J. Piekalski, K Wachowski (red.), *Rytm rozwoju miasta na kulturowym pograniczu. Studium strefy placu Nowy Targ we Wrocławiu*. Wrocław, 850-871.

Międzyrzecz 2015. Międzyrzecz. Gród i zamek w wiekach IX–XIV. Wyniki prac wykopaliskowych z lat 1954–1961. Red. S. Kurnatowski. *Origines Polonorum*, t. VIII. Warszawa.

Milewska, M. 1977. Dokumentacja archeologiczna znalezisk obuwia późnośredniowiecznego. Propozycja metody. *Kwartalnik Historii Kultury Materialnej* 35/4, 529–542.

Milewska, M. 1980. A Method of recording late Medieval footwear finds. *Archeologia Polski* 19: 115–136.

Milewska, M. 1989–1990. Wytwórczość skórzana w późnym średniowieczu i czasach nowożytnych. Stan i problematyka badań archeologicznych. *Prace i Materiały Muzeum Archeologicznego i Etnograficznego w Łodzi. Seria Archeologiczna* 36: 185–192.

Mischke, W. 1995. Warsztat garbarski w Kodeksie Behema. Problemy formy i interpretacji, (w:) T. Hrankowska (red.), *Niderlandyzm w sztuce polskiej. Materiały Sesji Stowarzyszenia Historyków Sztuki, Toruń, grudzień 1992*. Warszawa, 417–429.

Miśta-Jakubowska, E., Duczko, W., Kowalska, A.B., Czech, Błońska R., Mathur, R., Gójska, A., Rozmus, D., Siuda, R., Oleszak, D., Brojanowska, A. 2023. Amulets from Viking-age Baltic coast: a unique hoard from Piaski-Dramino (Poland) in the light of provenance and technological research of goldsmithing art. *Journal of Archaeological Science: Reports* 53: 1–13.

Moszyński, K. 1967. *Kultura ludowa Słowian, t. 1, Kultura materialna*. Warszawa.

Mould, Q, Carlisle, I., Cameron, E. 2003. Leather and Leatherworking in Anglo-Scandinavian and Medieval York. *The archaeology of York, The small finds 17/16, Craft, Industry and Everyday life*. York.

Moździoch, S. 1990. *Organizacja gospodarcza państwa wczesnopiastowskiego na Śląsku. Studium Archeologiczne*. Wrocław.

Nicolle, D. 2024. Medieval leather or rawhide helmets found in Tower 4 of the Citadel of Damascus, (w:) A.B. Kowalska (red.), *In gremio – in praxi. Leather without borders*. Szczecin, 81–119.

Niedzielski, P., Krueger, M., Brandherm, D. 2020. Effects of sample processing on XRF results from archeological pottery. *Materials and Manufacturing Processes* 35:1455-1460. DOI: 10.1080/10426914.2020.1743856

Nielsen, I. 1991. The leather finds, (w:) M. Bencard, L.B. Jørgensen, H.B. Madsen (red.), *Ribe excavations 1970–76*, t. 3. Esbejrg, 79–98.

Oborska, T. 1977. Próby oznaczania metodą mikromorfologiczną przynależności gatunkowej skór wczesnośredniowiecznych zwierząt. *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu* 93, *Archeozoologia* 3: 39–47.

Olczak, J. 1968. Wytwórczość szklarska na terenie Polski we wczesnym średniowieczu. Studium archeologiczno-technologiczne. Wrocław.

Okrągła D. b.r.w. Skóra pod lupą, (w:) Skóra w obiektach muzealnych. *Ochrona zabytków* 4: 13-14.

Persz, T. 1965. *Garbarstwo*, cz. 1. Warszawa.

Persz, T. 1972. *Materiałoznawstwo skórzane dla zasadniczych szkół zawodowych*. Katowice.

Persz, T. 1979. *Technologia wyprawy skór*, cz. 1, Garbowanie. Warszawa.

Pietkiewicz, Cz. 1928. *Polesie Rzeczyckie*. Kraków.

Pinhasi, R., Gasparian ,B., Areshian, G., Zardaryan, D., Smith, A. 2010. *First Direct Evidence of Chalcolithic Footwear from the Near Eastern Highlands*. PLoS ONE 5(6): e10984. doi:10.1371/journal.pone.0010984

Pitner, L. 1968. *Wykończanie obuwia*. Warszawa.

Poppe, D. 1974. Przemysł skórzany, (w:) W. Hensel, J. Pazdur (red.), *Historia kultury materialnej Polski w zarysie*. Warszawa, 130–156.

Poradnik garbarza. 1953. *Poradnik garbarza*. Praca zbiorowa. Warszawa.

Porankiewicz, S. 1947. *Szewstwo i cholewkarstwo*. Poznań.

Przybyszowska, B. 1979. Wyroby ze skóry, (w:) A. Cofta-Broniewska (red.), *Zaplecze gospodarcze konwentu o.o. Franciszkanów w Inowrocławiu od połowy XIII w.* Studia i Materiały do Dziejów Kujaw, Seria Archeologiczna 15, 103–116.

Püntener, A., Moss, S. 2010. Ötzi, the Iceman and his leather clothes. *Chimia* 64: 315–320.

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.

Radek, T. 1980. Przynależność gatunkowa garbowanych skór ze średniowiecznych wykopów w Nakle nad Notecią. *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu* 121: 59–73.

Radek, T. 1986. Przynależność gatunkowa skór garbowanych z wczesnośredniowiecznego stanowiska archeologicznego we Wrocławiu. *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu* 172: 91–101.

Radek, T. 1987. Przynależność gatunkowa skór szczątków obuwia z wczesnośredniowiecznego Ostrówka w Opolu. *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu* 184: 59–73.

Radek, T. 1996. Kilka uwag o skórnictwie średniowiecznego Kołobrzegu na podstawie submikroskopowych badań zabytków skórzanych z wykopalisk przy ul. Ratuszowej. *Archeologia Średniowiecznego Kołobrzegu* 1, 285–298.

Radek, T. 1997. Analiza submikroskopowa surowca skórzanego ze średniowiecznego Kołobrzegu. *Archeologia Średniowiecznego Kołobrzegu* 2, 207–220.

Radek, T. 1998. Ścinki i odpady skórzane materiałem źródłowym wiedzy o poziomie skórnictwa w średniowieczu, (w:) P. Wyrost, N. Pospieszny, B. Gediga (red.), *Szczątki zwierzęce jako źródło badań nad zróżnicowaniem poziomów życia materialnego i kulturalnego w różnych okresach dziejowych*. Materiały z Sympozjum Archeozoologicznego. Wrocław, 120–127.

Radek, T. 1999. Wyniki gatunkowej ekspertyzy zabytków skórzanych. *Wratislavia Antiqua* 2: 95–104.

Radek, T. 2006. Identyfikacja gatunkowa skór odkrytych w obrębie pochówków na cmentarzyskach wczesnośredniowiecznych, (w:) E. Cnotliwy, A. Janowski, K. Kowalski, S. Słowiński (red.), *Nie tylko archeologia*. Szczecin, 215–221.

Radek, T. 2009. Gatunek, asortyment i jakościowa ocena skór garbowanych na podstawie wyników badań makroskopowych i mikroskopowych wykopaliskowych przedmiotów i odpadów skórzanych, (w:) A.B. Kowalska, B. Wywrot-Wyszkowska (red.), *In gremio – in praxi. Studia nad średniowiecznym skórnictwem*. Szczecin, 137–145.

Radek, T. 2018. Wyniki gatunkowej ekspertyzy zabytków skórzanych. *Wratislavia Antiqua* 23: 872–874.

Räf, E. 2000. Slaughtering Holy Cows? Studies of Half-moon Knives in Women's Graves on Öland, (w:) D. Olausson, H. Vandkilde (red.), Form, Function and Context. Material culture studies in Scandinavian Archaeology. *Acta Archaeologica Lundiensia* 31: 239–251.

Rajewski, Z. 1939. Gnieźnieńskie wyroby skórzane z okresu wczesnodziejowego, (w:) *Gniezno w zaraniu dziejów (od VIII do XIII wieku) w świetle wykopalisk*. Poznań, 103–116.

Reed, R. (Ed.). 1972. *Ancient skins, parchments and leathers*. London.

Rębkowski, M. 2008. Czy archeolog odczytuje historię średniowiecza? Uwagi o znaczeniu źródeł archeologicznych, (w:) S. Suchodolski (red.), Źródła historyczne wydobywane z ziemi. Wrocław, 11–31.

Romanow, K. 1981. Wyniki badań na Starym Mieście we Wrocławiu (wykop I), cz. III. *Silesia Antiqua* 23: 165–197.

Rutkowska-Płachcińska, A. 1978. Omówienie literatury, (w:) W. Hensel, J. Pazur (red.), *Historia kultury materialnej w zarysie,* t. 2. Wrocław, 385–386.

Rybakov, B.A. 1948. *Remeslo drevnej Rusi*. Moskva.

Rząska, H., Walenta, K. (red.) 2017. *Brązy ukryte w ziemi… Łużycki skarb z Charzyków*. Chojnice.

Samsonowicz, A. 1974. Z badań nad wytwórczością skórzaną w Polsce wczesnośredniowiecznej. *Kwartalnik Historii Kultury Materialnej* 22/4: 633–653.

Samsonowicz, A. 1982. *Wytwórczość skórzana w Polsce wczesnofeudalnej*. Wrocław–Warszawa–Kraków–Gdańsk–Łódź.

Santok 2019. Santok. Strażnica i klucz Królestwa Polskiego. Red. K. Zamelska–Monczak. *Origines Polonorum*, t. XIII. Warszawa.

Schnack, Ch. 1992. Die mittelalterlichen Schuhe aus Schleswig. *Ausgrabungen in Schleswig* 10.

Serjeantson, D. 1989. Animal remains and the tanning trade, (w:) D. Serjeantson, T. Waldron (red.), *Diet and Crafts in Towns. The evidence of animal remains from the Roman to the Post-Medieval periods*. Oxford, 129–146.

Sieradzka, A. 2003. *Tysiąc lat ubiorów w Polsce*. Warszawa.

SJP 1983. *Słownik Języka Polskiego*. Warszawa.

SJP 1999. *Słownik Języka Polskiego*. Warszawa.

Skuza, Z. A. 2008. *Ginące zawody w Polsce*. Warszawa.

SPP 1982. *Słownik Poprawnej Polszczyzny*. Warszawa.

Suchodolski, S. 1974. Skarb z Zalesia – zespół z przełomu dwóch epok, (w:) M. Dekówna, J. Reyman, S. Suchodolski, *Wczesnośredniowieczny skarb srebrny z Zalesia powiat Słupca*, t. 2. Wrocław, 157–189.

Szczecin 2011. A.B. Kowalska, M. Dworaczyk. *Szczecin wczesnośredniowieczny. Nadodrzańskie centrum*. Origines Polonorum, t. V. Warszawa.

Szenicowa, W. 1961. Obróbka skóry, (w:) A. Gieysztor (red.), *Osiemnaście wieków Kalisza*, t. 2. Kalisz, 57–90.

Śmiechowski, K. 2015. Wybrane aspekty współczesnego garbarstwa, (w:) A.B. Kowalska (red.), *In gremio – in praxi. Przedmioty skórzane na co dzień i od święta*. Szczecin, 247–268.

Tandecki, J. 2009. Średniowieczne i nowożytne źródła do dziejów rzemiosł skórniczych na ziemiach polskich, (w:) A.B. Kowalska, B. Wywrot-Wyszkowska (red.), *In gremio – in praxi. Studia nad średniowiecznym skórnictwem*. Szczecin, 9–19.

Turnau, I. 1966. Źródła ikonograficzne do nowożytnej historii produkcji i konsumpcji. Próba klasyfikacji. *Kwartalnik Historii Kultury Materialnej* 14/1: 49–64.

Turnau, I. 1975a. *Garbarstwo na ziemiach polskich w XVI–XVIII wieku*. Wrocław–Warszawa–Kraków–Gdańsk.

Turnau, I. 1975b. *Skórnictwo odzieżowe w Polsce w XVI–XVIII wieku*. Wrocław.

Turnau, I. 1983. *Polskie skórnictwo*. Wrocław–Warszawa–Kraków–Gdańsk–Łódź.

Tymieniecki, K. 1955. Organizacja rzemiosła wczesnośredniowiecznego, a geneza miast polskich. *Studia Wczesnośredniowieczne* 1: 9–86.

van Driel-Murray, C. 2000. Practical Evaluation of a Field Test for the Identification of Ancient Vegetable Tanned Leathers. *Journal of Archaeological Science* 29/1. doi: 10.1006/jasc.2000.0649

van Driel-Murray, C. 2016. Practical Evaluation of a Field Test for the Identification of Ancient Vegetable Tanned Leathers. *Journal of Archaeological Science* 29/1. DOI: 10.1006/jasc.2000.0649

Vávra, R. 2024. Fishing for fish skin. Archaeological finds and the potential of fish skin, (w:) A.B. Kowalska (red.), *In gremio – in praxi. Leather without borders*. Szczecin, 229–244.

Veldmeijer, A.J. 2019. *The ancient Egyptian footwear project. Final archaeological analysis*. Leiden.

Why leather? Why leather. 2014. S. Harris, A.J. Veldmeijer (red.). *The material and cultural dimensions of leather*. Leiden.

Wiklak, H. 1957. Obuwie dawnych gdańszczan. *Z Otchłani Wieków* 23, 78–85.

Wiklak, H. 1959. Pracownie garbarsko-szewskie z XI i XII w. w Gdańsku. *Z Otchłani Wieków* 25/4, 267–268.

Wiklak, H. 1960. Obuwie gdańskie z X–XIII w. *Gdańsk Wczesnośredniowieczny* 3, 1–104.

Wiklak, H. 1967a. Obuwie gdańskie z XIII–XIV wieku. *Gdańsk Wczesnośredniowieczny* 6, 137–182.

Wiklak, H. 1967b. Gdańskie pochewki na noże z X–XIII wieku. *Gdańsk Wczesnośredniowieczny* 6, 67–81.

Wiklak, H. 1968. Krótka charakterystyka form polskiego obuwia wczesnośredniowiecznego. *Acta Archaeologica Lodziensia* 17: 145–153.

Wiklak, H. 1969. Polskie obuwie wczesnośredniowieczne z VIII–XIII w. na podstawie wykopalisk. *Materiały Wczesnośredniowieczne* 6: 475–516.

Wiklak, H. 1988. Wczesnośredniowieczne pracownie szewskie na Pomorzu Gdańskim. *Pomorania Antiqua* 13: 161–170.

Wiklak, H. 1993. Obuwie wykopaliskowe z Gniewa. *Pomorania Antiqua* 15: 75–129.

Wojtasik, J. 1960. Wczesnośredniowieczne wyroby ze skóry znalezione na stanowisku 4 w Wolinie. *Materiały Zachodniopomorskie* 6: 159–208.

Wojtasik, J. 1963. Rzemiosło szewskie we wczesnośredniowiecznym Wolinie. *Z Otchłani Wieków* 29/3: 169–171.

Wolin 2013. B. Wolin wczesnośredniowieczny, część 1 i 2. Red. B. Stanisławski, W. Filipowiak. *Origines Polonorum,* t. VI i VII. Warszawa.

Woźnicka, Z. 1961. *Wyroby bednarskie i tokarskie średniowiecznego Międzyrzecza*. Poznań.

Wywrot, B. 1995. Problemy badań nad średniowiecznymi wyrobami skórzanymi ze Starego Miasta w Kołobrzegu. *Materiały Zachodniopomorskie* 41: 269–301.

Wywrot, B. 1996. Wyroby skórzane. *Archeologia Średniowiecznego Kołobrzegu* 1, 243–284.

Wywrot, B. 1997. Zabytki skórzane. *Archeologia Średniowiecznego Kołobrzegu* 2, 183–206.

Wywrot-Wyszkowska, B. 1998. Znaleziska skórzane. *Archeologia Średniowiecznego Kołobrzegu* 3, 229–252.

Wywrot-Wyszkowska, B. 1999. Przedmioty skórzane. *Archeologia Średniowiecznego Kołobrzegu* 4, 231–251.

Wywrot-Wyszkowska, B. 2000. Rzemiosło skórnicze w lokacyjnym Kołobrzegu, (w:) L. Leciejewicz, M. Rębkowski (red.), *Salsa Cholbergiensis. Kołobrzeg w średniowieczu*. Kołobrzeg, 243–255.

Wywrot-Wyszkowska, B. 2002. Późnośredniowieczne patynki z lokacyjnego Kołobrzegu. *Przegląd Archeologiczny* 50: 103–110.

Wywrot-Wyszkowska, B. 2003. *Przemiany stylistyczne i konstrukcyjne w późnośredniowiecznym obuwiu pomorskim*, (w:) H. Paner, M. Fudziński (red.), *XIII Sesja Pomorzoznawcza*, t. 2. Gdańsk, 163–175.

Wywrot-Wyszkowska, B. 2008. *Skórnictwo w lokacyjnym Kołobrzegu. XIII–XV wiek*. Szczecin.

Wywrot-Wyszkowska, B. 2009. Uwagi na temat wytwórczości obuwniczej w późnośredniowiecznym Kołobrzegu. *Archaelogia Historica Polona* 18: 141–167.

Wywrot-Wyszkowska, B. 2010a. Przedmioty wykonane ze skóry. *Archeologia Średniowiecznego Kołobrzegu* 5, 114–119.

Wywrot-Wyszkowska, B. 2010b. Zabytki skórzane odkryte w obrębie średniowiecznego portu gdańskiego. *Archeologia Gdańska* 4, 189–223.

Wywrot-Wyszkowska, B. 2015. Uwagi na temat recyklingu oraz napraw i przeróbek wyrobów skórzanych

w późnośredniowiecznym Kołobrzegu, (w:) A.B. Kowalska (red.), *In gremio – in praxi. Przedmioty skórzane na co dzień i od święta.* Szczecin, 29–44.

Wywrot-Wyszkowska, B. 2016. Zabytki skórzane. *Archeologia Średniowiecznego Kołobrzegu* 6, 89–127.

Wywrot-Wyszkowska, B. 2017. Gewerbetopographie des spätmittelalterlichen und frühneuzeitlichen Kołobrzeg (Kolberg) im Lichte der archäologischen Quellen. *Zeitschrift für Archäologie des Mittelalters* 44: 149–166.

Wywrot-Wyszkowska, B. 2019. Die Wiederverwertung von Rohstoffen und die Verwaltung von Produktionsabfällen in spätmittelalterlichen Ostseestädten im Spiegel archäologischer Quellen. Einige Bemerkungen am Beispiel ausgewählter Gewerbe. *Fasciculi Archaeologiae Historicae* 32, 101–115.

Wywrot-Wyszkowska, B., Radek, T. 2007. Obróbka skóry, (w:) L. Leciejewicz, M. Rębkowski (red.), *Kołobrzeg. Wczesne miasto nad Bałtykiem*. Warszawa, 215–240.

Zalewski, E. 1938. *Skóry, surowiec, garbarstwo, handel*. Warszawa.

Żygulski, Z. jun. 1972. *Kostiumologia*. Kraków.





Traseologia wytworów z surowców kostnych

Grzegorz Osipowicz, Justyna Orłowska

WPROWADZENIE

Terminem surowce kostne lub materiały kostne określane są tkanki twarde zwierząt, takie jak: kości i zęby kręgowców, poroża jeleniowatych, rogi bydlęce, ciosy mamucie oraz słoniowe, a także muszle (Averbouh 2000, 187). Przedmioty wykonywane z tych surowców były wykorzystywane do najróżniejszych celów i znalazły zastosowanie we wszystkich dziedzinach życia dawnych grup ludzkich. Stanowiły nie tylko jeden z podstawowych materiałów do produkcji narzędzi i broni łowieckiej (m.in. Langley red. 2016; Orłowska i Osipowicz 2022b), lecz odgrywały także niezwykle ważną rolę w życiu społecznym i duchowym społeczności pradziejowych (Falci i in. 2018; Osipowicz i in. 2020a).

Wytwory z surowców kostnych mogą dostarczyć wielu cennych informacji o dawnych społecznościach. Jest to jednak wyjątkowo trudny materiał analityczny, wymagający uwzględnienia wielu czynników o kluczowym znaczeniu dla rezultatów prowadzonych badań. Należą do nich właściwości samego surowca, które nie są stałe, lecz zależą od jego rodzaju (kość, poroże itd.), gatunku zwierzęcia, z którego pochodzi, czy wreszcie pozycji w szkielecie (Krysiak *i in*. 2011, 29–37; Jaczewski 1992, 61–81). Olbrzymie znaczenie dla analizy prehistorycznych i historycznych wytworów kościanych mają również obecne na nich zmiany tafonomiczne, zachodzące pod wpływem procesów podepozycyjnych i innych (Fernández-Jalvo i Andrews 2016). W wielu przypadkach mogą one uniemożliwić realizację planowanych badań.

Jedną z podstawowych metod wykorzystywanych do studiów nad zabytkowymi wytworami z surowców kostnych jest traseologia. Metoda ta umożliwia interpretację funkcji dawnych narzędzi w oparciu o analizę obecnych na ich powierzchni zniszczeń użytkowych (np. Korobkowa 1999; Legrand 2007; Osipowicz 2010; Fullagar i Matheson 2013, 7063). W jej zakres wchodzą również badania śladów technologicznych powstałych w procesie produkcji danych przedmiotów (Évora 2015; Orłowska 2016; Orłowska i in. 2022b) oraz zniszczeń podepozycyjnych (Fernández-Jalvo i Andrews 2016). Celem tego artykułu jest prezentacja możliwości analitycznych, jakie daje zastosowanie traseologii do badań nad prehistorycznymi i historycznymi przemysłami kościanymi oraz prezentacja najciekawszych (w naszym

DOI: 10.64158/25trqo3mrl

odczuciu) w tym zakresie badań, które przeprowadzono w Polsce.

ZARYS HISTORII BADAŃ

Studia traseologiczne zabytkowych wytworów z kości i poroża są prowadzone od kilkudziesięciu lat i koncentrują się zasadniczo w obrębie dwóch głównych nurtów badawczych. Pierwszy to analizy technologiczne, mające na celu rekonstrukcję procesu produkcji wytworów kościanych. W drugim podejmowany jest problem funkcji tych artefaktów. Literatura dokumentująca dotychczasowe badania w omawianych zakresie jest niezwykle bogata i została podsumowana w wielu monografiach oraz artykułach (m.in. LeMoine 1997; Legrand 2007; Stemp i in., 2015). Z tego względu poniżej przytoczymy jedynie najważniejsze prace opublikowane poza granicami naszego kraju, koncentrując się na badaniach polskich, które w literaturze międzynarodowej nie były szczegółowo omawiane.

Jednej z pierwszych prób charakterystyki śladów technologicznych widocznych na prehistorycznych wytworach kościanych podjęli się Graham Clark i Michael W. Thompson w 1954 roku. W rezultacie studiów nad materiałami z unikatowego mezolitycznego stanowiska Star Carr w Wielkiej Brytanii wyróżnili oni tzw. *groove and splinter technique* (technika rycia i odłamywania – ryc. 1). Okazała się być ona jedną z najczęściej stosowanych metod produkcji półsurowca do wyrobu wielu rodzajów przedmiotów kościanych i funkcjonuje w literaturze do dziś (David 2004; Elliott i in., 2018).

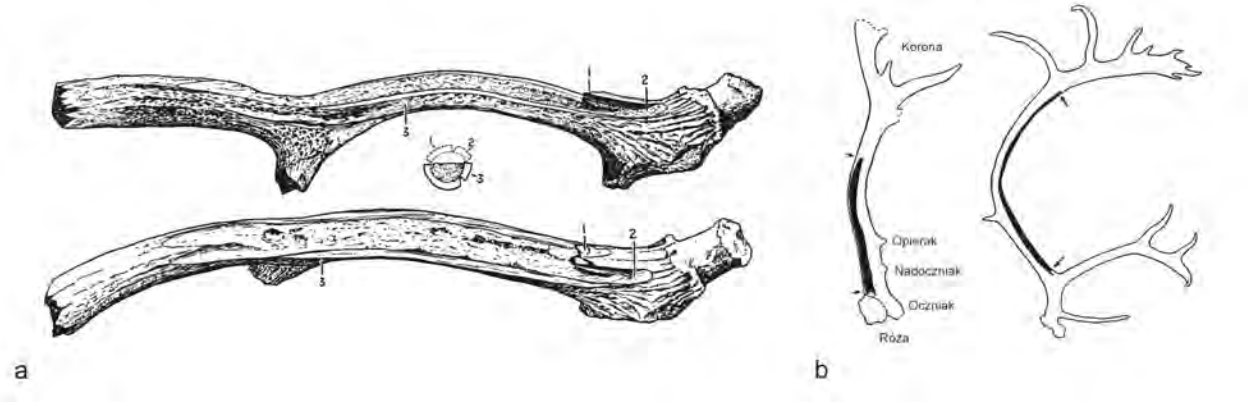
Mniej więcej w tym samym czasie do badań nad wytworami z kości i poroża zaczęto stosować traseologię. Podwaliny tej metody zostały stworzone na wschodzie Europy przez Siergieja A. Semenova. W swojej książce zatytułowanej „Piervobytnaja technika", dotyczącej głównie traseologii wytworów krzemiennych, badacz ten poświęcił sporo miejsca również analizie mikroskopowej artefaktów kościanych (Semenov 1957: 175–227). W 1964 roku ukazało się tłumaczenie pracy Semenova na język angielski. Publikacja ta stała się inspiracją dla prowadzenia tego typu badań również na Zachodzie.

W pierwszych projektach badawczych poświęconych traseologii wytworów kościanych skupiano się przede wszystkim na doskonaleniu metody i budowaniu odpowiedniego warsztatu badawczego (np. Stordeur-Yedid 1974; Newcomer 1974, 1977; Olsen 1984; d'Errico i Giacobini 1985, 1986; Peltier 1986; Peltier i Plisson 1986; Campana 1989; LeMoine 1989; Sidéra 1989). Te pionierskie prace stworzyły podwaliny dla dalszych bardziej szczegółowych i wszechstronnych studiów w omawianym zakresie (m.in. Sidéra 1993; d'Errico 1993; Choyke 1997; Maigrot 1997; Christidou 1999; Griffitts i Bonsall 2001; Russell 2001a, 2001b; Olsen 2007; Legrand 2008; Legrand i Radi 2008).

Prowadzone badania podsumowywano na wielu konferencjach i panelach dyskusyjnych. Warto w tym miejscu wspomnieć o cyklicznych spotkaniach we Francji zainicjowanych przez Henriette Camps-Fabrer. Część z nich poświęcono badaniom mikroskopowym (technologicznym) zabytkowych wytworów kościanych. Rezultatem tych dyskusji była publikacja kilku monografii (m.in. Camps-Fabrer 1976, red. 1977, red. 1979, red. 1988a, red. 1988b).

Obecnie większość specjalistów zajmujących się badaniami traseologicznymi prehistorycznych i historycznych wytworów kościanych współpracuje w ramach dwóch międzynarodowych grup roboczych. Pierwsza – Worked Bone Research Group (WBRG) – powstała w 1997 roku, a od roku 2000 stanowi oficjalną grupę roboczą International Council for Archaeozoology (ICAZ). Jej spotkania zaowocowały wieloma monografiami, których wagi dla badań nad dawnymi przemysłami kościanymi nie można nie doceniać (m.in. Choyke i Bartosiewicz red. 2001; Riddler red. 2003; Luik i in., red. 2005; Legrand-Pineau i in., red. 2010; Baron i Kufel-Diakowska red. 2001; Choyke i O'Connor red. 2013; Lang red. 2013; Ma i Hou red. 2014; Choyke i in., red. 2016; Vitezović red. 2016; Bejenaru red. 2018; Altamirano i Alarcón red. 2019; Wild i in., red. 2021; Bradfield red. 2023). Druga grupa badawcza to Groupement De Recherche Européen – Exploitation des Matieres Osseuses dans l'Europe Prehistorique (GDRE Prehistos). Została ona stworzona w roku 2007 przez badaczy początkowo zrzeszonych w ramach The French National Centre for Scientific Research (CNRS). Obecnie w jej skład wchodzi blisko pięćdziesięciu członków z dziewięciu krajów Europy Zachodniej, Środkowej i Wschodniej (Francja, Belgia, Włochy, Hiszpania, Węgry, Bułgaria, Rumunia, Polska i Rosja). Jest ona powiązana z szesnastoma laboratoriami partnerskimi z dwudziestu jeden różnych instytucji naukowych. Badacze tej grupy pracują nad stworzeniem wielojęzycznego słownika terminów „kościanych", który ma umożliwić ujednolicenie stosowanej terminologii, swobodną komunikację i wymianę poglądów pomiędzy specjalistami różnych narodowości (Averbouh red. 2016).

W Polsce badania traseologiczne wytworów z surowców kostnych rozpoczęto relatywnie późno. Najwcześniejsze prace podejmujące tę problematykę pochodzą z lat 90. XX wieku (Bagniewski 1992;



Ryc. 1. Ilustracje ukazujące groove and splinter technique opisaną przez Clarka i Thompsona w 1954 roku: a – poroże jelenia ze Star Carr z co najmniej dwoma fragmentami poroża pozyskanymi za pomocą techniki groove and splinter (za Clark i Thompson 1954, 149, fig. 1); b – poroże jelenia (po lewej) i renifera (po prawej) przedstawiające fragmenty poroża z których najczęściej były pozyskiwane długie fragmenty surowca (za Clark i Thompson 1954, 151, fig. 3)

Lasota-Moskalewska 1993). Ważna dla rozwoju tej dziedziny studiów archeologicznych była publikacja w 1999 roku tłumaczenia książki prof. Galiny F. Korobkowej. W tym podręczniku metody traseologicznej, obok charakterystyki zniszczeń użytkowych typowych dla wytworów kamiennych, przedstawiono także wybrane ślady tego rodzaju powstające na narzędziach kościanych (Korobkowa 1999). W 2005 roku ukazała się książka Grzegorza Osipowicza podejmująca problematykę metod rozmiękczania kości i poroża w epoce kamienia.

Napisano także kilka doktoratów, w których w badaniach nad sposobami wykonywania i używania wytworów z surowców kostnych wykorzystano możliwości, oferowane przez traseologię. W roku 2010 ukazała się dysertacja doktorska Magdaleny Krajcarz poświęcona badaniom nad sposobami obróbki surowców kostnych w paleolicie na podstawie wybranych zespołów z Jury Polskiej (Krajcarz 2010). W roku 2019 Justyna Orłowska obroniła dysertację doktorską poświęconą obróbce i użytkowaniu surowców kostnych przez ludy łowiecko-zbierackie w późnym glacjale i wczesnym holocenie na Niżu Polskim (Orłowska 2019). Z kolei w 2021 roku Kinga Winnicka obroniła pracę doktorską na podstawie dysertacji poświęconej przedmiotom osobistym wykonanym z kości, datowanym na wczesny okres epoki brązu (Winnicka 2021). W 2023 roku Monika Stelmasiak-Majorek obroniła pracę poświęconą funkcji przedmiotów z kości i poroża w typie kolców, igieł, stilusów w świetle badań traseologicznych oraz eksperymentalnych z grodów centralnych wczesnośredniowiecznej Wielkopolski (Stelmasiak-Majorek 2023).

Obecnie na terenie naszego kraju analizom traseologicznym poddaje się artefakty kościane o bardzo różnej chronologii. W przypadku kolekcji paleolitycznych badaniami tego rodzaju objęto materiały ze stanowisk w Wilczycach (Winiarska-Kabacińska 2014a, b), Orońsku (Osipowicz i in. 2019c), Kruczej Skale (Orłowska i Osipowicz 2022a) oraz Biśniku (Orłowska i in. 2022a). Na mezolit datowane są analizowane traseologicznie przedmioty kościane pochodzące ze stanowisk w Krzyżu Wielkopolskim 7 (Kabaciński i in. 2008, 2023), Pobielu 10 (Diakowski i Płonka 2010; Diakowski 2011), Dąbkach 9 (David 2015) oraz Dudce 1 (Pratsch 2006). Studiowane w ten sposób są również wytwory neolityczne pochodzące z takich stanowisk, jak m.in.: Piecki i Bachory (Winiarska-Kabacińska i Makowiecki 2004), Koszyce 3 (Frankiewicz 2013), Bodzia 1 (Kabaciński i in. 2014), Kowal 14 (Osipowicz i in. 2014), Kopydłowo 6 (Lisowski i in. 2015), Trzciano 40 (Osipowicz i in. 2015) oraz Osłonki 2 (Osipowicz i in. 2018). Badaniami traseologicznymi objęto również wytwory kościane pochodzące ze stanowisk datowanych na przełom epok brązu i żelaza (Winnicka 2016, 2017, 2019, 2020; Baron i Diakowski 2018; Baron i in. 2016, 2022).

Równolegle coraz częściej wykonywane są w naszym kraju analizy traseologiczne materiałów odnajdywanych bez szerszego kontekstu archeologicznego, czyli tzw. znalezisk luźnych (m.in. Sulgostowska i Hoffmann 1993; Goslar i in. 2006; Kufel i Diakowski 2008; Sulgostowska 2012; Osipowicz 2016; Osipowicz i in. 2019b, 2020c; Orłowska i Osipowicz 2019, 2021). Prowadzone są również eksperymentalne badania

metodologiczne zmierzające do głębszej charakterystyki różnego rodzaju śladów technologicznych i użytkowych (Orłowska 2015; Orłowska 2016; Orłowska 2018; Orłowska i in. 2022b). Od niedawna Polscy badacze prowadzą również szeroko zakrojone studia traseologiczne (technologiczne i funkcjonalne) poza granicami naszego kraju, m.in. nad kolekcjami wytworów kościanych pochodzących z tak unikatowych prehistorycznych stanowisk europejskich, jak Šventoji (Osipowicz i in. 2019a, d, 2020a, b, d, e) i Kaltanėnai (Piličiauskas i in. 2020) na Litwie, czy też Zvejnieki na Łotwie (Osipowicz i in. 2022a).

PROCEDURA BADAWCZA

Analiza archeozoologiczna

Wstępnym etapem analizy traseologicznej każdego zbioru wytworów kościanych jest oddzielenie przedmiotów, które noszą ślady intencjonalnych modyfikacji i użytkowania przez człowieka, od materiału czysto faunistycznego. Proces ten odbywa się z reguły przy współpracy z zooarcheologami, których opinie mogą mieć kluczowe znaczenie dla dalszego przebiegu badań traseologicznych. Obejmują one bowiem nie tylko ekspertyzę w zakresie typu surowca użytego do wykonania danego artefaktu, ale stanowią również niezwykle istotny element procesu interpretacji zniszczeń technologicznych czy użytkowych w sytuacji, gdy są one w znacznym stopniu zmienione podepozycyjnie, niecharakterystyczne lub stanowią *novum* (Osipowicz i in. 2020a). W pewnych wypadkach sugestie zooarcheologów mogą wręcz stanowić impuls do przeprowadzenia precyzyjnych analiz interdyscyplinarnych danego przedmiotu, jak to miało miejsce w przypadku mezolitycznej *bâton percé* z Gołębiewa, w województwie kujawsko-pomorskim (Osipowicz i in. 2017).

Analiza tafonomiczna

Od momentu depozycji do aktu wydobycia włącznie artefakty kościane podlegają rozmaitym procesom, które prowadzą do ich (szeroko rozumianego) uszkadzania, a nawet mogą spowodować ich całkowity rozkład (Fernandez-Jalvo i Andrews 2016). Rozumienie zmian zachodzących na powierzchni kości i w jej wnętrzu w rezultacie procesów depozycyjnych, podepozycyjnych, a także tych związanych z ich wydobyciem z kontekstu archeologicznego, dokumentacją, konserwacją i przechowywaniem jest kluczowe dla poprawnego prowadzenia analiz traseologicznych i wiarygodnej interpretacji rejestrowanych śladów użytkowych (por. Lyman 1994; Fisher 1995; Fernandez-Jalvo i Andrews 2016).

Dzięki wieloletnim badaniom nad problematyką czynników tafonomicznych i ich udziału w procesie degradacji surowca kostnego zniszczenia tego rodzaju zostały już dość dobrze opisane. Pozwala to na ich stosunkowo pewną identyfikację podczas analizy materiału zabytkowego (por. Olsen 1989; Lyman 1994; Fisher 1995; Fernandez-Jalvo i Andrews 2016), szczególnie jeżeli mamy do czynienia z przekształceniami wynikającymi z wpływu sedymentu, w którym zalegały artefakty (Senyane i in. 2023), deptania (tzw. *tramplingu*) przez zwierzęta oraz ludzi (m.in. Olsen i Shipman 1988) bądź innych zmian spowodowanych przez rośliny i zwierzęta (m.in. Blumenschine i in. 1996; Jin i Shipman 2010; Olsen 1989). Pewien problem stanowi jednak wciąż wpływ tego typu czynników na stan zachowania śladów technologicznych i użytkowych na przedmiotach kościanych (Vercoutère i in. 2007). Kwestia ta, również w naszym kraju, stała się przedmiotem badań eksperymentalnych oraz traseologicznych (Orłowska 2018).

Zmiany współczesne widoczne na artefaktach kościanych, które należy brać pod uwagę w trakcie badań mikroskopowych, to nie tylko uszkodzenia powstałe podczas ich wydobywania z kontekstów archeologicznych. To również zniszczenia będące rezultatem procesu ich konserwacji, inwentaryzacji czy przechowywania. Doskonałym przykładem wpływu tego typu czynników na charakterystykę artefaktów przekazywanych traseologom jest sztylet z Ulbi w Estonii (Bjørnevad i in., 2019). W przywołanym artykule udokumentowano kilkanaście istotnych zmian w wyglądzie tego przedmiotu, które nastąpiły na przestrzeni 84 lat jego przechowywania w Muzeum (głównie w rezultacie kolejnych procesów konserwacji). Widoczne są one przede wszystkim w modyfikacjach położenia i liczby wkładek krzemiennych umieszczonych w pazach wykonanych w narzędziu, połamaniu i błędnym sklejeniu części kościanej sztyletu oraz postępującym złuszczeniu jego powierzchni (Bjørnevad i in. 2019). „Modyfikacje" tego typu mają kluczowe znaczenie dla możliwości badań traseologicznych i muszą być brane pod uwagę przed każdą analizą mikroskopową artefaktu archiwalnego.

Ogromny problem dla badań traseologicznych, a szczególnie analizy wyświeceń użytkowych widocznych na przedmiotach kościanych stanowią również substancje używane do ich konserwacji. Z reguły

uniemożliwiają one kompletnie prowadzenie analizy funkcjonalnej (Osipowicz i in. 2019b).

Eksperymenty archeologiczne

W nowoczesnych badaniach nad obróbką i użytkowaniem przedmiotów z kości i poroża archeologia doświadczalna jest postrzegana jako jedna z najistotniejszych metod badawczych. Niestety w Polsce metoda ta jest nadal niedoceniana i często mylnie utożsamiana z rekonstrukcją historyczną, nie zaś z pełnowartościowymi badaniami naukowymi (Osipowicz 2010, 21).

Badania eksperymentalne są nieodłącznym elementem każdych studiów traseologicznych. Są one bowiem jedynym sposobem na stworzenie bazy wzorców doświadczalnych śladów technologicznych oraz użytkowych, które są wykorzystywane jako materiał porównawczy podczas analiz artefaktów (Marreiros i in. 2020). Samodzielne eksperymentowanie z produkcją i użytkowaniem różnego typu przedmiotów kościanych dostarcza również prowadzącym je traseologom wiedzy praktycznej, niezbędnej do poprawnej interpretacji sposobu wykonania i wykorzystywania przedmiotów zabytkowych.

Badania eksperymentalne podporządkowane studiom technologicznym w traseologii mają dwa podstawowe cele. Pierwszy to replikacja śladów produkcyjnych zaobserwowanych na przedmiotach zabytkowych w celu interpretacji narzędzi, których użyto, i czynności, które wykonano na poszczególnych etapach ich produkcji (ryc. 2). Drugi cel (bardziej generalny) to rekonstrukcja łańcucha operacji stosowanych w procesie wytwarzania przedmiotów kościanych danego rodzaju (szerzej na ten temat poniżej).

Podobnie skonstruowane są studia eksperymentalne podporządkowane analizom funkcjonalnym. Doświadczenia tego rodzaju polegają na wykorzystywaniu replik analizowanych narzędzi zabytkowych do obróbki różnego rodzaju surowców, w celu wytworzenia śladów użytkowych o cechach analogicznych do widocznych na artefaktach. Badania tego typu są niezwykle trudne, gdyż praca narzędziami kościanymi w nawet tak pozornie jednolitym surowcu, jakim jest skóra, może generować bardzo odmienne zniszczenia użytkowe, jeżeli np. stopień twardości obrabianego surowca jest różny lub charakterystyka wykonywanych czynności nie jest w pełni tożsama (np. Osipowicz 2020).

Szczególny wpływ na zmiany w cechach śladów użytkowych widocznych na narzędziach kościanych używanych do obróbki surowców organicznych mają różne rodzaje technik wspomagających tę obróbkę, jak np. rozmiękczanie w przypadku kości i poroża (Osipowicz 2005), ługowanie i ochrowanie podczas prac w skórze (Osipowicz i in. 2019a) czy wypalanie w przypadku drewna (Orłowska i Osipowicz 2017). Badania doświadczalne podporządkowane aspektom funkcjonalnym studiów trasologicznych muszą więc uwzględniać również wieloaspektowe działania w tym zakresie.

Ważnym, jednak rozpisanym na lata, typem doświadczeń archeologicznych powiązanych z badaniami traseologicznymi są prace mające na celu rekonstrukcję procesów podepozycyjnych, jakim podlegały artefakty kościane. Dotychczasowe eksperymenty tego rodzaju pozwoliły na scharakteryzowanie wielu typów modyfikacji tafonomicznych, o czym szerzej pisaliśmy powyżej.

Studia technologiczne

Jak zaznaczono powyżej, podstawowym celem badań technologicznych nad wytwórczością kościaną dawnych społeczności jest analiza i interpretacja śladów produkcyjnych rejestrowanych na artefaktach. Te pozornie proste studia w ostatecznym rozrachunku dostarczają informacji nie tylko na temat sposobu wykonania danych przedmiotów, ale również są podstawą do oceny zamysłów technologicznych ich wytwórców i wyróżniania rozmaitych trendów w tym zakresie (np. David 2004; Osipowicz i in. 2022a).

Badania technologiczne wytworów kościanych można podzielić ze względu na rodzaj sprzętu używanego w trakcie analiz, a przede wszystkim wielkość stosowanych powiększeń. Najprostsze analizy są oparte o obserwacje makroskopową lub ewentualnie niewielkie powiększenia, jakie oferuje lupa. Studia tego rodzaju koncentrują się z reguły na problematyce debitażu surowca kostnego i generalnej charakterystyce śladów technologicznych (np. David 2004; Averbouh 2000; Treuillot 2016).

Rozwinięciem tego typu badań są analizy prowadzone z zastosowaniem mikroskopów stereoskopowych z zewnętrznym źródłem światła oraz powiększeń do około ×80. Pozwalają one na dużo bardziej precyzyjną analizę i interpretacje śladów technologicznych i co za tym idzie, wysuwanie sugestii odnośnie do zastosowanych technik produkcyjnych, użytych narzędzi, kolejności wykonywania poszczególnych zabiegów technologicznych, sposobów naprawy wytworów kościanych czy też prawo- lub leworęczności ich wytwórców (np. Osipowicz 2016; Płonka i Kowalski 2017;



Ryc. 2. Replikacja śladów technologicznych wraz z przykładem śladu zaobserwowanego na materiale zabytkowym: a – skrobanie narzędziem krzemiennym poroża, b – eksperymentalne ślady skrobania wiórem krzemiennym, c – ślady skrobania zaobserwowane na materiale zabytkowym; d – piłowanie narzędziem krzemiennym poroża, e – eksperymentalne ślady piłowania wiórem naturalnym, poroże rozmiękczone w wodzie, piłowanie dookolne; f – ślady piłowania zaobserwowane na materiale zabytkowym; g – dookolne rąbanie poroża krzemiennym ciosakiem, h – eksperymentalne ślady rąbania rozmiękczonego poroża przy użyciu krzemiennych ciosaków, i – ślady rąbania zaobserwowane na materiale zabytkowym

Osipowicz i in. 2019b, 2020d, e; Orłowska i Osipowicz 2022a; Baron i in. 2022; Orłowska i in. 2022a).

W ostatnich latach w badaniach technologicznych coraz częściej wykorzystywane są również urządzenia dużo bardziej precyzyjne i operujące większymi powiększeniami, jak np. mikroskopy metalograficzne oraz cyfrowe. Dzięki swojej konstrukcji i wykorzystaniu powiększeń dochodzących do ×500 pozwalają na analizę wyświeceń technologicznych, co ma kluczowe znaczenie np. dla badań metod szlifowania oraz polerowania wytworów kościanych (Orłowska i in. 2022b). Umożliwiło także m.in. rejestrację różnic w charakterystyce śladów powstających na kości w rezultacie zastosowania narzędzi krzemiennych oraz metalowych (Osipowicz i in. 2018; Osipowicz i in. 2020d).

Innym urządzeniem z powodzeniem wykorzystywanym w studiach technologicznych artefaktów z surowców kostnych jest skaningowy mikroskop elektronowy (SEM, z ang. *scanning electron microscope*). Ze względu na wyjątkową ostrość rejestrowanego obrazu oraz brak refleksów spowodowanych przez oświetlenie sprzęt ten jest niezwykle przydatny do analizy topografii powierzchni oraz precyzyjnej charakterystyki cech szczegółowych niektórych rodzajów śladów, jak np. nacięć (LeMoine 1997; Orłowska 2016; Osipowicz i in. 2020d). Minusem SEM jest brak możliwości analizy dużych przedmiotów (ze względu na ograniczone rozmiary komory próżniowej). Często wymusza to zastosowanie wycisków silikonowych badanych fragmentów artefaktów, które z wielu względów mają ograniczoną użyteczność interpretacyjną. Problem stanowi również charakterystyka techniczna urządzeń tego typu, ograniczająca w zasadzie precyzyjne badania przy małych powiększeniach. Komplikuje to analizę kontekstualną większych obszarów powierzchni wytworów zabytkowych, a co za tym idzie, kompleksów śladów technologicznych, układów między nimi itp.

Pomocna w trakcie badań technologicznych artefaktów kościanych jest również koherencyjna tomografia optyczna z zastosowaniem interferometrii światła częściowo spójnego (ang. *optical coherence tomography* – OCT). Jest to nieinwazyjna, nieniszcząca i bezdotykowa metoda badania struktury obiektów składających się z przejrzystych lub półprzejrzystych warstw, pozwalająca otrzymać obrazy ich przekrojów stratygraficznych (Targowski i Iwanicka 2012). Metoda ta znajduje zastosowanie przy analizie przekrojów poprzecznych nacięć i ornamentów rytych (np. Osipowicz i in. 2020c, d).

Studia technologiczne w traseologii to mozolna analiza śladów produkcyjnych i ciągłe eksperymentowanie w celu interpretacji narzędzi i czynności, które mogły wygenerować obserwowane na artefaktach zniszczenia. W przypadku, kiedy dysponujemy kolekcją gotowych przedmiotów, półwytworów na różnych etapach produkcji oraz odpadów produkcyjnych lub gdy analizowany przez nas wytwór kościany nosi ślady technologiczne dokumentujące najważniejsze etapy swojego wykonania, możliwe jest podjęcie próby rekonstrukcji całego procesu technologicznego (tzw. łańcucha operacji), towarzyszącego produkcji danego rodzaju artefaktów (więcej na ten temat w części poświęconej rekonstrukcji biografii artefaktów kościanych).

Analiza funkcjonalna

Celem studiów tego typu jest interpretacja funkcji dawnych narzędzi kościanych. Podobnie jak w przypadku wytworów kamiennych, podstawą do wnioskowania w tym zakresie jest precyzyjna analiza cech zniszczeń użytkowych wytworzonych na tych przedmiotach w rezultacie stosowania ich w pracy. Analizie poddawane są trzy główne grupy śladów: 1) złamania, wyłamania i wykruszenia, 2) zagładzenia, zmatowienia i wyświecenia oraz 3) zadrapania, nacięcia i ślady liniowe (m.in. Olsen 1984; d'Errico 1993; Korobkowa 1999; Legrand 2007; Evora 2015). Każdy z wymienionych typów zniszczeń dostarcza informacji jedynie o pewnym aspekcie sposobu użytkowania danego przedmiotu. Przykładowo ślady liniowe są wskaźnikiem kierunku wykonywanej pracy oraz tekstury obrabianego materiału (d'Errico 1993; Legrand 2007). Charakterystyka wyświecenia informuje zarówno o jego typie / względnej twardości, jak i długości użytkowania danego narzędzia (Legrand 2007; Legrand i Sidera 2007). Jedynie kompleksowa analiza wszystkich rodzajów śladów może być podstawą do wysuwania sugestii prawdopodobnej funkcji dawnego narzędzia kościanego.

W analizach funkcjonalnych przedmiotów z surowców kostnych wykorzystuje się z reguły terminologię wywodzącą się z traseologii wytworów kamiennych (Korobkowa 1999; van Gijn 1989: 19; Juel Jensen 1994: 25; Osipowicz 2010). Struktura powierzchni kości i poroża znacznie jednak odbiega od obserwowanej w przypadku krzemieni, m. in. ze względu na obecność takich elementów „konstrukcyjnych", jak osteony i kanały Haversa (np. MacGregor 1985, 1–9; Krysiak i in. 2011: 29–36). Z tego powodu niektórzy badacze zaproponowali odmienne systemy terminologiczne, bazujące na specyfice surowca kostnego, w których duży nacisk położono na mikrotopografię powierzchni i charakterystykę poszczególnych jej elementów (np. Legrand 2007: 32–33; Buc 2011). Obecnie nie istnieje jeden, ogólnie preferowany system opisu śladów użytkowych obserwowanych na narzędziach kościanych. Taka klasyfikacja jest wciąż budowana na drodze kolejnych analiz traseologicznych oraz prac eksperymentalnych (Korobkowa 1999; Legrand 2007; Buc 2011; Bradfield 2015; Orłowska i in. 2022a, b).

Procedura analizy funkcjonalnej narzędzi z surowców kostnych jest bardzo zbliżona do opisanej powyżej w przypadku badań technologicznych. Analizy przy użyciu małych powiększeń są prowadzone w kierunku charakterystyki krawędzi pracującej oraz opisu makrośladów, takich jak: wyłamania oraz retusze (Korobkowa 1999; Évora 2015). Powiększenia w zakresie 10–150× są uznawane za wystarczające do ogólnego opisu śladów użytkowych, z uwzględnieniem takich ich cech, jak: dystrybucja, zasięg czy ogólna morfologia (Semenov 1964; Legrand i Sidéra 2007; Évora 2015). Szczegółową analizę wyświeceń użytkowych przeprowadza się z reguły przy użyciu mikroskopów metalograficznych i powiększeń dochodzących do 500×. Dzięki zastosowaniu stałego źródła światła padającego na analizowany przedmiot pod kątem prostym mikroskopy tego typu umożliwiają precyzyjne badania struktury (topografii i tekstury) powierzchni wyświeconych (np. Legrand 2007; Legrand i Sidéra 2007). Analizy o tym profilu są niezbędne dla interpretacji typu surowca obrabianego przy użyciu narzędzi kościanych.

W badaniach nad funkcją dawnych narzędzi z surowców kostnych czasem wykorzystuje się również SEM. Ma on jednak ograniczoną przydatność w studiach tego rodzaju ze względu na fakt, że jego specyfika uniemożliwia analizę niektórych istotnych cech wyświeceń użytkowych, takich jak np. połyskliwość. Powierzchnie wyświecone obserwowane przy użyciu SEM są matowe, co powoduje, że rozróżnienie ich poszczególnych typów jest bardzo trudne lub nawet

niemożliwe (Shipman i Rose 1988; Runnings i in. 1989). W niektórych przypadkach problemem może być nawet odróżnienie powierzchni wyświeconej od innej naturalnie gładkiej, nienoszącej zniszczeń tego rodzaju.

Od jakiegoś czasu podejmowane są próby kwantyfikacji analizowanych śladów użytkowych (np. zmian w teksturze powierzchni wyświeconych) w celu uwiarygodnienia statystycznego czynionych obserwacji (m.in. Lesnik 2011; Watson i Gleason 2016). Badaniom tego rodzaju poddawane są zarówno narzędzia eksperymentalne, jak i artefakty. Stosuje się w nich zarówno mikroskopię skaningową, jak i mikroskopię konfokalną (ang. *scanning laser confocal microscopes*) czy też technikę interferometrii z odpowiednim oprogramowaniem do analizy powierzchni (González-Urquijo i Ibáñez-Estévez 2003; Ungar 2004). Ta ostatnia jest z sukcesem wykorzystywana do rozróżniania zniszczeń powstałych na narzędziach kościanych w rezultacie pracy i działania czynników naturalnych (m.in. d'Errico i Backwell 2003).

Rezydua

Ogromne znaczenie dla badań traseologicznych artefaktów kościanych mają studia nad tzw. rezyduami (ang. *residues*), a więc pozostałościami różnego rodzaju materiałów organicznych i nieorganicznych, które zachowały się na ich powierzchniach (Wadley i Lombard 2007; Högberg i in. 2009). U podstawy tego rodzaju analiz stoi założenie, że w rezultacie kontaktu dwóch przedmiotów fragmenty każdego z nich są przenoszone na drugi wytwór (Loy i in. 1992). W praktyce oznacza to, że w wyniku obróbki dowolnego rodzaju surowca przy użyciu narzędzia kościanego powstają na tym narzędziu nie tylko ślady użytkowe, ale również „deponowane" są pozostałości obrabianego materiału. Badania nad nimi stanowią doskonałe uzupełnienie analiz traseologicznych i w wielu przypadkach bardzo dobry sposób na weryfikację ich wyników.

Do najczęściej odkrywanych rezyduów organicznych należą mikroskamieniałości (fitolity, pyłki roślin, ziarna skrobi), krew, tłuszcz, włosy, włókna roślinne (np. celuloza) oraz zwierzęce (kolagen i sierść), a także różnego rodzaju pozostałości amorficzne (Loy 1993; Fullagar i Matheson 2014). Substancje te mogą przetrwać na powierzchni dawnych narzędzi przez bardzo długi czas. Pośród rezyduów nieorganicznych wymienić należy m.in. resztki dawnych barwników (np. ochry – cf. Osipowicz i in. 2019c, Trąbska, w tym tomie) czy też mikrocząsteczki metalu pochodzące z narzędzi wykorzystanych do wykonania danego przedmiotu kościanego (np. Osipowicz i in. 2018).

Badania rezyduów to proces wielofazowy, w którym wykorzystuje się mikroskopy różnych typów, a także wiele zaawansowanych technik fizykochemicznych, jak np. skaningowy mikroskop elektronowy z dyspersyjną spektroskopią rentgenowską (ang. *scanning electron microscopy with energy dispersive X-ray spectroscopy*, SEM-EDX), spektroskopię w podczerwieni z transformacją Fouriera (ang. *Fourier transform infrared spectroscopy,* FTIR), spektroskopię ramanowską (ang. *Raman spectroscopy,* IR), chromatografię gazową spektroskopii masowej (ang. *gas chromatography-mass spectrometry*, GC-MS) czy też chromatografii cieczową spektroskopii masowej (ang. *liquid chromatography-mass spectrometry,* LC-MS) (Fullagar i Matheson 2014). Więcej na ten temat w rozdziałach tej książki.

Biografia wytworów kościanych

Wszystkie opisane powyżej typy analiz zmierzają do jednego celu, którym jest odtwarzanie „biografii" badanych przedmiotów kościanych. W proponowanym ujęciu termin ten obejmuje nie tylko całokształt działań podejmowanych przez człowieka od pojawienia się zamysłu wykonania danego przedmiotu kościanego do momentu jego porzucenia, ale również wszystkie procesy, które miały na niego wpływ po depozycji, oraz te, które oddziaływały na jego stan po wydobyciu (działalność archeologów, konserwatorów czy muzealników).

Badania traseologiczne są niezwykle istotnym elementem studiów nad biografią artefaktów kościanych. Stanowią bowiem jedną z kluczowych metod wykorzystywanych do odtwarzania tzw. łańcucha operacji (fr. c*haîne operatoire*; m.in. Tixier i in. 1980: 92), określanego też czasami mianem schematu techno-ekonomicznego (Averbouch 2001), a więc wszelkich działań podejmowanych wobec / z użyciem artefaktu za jego „życia". Studia w tym zakresie są szczególnie istotne w przypadku wytworów prehistorycznych, które (przyjmując synkretyczny obraz kultury ludności tego okresu, szczególnie w jego najstarszych etapach) zawierają informacje nie tylko ze sfery utylitarnej, tj. technologiczno-funkcjonalne, ale również niosą dane o znaczeniu społecznym, światopoglądowym oraz komunikacyjnym (Płonka 2003, 2012; Olsen 2010).

PRZYKŁADY Z BADAŃ

Badania technologiczne

Dobrym przykładem studiów technologicznych nad artefaktami kościanymi są opublikowane niedawno rezultaty badań nad prehistorycznymi technikami szlifowania wyrobów tego rodzaju (Orłowska i in. 2022b). Szlifowanie jest jedną z najstarszych metod obróbki materiałów kostnych i jest identyfikowane m.in. na materiałach pochodzących z dolnego paleolitu (Backwell i d'Errico 2003). Cechą charakterystyczną śladów użytkowych powstających w rezultacie tego procesu jest obecność rys, których budowa i układ wskazują na kierunek pracy i rodzaj zastosowanej techniki. Wynikiem dotychczasowych badań w tym zakresie jest hipoteza, że prehistoryczne wytwory kościane szlifowano głównie przy użyciu różnego typu płyt kamiennych, których morfologia, a przede wszystkim uziarnienie, miały istotny wpływ na charakterystykę zniszczeń powstających na obrabianych powierzchniach (np. Christidou 1999; Legrand 2007: 25; ryc. 11). Uważa się również dla zwiększenia efektywności szlifowania proces ten często wspomagano dodawaniem piasku lub wody, co także wpływało na cechy śladów użytkowych wytwarzanych na kości (m. in. Christidou 1999).

Sugestie te nie zostały jednak jak do tej pory w wystarczający sposób zweryfikowane. Nie wykonywano bowiem szczegółowych analiz mikroskopowych pozostałości szlifowania czytelnych na artefaktach. Nie stworzono także bazy śladów eksperymentalnych pozwalającej na rozróżnienie poszczególnych technik szlifowania. Luka ta stała się impulsem do przeprowadzenia studiów eksperymentalno-traseologicznych, których głównym celem była precyzyjna, wieloaspektowa analiza oraz klasyfikacja zniszczeń użytkowych powstających w rezultacie obróbki przedmiotów kościanych omawianą metodą.

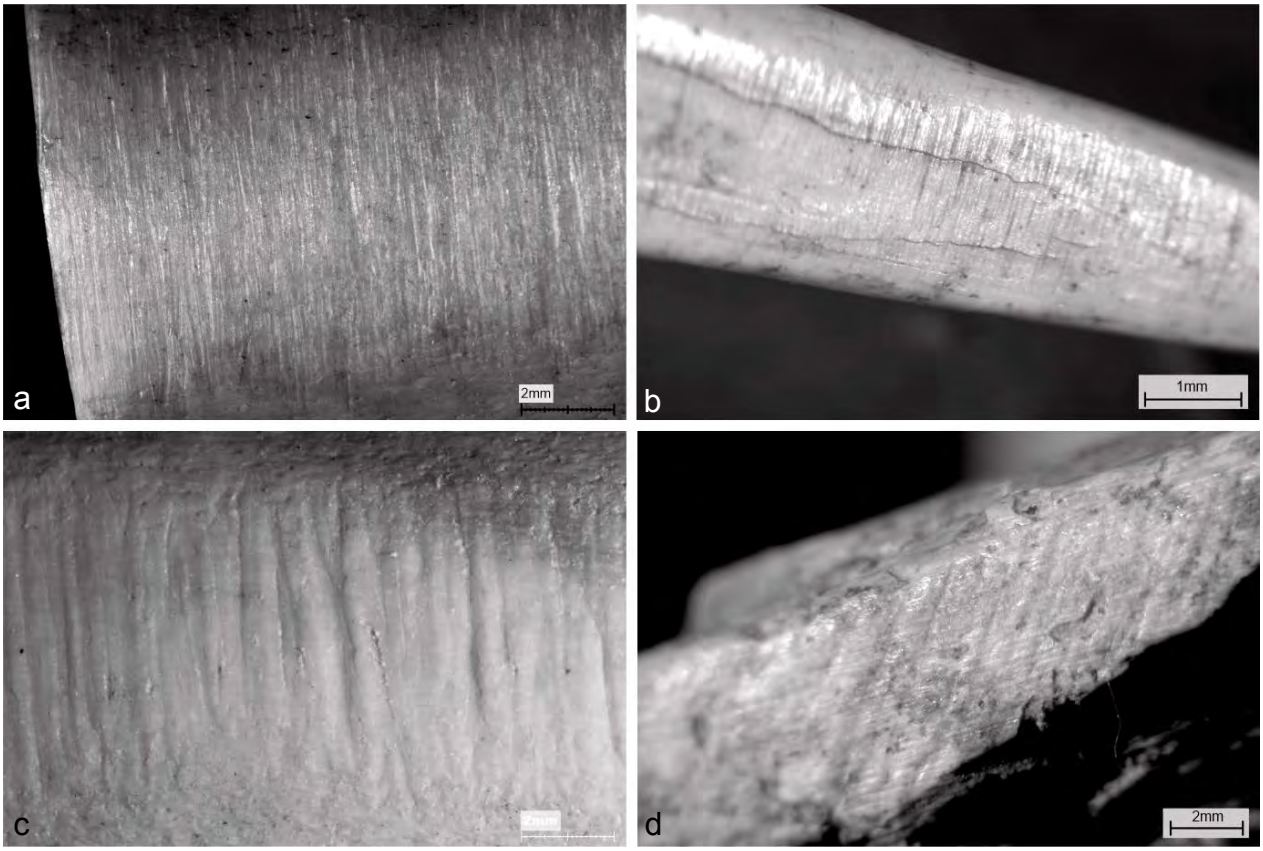
Program doświadczalny, który zaplanowano i zrealizowano na potrzeby tych studiów, obejmował szlifowanie matryc kościanych (nierozmiękczonych i rozmiękczonych) na płytach wykonanych z różnych surowców kamiennych, bez i z zastosowaniem procesów / substancji wspomagających, tj. podsypki piasku oraz wody (ryc. 3). W rezultacie analiz traseologicznych przeprowadzonych po tych eksperymentach stwierdzono, że nie jest możliwa jednoznaczna identyfikacja gatunku surowca skalnego, z którego wykonano płytę użytą do szlifowania danego artefaktu, choć w pewnym zakresie można powiązać morfologię rys obserwowanych na wytworach kościanych z kształtem oraz wielkością kryształów (uziarnieniem) płyty szlifierskiej. Jednocześnie zasugerowano, że możliwe jest (choć oczywiście nie we wszystkich przypadkach) potwierdzenie faktu zastosowania podsypki piasku oraz dodatku wody w procesie szlifowania, a także identyfikacja kości rozmiękczonych przed szlifowaniem (choć na tym etapie badań sugestia ta odnosi się przede wszystkim do materiałów eksperymentalnych).

Zupełnie inny przykład traseologicznych studiów technologicznych nad artefaktami kościanymi z terenu ziem polskich stanowią badania nad wyjątkowym zabytkiem późnopaleolitycznym, jakim jest wykonana z poroża renifera motyka typu Lyngby, odkryta we wsi Murowana Goślina, gm. Loco (ryc. 4a; Orłowska 2022). Uzyskane dla niej oznaczenie radiowęglowe (9890 ± 50 BP, Poz-15118; Goslar i in. 2006) czyni ją jednym z najmłodszych wytworów tego rodzaju odkrytym na Niżu Europejskim.

W rezultacie badań mikroskopowych na powierzchni artefaktu zidentyfikowano wiele rodzajów śladów technologicznych oraz interesujące zniszczenia podepozycyjne, jak np. pozostałości działalności gryzoni. Co jednak bardziej istotne, zniszczenia użytkowe widoczne na przedmiocie pozwalają na rekonstrukcję jego pełnej biografii (ryc. 4b). Obejmuje ona etap pozyskania surowca do produkcji narzędzia (zrzutu poroża renifera), etap nadania mu pożądanej formy (podział poroża przy użyciu techniki punktowania i kontrolowanego łamania; kształtowanie ostrza w wyniku m.in. strugania) oraz etap użytkowania, zakończony uszkodzeniem okazu. Zaobserwowane na „motyce" z Murowanej Gośliny ślady technologiczne związane z podziałem poroża znajdują ścisłe analogie na wielu tego typu formach odkrytych na Niżu Europejskim (m.in. Fischer i in. 2013).

Ornamentyka

Spośród wielu interesujących przedmiotów utożsamianych z kulturą magdaleńską odkrytych w schronisku w Kruczej Skale (Cyrek i in. red. 2022) za wyjątkowy można uznać niewielki wytwór z poroża pokryty złożonym ornamentem (ryc. 5a; Orłowska i Osipowicz 2022a). Jest on najprawdopodobniej fragmentem tzw. *baguette demi-ronde* (ang. *half-round rod*), jednego z charakterystycznych elementów inwentarzy tej kultury. Artefakt został poddany analizie traseologicznej, która objęła badania technologiczne zmierzające do interpretacji sposobu jego wykonania oraz studia widocznych na nim rytów (Osipowicz i in. 2020d; Orłowska i Osipowicz 2022a).



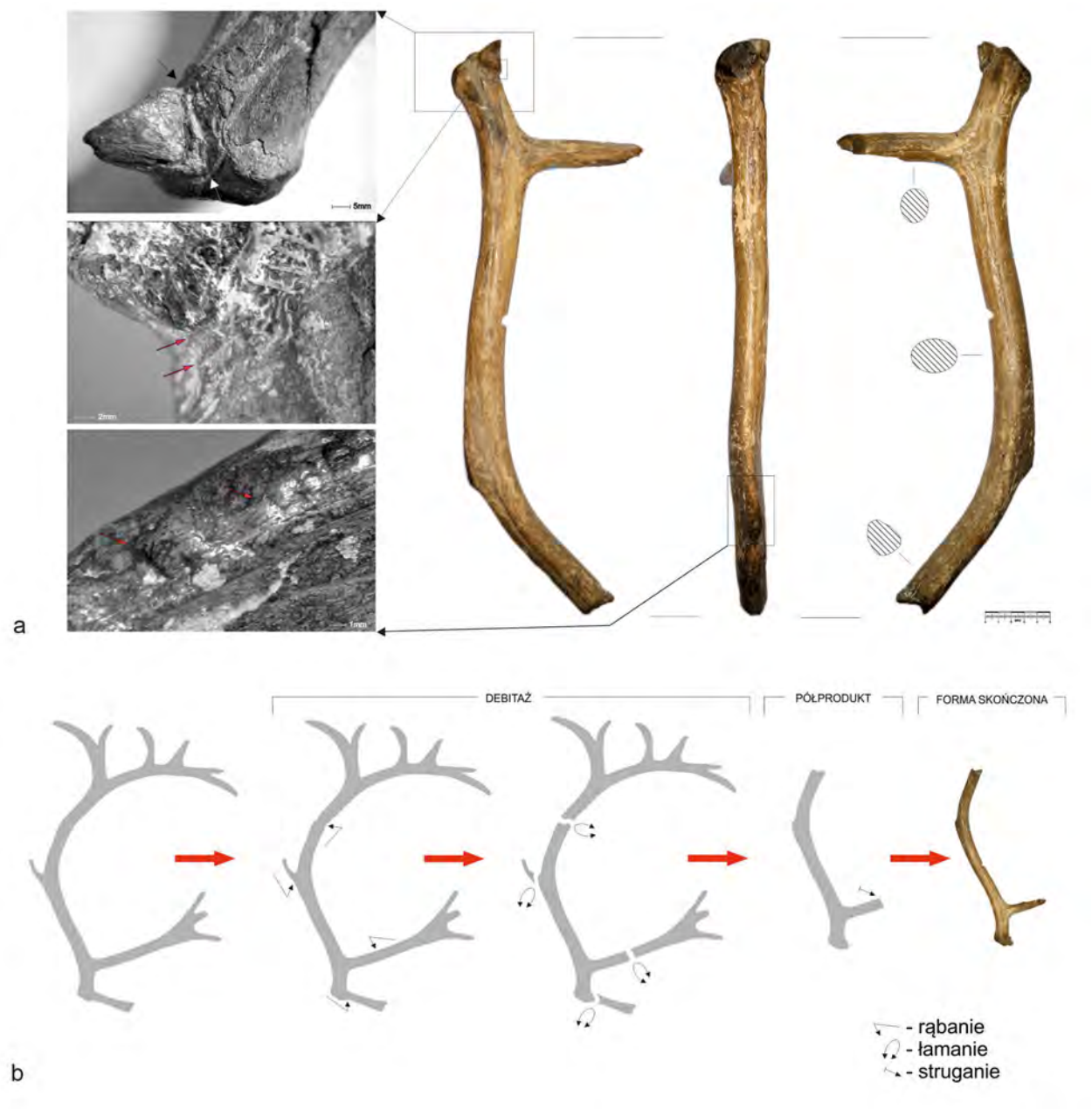
Ryc. 3. Badania eksperymentalno-traseologiczne nad możliwością identyfikacji techniki szlifowania na zabytkach z surowców kostnych: a – eksperymentalne ślady szlifowania: kość sucha, szlifowana na suchej płycie z gnejsu; b – analogiczne ślady szlifowania (na suchej płycie) zaobserwowane na materiale zabytkowym; c – eksperymentalne ślady szlifowania: kość sucha, szlifowana na płycie z gnejsu z dodatkiem mokrego piasku; d – analogiczne ślady szlifowania (na suchej płycie z dodatkiem piasku) zaobserwowane na materiale zabytkowym

Główny wątek ornamentacyjny artefaktu stanowi schematyczne wyobrażenie nieokreślonego zwierzęcia (jeleniowate? – ryc. 5b). W rezultacie analizy mikroskopowej tego elementu zdobienia stwierdzono, że wykonano je w całości techniką nacinania. W przypadku niektórych rytów ustalono kierunek ruchu i miejsce przyłożenia narzędzia, a także kolejność ich wykonania (Orłowska i Osipowicz 2022a). W centralnym punkcie sugerowanego przedstawienia głowy wyróżniono płytki dołek, który może stanowić wyobrażenie oka. Jednakże stan zachowania powierzchni nie pozwolił na potwierdzenie tego w sposób bezsporny.

Badania mikroskopowe drugiego wątku ornamentacyjnego widocznego na artefakcie, tj. zakreskowanej wstęgi, potwierdziły, że również ten element zdobienia wykonano techniką nacinania (ryc. 5b). Dzięki analizie traseologicznej i profilowaniom OCT ustalono jednak również, że widoczne obok dwa rzędy okrągłych i kwadratowych w zarysie dołków nie zostały nawiercone (co sugerowały obserwacje makroskopowe), a wykonane techniką *pointillé*, tj. poprzez nakłuwanie (ryc. 5a, c; Płonka 2012).

Kolejnym przykładem na zastosowanie metody traseologicznej do badań nad ornamentem widocznym na artefakcie kościanym są studia, którym poddano mezolityczny *bâton percé* ze stanowiska Gołębiewo 47 w centralnej Polsce (ryc. 6a). Przedmiot ten wykonano z poroża renifera (*Rangifer tarandus*) przyniesionego (jak wykazały badania izotopowe) najprawdopodobniej z okolic Półwyspu Kolskiego. Biorąc pod uwagę uzyskane wyniki datowania radiowęglowego (8790 ± 50 BP, Poz-73613), opisywany artefakt należy uznać za najmłodszy prehistoryczny wytwór z poroża renifera na Niżu Północnoeuropejskim (Osipowicz i in. 2017).

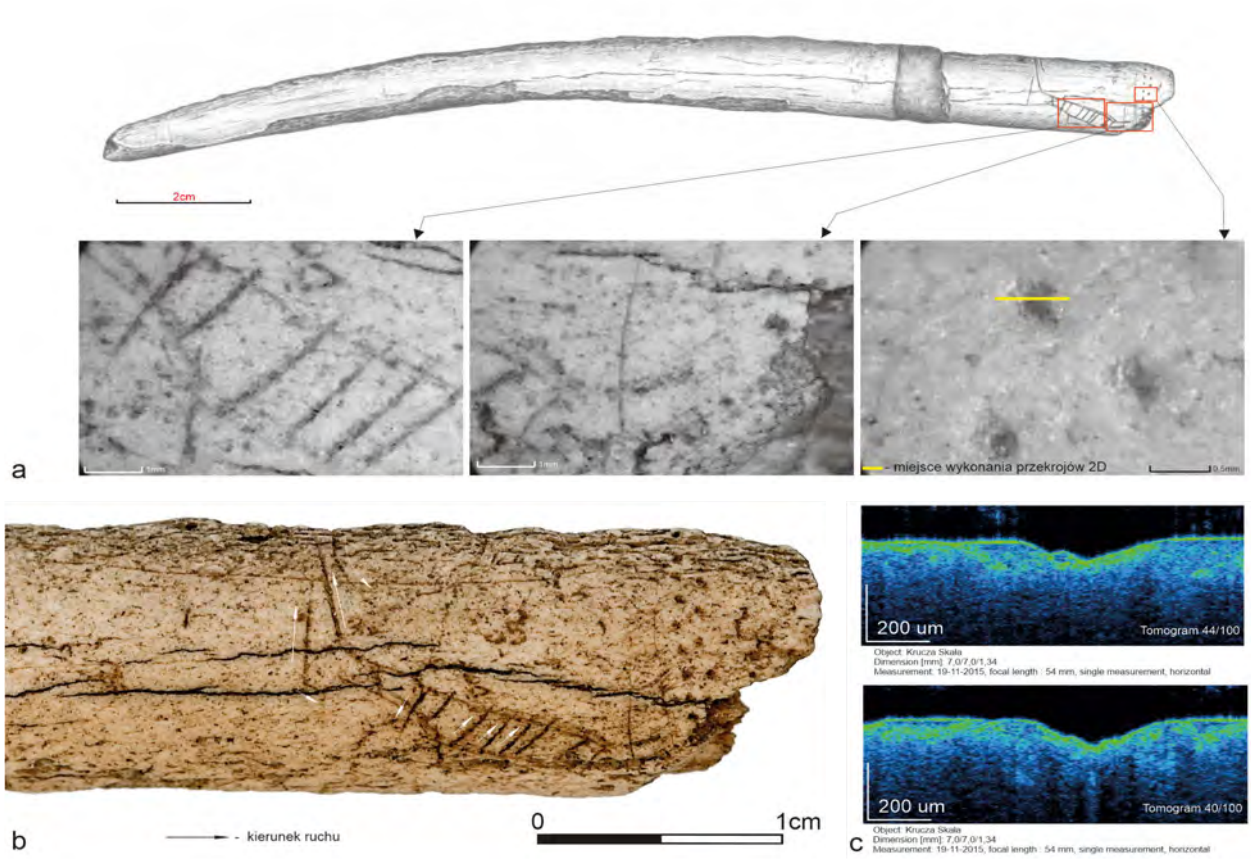
Na zdobienie widoczne na zabytku składa się linia o długości około 22 cm wykonana wzdłuż osi przedmiotu, do której dodano 10 „zakreskowanych" trójkątów o wysokości do 1 cm. Obecnie widocznych jest tylko 9 z nich, gdyż drugi trójkąt (od strony podstawy) celowo usunięto (wystrugano). Obserwacje przy



Ryc. 4. Motyka Lyngby z Murowanej Gośliny, gm. loco wraz z zaznaczoną lokalizacją wykonanych mikrofotografii (a); b – schemat "łańcucha operacji" dotyczącego formowania motyki typu Lyngby z Murowanej Gośliny

pomocy SEM oraz skanowania OCT przekroju poprzecznego linii tworzących trójkąty wykazały, że ornament wykonano dwiema technikami. Linię biegnącą wzdłuż osi zabytku stworzono za pomocą piłowania lub rycia (stąd jej V-kształtny profil), zaś te budujące trójkąty i ich wypełnienie powstały w rezultacie napiłowania, uzupełnionego struganiem pod małym kątem z jednej strony linii (por. ryc. 6b, c, d; 6e). Stworzone tą techniką ryty mają nieregularny, trapezoidalny profil poprzeczny z asymetrycznie ułożonymi ściankami, przy czym napiłowana strona linii jest bardziej pionowa, a jej ścianka ma zarys prosty, zaś ścianka od strony „struganej" jest ułożona pod dużo mniejszym kątem i ma zazwyczaj zarys lekko wklęsły.

Dzięki przeprowadzonym studiom mikroskopowym zaobserwowano również praktykę pogłębiania niektórych ścianek „struganych" dodatkowymi nacięciami. Stają się one wtedy zdecydowanie bardziej pionowe, zaś przekrój poprzeczny całego rytu jest zbliżony do litery „W". Analiza miejsc przecięcia



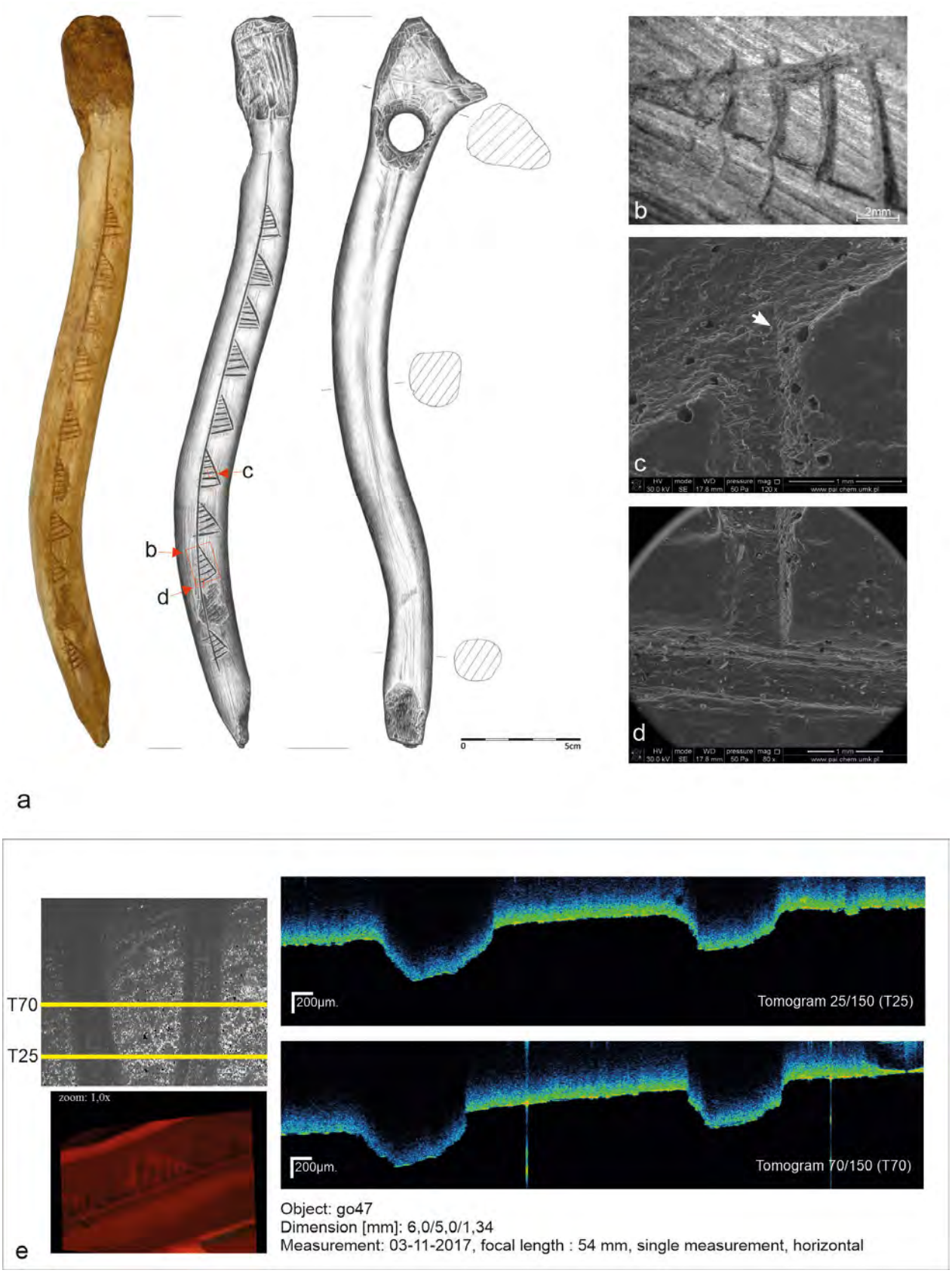
Ryc. 5. Pałeczka *baguette demi-ronde* odkryta w schronisku w Kruczej Skale wraz z zaznaczoną lokalizacją wykonanych mikrofotografii (a); b – zbliżenie na zdobioną część pałeczki; c – przykładowe przekroje przez wybrane elementy zdobienia (nakłucia *pointillé*) wykonane za pomocą profilowania OCT

nacięć tworzących zdobienie *bâton percé* z Gołębiewa pozwoliła na odtworzenie kolejności ich wykonywania (Osipowicz i in. 2020d).

W obu przytoczonych powyżej przykładach przeprowadzone badania traseologiczne wykazały zdecydowanie większą różnorodność i skomplikowanie technik zdobniczych, niż można by stwierdzić jedynie w oparciu o obserwacje makroskopowe. Dołki widoczne na artefakcie z Kruczej Skały nie zostały nawiercone, zaś ryty budujące ornament *bâton* z Gołębiewa wykonano, stosując różnorodne i bardzo skomplikowane techniki rytownicze. Zdobycie tak szczegółowej i jednocześnie ważnej wiedzy na temat prehistorycznych technik ornamentacyjnych nie byłoby możliwe bez wykonania odpowiednich analiz mikroskopowych. A przykładów tego rodzaju badań jest wiele (np. Płonka 2019; Płonka i Kowalski red. 2017).

Stosunkowo często studia traseologiczne pozwalają również na identyfikację wątków zdobniczych nieczytelnych makroskopowo lub na negatywną weryfikację istnienia ornamentów, które wyróżniono zbyt pochopnie. Dobrym przykładem pierwszej z wymienionych sytuacji są rezultaty analizy datowanego na epokę kamienia ostrza z Kosierzewa, gm. Malechowo (ryc. 7; Orłowska i Osipowicz 2023). W wyniku przeprowadzonych badań mikroskopowych na powierzchni zaobserwowano serie drobnych, równoległych względem siebie nacięć, zorientowanych prostopadle do osi dłuższej tych wytworów (ryc. 7). Stanowiły one rodzaj ornamentu (por. Płonka 2003, 44–45), będąc jednocześnie (zapewne) wyrazem zabiegu „magicznego", gdyż ze względu na swój rozmiar nie mogły raczej pełnić funkcji czysto dekoracyjnej.

Przykładem sytuacji drugiego typu są wyniki badań mezolitycznego ostrza z wkładkami krzemiennymi ze stanowiska w Tłokowie (Osipowicz i in. 2020c). Artefakt ten został poddany analizie mikroskopowej powiązanej z badaniami przy użyciu koherencyjnej



Ryc. 6. Mezolityczne *bâton percé* ze stanowiska Gołębiewo 47 (centralna Polska; a); b – zdjęcie mikroskopowe na fragment zdobienia; c, d – analiza zdobienia z zastosowaniem mikroskopu skaningowego (SEM); e –profile przez przykładowe ślady tworzące zdobienie wykonane przy użyciu profilowania OCT

tomografii optycznej (OCT). W ich rezultacie, obok zebrania szczegółowych informacji na temat sposobu wykonania ostrza, stwierdzono, że obecne na nim nacięcia, które interpretowano jako rodzaj zdobienia (por. Sulgostowska i Hoffmann 1993; Płonka 2003, 41), mają najprawdopodobniej pochodzenie technologiczne lub ewentualnie użytkowe i nie są intencjonalnym ornamentem.

Ubiór

Jednym z najczęstszych elementów wyposażenia grobów łowców–zbieraczy z epoki kamienia są zawieszki z zębów zwierzęcych. Czasem są to wytwory przygotowywane celowo na potrzeby rytuału pogrzebowego, nienoszące żadnych śladów użytkowych (Larsson 2006). Na dużej części artefaktów zaobserwowano jednak wyraźne zniszczenia wskazujące na ich bardzo długie wykorzystywanie, co sugeruje, że mogły być one elementem ubiorów używanych przez ludzi prahistorycznych na co dzień (Falci i in. 2019). W grobach z tego okresu w zasadzie nigdy nie zachowują się fragmenty skór, futer czy tkanin. Z tego powodu analiza sposobu wykorzystywania zawieszek z zębów zwierzęcych staje się jednym z bardziej perspektywicznych sposobów do próby rekonstrukcji odzieży łowców–zbieraczy z epoki kamienia, a także wynikającego z ich wyglądu znaczenia społecznego, komunikacyjnego oraz rytualnego tego rodzaju artefaktów.

Oczywiście, badania tego typu nie są łatwe. Wymagają one czasu i wszechstronnych analiz licznych kolekcji zawieszek. Przykładem postępu w studiach nad omawianym tematem są rezultaty analiz traseologicznych artefaktów pochodzących z subneolitycznych stanowisk w Šventoji na Litwie (Osipowicz i in. 2020e). Zawieszki te stanowiły element depozytów jeziornych, których pierwotny kontekst archeologiczny nie jest jasny. Zachowane na nich zniszczenia użytkowe stały się jednak impulsem do realizacji programu badawczego, ukierunkowanego na stworzenie klasyfikacji śladów użytkowania powstających na zawieszkach mocowanych do odzieży w różny sposób (ryc. 8).

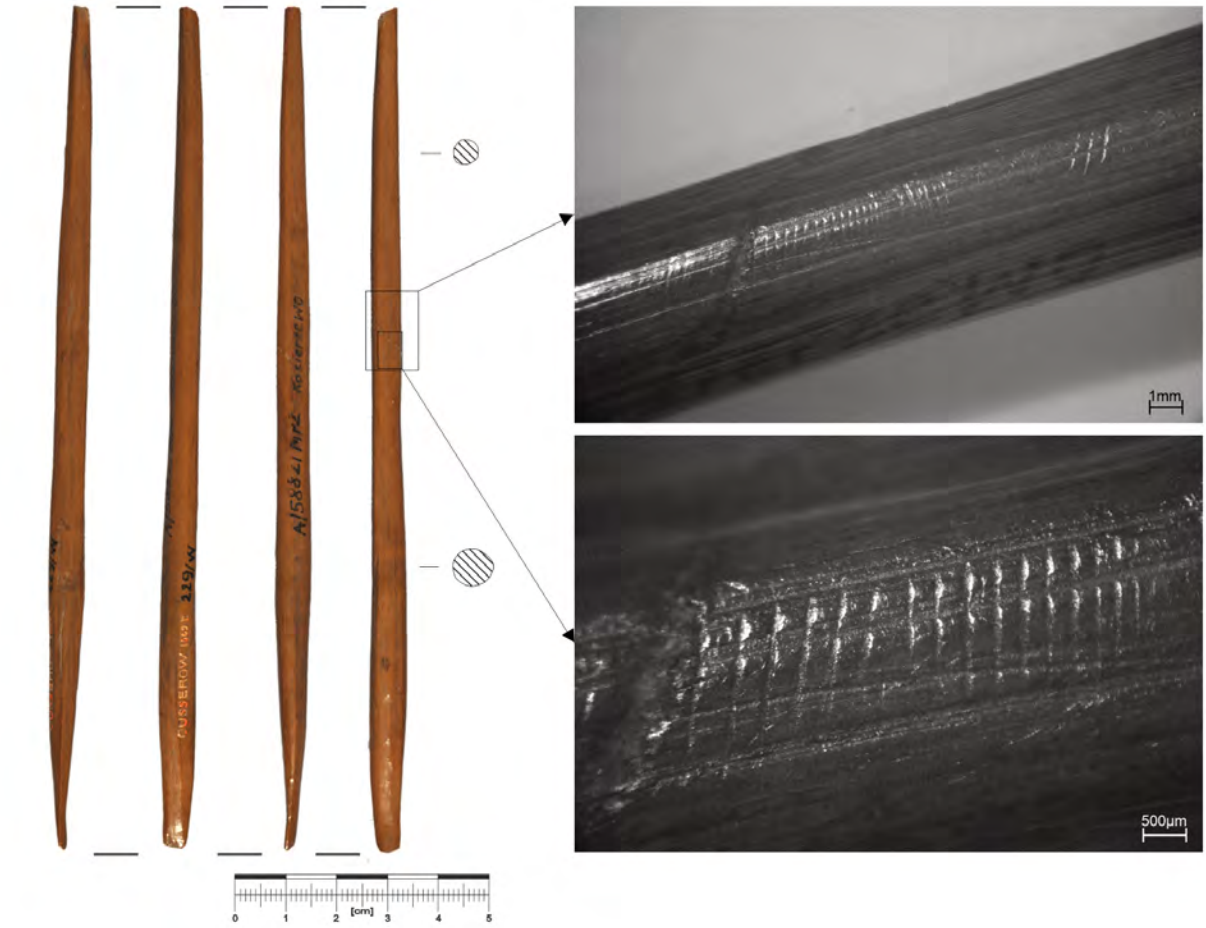
W trakcie badań doświadczalnych, będących jego pierwszą fazą, zawieszki wykonane w trakcie eksperymentów połączono w zestawy i przez miesiąc użytkowano na co dzień jako niezależne wisiorki oraz elementy bransolet noszonych na rękach i nogach, bezpośrednio na ciele lub na dobrze wyprawionej irsze jeleniej imitującej ubranie skórzane (ryc. 8e; Osipowicz i in. 2020e). Po zakończeniu eksperymentów użyte w nich wytwory poddano analizie traseologicznej, która wykazała wyraźną korelację pomiędzy sposobem ich wykorzystywania a lokalizacją śladów użytkowych wewnątrz i na krawędziach otworów, przez które przeplatano sznurki / rzemienie (ryc. 8b–f). Różnice w lokalizacji i charakterystyce zaobserwowanych zniszczeń były na tyle wyraźne, że pozwoliły na odróżnienie zawieszek przyszytych do ubrań od tych wykorzystywanych jako luźne wisiory. Stworzoną klasyfikację śladów użytkowych zastosowano do interpretacji sposobów wykorzystywania zawieszek pochodzących ze Šventoji (Osipowicz i in. 2020e), a później również innych stanowisk, w tym np. artefaktów z cmentarzyska w Zviejniekach na Łotwie (Osipowicz i in. 2022a).

Rytuał

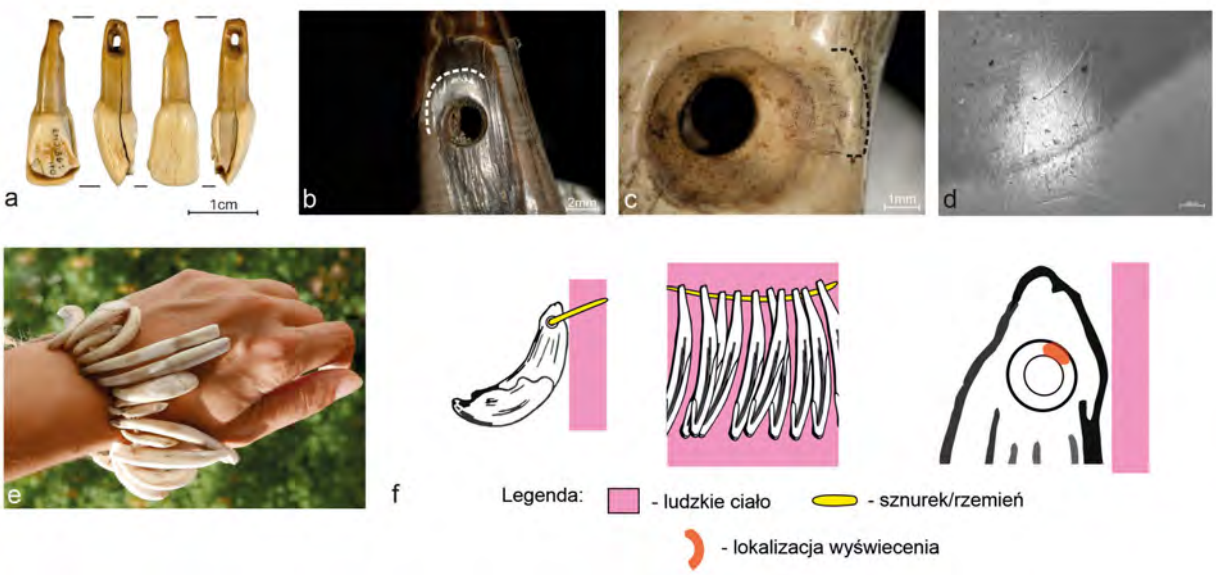
Symbolizm i powiązany z nim animizm odgrywały bez wątpienia istotną rolę w życiu społeczności zbieracko-łowieckich wczesnoholoceńskiej Europy. Wśród źródeł archeologicznych identyfikowanych na stanowiskach z tego okresu, które są zlokalizowane w strefie przymorskiej, często występują kości fok lub wykonane z nich przedmioty (m. in. Osipowicz 2020; Osipowicz i in. 2019a). Rola tych zwierząt w systemie światopoglądowym społeczności epoki kamienia pozostaje jednak wciąż niejasna. W jej poznaniu przydatne mogą być rezultaty badań traseologicznych pięciu czaszek fok pochodzących ze stanowisk w Šventoji na Litwie (ryc. 9a; Osipowicz i in. 2020a).

W rezultacie przeprowadzonych analiz mikroskopowych na ich powierzchni zidentyfikowano ślady technologiczne związane z „formowaniem" pożądanego wyglądu czaszek oraz powstałe w rezultacie ich przystosowywania do połączenia z innymi materiałami / przedmiotami (ryc. 9b–d). Do pierwszej grupy zaliczyć można zniszczenia będące wynikiem odpiłowywania mózgoczaszki oraz (być może) intencjonalnego usuwania łuków nadoczodołowych (Osipowicz i in. 2020a). Do drugiej – pozostałości formowania otworu łączącego oczodoły przy pomocy nieokreślonego narzędzia o formie kolca oraz jego powiększania za pomocą skrobania.

Ślady użytkowe zaobserwowane na czaszkach ze Šventoji są dobrze wykształcone i nie budzą większych wątpliwości co do swojej genezy. Zarejestrowano je w kilku powtarzalnych miejscach, tj. na krawędziach kości łuków nadoczodołowych, wewnątrz stworzonych otworów oraz na powierzchniach, którymi czaszki przylegały do innych materiałów. Bliższa analiza



Ryc. 7. Ostrze z Kosierzewa, gm. Malechowo wraz z mikrofotografiami prezentującymi zaobserwowane nacięcia



Ryc. 8. Przykładowa zawieszka ze Šventoji (a) wraz z mikrofotografiami prezentującymi ślady użytkowe (b-d); e – rekonstrukcja mocowania zawieszek ze stan. Šventoji na Litwie; f – schematyczne przedstawienie sposobu noszenia zawieszki wraz z lokalizacją tworzącego się wyświecenia

tych zniszczeń pozwoliła na wysunięcie pewnych sugestii odnośnie do typu materiałów, do których przylegały czaszki, oraz rodzaju sznurków użytych do ich przywiązania.

Cechy wyświecenia oraz śladów liniowych zaobserwowanych w otworach oraz na krawędziach kości łuków oczodołowych wskazują, że do przywiązania czaszek użyto najprawdopodobniej sznurów wykonanych z włókien roślinnych (Osipowicz i in. 2020a). Wyświecenie widoczne na kościach stanowiących powierzchnie styczne czaszek z materiałami, do których je przymocowywano, nosi w niektórych miejscach dość dobrze czytelne ślady świadczące o kontakcie ze skórą. Można więc zasugerować, że analizowane artefakty były elementem ubrań lub, co bardziej prawdopodobne (ze względu na inne cechy wyświecenia), częściami przedmiotów pokrytych skórą. Ślady użytkowe zaobserwowane na czaszkach są dobrze rozwinięte i mają cechy abrazyjne, co wskazuje, że powstały prawdopodobnie w rezultacie długotrwałego tarcia, a więc ruchu. Przedmioty, do których je przymocowano, nie mogły być więc statyczne, jak np. totemy, ale bez wątpienia mobilne i intensywnie używane. Obecność smoły na jednym z artefaktów może sugerować przyklejanie do czaszek dodatkowych przedmiotów nieokreślonego typu.

Rozpatrując prawdopodobną funkcję czaszek ze Šventoji, wziąć należy pod uwagę, że nie są to wytwory czysto użytkowe (jak np. narzędzia), ale że ich znaczenia należy poszukiwać w sferze życia duchowego grup zbieracko-łowieckich wczesnego holocenu. Pełniły one najprawdopodobniej funkcję rytualno-totemiczną (ryc. 9e, f), podobną do tej przypisywanej tzw. *frontlets* mezolitycznym wykonanym z czaszek jeleni, znanym np. ze stanowiska w Star Carr (Elliott i in. 2018). Są to jedyne przedmioty tego typu odkryte jak do tej pory w środkowo-wschodniej części Europy.

Funkcja

Badania nad funkcją narzędzi to jeden z najważniejszych celów, do których wykorzystywana jest metoda traseologiczna w studiach nad dawnymi przemysłami kościanymi. Do zilustrowania tego typu analiz również posłużyć się można badaniami, prowadzonymi nad kolekcją artefaktów kościanych ze stanowisk subneolitycznych w Šventoji na Litwie (cf. Osipowicz i in. 2019a).

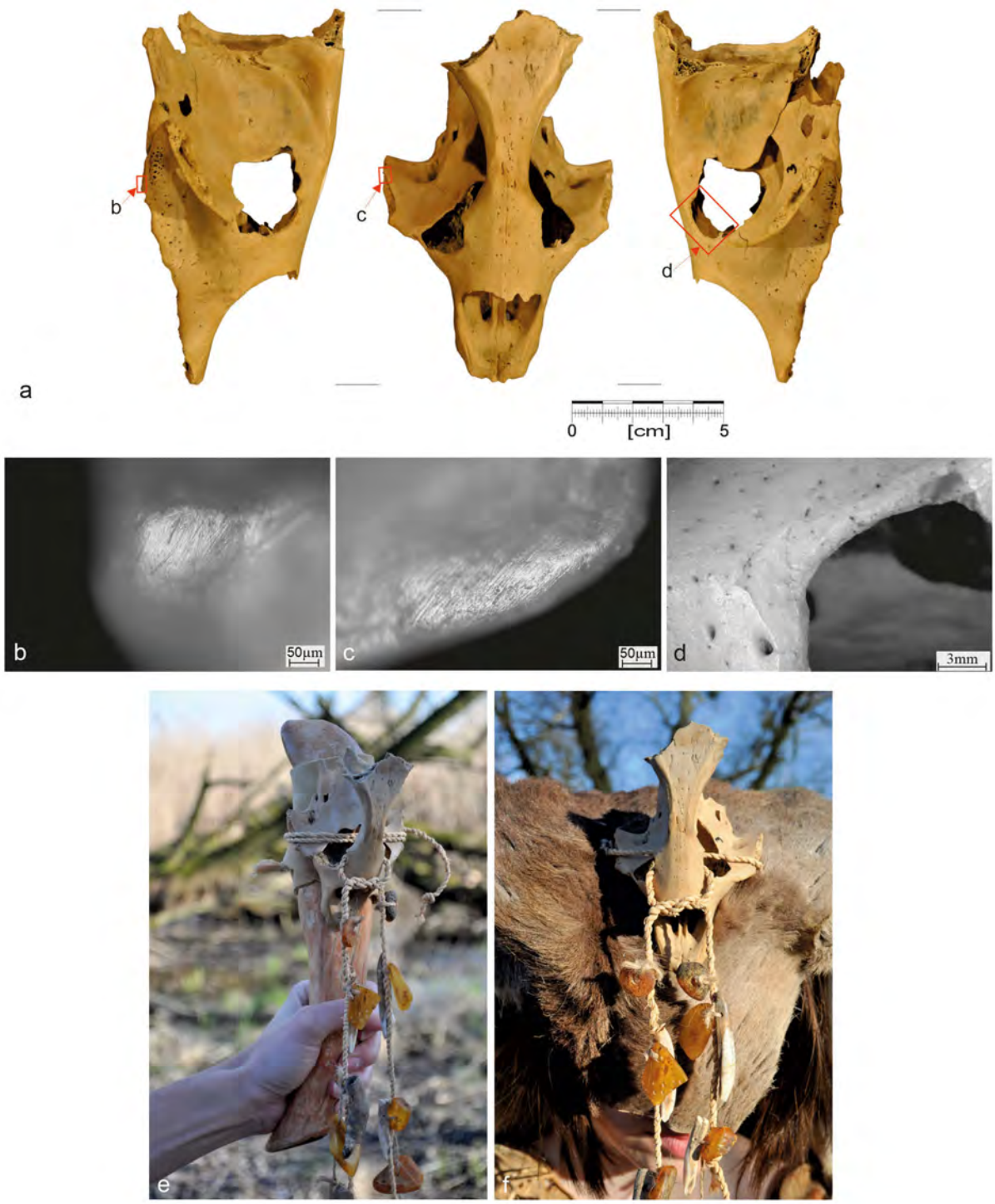
W zespołach ze Šventoji, stan. 1, 4, 6 i 23, wystąpiły niezwykle interesujące wytwory wykonane z kości piszczelowych fok (ryc. 10a), które ze względu na charakter śladów użytkowych i technologicznych czytelnych makroskopowo na ich powierzchni określono mianem skrobaczy (Osipowicz i in. 2019a). Dyskusja na temat funkcji tych narzędzi trwała od dziesięcioleci i doprowadziła do wysunięcia wielu, często bardzo odmiennych hipotez w tym zakresie (Rimantienė 2005; Luik i Piličiauskienė 2016).

Wszystkie dostępne wyroby omawianego typu (łącznie 27 artefaktów) poddano analizie traseologicznej przy użyciu mikroskopów optycznych; trzy wytypowano do badań z wykorzystaniem mikroskopu metalograficznego oraz SEM. Dodatkowo z ich powierzchni pobrano próbki rezyduów, które poddano analizie przy użyciu SEM-EDX. Jednocześnie zaplanowano i zrealizowano program badań doświadczalnych, uwzględniający czynności, które mogły być wykonywane „skrobaczami" ze Šventoji, biorąc pod uwagę specyfikę funkcjonalną tego kompleksu stanowisk (Piličiauskas i in. 2017).

W rezultacie przeprowadzonych analiz mikroskopowych stwierdzono, że zaobserwowane na analizowanych artefaktach zniszczenia użytkowe (specyficzne wyświecenie i ślady liniowe; ryc. 10b, c) są analogiczne do uzyskanych w trakcie oczyszczania (skrobania) skóry foki z podsypką antyseptycznej i konserwującej ochry (ryc. 10d, e; Osipowicz i in. 2019a). Interpretację tą wzmocniły rezultaty badań SEM-EDX, które potwierdziły znaczny wzrost udziału żelaza na krawędziach pracujących zarówno narzędzi doświadczalnych, jak i samych artefaktów (Osipowicz i in. 2019a). Wydaje się więc, że przeprowadzone studia traseologiczne pozwoliły na ostateczne rozwiązanie dyskutowanego od dawna problemu funkcji skrobaczy ze Šventoji.

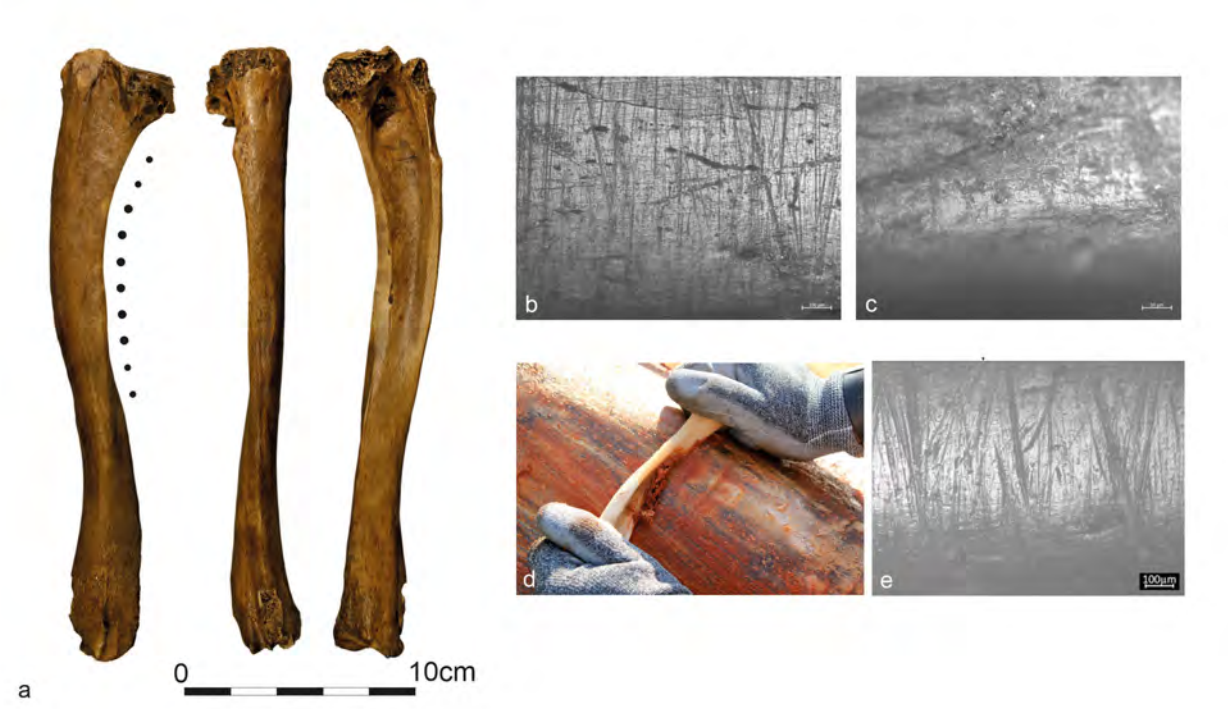
Dobrym przykładem na zastosowanie metody traseologicznej do badań nad funkcją prahistorycznych narzędzi z surowców kostnych są prowadzone w naszym kraju od jakiegoś czasu studia nad sposobami użytkowania specyficznych narzędzi wykonywanych z poroża jelenia, określanych w języku angielskim jako „*heavy bevel-ended tools*". Ze względu na kąt położenia ostrza względem otworu wykonywanego na stylisko wyroby te dzieli się na topory (orientacja ostrza zgodna z osią otworu) oraz motyki (ostrze położone prostopadle lub skośnie do osi otworu). W Polsce narzędzia tego rodzaju wystąpiły głównie na stanowiskach mezolitycznych, np. Krzyż Wielkopolski 7, gm. Loco (Kabaciński i in. 2008) oraz Dąbki 9, gm. Darłowo (David 2015), i neolitycznych, jak np. Bodzia 1, gm. Lubanie i Brześć Kujawski, gm. loco (Kabaciński i in. 2014).

Funkcja „*heavy bevel-ended tools*" jest przedmiotem dyskusji od długiego czasu i wysunięto w tym zakresie wiele hipotez (Smith 1989: 272; Turner 1889: 789; Woodman 1989: 19). Niedawno długofalowy



Ryc. 9. Przykładowa czaszka foki odkryta w Šventoji na Litwie (a) wraz z zaznaczoną lokalizacją wykonanych mikrofotografii i zdjęciami (b-d) prezentującymi ślady użytkowe zaobserwowane na jej powierzchni; e, f – przykładowe sposoby wykorzystywania czaszek na podstawie zaobserwowanych na ich powierzchni zniszczeń użytkowych

program w tym zakresie podjęto również w Polsce w Instytucie Archeologii Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu. Prowadzone w tym ośrodku prace doświadczalne objęły jak do tej pory użytkowanie form tego rodzaju do obróbki skóry i różnorodnych prac kopieniaczych (Orłowska i Osipowicz 2017), rąbania drewna niezbędnego do rekonstrukcji szałasu mezolitycznego (Orłowska i Osipowicz 2017; Osipowicz



Ryc. 10. Skrobacz z kości foczej ze stanowiska Šventoji na Litwie (a); b, c – przykładowe ślady użytkowe zaobserwowane na skrobaczu; d – eksperymentalne skrobanie skóry foczej z domieszka ochry; e - eksperymentalne ślady użytkowe zadokumentowane na skrobaczu użytym do skrobania skóry foczej z domieszką ochry

i in. 2015) oraz ciosania drewna wypalanego w trakcie wykonywania dłubanki (Osipowicz i in. 2022b). Badania traseologiczne wykonane w następstwie tych eksperymentów pozwoliły na stworzenie klasyfikacji śladów użytkowych powstających na wytworach omawianego typu w wyniku ich wykorzystywania w różny sposób (ryc. 11). Dokonane ustalenia przynoszą już pierwsze pozytywne rezultaty w postaci udanych (jak się wydaje) prób interpretacji funkcji zabytkowych przedmiotów tego rodzaju (Orłowska i Osipowicz 2017; Osipowicz i in. 2019b).

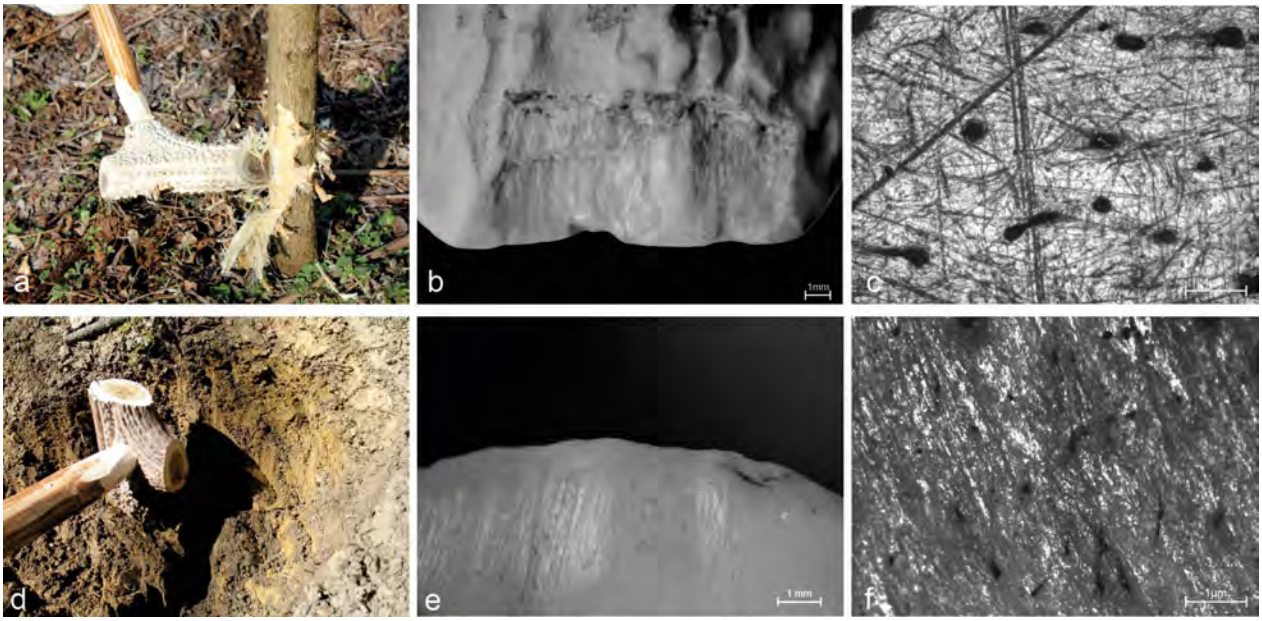
PODSUMOWANIE

Badania traseologiczne wytworów kościanych stanowią bez wątpienia niezwykle istotny element studiów nad dawnymi społecznościami. Jak ukazano na załączonych przykładach pozwalają one nie tylko na zdobycie wiedzy na temat sposobów wytwarzania i użytkowania przedmiotów z surowców kostnych, ale również dostarczają informacji odnoszących się do sfery symboliczno-rytualnej, kontaktów międzygrupowych i wymiany (w tym tej dalekosiężnej), odzieży itd. Wiele aspektów metody traseologicznej, w kontekście studiów nad wytworami z kości, wymaga jeszcze udoskonalenia. Prace metodologiczne w tym zakresie ciągle jednak trwają. Stale rozwijany jest wykorzystywany aparat narzędziowy, pojawiają się nowe sposoby prowadzenia obserwacji mikroskopowych, rejestracji zniszczeń technologicznych i użytkowych oraz analizy pozyskanych na tej drodze danych.

Badania traseologiczne staną się zapewne w niedalekiej przyszłości jedną z głównych metod studiowania dawnych przemysłów kościanych, a co za tym idzie jeszcze bardziej wartościowym sposobem zgłębiania wiedzy na temat użytkujących je przedstawicieli społeczności.

FINANSOWANIE

Powstanie artykułu jest elementem prac realizowanych w ramach projektu NCN 2021/43/B/HS3/00500.



Ryc. 11. Prace eksperymentalne związane z różnymi sposobami użytkowania heavy duty bevel-ended tools z poroża: a – eksperymentalne rąbanie drzewa, b – wyłamania i wykruszenia zaobserwowane na narzędziu eksperymentalnym użytym do rąbania drewna, c – wyświecenie użytkowe zaobserwowane na narzędziu eksperymentalnym użytym do rąbania drewna; d – eksperymentalne kopanie w ziemi, e - wyłamania i wykruszenia zaobserwowane na narzędziu eksperymentalnym użytym do kopania w ziemi, f – wyświecenie użytkowe zaobserwowane na narzędziu eksperymentalnym użytym do kopania w ziemi

LITERATURA

Altamirano, G.M., Alarcón, G.E. (red.) 2019. *El hueso trabajado en escena*. Cuadernos de Prehistoria y Arqueología de la Universidad de Granada 29. Granada.

Averbouh, A. 2000. *Technologie de la matière osseuse travaillée et implications palethnologiques. L'exemple des chaînes d'exploitation du bois de Cervidé chez les Magdaléniens des Pyrénées.* Thèse de Doctorat, Université de Paris I – Panthéon Sorbonne.

Averbouch, A. 2001. Methodological specifics of the techno-economic analysis of worked bone and antler: mental refitting and methods of application, (w:) A. Choyke, L. Bartosiewicz (red.), *Crafting Bone: skeletal technologies through time and space: proceedings of the 2nd Meeting of the (ICAZ) Worked Bone Research Group: Budapest, 31 August – 5 September 1999*. Oxford, 111–123.

Averbouh, A. (red.) 2016. *Multilingual lexicon of bone industries. version 2.* Aixen-Provence (coll. Archaeological Studies II, Hors-série à Préhistoires méditerranéennes)

Backwell, L., d'Errico F. 2003. Additional evidence on the early hominid bone tools from Swartkrans with reference to spatial distribution of lithic and organic artefact. *South African Journal of Science* 99: 259–267.

Bagniewski, Z. 1992. W sprawie obróbki surowca rogowego w mezolicie. *Studia Archeologiczne* 22: 13–33.

Baron, J., Kufel-Diakowska B. (red.) 2011. Written in Bones. Studies on technological and social context of past faunal skeletal remains. Wrocław.

Baron, J., Diakowski, M., Stolarczyk, T. 2016. Bone and antler artefacts from an 8-5th century BC settlement at Grzybiany, South-Western Poland, (w:) S. Vitezović (red.), *Close to the bone: current studies in bone technologies*. Belgrad, 28–47.

Baron, J., Diakowski, M. 2018. Tools make tools: changes in bone and antler manufacture at Late Bronze and Early Iron Age Polish sites. *Antiquity*, *Project Gallery* 92(363).

Baron, J., Diakowski, M., Badura, B., Stolarczyk, T. 2022. Bone, antler, and tooth objects from the late bronze/early Iron Age urnfields in south-western Poland. *Quaternary International* 665–666: 82–92.

Bejenaru, L. (red.) 2018. Worked Bone and Archaeology: Proceedings of the 11th Meeting of the ICAZ Worked Bone Research Group in Iasi 2016. *Quaternary International* 472.

Bjørnevad, M., Jonuks, T., Bye-Jensen, P., Manninen, M.A., Oras, E., Vahur, S., Riede, F. 2019. The life and times of an Estonian Mesolithic slotted bone 'dagger'. Extended object biographies for legacy objects. *Estonian Journal of Archaeology* 23(2): 103–125.

Blumenschine, R.J., Marean, C.W., Capaldo, S.D. 1996. Blind tests of inter-analyst correspondence and accuracy in the identification of cut marks, percussion marks, and carnivore tooth marks on bone surfaces. *Journal of Archaeological Science* 23: 493–507.

Bradfield, J. 2015. Pointed bone tool technology in southern Africa: results of use-trace analyses. *Southern African Humanities* 27: 1–27.

Bradfield, J. (red.) 2023. Two Million Years of Worked Osseous Technology: Proceedings of the 14th Meeting of the Worked Bone Research Group. *Quaternary International* 665–666.

Buc, N. 2011. Experimental series and use-wear in bone tools. *Journal of Archaeological Science* 38: 546–557.

Campana, D.V. 1989. Natufian and Protoneolithic Bone Tools: the Manufacture and Use of Bone Implements in the Zagros and the Levant. Oxford.

Camps-Fabrer, H. 1976. Actes du premier colloque international sur l'industrie de l'os dans la Préhistoire, Abbaye de Sénanque 1974. Aix-en-Provence.

Camps-Fabrer, H. 1977. *Méthodologie appliquée à l'industrie de l'os préhistorique. Deuxième colloque international sur l'industrie de l'os dans la Préhistoire, Abbaye de Sénanque 1976*. Paris.

Camps-Fabrer, H. 1979. *Actes de la première réunion du groupe de travail n° 3 sur l'industrie de l'os néolithique et de l'Âge des Métaux Aix-en-Provence, 1978*. Paris.

Camps-Fabrer, H. (red.) 1988a. *Sagaies, Cahier des Fiches typologiques de l'industrie osseuse préhistorique, Cahier I*. Aix-en-Provence.

Camps-Fabrer, H. (red.), 1988b. *Propulseurs, Cahier des Fiches typologiques de l'industrie osseuse préhistorique, Cahier II*. Aix-en-Provence.

Choyke, A. 1997. The bone tool manufacturing continuum. *Anthropozoologica* 25/6, 65–72.

Choyke, A., Bartosiewicz, L. (red.) 2001. *Crafting Bone: Skeletal Technologies through Time and Space – Proceedings of the 2nd meeting of the (ICAZ) Worked Bone Research Group Budapest, 31 August – 5 September 1999.* Oxford.

Choyke, A., O'Connor, S. (red.) 2013. *From These Bare Bones: Raw Materials and the Study of Worked Osseous Objects.* Oxford.

Choyke, A., Christie, A., Scheinsohn, V., Buc, N. (red.) 2016. *Global patterns in the exploitation of animal-based raw materials: technological and socio-cultural issues.* Argentina.

Christidou, R. 1999. *Outils en os néolithique du Nord de la Grèce: étude de technologique*. Thèse de doctorat, Université de Paris X.

Clark, J., Thompson, M. 1954. The Groove and Splinter Technique of working antler in Upper Palaeolithic and Mesolithic Europe. *Proceedings of the Prehistoric Society* 19(2): 148–160.

Cyrek, K., Sudoł-Procyk, M., Czyżewski, Ł. (red.) 2022. *Late Magdalenian Campsite at Krucza Skała Rockshelter*. Toruń.

d'Errico, F. 1993. Criteria for identifying utilised bone: the case of the Cantabrian "tensors". *Current Anthropology* 34: 299–309.

d'Errico, F., Backwell, L.R. 2003. Possible evidence of bone tool shaping by Swartkrans early hominids. *Journal of Archaeological Science* 30: 1559–1576.

d'Errico, F., Giacobini G. 1985. Approche méthodologique de l'analyse de l'outillage osseux, un exemple d'étude. *L'Anthropologie* 89(4): 457–472.

d'Errico F., Giacobini G. 1986. L'emploi des répliques en vernis pour l'étude de surface des pseudo-instruments en os, (w:) E. Aguirre, M.-H. Patou (red.), *Outillage peu élaboré en os et en bois de cervidé*. Treignes, 57–68.

David, É. 2004. *Technologie osseuse des derniers chasseurs prehistoriques en Europe du Nord (Xe-VIIIe millenaires avant J.-C.): le Maglemosien et les technocomplexes du Mésolithique.* Unpublished PhD dissertation. Nanterre-Paris.

David, É. 2015. Dąbki 9 : New technological insights yielded by the bone and antler industry, (w:) J. Kabaciński, S. Hartz, D. C. M. Raemaekers, T. Terberger (red.), *The Dąbki site in Pomerania and the neolithisation of the north European lowlands (c. 5000–3000 calBC).* Rahden, 157–168.

Diakowski, M. 2011. Bone and antler artefacts from Pobiel 10, Lower Silesia, Poland. Are they really Mesolithic, (w:), J. Baron, B. Kufel-Diakowska (red.), *Written in Bones. Studies on technological and social contexts of past faunal skeletal remains*. Wrocław, 93–116.

Diakowski, M., Płonka, T. 2010. New data on ornamented artifacts from the Mesolithic site Pobiel 10, Lower Silesia, Poland. *Archäologisches Korrespondenzblat*t 40/3: 317–330.

Elliott B., Knight, B., Little, A. 2018. Osseous Technology, (w:) N. Milner, C. Conneller, B. Taylor (red.), *Star Carr Volume 2: Studies in Technology, Subsistence and Environment*. York, 255-272.

Elliott, B., Knight, B., Little, A. 2018. Antler Frontlets, (w:) N. Milner, C. Conneller, B. Taylor (red.), *Star Carr Volume 2: Studies in Technology, Subsistence and Environment*. York, 297–333.

Évora M.A. 2015. Use-Wear Methodology on the Analysis of Osseous Industries, (w:) J.M. Marreiros, J.F.G. Bao, N.F. Bicho (red.), *Use-Wear and Residue Analysis in Archaeology*. New York, 159–170.

Falci, C.G., Cuisin, J., Delpuech, A., Van Gijn, A., Hofman, L.C. 2019. New Insights into Use-Wear Development in Bodily Ornaments Through the Study of Ethnographic Collections. *Journal of Archaeological Method and Theory* 26: 755–805.

Fernández-Jalvo, Y., Andrews, P. 2016. *Atlas of taphonomic identifications: 1001+ images of fossil and recent mammal bone modification*. Dordrecht.

Fisher, J.W. 1995. Bone Surface Modifications in Zooarchaeology. *Journal of Archaeological Method and Theory* 2: 7–68.

Fischer, A., Clemmensen, L.B., Donahue, R., Heinemeier, J., Lykke-Andersen, H., Lysdahl, P., Mortensen, M.F., Olsen, J., Petersen, P.V. 2013. Late Palaeolithic Nørre Lyngby – a northern outpost close to the west coast of Europe. *Quartär* 60: 137–162.

Frankiewicz, M. 2013. Analiza traseologiczna materiałów kostnych, (w:) M.M. Przybyła, A. Szczepanek, P. Włodarczak (red.), *Koszyce, stanowisko 3: przemoc i rytuał u schyłku neolitu = Koszyce, site 3 : violence and ritual at the end of the Neolithic.* Kraków Pękowice.

Fullagar, R., Matheson, M., 2013. Traceology: a summary, (w:) C. Smith (red.), *Encyclopedia of Global Archaeology*. New York, 73–85.

González-Urquijo, J.E., Ibáñez-Estévez, J.J. 2003. The quantification of use-wear polish using image analysis: first results. *Journal of Archaeological Science* 30: 481–489.

Goslar, T., Kabaciński, J., Makowiecki, D., Prinke, D., Winiarska-Kabacińska, M. 2006. Datowanie radiowęglowe zabytków z Kolekcji Epoki Kamienia Muzeum Archeologicznego w Poznaniu. *Fontes Archaeologici Posnanienses* 42: 5–14.

Griffitts, J., Bonsall, C. 2001. Experimental determination of the function of antler and bone 'bevel-ended tools' from prehistoric shell middens in western Scotland, (w:) A. Choyke, L. Bartosiewicz (red.), *Crafting Bone: skeletal technologies through time and space: proceedings of the 2nd Meeting of the (ICAZ) Worked Bone Research Group: Budapest, 31 August – 5 September 1999.* Oxford, 207–219.

Högberg A., Puseman Kand, Y.C. 2009. Integration of use-wear with protein residue analysis: a study of tool use and function in the south Scandinavian early Neolithic. *Journal of Archaeological Science* 36: 1725–1737.

Jaczewski, Z. 1992. *Poroże jeleniowatych*. Warszawa.

Jin, J.J.H., Shipman, P. 2010. Documenting natural wear on antlers: A first step in identifying use-wear on purported antler tools. *Quarternary International* 211: 91–102.

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*. Aarhus C.

Kabaciński, J., David, É., Makowiecki, D., Schild, R., Sobkowiak-Tabaka, I., Winiarska- Kabacińska, M. 2008. Stanowisko mezolityczne z okresu Borealnego w Krzyżu Wielkopolskim. *Archeologia Polski* LIII (2): 243–288.

Kabaciński, J., Sobkowiak-Tabaka, I., David, É., Osypińska, M., Terberger, T., Winiarska-Kabacińska, M. 2014. The chronology of T-shaped axes in the Polish Lowland. *Sprawozdania Archeologiczne* 66: 29–56.

Kabaciński, J., Henry, A., David, É, Rageot, M., Cheval, C., Winiarska-Kabacińska, M., Orange, F. 2023. Expedient and efficient: An Early Mesolithic composite implement from Krzyż Wielkopolski. *Antiquity* 97(392): 295–313.

Korobkowa, G.F. 1999. *Narzędzia w pradziejach. Podstawy badania funkcji metodą traseologiczną*. Toruń.

Krajcarz, M. 2010. *Badania nad sposobami obróbki kości w paleolicie na podstawie wybranych zespołów z Jury Polskiej*. Toruń (rozprawa doktorska, Instytut Archeologii, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu).

Krysiak, K., Kobryń, H., Kobryńczuk, F. 2011. *Anatomia zwierząt Tom 1 Aparat ruchowy*. Warszawa.

Kufel, B., Diakowski, M. 2008. The bone mattock from Mesolithic site Plawienko 31, Pomerania, Poland. Use-wear analysis and experimental method in determining function and manufacture process, (w:) L. Longo, N. Skakun (red.), *„Prehistoric Technology" 40 years later: Functional Studies and the Russian Legacy*. Oxford, 359–364.

Lang, F. (red.) 2013. *The Sound of Bones. Proceedings of the 8th Meeting of the ICAZ Worked Bone Research Group in Salzburg 2011*. Salzburg.

Langley, M.C. (red.) 2016. *Osseous Projectile Weaponry (Vertebrate Paleobiology and Paleoanthropology Series)*. Dordrecht.

Larsson, L., 2006. Tooth for a Tooth for a Grave: Tooth Ornaments from the Graves at the Cemetery of Zvejnieki, (w:) L. Larsson, I. Zagorska (red.), *Back to the Origin: New Research in the Mesolithic-Neolithic Zvejnieki Cemetery and Environment, northern Latvia*. Stockholm, 253–288.

Lasota-Moskalewska, A. 1993. Animals remains from Maszycka Cave (Upper Paleolith), (w:) S.K. Kozłowski (red.), *Maszycka, a Magdalenian site in southern Poland*. Mainz, 231–239.

Legrand, A. 2007. *Fabrication et utilisation de l'outillage en matières osseuses du Néolithique de Chypre: Khirokitia et Cap Andreas-Kastros*. Oxford.

Legrand, A. 2008. Neolithic bone needles and vegetal fibres working: experimentation and use-wear analysis, (w:) L. Longo, N. Skakun (red.), *„Prehistoric Technology" 40 years later: Functional Studies and the Russian Legacy*. Oxford, 445–50.

Legrand, A., Radi, G. 2008. Manufacture and use of bone points from early Neolithic Colle Santo Stefano, Abruzzo, Italy. *Journal of Field Archaeology* 33: 305–20.

Legrand, A., Sidera, I. 2007. Methods, means, and results when studying European bone Industry, (w:) G. Gates St-Pierre, R.B. Walker (red.), *Bones as Tools: Current Methods and Interpretations in Worked Bone Studies*. Oxford, 291–304.

Legrand-Pineau, A., Sidéra, I., Buc, N., David, E., Scheinsohn, V. 2010. *Ancient and Modern Bone Artefacts from America to Russia. Cultural, technological and functional signature*. Oxford.

LeMoine, G. 1989. Use Wear Analysis of Bone Tools. *Archaeozoologia* III 1–2: 211–224.

LeMoine, G. 1997. *Use Wear Analysis on Bone and Antler Tools of the Mackenzie Inuit*. Oxford.

Lesnik, J.J. 2011. Bone tool texture analysis and the role of termites in the diet of South African hominids. *PaleoAnthropology* 2011: 268–281.

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*. Pękowice-Poznań, 245–264.

Loy, T.H, Spriggs M., Wickler S. 1992. Direct evidence for human use of plants 28 000 years ago: starch residues on stone artifacts from the Northern Solomon Islands. *Antiquity* 66: 898–912.

Loy, T.H. 1993. The artifact as site: an example of the biomolecular analysis of organic residues on prehistoric tools. *World Archaeology* 25: 44–63.

Luik, H., Piličiauskienė, G., 2016. Bone tools at the Neolithic sites of Šventoji, Lithuania:Used materials and working methods, (w:) S. Vitezović (red.), *Close to the Bone: Current Studies in Bone Technologies*. Belgrade, 188–200.

Luik, H., Choyke, A., Batey, C., Lougas, L. (red.) 2005. *From Hooves to Horns, from Mollusc to Mammoth – Manufacture and Use of Bone Artefacts from Prehistoric Times to the Present –Proceedings of the 4th Meeting of the ICAZ Worked Bone Research Group at Tallinn, 26th–31st of August 2003*. Tallinn.

Lyman, R.L. 1994. *Vertebrate taphonomy*. Cambridge.

Ma, X., Hou, Y. (red.) 2014. *Proceedings of the 9th Meeting of the (ICAZ) Worked Bone Research Group, Zhengzhou, China, 2013*. Beijing.

MacGregor, A. 1985. *Bone, antler, ivory & horn: the technology of skeletal materials since the Roman period*. London.

Maigrot , Y. 1997. Tracéologie des outils tranchants en os des Ve et IVe millénaires avant J.C en Bassin Parisien: essai méthodologique et application. *Bulletin de la Société Préhistorique Française* 94/2: 198–216.

Marreiros, J., Calandra, I., Gneisinger, W., Paixão, E., Pedergnana, A., Schunk, L. 2020. Rethinking Use-Wear Analysis and Experimentation as Applied to the Study of Past Hominin Tool Use. *Journal of Paleolithic Archaeology* 3: 475–502.

Newcomer, M. 1974. Study and replication of bone tools from Ksar Akil (Lebanon). *World Archaeology* 6: 138–53.

Newcomer, M. 1977. Experiments in Upper Palaeolithic Bone Work, (w:) H. Camps-Fabrer (red.), *Méthodologie appliquée à l'industrie de l'os préhistorique. Deuxième colloque international sur l'industrie de l'os dans la Préhistoire, Abbaye de Sénanque 1976*. Paris, 293–301.

Olsen, B., 2010. Kultura materialna po tekście: przywracanie obecności rzeczom, (w:) E. Domańska (red.) *Teoria wiedzy o przeszłości na tle współczesnej humanistyki. Antologia*. Poznań.

Olsen, S.L. 1984. *Analytical approaches to the manufacture and use of bone artifacts in prehistory*. PhD thesis, University of London. London.

Olsen, S.L. 1989. On distinguishing natural from cultural damage on archaeological antler. *Journal of Archaeological Science* 16: 125–135.

Olsen, S. L. 2007. Conclusions: bone artifacts and their importance to archaeology. Bones as Tools: Current Methods and Interpretations in Worked Bone Studies, (w:) G. Gates St-Pierre, R. B. Walker (red.), *Bones as Tools: Current Methods and Interpretations in Worked Bone Studies*. Oxford, 175–82.

Olsen, S.L., Shipman, P. 1988. Surface modification on bone: trampling versus butchery. *Journal of Archaeological Science* 15: 535–553.

Orłowska, J. 2015. How Did They Drill That? – A Few Observations on the Possible Methods for Making Large-sized Holes in Antler. *EXARC Journal* 2015/2, [online] Available at: https://exarc.net/ark:/88735/10193 html dostęp: 14.08.2023.

Orłowska, J. 2016. Reading osseous artefacts – an application of micro-wear analysis to experimentally worked bone materials, (w:) S. Vitezović (red.), *Close to the Bone: Current Studies in Bone Technologies*. Belgrade, 236–247.

Orłowska, J. 2018. The same or different? Experimenting with the influence of peat environment on use-wear traces on antler tools. *International Journal of Osteoarchaeology* 28 (2): 120–130.

Orłowska, J. 2019. *Obróbka i użytkowanie surowców kostnych przez ludy łowiecko-zbierackie w późnym glacjale i wczesnym holocenie na Niżu Polskim. Studium eksperymentalno-traseologiczne. Toruń* (rozprawa doktorska, Instytut Archeologii, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu).

Orłowska, J. 2022. Późnopaleolityczna „motyka" typu Lyngby z Murowanej Gośliny w świetle wyników analiz traseologicznych. *Acta Universitatis Nicolai Copernici Archeologia* 37: 25–40.

Orłowska, J., Osipowicz, G. 2017. Searching for the function of the Early Holocene heavy duty bevel-ended tools: remarks from experimental and use-wear studies. *Arheologiâ Evrazijskih Stepej* 2017: 103–121.

Orłowska, J., Osipowicz, G. 2019. Bone working practices in Final Palaeolithic Poland: an example of a three-edged bone point from Lisi Ogon, site 13, (w:) B.V. Eriksen, E. Rensink, S. Harris (red.), *The final Palaeolithic of Northern Eurasia: proceedings of the Amersfoort, Schleswig and Burgos UISPP Commission Meetings*. Ludwig, 299–307.

Orłowska, J., Osipowicz, G. 2021. Mesolithic bone adzes and mattock heads from Poland : some suggestions on their technology and function, (w:) S. Beyries, C. Hamon, Y. Maigrot (red.), *Beyond use-wear traces: going from tools to people by means of archaeological wear and residue analyses.* Leiden, 143–154.

Orłowska, J., Osipowicz, G. 2022a. Baguette demi-ronde (half-round rod) from Krucza Skała Rockshelter in the light of traceological analyses, (w:) K. Cyrek, M. Sudoł-Procyk, Ł. Czyżewski (red.), *Late Magdalenian Campsite at Krucza Skała Rockshelter*. Toruń, 82–88.

Orłowska J., Osipowicz G. 2022b. Accuracy of the typological classifications of the Late Glacial and Early Holocene osseous projectile points according to the new AMS dates of selected artifacts from Poland. *Archaeological and Anthropological Sciences* 14: 8 (2022).

Orłowska J., Osipowicz G. 2023. Z wyników analiz traseologicznych późnoglacjalnych i wczesnoholoceńskich ostrzy kościanych z terenu Niżu Polskiego. Przykład ostrza z Kosierzewa, gm. Malechowo oraz Goli, gm. Jaraczewo, (w:) M. Sudoł-Procyk, Ł. Czyżewski, M. Krajcarz (red.), *Między archeologią a naukami o środowisku. Between archaeological and environmental sciences*. Toruń, 217–228.

Orłowska, J., Cyrek, K., Kaczmarczyk, G., Migal, W., Osipowicz, G. 2022a. Rediscovery of the Palaeolithic antler hammer from Biśnik Cave, Poland: new insights into its chronology, raw material, technology of production and function. *Quaternary International* 665–666: 48–64.

Orłowska J., Ćwiek M., Osipowicz G. 2022b. Was it ground? A closer look at various prehistoric bone grinding techniques: an experimental and traceological study. *Journal of Archaeological Science: Reports* 46: 103675.

Osipowicz, G. 2005. *Metody rozmiękczania kości i poroża w epoce kamienia w świetle doświadczeń archeologicznych oraz analiz traseologicznych*. Toruń.

Osipowicz, G. 2010. *Narzędzia krzemienne w epoce kamienia na ziemi chełmińskiej. Studium traseologiczne*. Toruń.

Osipowicz, G. 2016. Technical approach of two mesolithic bone harpoon heads from Wiele 33, central Poland, (w:) S. Vitezović (red.), *Close to the Bone: Current Studies in Bone Technologies*. Belgrade, 248–256.

Osipowicz, G. 2020. Towards an understanding the role of seals in the Subneolithic communities of the south-east coast of the Baltic Sea: the bacula from Šventoji 3 site. *Archaeologia Lituana* 21: 27–40.

Osipowicz, G., Nowak, D., Kuriga, J. 2015. Two reconstructions of the prehistoric houses from Toruń (Poland). EXARC Journal 2015/1, [online] Available at: https://exarc.net/ark:/88735/10186 html [dostęp: 14.08.2023].

Osipowicz,, G., Pomianowska, H., Makowiecki, D. 2014. Wytwory krzemienne, kamienne, z kości, poroża i zębów zwierzęcych, (w:) G. Osipowicz (red.), *Kowal 14: Sepulchral and Ritual place of people Representing the Globular Amphora Culture*. Toru, 91–117.

Osipowicz, G., Kalinowska, M., Weckwerth, P., Jankowski, M. 2015. Osada kultury ceramiki wstęgowej rytej ze stanowiska Trzciano 40, gm. Wąbrzeźno. *Fontes Archaeologici Posnanienses* 51: 201–243.

Osipowicz, G., Witas, H., Lisowska-Gaczorek, A., Reitsema, L., Szostek, K., Płoszaj, T., Kuriga, J., Makowiecki, D., Jędrychowska-Dańska, K., Cienkosz-Stepańczak, B. 2017. Origin of the ornamented b*â*ton perc*é* from the Gołębiewo site 47 as a trigger of discussion on long-distance exchange among Early Mesolithic communities of Central Poland and Northern Europe. *PLoS ONE 12(10): e0184560.*

Osipowicz, G., Kuriga, J., Makowiecki, D., Bosiak, M., Grygiel, R. 2018. Evidence for widespread occurrence of copper in Late Neolithic Poland? A deposit of Funnel Beaker Culture bone products at site 2 in Osłonki (Kuyavia, central Poland). *Quaternary International* 472: 60–74.

Osipowicz, G., Piličiauskas, G., Piličiauskienė, G., Bosiak, M. 2019a. „Seal scrapers" from Šventoji: in search of their possible function. *Journal of Archaeological Science: Reports* 27: 101928.

Osipowicz, G., Orłowska, J., Kuriga, J., Makowiecki, D. 2019b. Nowe znalezisko wczesnomezolitycznej „motyki" kościanej ze wsi Borki, pow. wołomiński. *Wiadomości Archeologiczne* 70: 173-182.

Osipowicz, G., Kerneder-Gubała, K., Bosiak, M., Makowiecki, D., Orłowska, J. 2019c. The oldest osseous mining tools in Europe? New discoveries from the chocolate flint mine in Orońsko, site 2 (southern Poland). *Quaternary International* 512: 8298.

Osipowicz, G., Orłowska, J., Piličiauskas, G., Piličiauskienė, G. 2019d. The story of one harpoon: reutilization of an osseous projectile from Subneolithic at Šventoji (Lithuania), (w:) G.M. Altamirano, G.E. Alarcón (red.) 2019. *El hueso trabajado en escena*. Cuadernos de Prehistoria y Arqueología de la Universidad de Granada 29, 237–250.

Osipowicz, G., Orłowska, J., Piličiauskienė, G., Piličiauskas, G. 2020a. Frontlets from the south-east coast of the Baltic Sea? Seal craniums from Šventoji: a unique clue to understanding the symbolic culture of European middle Holocene hunter-gatherers. *Journal of Archaeological Science: Reports* 34: 1–15.

Osipowicz, G., Orłowska, J., Piličiauskas, G., Piličiauskienė, G., Bosiak, M. 2020b. Osseous points and harpoon heads from Šventoji Subneolithic sites, coastal Lithuania : first traceological insight into the way they were produced and used. *Lietuvos Archaeologija* 46: 147–169.

Osipowicz, G., Orłowska, J., Bosiak, M., Manninen, M., Targowski, P., Sobieraj, J. 2020c. Slotted bone point from Tłokowo: rewritten story of a unique artefact from Mesolithic Poland. *Praehistorische Zeitschrift* 95: 334–349.

Osipowicz, G., Orłowska, J., Piličiauskas, G., Piličiauskienė, G., Rannamäe, E., Cyrek, K., Sylwestrzak M. 2020d. Stone Age technologies and human behaviors as reflected in decoration of osseous artefacts from the northern part of East-Central Europe. *Quaternary International* 569–570: 66-83.

Osipowicz, G., Piličiauskienė, G., Orłowska, J., Piličiauskas, G. 2020e. An occasional ornament, part of clothes or just a gift for ancestors? The results of traceological studies of teeth pendants from the Subneolithic sites in Šventoji, Lithuania. *Journal of Archaeological Science: Reports* 29, 102–130.

Osipowicz, G., Orłowska, J., Zagorska I. 2022a. Towards understanding the influence of Neolithisation for communities using the Zvejnieki cemetery, Latvia: a technological and functional analysis of the osseous artefacts discovered in the Late Mesolithic burial no 57 and Neolithic burial no 164. *Quaternary International* 665–666: 65–81.

Osipowicz, G., Orłowska, J., Kuriga, J. i in. 2022b. Reconstructing prehistoric boats: a report on two experiments carried out during the first International Camp of Experimental Archaeology, Toruń 2021, (w:) M. Mărgărit, A. Boroneanț (red.), *Recreating artefacts and ancient skills: from experiment to interpretation*. Targoviste, 43–62.

Peltier, A. 1986. Étude expérimentale des surfaces osseuses façonnées et utilisées. *Bulletin de la Société Préhistorique Française* 83(1): 5–7.

Peltier, A., Plisson, H. 1986. Micro-tracéologie fonctionnelle sur l'os, quelques résultats expérimentaux, (w:) E. Aguirre, M.-H. Patou (red.), *Outillage peu élaboré en os et en bois de cervidé*. Treignes, 69–80.

Piličiauskas G., Piličiauskienė G., Jankauskas, R., Dupras, T. 2017. Reconstructing Subneolithic and Neolithic diets of the inhabitants of the SE Baltic coast (3100–2500cal BC) using stable isotope analysis. *Archaeological and Anthropological Sciences* 9 (7): 1421–143.

Piličiauskas, G., Matiukas, A., Peseckas, K., Mažeika, J., Osipowicz, G., Piličiauskienė, G., Rannamäe, E., Pranckėnaitė, E., Vengalis, R., Pilkauskas, M. 2020. Fishing history of the East Baltic during the Holocene according to underwater multiperiod riverine site Kaltanėnai, northeastern Lithuania. *Archaeological and Anthropological Sciences* 12 (12): 279 (2020).

Płonka, T. 2003. *The Portable Art of Mesolithic Europe*. Wrocław.

Płonka, T. 2012. *Kultura symboliczna społeczeństw łowiecko-zbierackich środkowej Europy u schyłku paleolitu*. Wrocław.

Płonka, T., 2019. Human representations in the Late Palaeolithic and Mesolithic art of north-western Europe. *Quaternary International* 573: 92–103.

Płonka, T., Kowalski, K. (red.), 2017. *Rusinowo. The Symbolic Culture of Foragers in the Late Palaeolithic and the Early Mesolithic*. Wrocław.

Pratsch, S. 2006. *Mesolithische Geweihgeräte im Jungmoränengebiet zwischen Elbe und Neman. in Beitrag zur* Ökologie *und* Ökonomie *mesolithischer Wildbeuter*, *Studien zur Archäologie Europas 2*. Bonn.

Riddler, I. (red.) 2003. *Materials of Manufacture: The Choice of Materials in the Working of Bone and Antler in Northern and Central Europe During the First Millennium AD*. Oxford.

Rimantienė, R., 2005. *Die Steinzeitfischer an der Ostseelagune in Litauen.* Vilnius.

Runnings, A, Gustafson, C., Bentley, D. 1989. Use-wear on bone tools: a technique for study under the scanning electron microscope, (w:) R. Bonnichsen, M. Sorg (red.), *Bone Modification*. Maine, 259–266.

Russell, N. 2001a. Neolithic Relations of Production: Insights from the Bone Tool Industry, (w:) A. Choyke, L. Bartosiewicz (red.), *Crafting Bone: skeletal technologies through time and space: proceedings of the 2nd Meeting of the (ICAZ) Worked Bone Research Group: Budapest, 31 August – 5 September 1999*. Oxford, 271–280.

Russell N. 2001b. The Social Life of Bone: A Preliminary Assessment of Bone Tool Manufacture and Discard at Çatal Höyük, (w:) A. Choyke, L. Bartosiewicz (red.), *Crafting Bone: skeletal technologies through time and space: proceedings of the 2nd Meeting of the (ICAZ) Worked Bone Research Group: Budapest, 31 August 5 September 1999*. Oxford, 241–249.

Semenov, S.A. 1957. *Pervobytnaja technika, Materialy i issledovanija po archeologii SSSR 54*. Moskva–Leningrad.

Semenov, S.A. 1964. *Prehistoric technology*. London.

Senyane, L., Bradfield, J., Lotter, M. 2023. An assessment of whether saturated sediment ablation on stationary bone can mimic bone tool use-wear from Earlier Stone Age contexts. *Journal of Archaeological Science: Reports* 49: 104026.

Shipman, P., Rose, J.J. 1988. Bone tools: An experimental Approach, (w:) S.L. Olsen (red.), *Scanning Electron Microscopy in Archaeology*. Oxford, 303–335.

Sidera, I. 1989. *Un complément des données sur les sociétés rubanées: l'industrie osseuse à Cuiry-lès-Chaudarde*. Oxford.

Sidera, I. 1993. *Les assemblages osseux en bassins parisien et rhénan du VIe au IVe millénaire B.C. istoire, techno-économie et culture*. Thèse de doctorat, Université de Paris I. Paris.

Smith, C. 1989. British Antler Mattocks, (w:) C. Bonsall (red.), *The Mesolithic in Europe: papers presented at the third international symposium*. Edinburgh, 272–283.

Stelmasiak-Majorek, M. K. 2023. *Funkcje przedmiotów z kości i poroża w typie kolców, igieł, stilusów w świetle badań traseologicznych oraz eksperymentalnych. Analiza materiałów archeologicznych z grodów centralnych wczesnośredniowiecznej Wielkopolski*. Poznań (rozprawa doktorska, Wydział Archeologii, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu).Stemp, W.J., Watson, A.S., Evans, A.A. 2015. Surface analysis of stone and bone tools. *Surface Topography, Metrology and Properties* 4(1): 013001.

Stordeur-Yedid, D. 1974. Objets dentés en os de Mureybet (Djezireh, Syrie) des phases IB à III: 8 400 à 7 600 BC. *Paléorient* 2/2: 437–442.

Sulgostowska, Z. 2012. Paleolityczne (?) i mezolityczne wytwory z kości i poroża ocalone z dawnej kolekcji starożytności pomorskich w aspekcie technologiczno-surowcowym, użytkowym i symbolicznym, (w:) K. Kowalski, D. Kozłowska-Skoczka (red.), *Zaginione-Ocalone: Szczecińska kolekcja starożytności pomorskich*. Szczecin, 47–69.

Sulgostowska, Z., Hoffmann M.J. 1993. Kościane ostrze mezolityczne z wkładkami krzemiennymi z Tłokowa, woj. olsztyńskie – aspekt technologiczny. *Archeologia Polski* 38 (1): 75–88.

Targowski, P., Iwanicka, M., 2012. Optical Coherence Tomography: its role in the noninvasive structural examination and conservation of cultural heritage objects—a review. *Appl. Phys. A* 106: 265–277.

Tixier, J., Inizian, M.-L. Roche, H. 1980. *Préhistoire de la pierre taillé, 1. Terminologie et technologie*. Antibes.

Treuillot, J. 2016. À l'*Est quoi de nouveau? L'exploitation technique de l'élan en Russie centrale au cours de la transition entre pêcheurs-chasseurs-cueilleurs sans céramique («Mésolithique récent») et avec céramique («Néolithique ancien»).* Thèse de doctorat soutenue le 2 décembre 2016 à l'Université Paris 1-Panthéon-Sorbonne. Paris.

Turner, W. 1889. On some implements of stag's horn associated with whale skeletons found in the Carse of Stirling. *Report on the Meetings of the British Association* 59: 789–791.

Ungar, P. 2004. Dental topography and diets of Australopithecus afarensis and early Homo. *Journal of Human Evolution* 46: 605–622.

Van Gijn, A.L. 1989. *The wear and tear of flint: principles of functional analysis applied to Dutch Neolithic assemblages, Analecta praehistorica Leidensia* 22. Leiden.

Vercoutère, C., Patou-Mathis, M., Giacobini, G. 2007. The importance of the paleontological and taphonomical analyses for the study of bone industries, (w:) G. Gates St-Pierre, R.B. Walker (red.), *Bones as Tools: Current Methods and Interpretations in Worked Bone Studies*. Oxford, 23–34.

Vitezović, S. (red.) 2016. *Close to the bone: current studies in bone technologies*. Belgrad.

Wadley, L., Lombard, M. 2007. Small things in perspective: the contribution of our blind tests to micro-residue studies on archaeological stone tools. *Journal of Archaeological Science* 34: 1001–1010.

Watson, A., Gleason, M. 2016. A comparative assessment of texture analysis techniques applied to bone tool use-wear. *Surface Topography: Metrology and Properties* 4 (2): 024002.

Wild, M., Thurber, B.A., Rhodes, S., Gates St-Pierre, C. (red.) 2021. *Bones at a crossroads. Integrating Worked Bone Research with Archaeometry and Social Zooarchaeology*. Leiden.

Winiarska-Kabacińska, M., 2014a. Wilczyce. A Swan Long Bone with Cut Marks, (w:) R. Schild (red.) *Wilczyce. A late palaeolithic winter hunting camp in southern Poland*. Warszawa, 291–294.

Winiarska-Kabacińska, M., 2014b. Microscopic and Functional Analysis of the Arctic Fox Tooth Pendants/Beads, (w:) R. Schild (red.), *Wilczyce. A late palaeolithic winter hunting camp in southern Poland*. Warszawa, 346–358.

Winiarska-Kabacińska, M., Makowiecki, D. 2004. Analiza technologiczna i funkcjonalna zabytków kościanych z osad ludności kultury pucharów lejkowatych w Pieckach i Bachorach, woj. kujawsko-pomorskie, (w:) J. Bednarczyk, A. Kośko (red.), *Od długiego domu najstarszych rolników do dworu staropolskiego. Wyniki badań archeologicznych na trasach gazociągów Mogilno-Włocławek i Mogilno*. Poznań, 553–565.

Winnicka, K. 2016. More than meets the eye: microscopic and technological studies on Early Bronze Age bone and antler beads from Kichary Nowe, south-eastern Poland, (w:) S. Vitezović (red.), *Close to the bone: current studies in bone technologies*. Belgrad, 376–394.

Winnicka K. 2017. Late Neolithic V-perforated buttons from a female burial in SE Poland – a comprehensive study of raw material, bone technology and use-life. *Analecta Praehistorica Leidensia* 47: 59–73.

Winnicka, K. 2019. Pointed Objects of the Mierzanowice Culture (Early Bronze Age). A Study of Function by Use-Wear Analysis), (w:) G.M. Altamirano, G.E. Alarcón (red.) 2019. *El hueso trabajado en escena*. Cuadernos de Prehistoria y Arqueología de la Universidad de Granada 29, 87–103.

Winnicka, K. 2021. *Early Bronze Age Objects of Personal Use Made of Bone: Their Materiality and Meaning.* Wrocław (rozprawa doktorska, Instytut Archeologii, Uniwersytet Wrocławski).

Winnicka, K., Garbacz-Klempka, A., Gaweł, A., Marszałek, M., Wardas-Lasoń, M., Kowalewska-Marszałek, H. 2020. Archaeometric analysis of two decorated bone pins from Poland reveals Early Bronze Age combination of crafts. *Quaternary International* 569/570: 84–101.

Woodman, P.A. 1989. Review of the Scottish Mesolithic: a plea for normality! *Proceedings of the Society of Antiquaries of Scotland* 119, 1–32.





Traseologia ceramiki

Dagmara Łaciak

WPROWADZENIE

Ceramika, jako dominujący materiał pozyskiwany w trakcie wykopalisk archeologicznych, dla wielu badaczy stanowi kluczowe narzędzie do rozstrzygania złożonych kwestii chronologicznych badanych stanowisk. Naukowcy tradycyjnie skupiali się na badaniu stylu oraz ewolucji form naczyń, aby tworzyć systemy chronologiczne. Wiele prac badawczych koncentrowało się na tworzeniu typologii form, co spowodowało pewną stagnację w badaniach nad ceramiką.

Zastosowanie nowego podejścia w badaniach ceramiki, traktującego wyroby z gliny, jako obiekt posiadający swoją własną biografię, zmieniło postrzeganie materiałów ceramicznych, znacząco poszerzając możliwości interpretacyjne dotyczące społecznych uwarunkowań wytwórczości ceramicznej. Studia nad rozpoznawaniem i identyfikacją śladów powstałych podczas różnych etapów jej „cyklu życia" (produkcja, użytkowanie, deponowanie) wykorzystują szerokie spektrum narzędzi analitycznych. Ich podstawą jest teoria oparta na podejściu *chaîne opératoire*, a następnie obserwacje mikrośladów przy zastosowaniu różnych powiększeń. Eksperymenty mają na celu stworzenie materiałów referencyjnych, weryfikujących stawiane hipotezy. Istniejące wyniki badań etnoarcheologicznych są również z powodzeniem włączane w proces interpretacyjny.

Wprowadzenie nowego spojrzenia na ceramikę otworzyło nowe perspektywy badawcze i interpretacyjne, przekształcając studia ceramiczne i wzbogacając nasze rozumienie dawnych społeczeństw. Choć badania te są prowadzone przez niewielu badaczy, ich potencjał powoduje, że stają się głównym trendem w obecnych studiach ceramicznych.

CHARAKTERYSTYKA SPECJALNOŚCI PRZEDMIOT BADAŃ

Traseologia pojmowana szeroko zajmuje się śladami związanymi z technologią wykonania obiektu (patrz Pyżewicz 2021), czyli w wypadku ceramiki będzie to formowanie naczyń oraz ich użytkowanie. Ma to związek ze śladami pozostawionymi przez specyficzne narzędzia lub z powierzchniowymi anomaliami

DOI: 10.64158/2wuinf10tt

spowodowanymi zastosowaniem odpowiedniej techniki. Warto wspomnieć, że istnieje osobna grupa badań koncentrująca się wyłącznie na śladach powstałych w wyniku użytkowania obiektu (ang. *use-wear*), które są powszechnie stosowane w badaniach nad ceramiką.

Studia wykorzystujące analizy śladów rejestrowanych na powierzchniach obiektów czy narzędziach prowadzi się wraz z eksperymentami. Są one bardzo pomocne w interpretacji obserwowanych śladów, które mogły powstać w wyniku czynności formujących, związanych z użytkowaniem, wskutek depozycji czy zabiegów konserwatorskich. Dodatkowych informacji dostarcza również ustalenie wzajemnego stosunku wymienionych aktywności.

Badania śladów prowadzone są na powierzchniach wyrobów ceramicznych zarówno na całych formach, jak i na fragmentach diagnostycznych (Forte 2021: 383). Obserwacje dotyczą różnych etapów życia (tzw. „cyklu życia") związanych z biografią obiektu ceramicznego, począwszy od jego powstania do zdeponowania.

ZASTOSOWANIE W ARCHEOLOGII

Ceramika była i nadal jest obiektem badań typologicznych, formalnych, morfologicznych oraz stylistycznych. Ich celem jest uporządkowanie często ogromnych zbiorów pochodzących z badań archeologicznych, najczęściej naczyń, oraz zakwalifikowanie ich do konkretnego czasu i miejsca. Takie podejście, choć wartościowe jest niepełne i pomija takie zagadnienia jak produkcja naczyń, ich dystrybucja, użytkowanie i deponowanie. Badania śladów poszerzają nasze rozumienie kontekstów społecznych, umożliwiając rekonstrukcję organizacji produkcji ceramicznej. Włączenie analizy traseologicznej do badań interdyscyplinarnych pozwala na bardziej kompleksowe charakteryzowanie materiałów ceramicznych, wychodząc poza tradycyjną klasyfikację typologiczną. Dzięki temu możliwe stało się poszerzenie zakresu pytań badawczych: Jak i z czego wykonano te przedmioty? Jakie narzędzia używano podczas ich formowania? Do czego były używane? Kto się nimi posługiwał? Jaki był poziom umiejętności wytwórców? Jaki status posiadali w społeczeństwie? Skąd znali zastosowaną technikę?

Te zagadnienia stanowią podstawę dla szeroko zakrojonej perspektywy badawczej, dotyczącej umiejętności wymaganych w procesie produkcyjnym, identyfikacji specjalizacji, rzemieślników i ich rzemiosła, a także społecznej wartości produkcji rzemieślniczej. Badania te umożliwiają interpretację zachowań rzemieślników (np. Forte 2021), diety, sposobów konsumpcji w przeszłości oraz charakteryzowanie ludzkich umiejętności i związanej z nimi wiedzy (np. Forte 2019).

PROCEDURA BADAWCZA

Niezmiernie ważne przed przystąpieniem do badań śladów formowania i użytkowania na ceramice jest dokładne zdefiniowanie różnych aspektów technologii i prezentacja metod odpowiadających za identyfikację poszczególnych procedur (patrz Roux 2019). Wymagana jest znajomość rozpoznania poszczególnych etapów z „cyklu życia" należących do rzemiosła garncarskiego. Od tego uzależniony jest dobór materiałów do badań, dostosowanych do późniejszych obserwacji oraz do możliwości i ograniczeń konkretnych technik analitycznych.

Zrozumienie „życia" naczynia wymaga przyjęcia założenia, że ceramika jest efektem wielu czynności, którym była poddawana od początku swojego powstania czyli od wyboru surowca, formowania, użytkowania, kończąc swoją egzystencję na porzuceniu (Rice 1984; Skibo 1992). Z tego powodu przeprowadza się analizę zużycia głównych elementów składowych przedmiotu ceramicznego (w przypadku naczynia będzie to dno, ścianka, wylew).

Technologia to zbiór akcji podyktowanych wyborami wykonującego dany przedmiot, które zależne są od uwarunkowań społecznych i kulturowych. Z „cyklu życia" obserwowalne ślady należą do etapu formowania i użytkowania. Procesy zachodzące w trakcie długotrwałego przebywania ceramiki w wodzie czy ziemi mogą przekształcić powierzchnie oraz znacząco wpłynąć na skład chemiczny wyrobów z gliny (Daszkiewicz 2014: 178). Są one przyczyną deformacji pierwotnych śladów powstałych we wcześniejszych etapach. Procesy zachodzące podczas depozycji artefaktów oraz w trakcie prowadzenia i po zakończeniu wykopalisk są najmniej zbadanym zagadnieniem, a dotychczasowe badania dotyczyły modyfikacji powierzchni ceramiki pod wpływem działania wody oraz deptania i obracania fragmentów naczyń w różnych osadach stanowisk archeologicznych (patrz van Gijn *i in.,* 2019).

Studia traseologiczne skupiają się na śladach zostawionych przez narzędzia lub na anomaliach obecnych na powierzchni ceramiki, spowodowanych przez zaaplikowanie konkretnej techniki. Naukowcy opracowali metody oraz opis konkretnych kryteriów opartych na opracowaniach technologii ceramicznej, polegającej na rekonstrukcji sekwencji produkcyjnej, którymi

należy się kierować w opisie śladów technologicznych (np. Michelaki 2008; Ard 2013; Lepère 2014; Forte *i in.,* 2018; Forte 2019; Roux 2019). Produkcja ceramiczna składała się z następujących po sobie etapów, które należy zidentyfikować i odtworzyć: zdobywanie surowców, przygotowanie surowca, przygotowanie masy ceramicznej, formowanie, suszenie, wypalanie, obróbka po wypaleniu. Garncarz miał wpływ na każdy z wymienionych etapów, dlatego też łańcuch operacyjny jest niezwykle istotny przy interpretacji aspektów społecznych w produkcji ceramiki.

HISTORIA BADAŃ

Początki badań nad ceramiką wiążą się ze zwróceniem uwagi na zalegające w ziemi całe naczynia, które dostrzeżone zostały ze względu na swoje wartości estetyczne. Pierwsza publikacja datowana jest na XV w., kiedy to prehistoryczne naczynia pochodzące z Stockerau określono jako „magiczne gliniane naczynia" rosnące w ziemi lub wytworzone przez gnomy (Orton i Hughes 2013: 5).

Nie był to pogląd odosobniony, gdyż Jan Długosz wymieniając cudowności polskiej krainy wskazuje „... że na polach ... rodzą się w łonie ziemi garnki" (Długosz 2009). W późniejszym czasie, tj. od XVIII w. naczynia pochodzące z wykopalisk prowadzanych przede wszystkim na terenie Grecji czy Włoch, stawały się cennymi przedmiotami kolekcjonerskimi oraz podstawą zbiorów muzealnych. Wiek XIX to czas pojawienia się coraz większej ilości glinianych przedmiotów pochodzących z odkryć prowadzonych na terenie Francji, Niemiec i Wielkiej Brytanii. Zaistniała, więc potrzeba ich klasyfikacji, co rozpoczęło długą historię studiów nad typologią ceramiki. Spowodowało to traktowanie nie tylko naczyń ale ich fragmentów jako wyznaczników chronologii względnej (Orton i Hughes 2013: 5-23).

Rozwój nauki przyczynił się również do szybkiego rozwoju archeologii. Dostrzeżony został potencjał, jaki daje badanie ceramiki archeologicznej. Było to przyczyną do nadania pewnej autonomii procesowi badawczemu tej kategorii zabytku, co znalazło odzwierciedlenie w wyodrębnieniu się terminu ceramologia dotyczącego studiów nad artefaktami ceramicznymi, surowcem, technologią i organizacją rzemiosła oraz użytkowaniem produktów (Skibo 2013). Ceramologia stała się, więc dyscypliną pomocniczą archeologii, mającą na celu systematyczną eksplorację danych zawartych w dokumentach ceramicznych (Buko 1990, 2008, tam dalsza literatura). Powstają, więc laboratoria zajmujące się metodami badań ceramiki pochodzącej z wykopalisk (m.in. w Lyonie, Caen czy Geniu), tworzone są międzynarodowe inicjatywy skupiające zainteresowanych służące wymienianiu wiedzy i doświadczeń, jak np. Medieval Pottery Research Group. Był to również początek angażowania w studiach nad ceramiką wielu metod badawczych innych dyscyplin: geologii, fizyki, chemii, matematyki, etnologii itd. (Buko 1998; Orton i Hughes 2013).

Zwrócenie się w ostatnich 20 latach w kierunku badań traseologicznych w studiach ceramicznych było możliwe dzięki wprowadzeniu koncepcji *chaîne opératoire*, co spowodowało zainteresowanie procesem technologicznym, związanym z wytwarzaniem i użytkowaniem przedmiotów. Każdy bowiem obiekt kultury materialnej (w tym ceramika) posiada swoją biografię, która jest analogiczna do biografii człowieka (Kopytoff 1986). Jest, więc jak człowiek, efektem wielu interakcji zachodzących między sobą. Dzięki akceptacji biograficznego podejścia, traktującego rzeczy jako posiadające kolejne, następujące po sobie etapy życia możliwe było analizowanie relacji, jakie zachodzą między ludźmi a rzeczami (Schiffer 1972). Przyniosło to inne możliwości interpretacyjne niż tradycyjne podejście kulturowo-historyczne. W miarę upływu czasu powstawało i powstaje wiele prac, w których bierze się pod uwagę właściwości materiału, a powstający artefakt traktowany jest jako wynik wielu interakcji. Doprowadziło to do opracowania i zaangażowania wielu nowych metod naukowych, również analizy traseologicznej, które w nowy sposób służą badaniu i interpretacji zabytków.

Pionierskie studia nad śladami użytkowania ceramiki zostały poczynione w latach 90. XX wieku (Skibo 1992), stając się inspiracją dla późniejszych analiz. Początkowo wykazano, że fragmenty naczyń ceramicznych były używane jako narzędzia, głównie do produkcji ceramiki (López Varela *i in.,* 2002; van Gijn i Hofman 2008; Vieugué 2015).

Badania etnograficzne i etnoarcheologiczne ceramiki skłoniły kilku badaczy do analiz modyfikacji powierzchni kompletnych naczyń, które były wynikiem użytkowania (Arthur 2002; Skibo 2015). Obejmowały one obserwacje śladów związanych z obecnością sadzy, karbonizacji (zwęglone osady) na naczyniach kuchennych (Skibo 2013: 1-25), fermentacji produktów mlecznych i alkoholowych (Arthur 2003; Vuković 2009) oraz ścierania powierzchni w wyniku różnych procesów, które miały miejsce podczas historii życia naczynia (van Gijn *i in.,* 2019: 80).

W Polsce na ślady związane z technikami formowania naczyń zaczął zwracać uwagę W. Hołubowicz

w latach 30. XX wieku (Hołubowicz 1938). W jego ogromnym dorobku można dostrzec uwagę jaką poświęcał technikom formowania i obserwacjom śladów na naczyniach, zarówno etnograficznych, archeologicznych jak i pochodzących z własnych eksperymentów (Hołubowicz 1947, 1950, 1965). Jego prace stanowią źródło inspiracji dla wielu archeologów, a P. Szymański (2024) wykorzystał zaobserwowane przez Hołubowicza zjawisko pękania naczyń w miejscach łączenia kawałków gliny (wałki, taśmy, płaty) do analizy materiałów należących do kręgu kultur zachodniobałtyjskich. Kształty spękań, głębokość oraz wzajemna relacja dostarczyły wielu nowych informacji o sposobach formowania, umiejętnościach wytwórcy, etapach pracy nad stworzeniem konkretnego kształtu. Przyczyniło się to do stwierdzenia, że naczynia późnorzymskie, jak i te pochodzące z okresu wędrówek ludów, wykonane były podobną techniką,

Po raz pierwszy podejście traseologiczne zastało zastosowane względem materiałów kultury ceramiki wstęgowej rytej, pochodzącej z Polski w celu zidentyfikowania i rozróżnienia grup jej producentów (Pyzel i Gomart 2023). Rozpoznanie różnych śladów związanych z formowaniem przemawia wg autorek za obecnością różnych grup społecznych.

Nowych informacji dostarczyły badania mikroskopowe prowadzone na ceramice pokrytej odciskami tekstylnymi. Analiza naczyń kultury trypolskiej (Skrzyniecka 2020; Rud i in., 2023), doprowadziła nie tylko do zrekonstruowania włókien, ale również wykrycia wykorzystywania tekstyliów w produkcji ceramiki. Mianowicie w trakcie nadawania kształtu przede wszystkim dyskoidalnej podstawy części dolnej naczynia, tekstylia służyły jako obrotowe podstawki. Natomiast ślady tkanin wewnątrz mogą przemawiać za używaniem materiału jako wspomagania przy scalaniu kolejnych elementów gliny. Podobne spostrzeżenia przyniosły analizy odcisków tekstylnych prowadzone na materiałach ze środkowej i późnej epoki brązu ze stanowiska Szczepidło. Zauważono również, że w przypadku zwłaszcza dużych naczyń odciski tekstylne przez swoje nierówne krawędzie były lekko chropowate, przez co mogły zapewniać większą przyczepność do dłoni jego użytkownika. Kolejne spostrzeżenie to, że wzory tekstylne na powierzchniach naczyń można interpretować w kategoriach skeuomorfów, co oznacza, że ornament lub przedmiot wykonany z jednego materiału ma imitować inny materiał (Skrzyniecka i in., 2022: 244). Wszystkie wymienione studia, wskazują na powiązania technologi wytwarzania tekstyliów i ceramiki oraz na interakcje między grupami społecznymi pochodzącymi z różnych terytoriów. .

Podejście traseologiczne zostało uwzględnione w programach instytucji powołanych specjalnie w celu rozwoju studiów nad ceramiką. W 1961 roku na Wydziale Archeologii Uniwersytetu w Lejdzie zostało założone laboratorium dedykowanego ceramice (the Ceramic Laboratory of the Faculty of Archaeology at Leiden University, obecnie Laboratory for Material Culture Studies). Powstało ono specjalnie dla poznawania technologii garncarskiej, wykorzystując badania eksperymentalne, mikroskopowe struktury ceramiki (ang. *fabric analysis*) oraz śladów produkcyjnych, sposobów wykończenia powierzchni oraz metod wypalania ceramiki. Wyniki prowadzonych badań są następnie sprawdzane poprzez wytwarzanie naczyń przy użyciu podobnej gliny, tych samych sposobów formowania, wykańczania i wypalania (van Gijn *i in.*, 2019: 79). Kolejna instytucja powstała w 1963 roku jako Laboratorium Historii Ceramiki działające przy Instytucie Archeologii Rosyjskiej Akademii Nauk, realizuje program opracowywania nowych metod studiowania ceramiki jako źródła historycznego. Przez lata istnienia, laboratorium zgromadziło unikalną bazę źródłową w postaci źródeł etnograficznych dotyczących ceramiki pochodzącej z Europy Wschodniej, Azji Środkowej, Kaukazu i Bliskiego Wschodu, referencyjny zbiór próbek eksperymentalnych określających główne techniki produkcji ceramicznej, kolekcję surowców ceramicznych z różnymi domieszkami, ze śladami po różnych narzędziach, obróbkach powierzchni czy wypalania, porównawczy zbiór ceramiki starożytnej z Euroazji, Afryki i Ameryki. Powstało wiele publikacji, spośród których wyróżniają się prace długoletniego kierownika laboratorium Aleksandra A. Bobrinskiego szczególnie o metodach i etapach formowania naczyń w starożytności, czego dokonał na podstawie analizy ogromnego zbioru materiałów (Bobrinsky 1978).

ARCHEOLOGIA EKSPERYMENTALNA I ETNOARCHOLOGIA

Kluczowe w procesie badawczym bazującym na podejściu technologicznym jest łączenie analizy śladów z archeologią eksperymentalną. Ceramika jest prawdopodobnie jeszcze bardziej różnorodna pod względem właściwości fizycznych i chemicznych od surowca kamiennego, ze względu na zróżnicowanie w składzie gliny, materiałów schudzających masę ceramiczną, temperaturę wypalania itd., z których wszystkie mają

znaczny wpływ na rozwój i charakter śladów. Dlatego też każdy zbiór ceramiczny poddawany rozważaniom wymaga osobnego podejścia i przeprowadzenia wielu eksperymentów w celu pozyskania przekonywujących analogii między śladami obserwowanymi na ceramice eksperymentalnej i archeologicznej (van Gijn *i in.,* 2019; Roux 2019). W tym celu tworzony jest specjalny protokół zgodnie z pytaniami badawczymi stawianymi w konkretnym opracowaniu. Udane zastosowanie eksperymentu w archeologii uzależnione jest od konstrukcji owego protokołu, reprodukującego określone dla danego czasu i miejsca warunki, takie jak: selekcja surowca, odpowiednie narzędzia, zastosowanie konkretnych technik.

Eksperymenty polegają na wytworzeniu pożądanych replik, czyli prowadzą do stworzenia materiałów referencyjnych. Powstające kopie mają na celu jak najwierniejsze odtworzenie warunków i cech technologicznych, które będą później porównane z oryginalnymi materiałami archeologicznymi. Zdecydowanie najlepszym rozwiązaniem jest wykonanie ich samodzielnie przez naukowców prowadzących badania, co pozwala na pełniejsze zrozumienie możliwości powstania i charakterystyki tworzących się śladów.

W badaniach korelacji między społecznościami a wytwórczością ceramiczną wykorzystywane są również dane pozyskane dzięki studiom etnoarcheologicznym, które prowadzone są od lat 70. XX wieku (np. Arnold 1978; David i Hennig 1972; DeBoer 1974; Kramer 1985) i z powodzeniem kontynuowane (np. Arthur 2003; Beck i Hill 2004, 2007; Frink i Harry 2008; Harry *i in.,* 2009). Służą one do tworzenia modeli wytwórczości garncarskiej, użytkowania i pozbywa się naczyń w celu dostarczenia naukowcom wzorców relacji między ceramiką, jej wytwórcami oraz użytkownikami (Skibo 2013: 6).

SELEKCJA PRÓBEK

Badania należy rozpocząć od sformułowania pytań badawczych, które wstępnie określą problematykę, ponieważ to one będą determinować dobór technik analitycznych zastosowanych do wybranych materiałów. Ceramika to bardzo często materiał masowy, którego analiza przynosi najlepsze rezultaty gdy jest dobrze określony pod względem chronologii oraz kontekstu odkrycia. Dobrze opisany i zdefiniowany zbiór ułatwia proces interpretacji. Obserwacje prowadzone są bezpośrednio na badanych fragmentach ceramiki czy całych naczyniach, bez konieczności specjalnego przygotowania np. pobierania próbek czy tworzenia preparatów mikroskopowych.

Do analiz wybiera się zarówno całe naczynia, jak i ich fragmenty, które wykazują cechy diagnostyczne umożliwiające przyporządkować je do konkretnej części naczynia. Materiały pochodzące bezpośrednio z badań wykopaliskowych należy oczyścić z ziemi i piasku, a następnie wysuszyć. Dalsze czyszczenie, szczególnie tradycyjne mycie szorstkimi szczotkami może doprowadzić do powstawania nowych śladów czy usunięcia chociażby warstwy inkrustacji czy malowania. Jest to szczególnie istotna uwaga dla ceramiki pradziejowej, nie szkliwionej, wypalanej w niskich temperaturach, która ulega szybszej degradacji zalegając w ziemi lub przebywając w wodzie.

Fragmenty oraz całe naczynia poddawane są ocenie makroskopowej oraz mikroskopowej. Po dokonaniu wstępnych obserwacji bez użycia powiększeń, można wyselekcjonować interesujące materiały do dalszych badań z użyciem mikroskopu, stosując różne zakresy powiększeń. Do analiz zazwyczaj wykorzystywane są mikroskopy cyfrowe (np. Dinolite) czy stereoskopowe o powiększeniach rzędu 0,75x - 75x (np. Nikon SMZ-U zdolny do 75x powiększenia, np. Forte 2012; Gawron-Szymczyk *i in.*, 2020).

Dotychczas najliczniejsze dane w dziedzinie technologii ceramicznej zostały opublikowane przez V. Roux (2019, tam dalsza literatura). Zestaw cech diagnostycznych należący do różnych technik został wyselekcjonowany po zanalizowaniu mechanicznych deformacji i transformacji surowca ceramicznego, obserwowanych na obiektach etnograficznych i eksperymentatorskich. Korespondują one z rezultatami opublikowanych, najważniejszych studiów ceramicznych. W opisywaniu obserwowanych cech brana była pod uwagę siła zaaplikowana w masę ceramiczną oraz narzędzia i gesty, wpływające na warstwy powierzchniowe. Zarejestrowane zostały, następujące parametry widoczne na powierzchniach: relief, typ pęknięcia, kolor przekroju promienistego (czyli powierzchnia zewnętrzna i wewnętrzna oraz środek naczynia) oraz stopień twardości. Lista cech diagnostycznych poszczególnych etapów związanych z powstawaniem, użytkowaniem i deponowaniem ceramiki nie jest zamknięta i jest stale tworzona w wyniku rozwijających się studiów traseologicznych nad ceramiką. Najbardziej zaawansowane badania dotyczą czynności formujących, dlatego też są one najlepiej udokumentowane w postaci publikacji.

Dalsze czynności dotyczą zapisania i opisania zauważonych śladów w bazie danych zgodnie z obiektywnymi parametrami, opracowanymi specjalnie dla



Ryc. 1. Przykłady naczyń „grafitowanych": a - cała powierzchnia zewnętrzna i wewnętrzna (Łazy 1, powiat wołowski, grób 8/97, naczynie 22); b - powierzchnia z widoczną plamą naturalnej warstwy naczynia (Domasław 10/11/12, powiat wrocławski, grób 5970, naczynie 4); c - jedynie pasek przy krawędzi, granicę wskazują strzałki (Domasław 10/11/12, powiat wrocławski, grób 3797, naczynie 30). Na podstawie Łaciak 2023, ryc. 1a, 2b, 2c

konkretnego zbioru ceramicznego. Niezwykle ważna jest dokumentacja fotograficzna obserwowanych śladów, gdyż jest to wizualny dowód ich obecności. Szczególnie obiekty i dokumentowane fragmenty o dużych krzywiznach mogą w obrazie mikroskopowym posiadać partie nieostre. Należy, więc wykonać zdjęcia, które ukazują w sposób jasny i komunikatywny szczegół, na który chcemy zwrócić uwagę. Można wykonać poprawę wizualizacji śladów stosując kompilację zdjęć (ang. *stacking*) czyli zdjęcia kompozytowe, których rezultatem jest zdjęcie o wysokiej rozdzielczości i znacznej głębi ostrości (van Gijn 2014: 168). W publikacjach wyników badań czy tworzonych referencyjnych bazach danych, można posłużyć się dodatkowo strzałkami wskazującymi szczegóły (patrz ryc. 5b).

PRZYKŁADOWE ANALIZY

Potencjał, jaki niesie za sobą analiza śladów w badaniach ceramicznych jest ogromny jednak w polskiej archeologii metody te z różnych powodów są nadal rzadko stosowane. Poniżej zostaną przedstawione nieliczne publikowane przykłady badań z terenu Polski, w których zastosowano analizę śladów na ceramice.

Czarne powierzchnie naczyń

Naczynia ceramiczne o czarnej, ciemnoszarej barwie powierzchni od dawna znajdują się w polu zainteresowań wielu badaczy (np. Hołubowicz 1948, 1950; Malinowski 1963; Gedl 1973; Kreiter *i in.,* 2014; Borowski 2017). Odnajdywane na stanowiskach archeologicznych uważane są za przedmioty prestiżowe o wysokiej wartości dla społeczności, które zamieszkiwały znaczne połacie Europy pod koniec epoki brązu i na początku epoki żelaza. W tym okresie czasu dochodziło do poważnych zmian społecznych i kulturowych, a pojawienie się tych naczyń na stanowiskach archeologicznych uważane jest za materialny dowód owych przemian.

Subiektywne obserwacje makroskopowe prowadzone przez archeologów doprowadziły do wyodrębnienia dużego zbioru ceramiki tzw. grafitowanej, obecnej w prawie każdym zespole archeologicznym datowanym na późną epokę brązu i wczesną epokę żelaza. Powstała hipoteza sugerująca, że użytkowanie grafitu w procesie obróbki powierzchni prowadziło do powstania charakterystycznego ciemnoszarego zabarwienia, któremu towarzyszył połysk. Mogło to być związane z importem tego minerału z odległych



Ryc. 2. Naczynia (a i b) powstałe podczas wypalania w piecu jamowym (c). Na podstawie Łaciak 2023, ryc. 8a, 8b, 9, 4a, 4b, 4c

obszarów, wynik dalekosiężnej wymiany handlowej, w przypadku braku miejscowych wychodni. Inna mniej popularna hipoteza wskazuje na możliwość powstawania takiej powierzchni naczynia przez odpowiednią obróbkę (polerowanie) i wypał w atmosferze redukcyjnej.

W celu wyjaśnienia sposobu powstawania powierzchni tzw. grafitowanych na tych naczynia przeprowadzono eksperymenty oraz zaangażowano analizy archeometryczne, chcąc sprawdzić obie hipotezy (Łaciak *i in.*, 2019; Łaciak 2023).

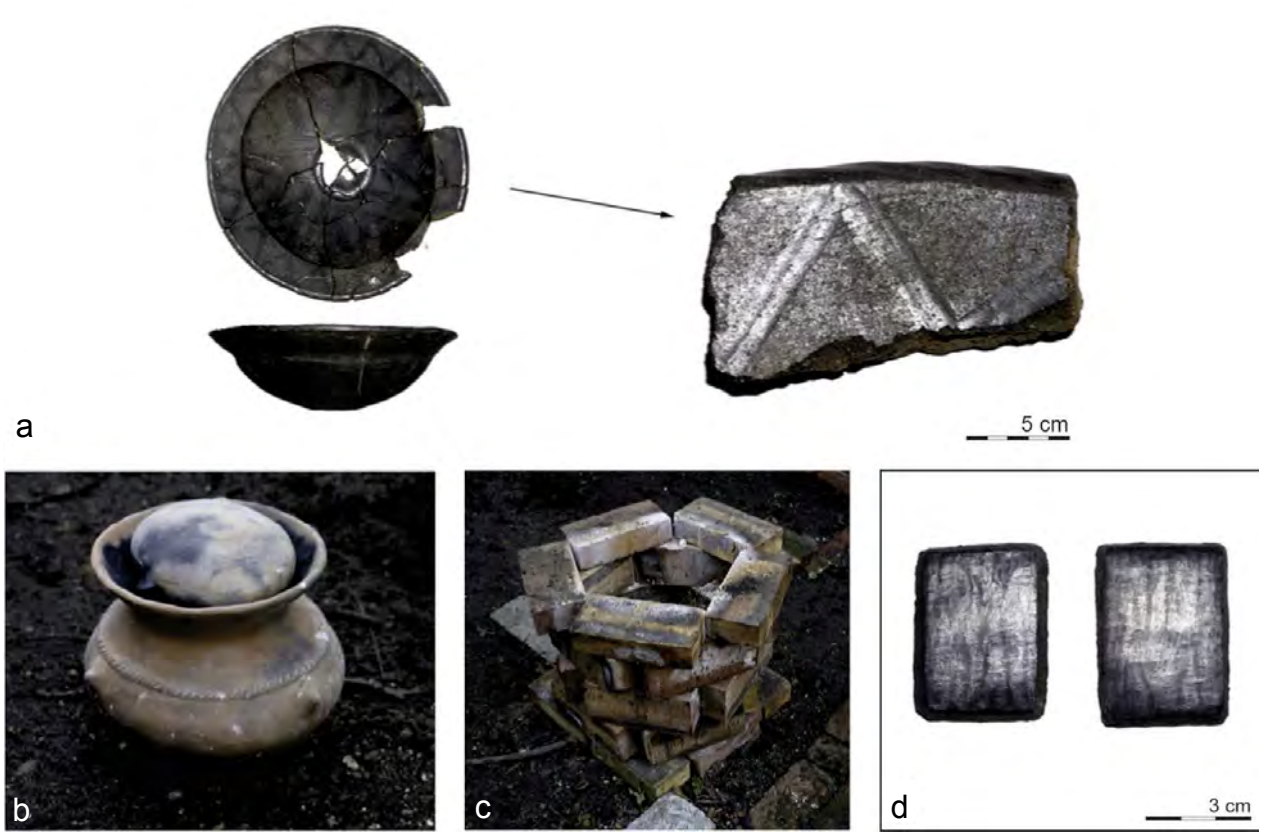
Wykorzystanie archeologii eksperymentalnej (Łaciak 2023) polegało na wytworzeniu replik naczyń o ciemnej, polerowanej powierzchni, wzorując się na egzemplarzach pochodzących z późnej epoki brązu i wczesnej epoki żelaza z południowej Polski (ryc. 1). Naczynia zostały wykonane stosując technikę łączenia taśm i wyklepania powierzchni drewnianą szpatułką w celu nadania ostatecznego kształtu. Następnie były wygładzane i polerowane od strony zewnętrznej rękami i kamiennym otoczakiem. Wypał został wykonany w atmosferze redukcyjnej w 2 rodzajach pieców jednokomorowych: jamowym (ryc. 2c) oraz jamowym przykrytym kopułą (ryc. 3b). Otrzymane powierzchnie na naczyniach okazały się być bardzo zbliżone do oryginałów (ryc. 2a, b; 3a). Ceramika ta



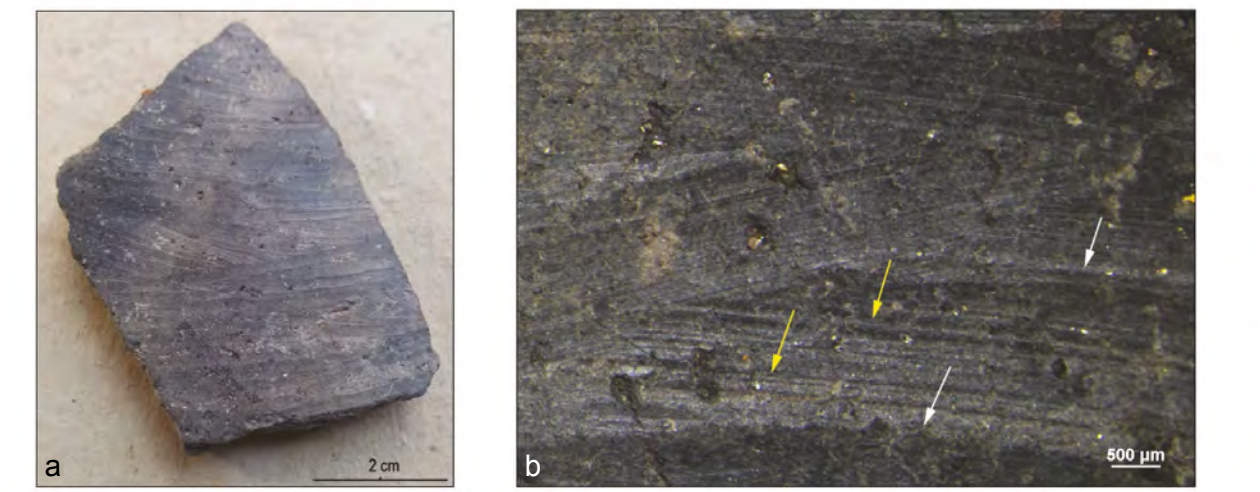
Ryc. 3. Naczynia (a) powstałe podczas wypalania w piecu jamowym przykrytym kopułą (b). Na podstawie Łaciak 2023, ryc. 5a, 5b, 6a, 6b, 10a, 10b

została również wykorzystana w dalszych analizach, jako dopełnienie procesu badawczego zmierzającego do identyfikacji grafitu.

Naczynia oraz ich powierzchnie poddano analizie petrograficznej z wykorzystaniem mikroskopii skaningowej (SEM-EDS) oraz ramanowskiej (Łaciak *i in.,* 2019). Wymienione analizy zostały zastosowane względem naczyń powstałych w wyniku eksperymentalnego procesu produkcji ceramiki bez wcierania grafitu (ryc. 2a, b, 3a), naczyń rozpoznanych przez archeologów po cechach makroskopowych jako ceramika „grafitowana" (neolit, późna epoka brązu i wczesna

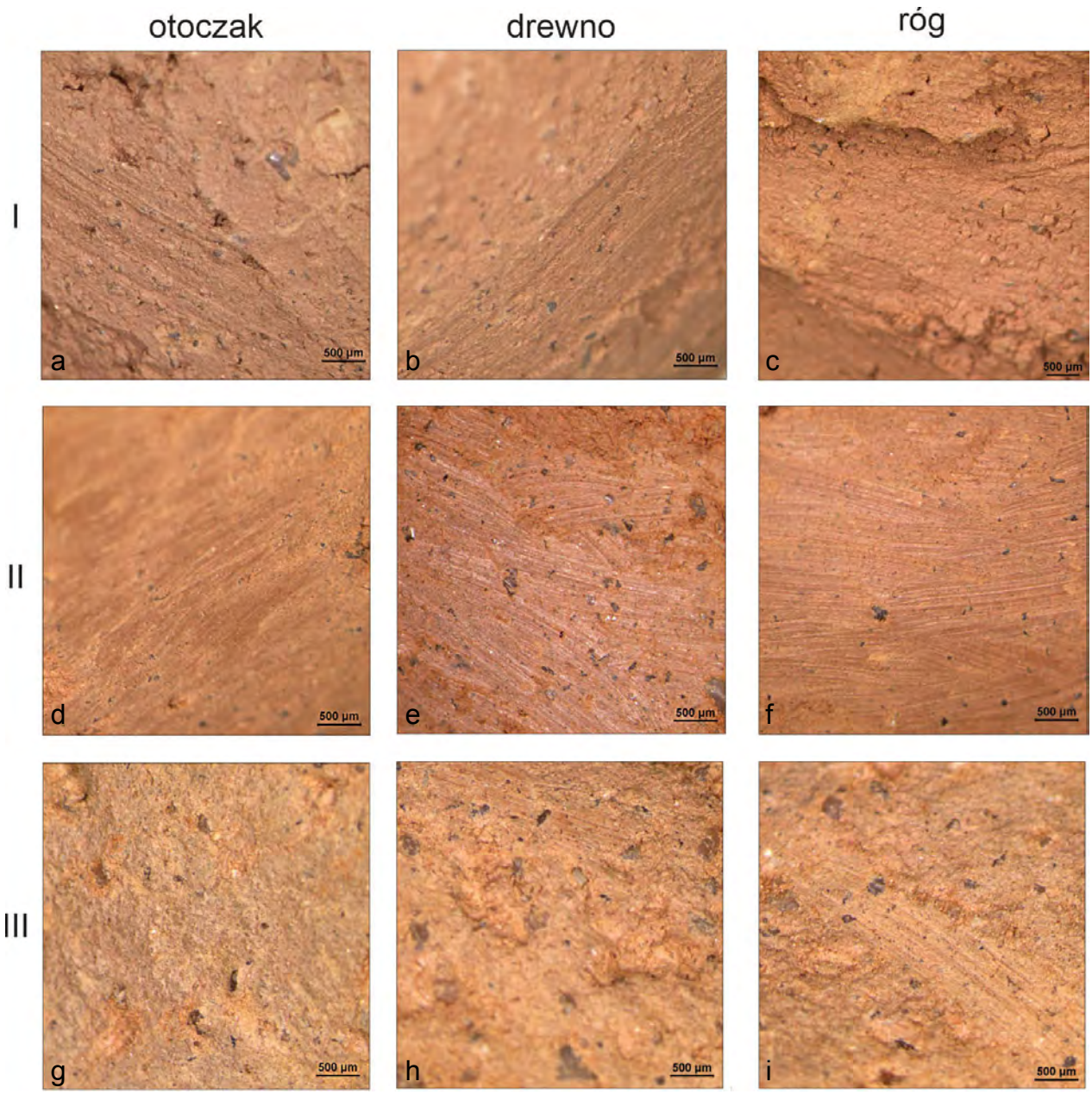


Ryc. 4. Ceramika archeologiczna (a) oraz proces wytwarzania (b, c) ceramicznych płytek pokrytych grafitem (d), poddanych badaniom archeometrycznym. Na podstawie Łaciak i in., 2019, ryc. 2c , 3c, d, e.



Ryc. 5. Obraz makroskopowy (a) i mikroskopowy (b) zarejestrowany na powierzchni naczynia z wczesnej epoki brązu z Radłowic (próbka Ra-06-E). Białe strzałki wskazują na krawędzie pasma (wypustki), żółte na linie wewnątrz pasma. Za Gawron i in., 2020, ryc. 3

epoka żelaza, ryc. 4a) oraz próbek ceramicznych, w które wtarto mineralny grafit i wypalono w atmosferze redukcyjnej (ryc. 4b, c, d). Porównanie wyników analiz względem wszystkich materiałów, pozwoliło na rozpoznanie mineralnego grafitu i rozróżnienie czarnych, lśniących powierzchni ceramicznych. Stwierdzono, że

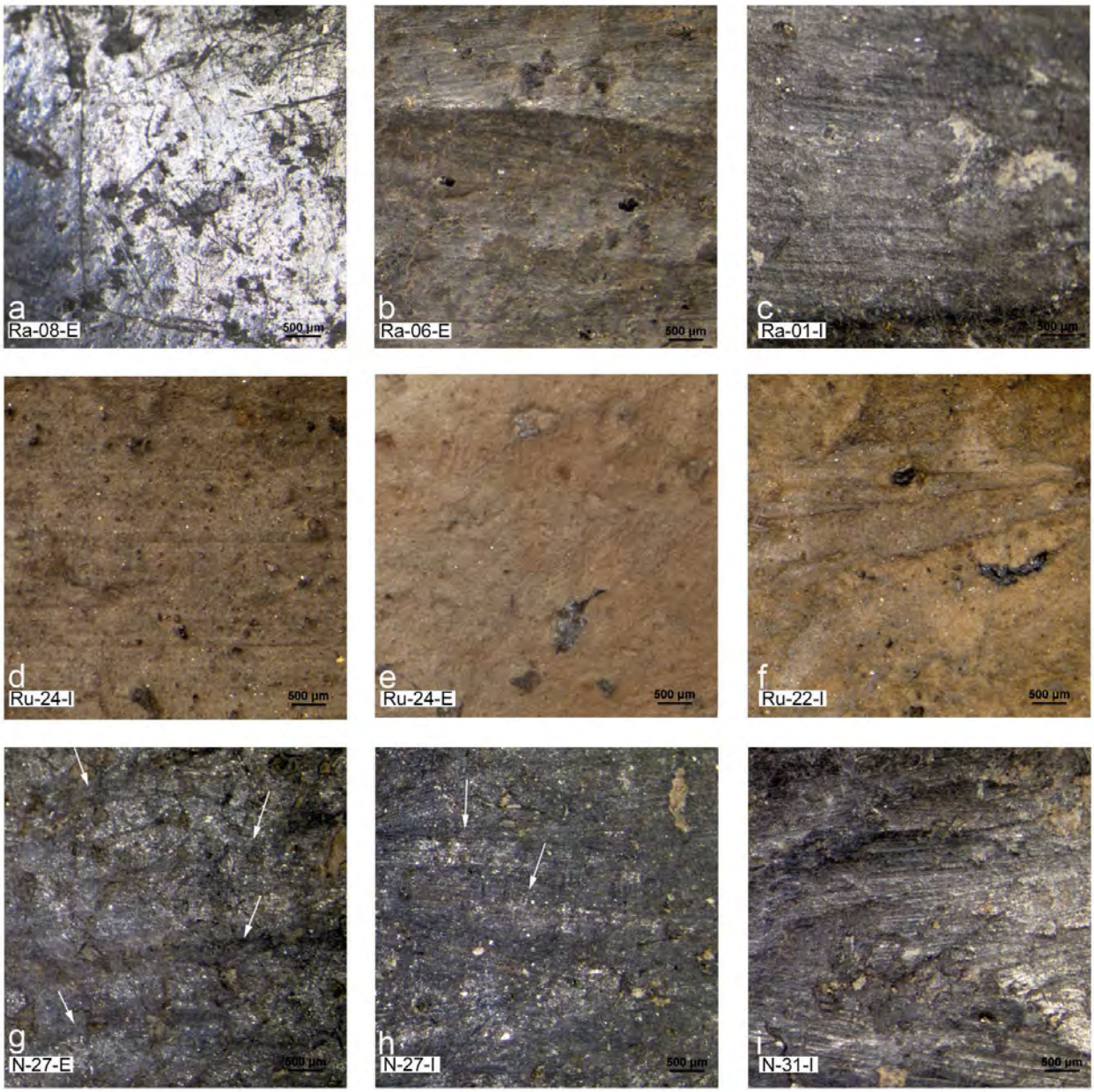


Ryc. 6. Ślady narzędzi na ceramice eksperymentalnej, w zależności od czasu wysychania (grupy I-III). Za Gawron i in., 2020, ryc. 4

nie można na podstawie jedynie obserwacji makroskopowych rozstrzygnąć w jaki sposób powstało charakterystyczne zabarwienie oraz jak wyglądał proces jego wytworzenia, a przez to nadawać termin ceramika grafitowana każdemu naczyniu o ciemnej powierzchni, gdyż jest to mylące. Niezbędne jest wykonanie wymienionych analiz archeometrycznych, gdyż tylko one są w stanie zidentyfikować grafit na powierzchni naczyń w jego formie mineralnej.

Gładzenie, wyświecanie, polerowanie ceramiki

W wytwórczości ceramicznej wszystkich społeczności oraz na każdym obszarze obserwuje się ceramikę o powierzchniach gładzonych, wyświecanych czy polerowanych. Wymienione sposoby opracowania powierzchni różnią się między sobą. Widoczne jest to zarówno na poziomie obserwacji makro-, jak i mikroskopowych (np. Ionescu *i in.*, 2015). W celu zidentyfikowania narzędzi, które były wykorzystywane do gładzenia (ang.



Ryc. 7. Ceramika pochodząca z osad: Radłowice (a, b, c), Ruszowice (d, e, f), Wrocław ulica Niemczańska (g, h, i); Widoczne ślady narzędzi: a – polerowanie (brak zaobserwowanych śladów), b, d, e, g, h – otoczak, c, i – drewno, f – poroże. Białe strzałki wskazują na podobne ślady użycia otoczaka. Za Gawron i in., 2020, ryc. 6

smoothing), wygładzenia (ang. *burnishing*) oraz polerowania (ang. *polishing*) powierzchni naczyń, wykonano badania śladów na naczyniach pochodzących z epoki brązu (Gawron-Szymczyk *i in.*, 2020), oraz na stworzonych dzięki eksperymentom replikach.

Punktem wyjścia do tych rozważań było stwierdzenie M. Mogielnickiej-Urban (1984: 104), że naczynia kultury łużyckiej były wygładzane najpierw rękami, a następnie twardym narzędziem na mokrej i suchej powierzchni. Hipoteza ta oparta była na danych etnograficznych, a jej słuszność nie została sprawdzona współcześnie.

Zastosowane metody analizy śladów, rozpoczęło wyjaśnienie procesu obróbki powierzchni ceramicznej. Wyróżnione cechy były obserwowane makroskopowo i mikroskopowo na ceramice archeologicznej (Fig. 5a, b) przy użyciu mikroskopu stereoskopowego, stosując powiększenie 6,4-10x. W celu weryfikacji spostrzeżeń pochodzących z powyższych obserwacji, został utworzony protokół badań eksperymentalnych.

W wyniku eksperymentów powstały repliki 15 misek o określonej masie garncarskiej i grubości ścianek, lepione z jednego kawałka. Ważnym czynnikiem był czas schnięcia, dlatego dalsze obserwacje były prowadzone w zależności od czasu wysychania (miski podzielono na 3 grupy). Opracowanie powierzchni w każdej z tych grup przeprowadzano za pomocą różnych narzędzi: żebra świni, fragmentu naczynia ceramicznego z domieszką granitu, kwarcytowym otoczakiem, gładkim kawałkiem drewna sosnowego, gładkim kawałkiem poroża jelenia (ryc. 6). Każde z naczyń było obrabiane przez 5 minut, z równomiernym naciskiem. Po wypale w piecu elektrycznym przy temperaturze 600°C przystąpiono do obserwacji. Na podstawie rezultatów eksperymentów i obserwacji powierzchni powstałych w ten sposób naczyń, oraz obserwowanych na naczyniach z epoki brązu, udało się zidentyfikować ślady odpowiadające takim narzędziom jak: kamienny otoczak, drewno, poroże oraz żebro (ryc. 7).

PODSUMOWANIE

Produkcja ceramiczna od zarania dziejów ściśle wiązała się z życiem społecznym, obejmującym przetwarzanie żywności, rytuały czy obrzędy pogrzebowe. Oprócz badania jej funkcji użytkowych, ceramika może służyć również do interpretacji różnych aspektów życia codziennego, w tym technologii jej produkcji, która jest kluczowa dla zrozumienia procesu wytwarzania naczyń.

Badania traseologiczne wyrobów z gliny stanowią rozwijające się podejście w archeologii. Nie są to studia należące do łatwych ze względu na złożoność surowca ceramicznego, wielość sposobów jego modyfikacji, produkcji ceramiki, której proces powstania wymaga transformacji gliny pod wpływem działania wysokiej temperatury, modeli użytkowania, naprawiania i pozbywania się ceramiki z życia społecznego. Istnieje, więc bardzo dużo zmiennych, a kolejne formujące się ślady mogą zacierać te powstałe wcześniej albo powodować tworzenie się nowych. Kolejny zagrożenie to czynniki tafonomiczne, wpływające na zalegające na różnych stanowiskach archeologicznych wyroby z gliny. Również nierozważne i nieprzemyślane zabiegi restauratorskie czy rekonstrukcyjne mogą zniszczyć bezcenne mikroślady obecne na powierzchni. Niemniej jednak naukowcy opracowali solidne teoretyczne i empiryczne fundamenty, co pozwala na osiągnięcie zupełnie nowego zestawu danych i powoduje rozwój studiów ceramologicznych. Ceramika poddawana ostrożnemu traktowaniu demonstruje ogromny potencjał i prowadzi do znacznego poszerzenia naszej wiedzy. Wykroczenie poza tradycyjne studia typologiczno-chronologiczne i wprowadzenie nowych narzędzi analitycznych jest kluczowe dla lepszego zrozumienia wyjątkowego rodzaju ceramiki, jaką jest ceramika archeologiczna.

LITERATURA

Ard, V. 2013. Ceramic traditions and cultural identities: West-Central France during the Late Neolithic II Period (C.3400-2900 Cal. B.c.). *Oxford Journal of Archaeology* 32(4): 367-389.

Arnold, D.E. 1978. The ethnography of pottery making in the valley of Guatemala, (w:) R. Wetherington (red.), *The ceramics of Kaminaljuyu, Guatemala (Pennsylvania State University monograph series on Kaminaljuyu)*. Pennsylvania, 327-400.

Arthur, J.W. 2002. Pottery use-alteration as an indicator of socioeconomic status: the ethnoarchaeological study of the Gamo of Ethiopia. *Journal of Archaeological Method and Theory* 9(4): 331-335.

Arthur, J.W. 2003. Brewing beer: status, wealth and ceramic use alteration among the Gamo of south-western Ethiopia. *World Archaeology* 34(3): 516-528.

Beck, M.E., Hill, M.E. 2004. Rubbish, relatives, and residence: The family use of middens. *Journal of Archaeological Method and Theory* 11(3): 297–333.

Beck, M.E., Hill, M.E. 2007. Midden ceramics and their sources in Kalinga, (w:) J.M. Skibo, M.W. Graves, M.T. Stark (red.), *Archaeological anthropology: Perspectives on method and theory.* Tucson, 111–137.

Bobrinsky, A.A., 1978. *The pottery of Eastern Europe. Source and methods of study*. Moscow (in Russian). (Bobrinskij A.A. 1978: A.A. Бобринский, *Гончарство восточной Европы. Источники и методы изучения*, Москва [Наука]).

Borowski, M. 2017. Methods of surface treatment on ceramic vessels from the Nadziejewo cemetery in light of mineralogical analyses, (w:) M. Kaczmarek (red.), *Nadziejewo. The Late Bronze Age and Early Iron Age Cremation Cemetery in Central Wielkopolska. Hyperborea. Poznańskie studia nad epoką brązu i wczesną epoką żelaza 2*. Poznań, 305–319.

Buko, A. 1990. *Ceramika wczesnopolska. Wprowadzenie do badań*. Ossolineum.

Buko, A. 1998. Kierunki badań ceramiki z wykopalisk. Aspekty dydaktyczne. *Światowid* 41/Fasc.B: 546-556.

Buko, A. 2008. Ceramology: what is it and why? *Archaeologia Polona* 46: 15–27.

David, N., Hennig, H. 1972. *The ethnography of pottery: A Fulani case seen in archaeological perspective.* Reading: Addison-Wesley.

Daszkiewicz, M. 2014. Ancient pottery in the laboratory - principles of archaeoceramological investigations of provenance and technology. *Novensia* 25: 177-197.

DeBoer, W.R. 1974. Ceramic longevity and archaeological interpretation: An example from the Upper Ucayali, Peru. *American Antiquity* 39(2): 335-343.

Długosz, J. 2009. *Roczniki czyli Kroniki sławnego Księstwa Polskiego.* Ks. XI. Warszawa.

Forte, V. 2012. Investigating pottery technological patterns through macrowear analysis: the chalcolithic village of Maccarese-Fiumicino (Italy), (w:) J. Marreiros, N. Bicho, J.F. Gigaja (red.), *International conference on use-wear analysis.* Cambridge, 619-630.

Forte, V. 2019. Skilled people or Specialists? Knowledge and expertise in Copper Age vessels from central Italy. *Journal of Anthropological Archaeology* 55: 1-12.

Forte, V. 2021. Craft Identities and skill in Copper Age Communities. A multidisciplinary approach to the pottery production of Central Italy, (w:) S. Beyries, V. Hamon Y. Maigrot, (red.), *Beyond use-wear traces, Going from tools to people by means of archaeological wear and residue analyses.* Leiden, 381-392.

Forte, V., Cesaro, S. N., and Medeghini, L. 2018. Cooking traces on Copper Age pottery from central Italy: An integrated approach comprising use wear analysis, spectroscopic analysis and experimental archaeology. *Journal of Archaeological Science: Reports* 18: 121-138.

Frink, L., Harry, K.G. 2008. The beauty of "ugly" Eskimo cooking pots. *American Antiquity* 73(1): 103-120.

Gawron-Szymczyk, A., Łaciak, D., Baron, J. 2020. To smooth or not to smooth? A traceological and experimental approach to surface processing of Bronze and Iron Age ceramics. *Sprawozdania Archeologiczne* 72(2): 67-86.

Gedl, M. 1973. *Cmentarzysko halsztackie w Kietrzu, pow. Głubczyce*. Wrocław–Warszawa–Kraków–Gdańsk–Łódź.

Harry, K.G., Frink, L., O'Toole, B., Charest, A. 2009. How to make an unfired clay cooking pot: Understanding the technological choices made by Arctic potters. *Journal of Archaeological Method and Theory* 16: 33–50.

Hołubowicz, W. 1948. Z badań nad ceramiką kultury „łużyckiej", cz. II. *Z otchłani wieków* 17: 12–17.

Hołubowicz, W. 1938. Garncarskie techniki lepienia na terenie ziem północno-wschodnich Polski w świetle ostatnich wykopalisk (Ze szczególnym uwzględnieniem ceramiki cmentarzyska koło Płatowa). *Ateneum Wileńskie* XIII: 1–14.

Hołubowicz, W. 1947. Technika obróbki gliny w eneolitycznej osadzie ceramiki malowanej w Szypenicach na Bukowinie. *Przegląd Archeologiczny* 7(2): 131–158.

Hołubowicz, W. 1950. *Garncarstwo wiejskie zachodnich terenów Białorusi*. Toruń.

Hołubowicz, W. 1965. Garncarstwo wczesnośredniowieczne Słowian, Acta Universitatis Wratislaviensis 31. *Studia Archeologiczne I*, Wrocław [PWN].

Ionescu, C., Hoeck, V., Crandell, N.O., Saric, K. 2015. Burnishing versus smoothing in ceramic surface finishing: A SEM study. *Archaeometry* 57(1): 18-26.

Kopytoff, I. 1986. The cultural biography of things. Commoditization as process, (w:) A. Appadurai (red.), *The social life of things. Commodities in cultural perspective*. Cambridge, 64-91.

Kramer, C. 1985. Ceramic ethnoarchaeology. *Annual Review of Anthropology* 14*:* 77–102.

Kreiter, A., Czifra, S., Bendó, Z., Imre, J.E. Pánczél, P. 2014. Shine like a metal: an experimental approach to understand prehistoric graphite coated pottery technology. *Journal of Archaeological Science* 52: 129–142.

Lepère, C. 2014. Experimental and traceological approach for a technical interpretation of ceramic polished surfaces. *Journal of Archaeological Science* 46: 144-155.

López Varela, S. L., Van Gijn, A., Jacobs, L. 2002. De-mystifying pottery production in the Maya lowlands: Detection of traces of use-wear on pottery sherds through microscopic analysis and experimental replication. *Journal of Archaeological Science* 29: 1133-1147.

Łaciak, D. 2023. Creating the so-called graphite-coated pottery of the Late Bronze and Early Iron Ages: An experimental approach to manufacturing prehistoric pottery. *Archeologické Rozhledy* 75(1): 7-23.

Łaciak, D., Borowski P.M., Łydżba-Kopczyńska, B., Baron, J., Furmanek, M. 2019. Archaeometric characterisation and origin of black coatings on prehistoric pottery. *Chemie der Erde-Geochemistry* 79(3): 453-466.

Malinowski, T. 1963. Kwestia tzw. grafitowania naczyń kultury łużyckiej na przykładzie naczynia z cmentarzyska w Laskach, pow. Kępno. *Fontes Archaeologici Posnanienses* 14: 181–185.

Michelaki, K. 2008. Making pots and potters in the Bronze Age Maros villages of Kiszombor-Új-Élet and Klárafalva-Hajdova. *Cambridge Archaeological Journal* 18(3): 355-380.

Mogielnicka-Urban, M. 1984. *Warsztat ceramiczny w kulturze łużyckiej*. Wrocław, Warszawa, Kraków, Gdańsk, Łódź.

Orton, C., Hughes, M. 2013. *Pottery in Archaeology (2nd ed.).* Cambridge University Press.

Pyzel, J., Gomart, L. 2023. From pots to potters: reconstructing group and individual variability in pottery production. A case study of the LBK site Cząstków Polski XII, Comm. Czosnów. *Sprawozdania Archeologiczne* 75(2): 115-135.

Pyżewicz, K. 2021. Traseologia, (w:) A. Kurzawska, I. Sobkowiak-Tabaka (red.), *Mikroprzeszłość Badania specjalistyczne w archeologii*. Poznań, 333-353.

Rice, P.M. 1984. *Pots and Potters. Current approaches in ceramic archaeology*. Los Angeles.

Roux, V. 2019. *Ceramic and Society. A Technological Approach to Archaeological Assemblages.* Springer International Publishing.

Rud, V., Zaitseva, O., Skrzyniecka, W., Kosakivskyi, V., Hofmann, R. 2023. Tracing the micro processes of the production and use of ceramic vessels and textile products from the Cucuteni-Trypillia settlements of Bilyi Kamin and Krynychky-Ferma (Ukraine). *Sprawozdania Archeologiczne* 75(1): 183-212.

Schiffer, M.B. 1972. Archaeological context and systemic context. *American Antiquity*, 37: 156-165.

Skibo, J.M. 1992. *Pottery Function. A use-alteration perspective.* New York.

Skibo, J.M. 2013. *Understanding pottery function*. New York.

Skibo, J.M. 2015. Pottery use-alteration analysis in use-wear and residue analysis, (w:) J.M. Marreiros, J.F. Gibaja Bao, N. Ferreira Bicho (red.), *Use-Wear and Residue Analysis in Archaeology.* New York, 189-198.

Skrzyniecka, W. 2020. Textile impressions on the Trypillia culture pottery from Ogród and Verteba Cave sites in Bilcze Złote. *Sprawozdania Archeologiczne* 72(2): 231-258.

Skrzyniecka, W., Makarowicz, P., Silska, P. 2022. Textile-impressed pottery from the Bronze Age settlement in Szczepidło, Poland. *Sprawozdania Archeologiczne* 74(2): 227-248.

Szymański, P. 2024. Technika lepienia naczyń w kulturze sudowskiej. Uwagi na marginesie znalezisk z cmentarzyska w Czerwonym Dworze koło Gołdapi. *Wiadomości Archeologiczne* 75: 153-180.

van Gijn, A.L. 2014. Science and interpretation in microwear studies. *Journal of Archaeological Science* 48: 166-169.

van Gijn, A., Hofman , C.L. 2008. Were they used as tools? An exploratory functional study of abraded potsherds from two pre-colonial sites on the island of Guadeloupe, Northern Lesser Antilles. *Caribbean Journal of Science* 44(1): 21-35.

van Gijn, A., Jacobs, L., Groat, N., de Koning, N., Braekmans, D., Verbaas, A. 2019. Studying vessel biographies from the Heuneburg. An experimental approach, (w:) P.W. Stockhammer, J. Fries-Knoblach (red.), *Was tranken die frühen Kelten? Bedeutungen und Funktionen mediterraner Importe im früheisenzeitlichen Mitteleuropa*. Leiden, 77-99.

Vieugué, J. 2015. What were the recycled potsherds used for? Use-wear analysis of Early Neolithic ceramic tools from Bulgaria (6100-5600 cal. BC). *Journal of Archaeological Science* 58: 89-102.

Vuković, J.B. 2009. Non-abrasive pottery surface attrition: Blagotin evidence. *Journal of the Serbian Archaeological Society* 25: 25-35.





Traseologia zabytków metalowych

Dawid Sych

WPROWADZENIE

Celem analiz traseologicznych metaloplastyki jest próba odpowiedzi na pytanie, czy dany przedmiot był w przeszłości używany, w jaki dokładnie sposób i jak intensywnie, a także jak został zrobiony oraz czy sposób i jakość wykonania mogą powiedzieć nam coś więcej na temat jego funkcji w przestrzeni gospodarczej, społecznej i religijnej różnych społeczeństw pradziejowych (Gener 2011; Kuijpers 2015). W pierwszym tomie *Mikroprzeszłości* Czytelnik znajdzie teksty Katarzyny Pyżewicz o traseologii oraz Marcina i Mateusza Biborskich o archeometalurgii. Traseologia metaloplastyki, czyli przedmiotów wykonanych z różnych metali, znajduje się na styku wspomnianych metod. Co więc łączy, a co dzieli traseologię metaloplastyki i traseologię przedmiotów wykonanych z innych materiałów, takich jak surowce kamienne czy organiczne? Obie związane są z obserwacją śladów produkcji i użytkowania widocznych na powierzchniach zabytków. Główną różnicą są natomiast właściwości materiałów, z których przedmioty zostały wykonane.

W przypadku zabytków krzemiennych czy kościanych jesteśmy w stanie prześledzić procesy technologiczne i kolejne etapy użytkowania. Jeżeli chodzi natomiast o metaloplastykę, to analiza wszystkich „etapów życia" zabytku nie jest zwykle możliwa ze względu na to, że w razie potrzeby przedmiot można było przetopić i nadać mu nową, zupełnie odmienną od pierwotnej formę. W zasadzie można powiedzieć, że jako badacze mamy dostęp jedynie do końcowego etapu, jakim było funkcjonowanie przedmiotu w jego ostatniej postaci.

Na podstawie analizy izotopów ołowiu oraz zawartości pierwiastków śladowych możliwa jest próba określenia miejsca pochodzenia metalu i stwierdzenie, czy w stopie znajdują się pozostałości po różnych domieszkach (por. Miśta-Jakubowska, w tym tomie). Nie możemy natomiast odpowiedzieć na pytanie, jakie przemiany przechodził i jakie funkcje wśród społeczności pradziejowych pełniły wykonane z niego zabytki.

DOI: 10.64158/locr15jpjr

Gdzie punkt wspólny z archeometalurgią? Dzięki wiedzy na temat technologii produkcji oraz technik wykorzystywanych w jej trakcie możemy określić, czy w wykonanie danego przedmiotu włożono dużo pracy i czy wymagało to większej wiedzy wytwórcy. W zestawieniu z analizą śladów użytkowania jesteśmy w stanie lepiej interpretować funkcję danego przedmiotu, a niekiedy znaczenie nadawane mu przez społeczność, która zdeponowała go w ziemi lub wodzie.

W zagranicznej literaturze w ostatnich latach coraz częściej pojawia się określenie "*metalwork wear analysis*" (Dolfini i Crellin 2016), które można tłumaczyć jako „analizę śladów zużycia na metaloplastyce" (w domyśle: powstałych w efekcie bezpośredniego kontaktu jednego przedmiotu z innym). Nie należy utożsamiać go z „analizą śladów użytkowania", która dotyczy wyłącznie badania efektów eksploatacji danego przedmiotu. Śladem zużycia, na przykład na siekierze brązowej, jest zatem zarówno odkształcenie ostrza powstałe w wyniku rąbania drewna, jak i ślady szlifowania, które pozostawił po sobie kamień szlifierski użyty do usunięcia szwów odlewniczych po wyjęciu jej z formy. W Polsce przez specjalistów używany jest termin „traseologia" (Baron 2019; Sych i in. 2020; Nowak i in. 2022; Nowak i Sych 2024), którego według mnie można używać zamiennie. Jest też krótszy i bardziej przystępny, zwłaszcza w słowie pisanym, od „analizy śladów zużycia" i trudniej pomylić go z „analizą śladów użytkowania".

Z tych właśnie względów w tytule artykułu pojawił się termin „traseologia", zamiast „analizy śladów zużycia". W dalszej części tekstu używam zamiennie terminów „traseologia brązów" i „traseologia metaloplastyki", zdając sobie jednocześnie sprawę z węższego znaczenie pierwszego i szerszego znaczenia drugiego z nich. Terminy „ślady produkcji" i „ślady użytkowania" stosuję tam, gdzie jest mowa o odpowiadających im rodzajach śladów widocznych na powierzchniach zabytków. Jednocześnie zdaję sobie sprawę z tego, że analizy traseologiczne metaloplastyki obejmują nie tylko brązy i inne stopy miedzi, ale też złoto, cynę (Crellin i in. 2023; Carey i in. 2023) czy ołów, a niekiedy nawet żelazo (Biborski i in. 2009).

HISTORIA BADAŃ

Tak jak w traseologii zabytków kamiennych czy kościanych, pierwszym podręcznikiem również i w tym przypadku jest *Prehistoryczna technologia: eksperymentalne studium najstarszych narzędzi i artefaktów na podstawie śladów produkcji i użytkowania* S.A. Siemionowa z 1957 roku, która zyskała większy rozgłos dopiero w 1964 roku, kiedy pojawiło się jej tłumaczenie na język angielski pióra M.W. Thompsona.

Badania zabytków metalowych rozpoczęto jednak dopiero ponad dwie dekady później – pod koniec lat 80. (Wall 1987) i w latach 90. (Bridgford 1997) XX wieku. W obszarze zainteresowania badaczy znalazły się wtedy jedne z najbardziej imponujących kategorii zabytków z epoki brązu, czyli sztylety i miecze. Zaczęły też pojawiać się pierwsze artykuły poświęcone narzędziom, a konkretniej siekierom brązowym (Kienlin i Ottaway 1998).

W pierwszej dekadzie XXI wieku uwaga archeologów nadal skupiała się głównie na mieczach brązowych (Kristiansen 2002; Molloy 2008, 2010), ale zaczęli oni też coraz częściej badać również inne kategorie zabytków, takie jak: siekiery (Roberts i Ottaway 2003), berła sztyletowe (O'Flaherty 2007), tarcze (Molloy 2009) oraz groty włóczni (Anderson 2010) i strzał (Gutiérrez i in. 2010; Sych 2011 i Baron i in. 2022). Druga dekada XXI wieku to przede wszystkim wzrost liczby analiz i dalsze poszerzenie zakresu zainteresowań badawczych. Ze względu na fakt, że większość analizowanych do tej pory artefaktów pochodziła z kolekcji muzealnych, zaczęto interesować się wpływem konserwacji zabytków na stan zachowania śladów produkcji i użytkowania (Sych i in. 2020). Przybywać zaczęło też artefaktów, które udało się przeanalizować zarówno przed, jak i po konserwacji (Baron i in. 2019). Przede wszystkim jednak, pojawiły się pierwsze próby zebrania i syntezy wyników wieloletnich badań (Uckelmann i Mödlinger 2011; Gutiérrez i Lerma 2014; Dolfini i Crellin 2016; Hermann i in. 2020).

Na początku trzeciej dekady XXI wieku można już wskazać kierunki, w których traseologia metaloplastyki będzie się rozwijała w następnych latach. Po pierwsze możemy przewidywać, że wzrośnie intensywność badań nad śladami produkcji i użytkowania na ozdobach, częściach stroju oraz innych niż militaria i narzędzia kategoriach zabytków (Sych 2021; Kasprowicz 2022). Drugim kierunkiem mogą być badania nad pozostałymi przedmiotami, z którymi zabytki brązowe wchodziły w interakcje, takimi

jak na przykład: poroże i kości (Baron, Diakowski 2018; Baron i in. 2024), narzędzia kamienne (Crellin i in. 2022; Carey i in. 2023) lub pozostałości organiczne zachowane na ich powierzchniach – krew, mięśnie, ścięgna, kości czy pozostałości po oprawach (Caricola i in. 2022).

Pokrewnym tematem są także intensywnie rozwijające się w ostatniej dekadzie (Knight 2021; Lago i in. 2023) badania nad celowym niszczeniem przedmiotów w przeszłości. Wiele zabytków z epoki brązu było przed depozycją giętych, skręcanych, miażdżonych, łamanych, wyszczerbianych i poddawanych działaniu wysokiej temperatury. Część była też nakłuwana, a w przypadku przedmiotów z tulejami, były one zatykane fragmentami innych zabytków, a niekiedy także dodatkowo miażdżone. Celowe niszczenie mogło mieć wymiar symboliczny i związek z różnego rodzaju zachowaniami rytualnymi (Knight 2021) lub praktyczny, kiedy podział przedmiotu miał służyć uzyskaniu fragmentów o określonej wadze, co wiąże się z wczesnymi systemami wagowymi i pierwszymi środkami płatniczymi w Europie (Ialongo i Lago 2021; Lago i in. 2023). Analiza traseologiczna metaloplastyki pozwala na dokładniejszą interpretację tego typu znalezisk.

METODA BADAWCZA / PROCEDURA BADAWCZA

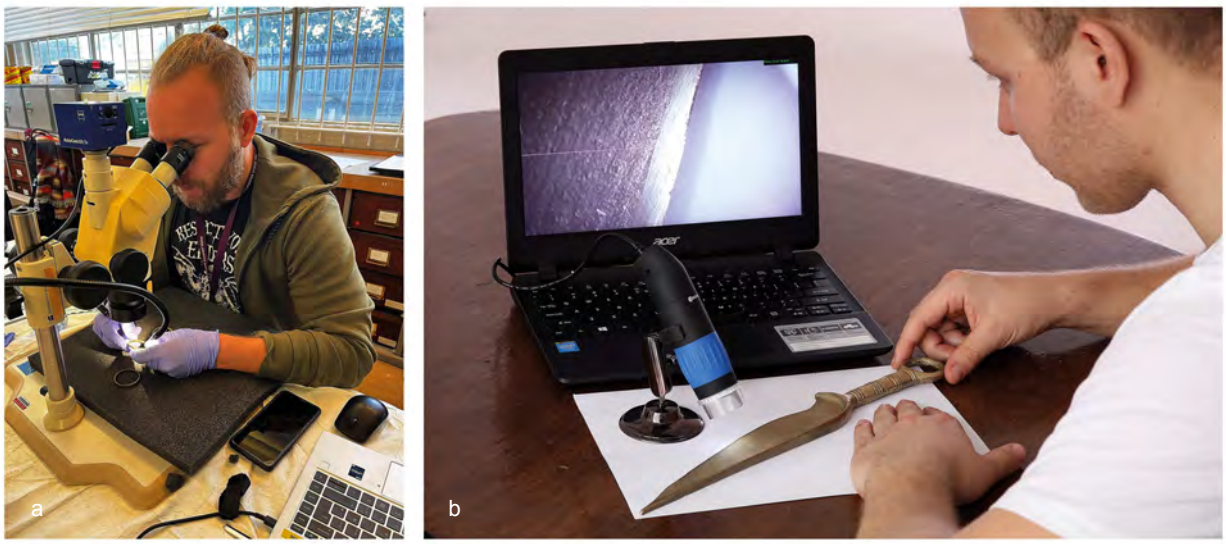
Do analiz traseologicznych metaloplastyki wykorzystuje się głównie mikroskopy cyfrowe, metalograficzne i stereoskopowe (ryc. 1). Z uwagi na specyfikę surowca i śladów, jakie mogą być widoczne na zabytkach, do podstawowych obserwacji wystarczy zwykła lupa, a do rejestracji – aparat z trybem makro lub przenośny mikroskop cyfrowy, taki jak na przykład urządzenia z serii Dino-Lite. Zaawansowana analiza traseologiczna wymaga profesjonalnych mikroskopów stereoskopowych i metalograficznych, które umożliwiają obserwację przedmiotów pod zróżnicowanym światłem (prostopadłym i bocznym) oraz tworzenie zdjęć kompozytowych, z ostrym obrazem na całej powierzchni fotografii.

Optymalny zakres powiększenia, przy którym najlepiej widoczne są ślady produkcji i użytkowania na metaloplastyce, mieści się w przedziale od 20× do 50×. Rejestracja pozostałości organicznych oraz analiza mikrostruktury będą wymagały odpowiednio większych powiększeń. Z uwagi na błyszczącą powierzchnię metali zaleca się korzystanie z urządzeń wyposażonych w filtr antyrefleksyjny. W codziennej pracy korzystam m.in. z mikroskopów stereoskopowych Zeiss Stemi 508 i Zeiss Stemi V20 z kamerą Axiocam 208 color, z powodzeniem stosowałem też urządzenia Hirox RH-2000 czy Keyence VHX-7000.

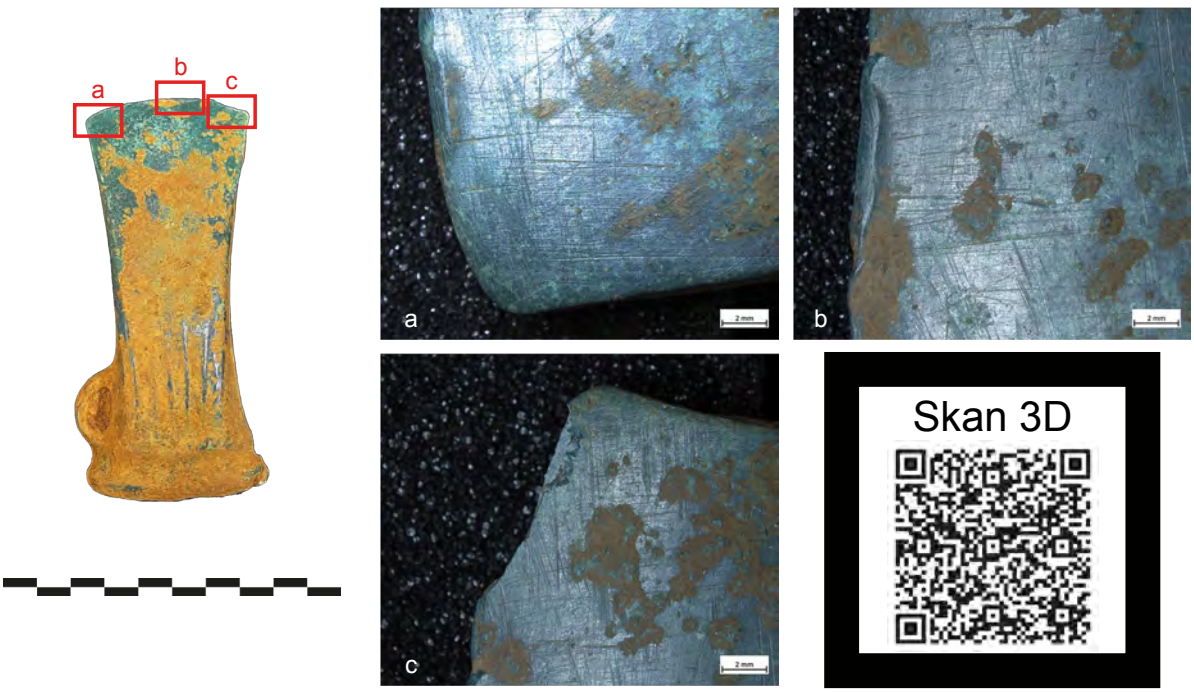
Ślady widoczne na metaloplastyce można podzielić na trzy główne kategorie: 1) deformacje plastyczne, 2) deformacje fizykochemiczne i 3) pozostałości różnych materiałów (Gutiérrez Sáez, Lerma 2014). Do pierwszej kategorii zaliczymy m.in. odciski, nacięcia, zarysowania, wygładzenia, złamania, pęknięcia, zagięcia, zgrubienia, wypłaszczenia, szczerby czy asymetrię części pracującej. Niektóre z nich powstały podczas produkcji, a inne w trakcie użytkowania przedmiotu. Do drugiej kategorii zalicza się głównie korozję oraz wyświecenia, których źródłem mogły być różne procesy technologiczne, użytkowanie lub procesy podepozycyjne. Trzecia kategoria obejmuje m.in. pozostałości po drewnianych oprawach lub innych substancjach, które mogły wejść w kontakt z metalem po złożeniu przedmiotu w ziemi lub wodzie w wyniku działania procesów podepozycyjnych.

Naukowcy, którzy specjalizują się w analizach traseologicznych metaloplastyki, przez lata sięgali przede wszystkim po zabytki ze zbiorów muzealnych, a nie nowo odkryte artefakty, które nie zostały poddane jeszcze konserwacji. Wnioski z takich badań mogą być niekiedy obarczone błędem. Nasze badania (Sych i in. 2020) udowodniły, że konserwacja ma znaczący wpływ na sposób zachowania śladów. Z tego powodu zaleca się obserwację zabytków zarówno przed (ryc. 2), jak i po niej (Baron i in. 2019). Jeżeli takiej możliwości nie ma, warto zapoznać się z odpowiednią dokumentacją, w której opisane zostały zastosowane metody konserwacji. Szczególnie destrukcyjne może być na przykład używanie mikrosilników ze zbyt twardymi szczotkami do usuwania produktów korozji, które mogą zniszczyć mniej widoczne ślady.

Do obserwacji artefaktów pod mikroskopem zalecane jest używanie rękawiczek ochronnych. Kontakt nieosłoniętej dłoni z niedawno wydobytym zabytkiem może doprowadzić do kontaminacji jego powierzchni, a co za tym idzie, bezpowrotnej utraty cennych informacji. Ma to szczególne znaczenie wtedy, kiedy staramy się dowiedzieć, z jakimi substancjami organicznymi artefakt miał kontakt. Również przedmioty z kolekcji muzealnych powinno się trzymać w rękawiczkach, aby nie zniweczyć pracy konserwatora. Dobrze sprawdzają się na przykład rękawiczki nitrylowe.



Ryc. 1. (a) Analiza traseologiczna z użyciem stacjonarnego mikroskopu stereoskopowego i (b) przenośnego mikroskopu cyfrowego (fot. Matthew Hitchcock, Jacek Soida)



Ryc. 2. Ślady użytkowania zaobserwowane na siekierze z tulejką ze skarbu z Husbands Bosworth, Leicestershire, przed konserwacją; (a-b) równoległe do krawędzi ostrza zarysowania są efektem ostrzenia, prostopadłe powstały w wyniku użytkowania, spłaszczenie ostrza (b) i jego ukruszenie (c) to efekt użytkowania (fot. Dawid Sych)

Modelowa analiza traseologiczna powinna składać się z następujących trzech etapów.

1) Analiza makroskopowa przy użyciu lupy, której celem jest wytypowanie najbardziej obiecujących miejsc na powierzchni zabytku.
2) Analiza mikroskopowa przy użyciu małych powiększeń w zakresie od 20× do 50×, w których ślady produkcji i użytkowania są najlepiej widoczne.
3) Analiza mikroskopowa przy użyciu dużych powiększeń (powyżej 50×) do badań mikrostruktury i poszukiwania szczątków organicznych.

Uzyskane w ten sposób wyniki powinny zostać skonfrontowane z rezultatami eksperymentów, które również w przypadku metaloplastyki, odgrywają kluczową rolę w analizie traseologicznej. Badania eksperymentalne są niezbędne przy próbie określenia pochodzenia poszczególnych śladów produkcji i użytkowania. Tak jak w przypadku innych analiz traseologicznych, tak i tutaj można wyróżnić dwie główne kategorie testów doświadczalnych (Pyżewicz 2021: 334) – aktualistyczne i laboratoryjne.

Eksperymenty aktualistyczne polegają na jak najwierniejszej – w oparciu o źródła i dostępne dane – rekonstrukcji warunków, jakie panowały w danym miejscu i czasie. Zastosowanie replik służy formułowaniu też na zasadzie analogii. Jeżeli eksperyment się powiedzie i można go bez przeszkód powtórzyć, uzyskując podobny rezultat, możemy z dużą dozą prawdopodobieństwa założyć, że udało nam się odkryć jedną z możliwych odpowiedzi na postawione przez nas pytania. Musimy być też świadomi, że w niektórych przypadkach nigdy nie będziemy w stanie w sposób idealny odtworzyć warunków panujących w pradziejach. Dobrym tego przykładem są badania nad technikami walki w epoce brązu. Możemy z dbałością o najdrobniejsze szczegóły odtworzyć broń i uzbrojenie ochronne, ale nikt nie zdecyduje się raczej na walkę na śmierć i życie, próbując dokończyć eksperyment. Bezpieczeństwo uczestników to jedna z podstawowych zasad prawidłowo przeprowadzonego eksperymentu (Anderson 2011; Molloy 2008, 2009, 2010; Hermann 2020).

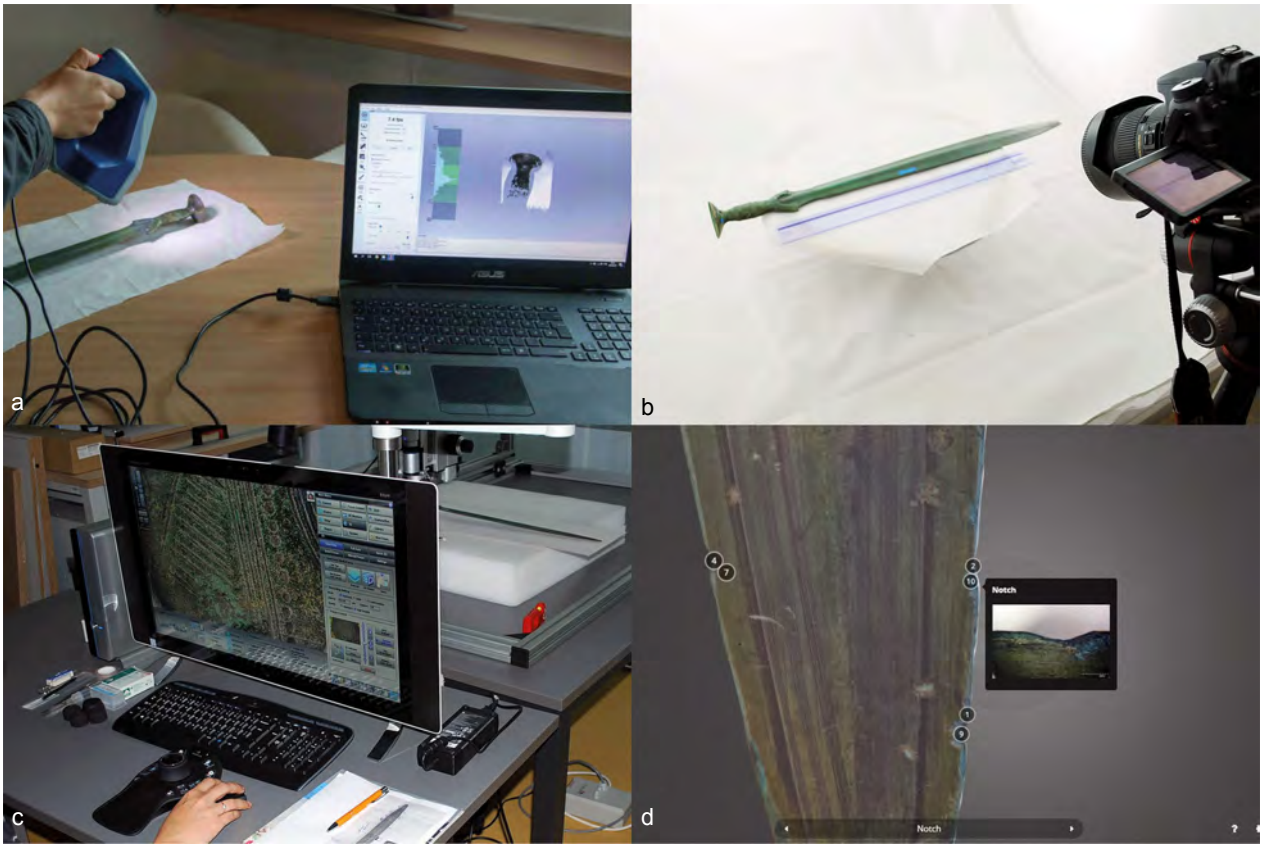
Eksperymenty laboratoryjne (nazywane też kontrolowanymi) kładą z kolei nacisk na zagadnienia związane z pochodzeniem i charakterem śladów oraz sposobem użytkowania i rodzajem wykonywanej pracy (O'Flaherty 2007; Hermann 2020). Chociaż wyniki takich testów doświadczalnych są bardziej jednoznaczne z uwagi na ograniczenie liczby działających jednocześnie czynników (także losowych), eksperymenty laboratoryjne pomijają wiele aspektów, które mogły pojawić w trakcie eksperymentów aktualistycznych. Dlatego też ważne jest, aby w miarę możliwości realizować obie ścieżki testów doświadczalnych, a następnie porównywać i łączyć (triangulacja) uzyskane rezultaty. Tylko w ten sposób możemy zbliżyć się do wiarygodnych odpowiedzi na postawione przez nas pytania. Dobrym przykładem łączenia obu metod jest praca *Bronze Age Combat: An Experimental Approach* (Hermann i in. 2020), w której autorzy starali się odtworzyć metody walki przy użyciu różnych rodzajów broni z epoki brązu.

Osobną kwestię stanowi dokumentacja śladów widocznych na zabytkach. W przeszłości wykorzystywano w tym celu głównie dentystyczne materiały wyciskowe (Roberts i Ottaway 2003), natomiast współcześnie używa się przede wszystkim aparatów wbudowanych w mikroskopy lub klasycznych aparatów fotograficznych wyposażonych w dobry tryb makro. Wynika to z faktu, że przedmiotem obserwacji na metaloplastyce są przede wszystkim różnego rodzaju deformacje plastyczne, które często lepiej widoczne są w mniejszych powiększeniach, oferowanych także aparaty fotograficzne.

Od niedawna prowadzi się też eksperymenty z nowoczesnymi metodami digitalizacji w postaci skanowania 3D i fotogrametrii (ryc. 3) (por. M. Mackiewicz, w tym tomie), a także łączenia tych technik z klasyczną fotografią (Molloy i in. 2016; Sych 2018). Efekty takiego parowania można zobaczyć pod adresem: bit.ly/traseoskan3d. Obecnie prowadzę też pierwsze eksperymenty z dokumentacją śladów przy pomocy wydruków 3D zeskanowanych wcześniej zabytków.

PRZYKŁADY Z BADAŃ

Przykładów zastosowania analizy traseologicznej w badaniach metali jest wiele i z każdym rokiem ich liczba rośnie. Dla Polaków szczególne znaczenie miały jednak badania przeprowadzone ponad dekadę temu na mieczu koronacyjnym polskich królów, czyli słynnym Szczerbcu (Biborski i in. 2009). Zabytek został zbadany przy użyciu wielu różnych metod, aby udowodnić lub odrzucić tezę o jego autentyczności, co do której istniały pewne wątpliwości. Analizę traseologiczną wykorzystano do zweryfikowania tego, czy szczerba w głowni była elementem oryginalnym czy może powstała w efekcie działania korozji. Analiza traseologiczna jednoznacznie wskazała na tę drugą interpretację. Co więcej, pomogła



Ryc. 3. Skanowanie 3D (a) i fotogrametria (b) miecza brązowego wykonane w studiu The Farm 51. W Muzeum Śląskim w Katowicach wykonane zostały zdjęcia mikroskopowe śladów produkcji i użytkowania (c). Następnie trójwymiarowy model został połączony ze zdjęciami (d) w platformie Sketchfab (Sych i in., 2018)

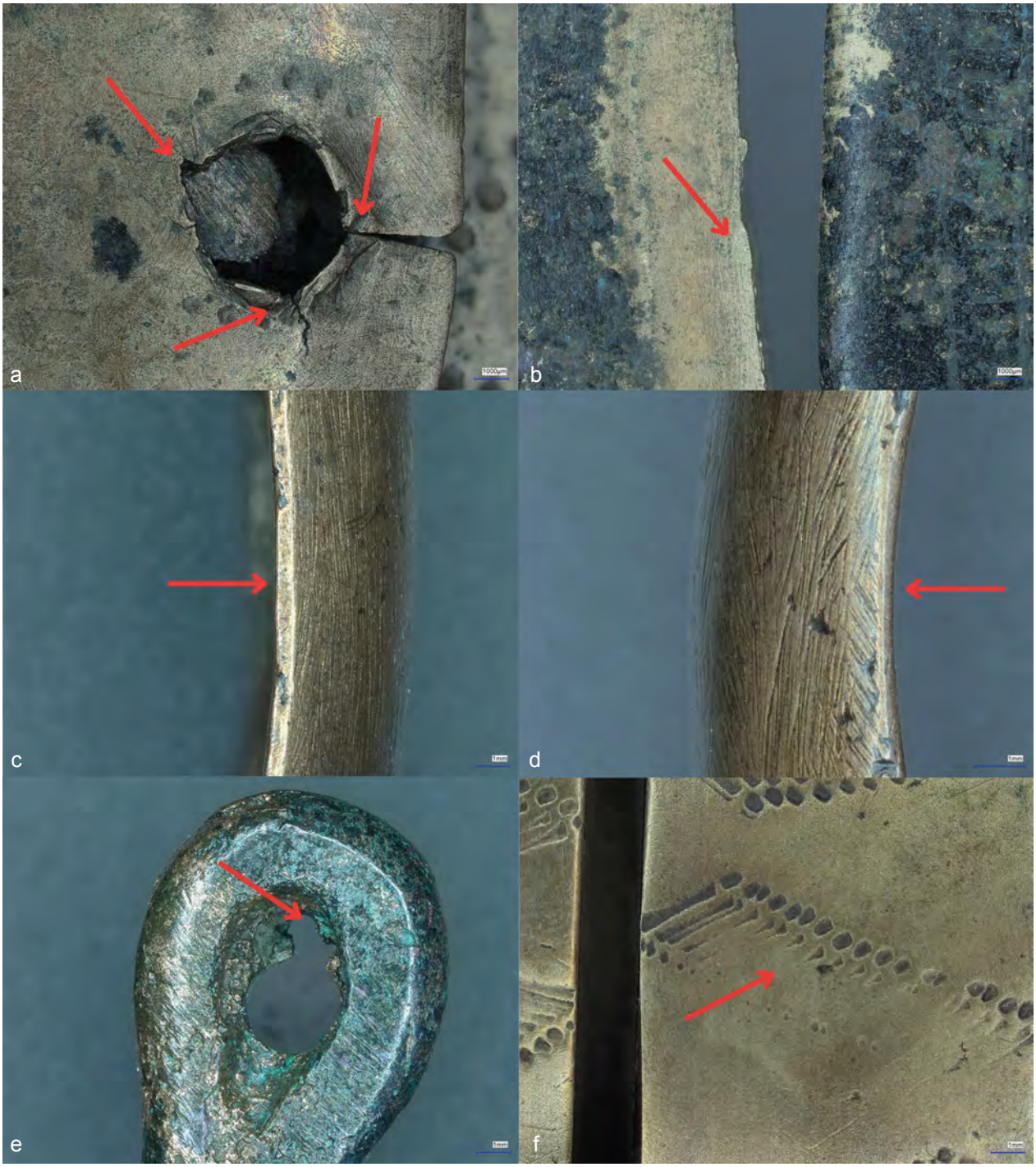
ustalić, że głowica z jelcem stanowią pierwotne elementy rękojeści, natomiast płytki okładzin trzonu zostały wykonane później, w innym warsztacie i przez inną osobę.

Na co dzień analizy traseologiczne metaloplastyki obejmują raczej przedmioty wykonane z miedzi i jej stopów. Dzieje się tak przede wszystkim z powodu lepszego stanu zachowania takich zabytków. Dzięki obecności silnie eksploatowanej w przeszłości części pracującej (zwykle jest to jakiś rodzaj ostrza) militaria i narzędzia znacznie łatwiej badać pod kątem obecności śladów użytkowania niż ma to miejsce chociażby w przypadku ozdób i części stroju. Wszystkie kategorie zabytków można natomiast badać, poszukując śladów produkcji.

Taka holistyczna analiza traseologiczna została przeprowadzona m.in. na czterech skarbach z dawnego Karmina (Baron i in. 2019). Przedmioty, które wchodziły w skład depozytów, a były to broń, narzędzia, ozdoby i części strojów, charakteryzował zróżnicowany stopień zużycia. To cecha charakterystyczna skarbów z późnej epoki brązu z tego czasu i okolic. Na podstawie analizy traseologicznej tych zabytków możliwe było też formułowanie kolejnych wniosków. Na narzędziach ze skarbów z Karmina ślady produkcji i błędy odlewnicze można zaobserwować zdecydowanie częściej niż na broni, ozdobach i częściach stroju. Szwy odlewnicze, porowata powierzchnia, nadlewy i niedolewy to elementy, które współwystępują ze śladami użytkowania, wyklucza to więc interpretację, że mamy do czynienia z przedmiotami wadliwymi czy niedokończonymi.

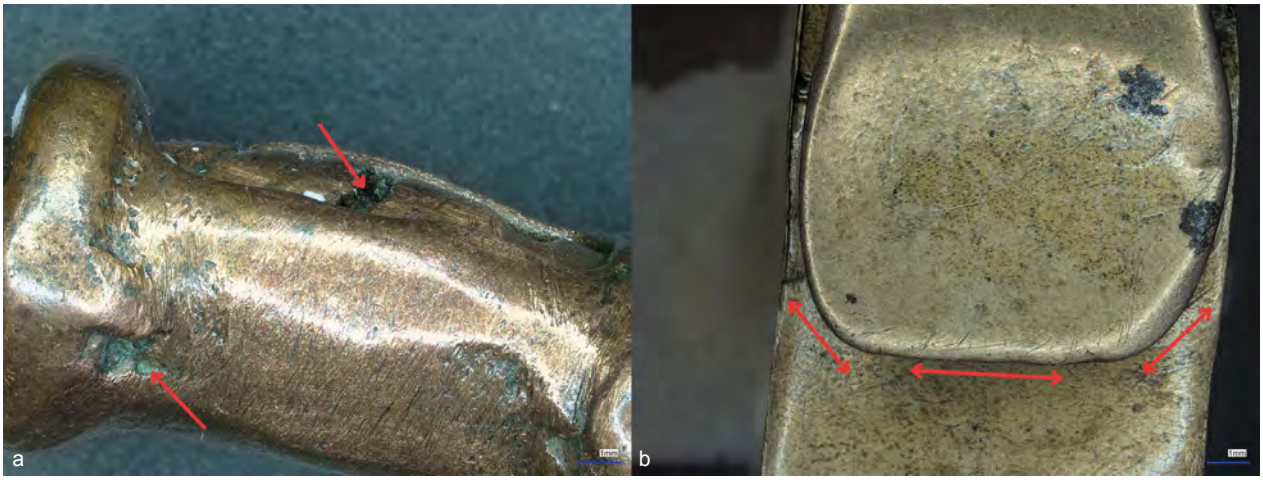
Można zatem sformułować wniosek, że pod koniec epoki brązu narzędzia były postrzegane głównie przez pryzmat swojej funkcjonalności, a nie estetyki wykonania. Z kolei broń, poza funkcją bojową, miała też odpowiadać na potrzeby estetyczne, na co wskazuje wysoki poziom wykonania i opracowania powierzchni.

Pomimo tego, że ślady produkcji i użytkowania na ozdobach i częściach stroju są trudniejsze do zaobserwowania i nie zawsze jednoznaczne w interpretacji,

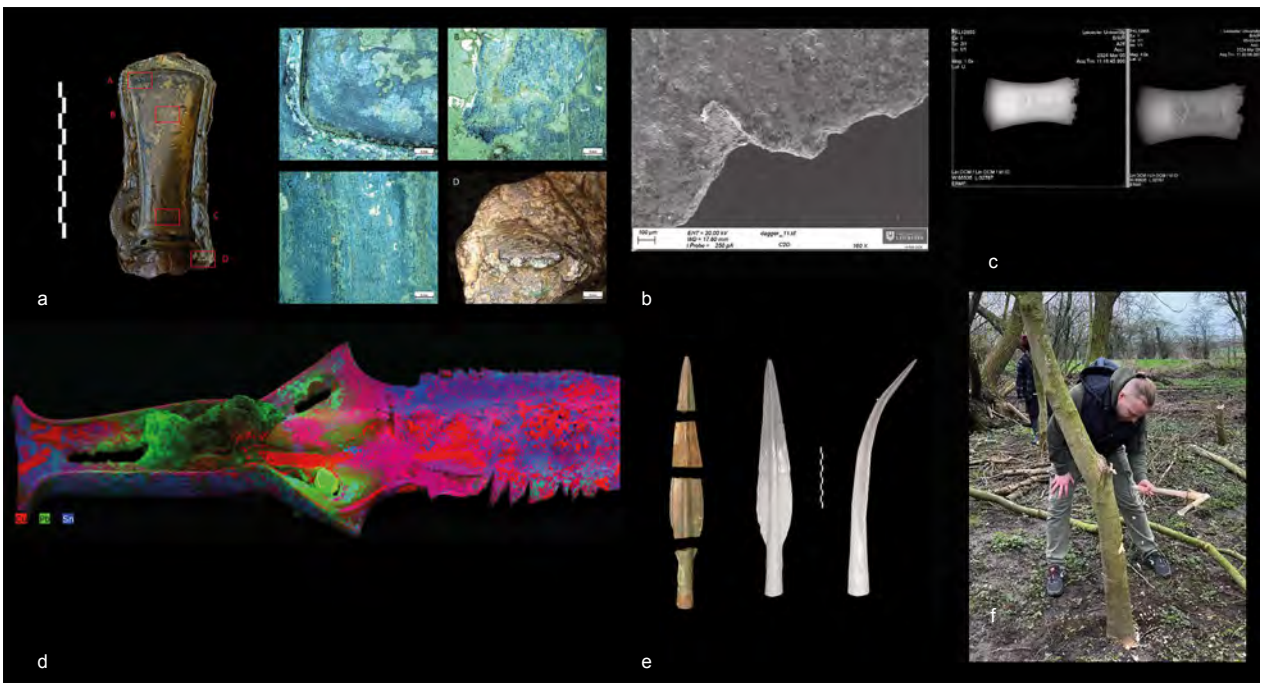


Ryc. 4. Ślady użytkowania zaobserwowane na ozdobach i częściach stroju (Kaczmarek i in., 2021) - napierśnikach brązowych (a-b), bransoletach (c-d, f) i naszyjniku (e)

coraz częściej analizami traseologicznymi obejmuje się także te kategorie zabytków (ryc. 4). Do skarbu przedmiotów metalowych z późnej epoki brązu ze stanowiska Kaliska I na Pomorzu, poza militariami czy elementami uprzęży końskiej, zaliczały się też liczne ozdoby i części stroju. Wśród nich znalazły się m.in. spektakularne napierśniki brązowe, z których jeden zdobiony jest bogatym ornamentem figuralnym (Kaczmarek i in. 2021). Omawiane artefakty noszą nie tylko ślady użytkowania, ale także ślady napraw (ryc. 5). Te, z powodu stosowania podobnych narzędzi, niekiedy łatwo pomylić ze śladami



Ryc. 5. Naprawa poprzez wykonanie nadlewu (a) oraz przerobiona po złamaniu (b) bransoleta (Kaczmarek i in., 2021)



Ryc. 6. Analizy specjalistyczne wykonywane w ramach projektu A New History of Bronze: crafting, leadership and violence; (a) dokumentacja fotograficzna z analizy śladów zużycia na formie brązowej ze skarbu z Rothley, (b) zdjęcie wykonane przy pomocy SEM-EDS, (c) zdjęcie rentgenowskie siekiery ze skarbu ze Stoke Doyle, Leicestershire, (d) wizualizacja wyników z analizy microXRF miecza z Bradley Fen, Cambridgeshire, (e) wydrukowana rekonstrukcja grotu włóczni ze skarbu ze Stoke Doyle, Leicestershire, (f) badania eksperymentalne przy użyciu siekiery brązowej

produkcyjnymi. Naprawy mogą wskazywać na długotrwałą lub wyjątkowo intensywną eksploatację przedmiotu, a niekiedy także na jego wadliwe wykonanie. Nie na wszystkich zabytkach udało się zaobserwować świadectwa użytkowania. Nie oznacza to jednak wcale, że w przeszłości nie były używane. Jak już wspomniałem wyżej, w przypadku ozdób i części strojów ślady te są słabiej rozpoznane i niejednokrotnie mniej widoczne.

Przeprowadzone przeze mnie badania kilkuset zabytków ze Śląska (Sych 2016) pokazują, że na przestrzeni epoki brązu zmieniało się podejście

społeczności pradziejowych do metalu i wykonywanych z niego przedmiotów – na przykład wspomniana już kwestia większego przywiązania do walorów funkcjonalnych niż estetycznych. Zmieniały się zasady odnośnie do deponowania przedmiotów w ziemi i w wodzie – w czasie zmieniał się asortyment artefaktów w skarbach oraz stopień ich zużycia. Starsze depozyty wydają się pod tym względem bardziej jednorodne od młodszych. Warto zwrócić też uwagę na to, że społeczności epoki brązu deponowały w zdecydowanej większości przedmioty używane, a nie jak wcześniej sądzono, wykonane specjalnie z myślą o złożeniu w ziemi. Dotyczy to nie tylko znalezisk, które pochodziły ze skarbów, ale także tych, które odkryto w pochówkach (tamże).

Za granicą zdecydowanie najlepiej przebadaną kategorią zabytków są miecze brązowe, którym poświęcono najwięcej opracowań i artykułów. Dzięki analizom traseologicznym śladów użytkowania oraz aktualistycznym i laboratoryjnym badaniom eksperymentalnym archeolodzy diametralnie zmienili swój pogląd na funkcję tych militariów. Przestali postrzegać je jako przedmioty czysto paradne, a zaczęli widzieć w nich pełnoprawną broń – pierwsze w historii ludzkości narzędzie służące do zabijania innych ludzi. Na tym jednak nie koniec, ponieważ w nowszej literaturze naukowcy podejmują również próby rekonstrukcji technik walki przy pomocy mieczy z brązu (Horn i Karck 2019; Hermann i in. 2020). Podobne badania przeprowadzono również na grotach włóczni i oszczepów (Anderson 2011; Hermann i in. 2020) oraz berłom sztyletowym (Horn 2017).

Niedawno szerokim echem odbiły się badania sztyletów z epoki brązu (1550–1250 BCE) z Pragatto we Włoszech, na których – dzięki zastosowaniu badań biochemicznych oraz analiz SEM-EDX – zidentyfikowano ślady kości, ścięgien i mięśni zwierzęcych, jak również organicznych opraw. Odkrycie to ujawniło błędność tez, że przedmioty te pełniły jedynie funkcję symboliczną i nie mogły być używane w celach innych niż paradne (Caricola i in. 2022). Wśród innych pozostałości organicznych odkrytych na zabytkach metalowych można wymienić m.in. ludzką skórę i resztki tekstyliów na zapince lateńskiej z Potzneusiedl w Austrii (Saunderson i in. 2022) czy fragment sznurka znaleziony na falerze z Kalisk (Kaczmarek i in. 2021). To również dobre przykłady dowodzące, że dodatkowe analizy nakierowane na identyfikację pozostałości organicznych mogą stanowić doskonałe uzupełnienie klasycznych badań mikroskopowych.

Obecnie na University of Leicester realizowany jest finansowany przez Leverhulme Trust projekt badawczy "A New History of Bronze: crafting, leadership and violence", którego kierowniczką jest dr Rachel Crellin. Celem projektu jest rzucenie nowego światła na to, kim byli wytwórcy i użytkownicy metali oraz jak były one wymieniane, wykorzystywane i postrzegane przez społeczności pradziejowe w epoce brązu na terenie Wielkiej Brytanii i Irlandii. Tym, co go wyróżnia, jest nie tylko łączenie traseologii z różnymi innymi nieinwazyjnymi metodami analitycznymi, ale także rozszerzenie przedmiotu badań na wiele kategorii zabytków metalowych oraz artefakty kamiennie, które wchodziły z nimi w kontakt. W planach zespołu badawczego jest przebadanie 3500 zabytków metalowych (3000) i kamiennych (500). W przypadku metaloplastyki będzie to największa dotychczas próba.

W ramach projektu analizujemy ślady zużycia na przedmiotach wykonanych z kamienia oraz miedzi i jej stopów począwszy od narzędzi i broni, przez ozdoby i części stroju, po elementy uprzęży końskiej i inne. Informacje na temat obserwacji zbierane są we wspólnej bazie danych, która została zaprojektowana z myślą o badaniu i zestawianiu ze sobą danych na temat zróżnicowanych zabytków. Uzupełnieniem dla analizy traseologicznej są m.in. badania eksperymentalne, rentgenowskie, microXRF i SEM-EDS (ryc. 6). O ile same wymienione analizy nie są niczym wyjątkowym w archeologii, o tyle stosowanie ich do badania różnych kategorii zabytków wykonanych z różnych materiałów i skupienie się na relacjach, jakie je łączyły, stanowi jego największy atut. Uzyskane z połączenia wszystkich wymienionych metod rezultaty interpretujemy w duchu filozofii nowego materializmu (Tsoraki i in. 2020; Crellin i Harris 2021). Więcej na temat projektu można przeczytać pod adresem: bit.ly/a-new-history-of-bronze.

PODSUMOWANIE

Traseologia dopiero niedawno zaczęła odgrywać większą rolę w badaniach nad metaloplastyką. Archeolodzy coraz częściej analizują nie tylko obiekty z kolekcji muzealnych, ale również te świeżo wydobyte z ziemi. Ślady na różnych kategoriach zabytków są rejestrowane, katalogowane i poddawane badaniom. Równolegle prowadzi się coraz więcej eksperymentów, które umożliwiają weryfikację dotychczasowej wiedzy.

Podstawą w wykorzystaniu traseologii jest przeprowadzanie analiz na możliwie największej liczbie zabytków, najlepiej przed zabiegami konserwacyjnymi. Ważne jest również łączenie traseologii z innymi metodami badawczymi, zwłaszcza archeometalurgią, obejmującą badania składu pierwiastkowego metali, izotopów (por. Miśta-Jakubowska, w tym tomie) czy mikrostruktury. Dopiero integracja tych metod umożliwia pełną interpretację nie tylko pojedynczych obiektów (Kuijpers 2017), ale także całych zespołów zabytków.

Coraz większą uwagę poświęca się również analizom pozostałości organicznych zachowanych na powierzchni zabytków. Przykładem mogą być badania sztyletów z Pragatto (Caricola i in. 2022), które – choć na razie rzadkie – dają obiecujące wyniki. Mogą one zachęcić inne zespoły badawcze do wprowadzenia tego rodzaju analiz jako standardu.

Obecnie analizy obejmują nie tylko samą metaloplastykę, ale również przedmioty, z którymi mogła wchodzić w bezpośredni kontakt. Na przykład badania traseologiczne przeprowadzone na zabytkach z kości i poroża, datowanych na epoki brązu i wczesnego żelaza, wykazały, że narzędzia kamienne przez cały ten okres były używane do obróbki wspomnianych surowców. Udział narzędzi metalowych stopniowo jednak wzrastał (Baron i Diakowski 2018; Baron i in. 2024).

Kluczowe znaczenie ma również sposób rejestrowania śladów. Tańsze przenośne mikroskopy cyfrowe pozwalają co prawda wykonywać zdjęcia, jednak dopiero urządzenia stacjonarne, wyposażone w lepsze komponenty i oferujące bardziej rozbudowane funkcje, zapewniają odpowiednią jakość obrazu. Warto także rozważyć połączenie klasycznej fotografii z fotogrametrią i skanowaniem 3D. Te nowoczesne technologie otwierają nowe możliwości analizy śladów produkcji i użytkowania, znacząco wzbogacając badania nad zabytkami metalowymi.

Pomimo dynamicznego rozwoju traseologii metaloplastyki wyzwaniem nadal pozostaje stworzenie wspólnej bazy danych dotyczących śladów użytkowania obejmującej większą liczbę krajów. Obecnie badania prowadzone są przez różne ośrodki i archeologów, z których jedynie część współpracuje. W rezultacie wiedza pozostaje rozproszona.

Kolejnym problemem jest brak ujednoliconej nomenklatury i typologii śladów, co utrudnia porównywanie wyników. Jednak rozwój tej metody badawczej postępuje, a traseologia metaloplastyki zyskuje status niezależnej i interdyscyplinarnej dziedziny badawczej. Przyszłość badań najprawdopodobniej skupi się nie tylko na analizach śladów produkcji i użytkowania, ale także na różnorodnych interakcjach, co pozwoli lepiej interpretować procesy związane z zabytkami metalowymi.

LITERATURA

Anderson, K. 2011. Slashing and thrusting with Late Bronze Age spears: analysis and experiment. *Antiquity* 85/328: 599–612.

Baron, J., Diakowski, M., Kufel-Diakowska, B., Nowak, K., Sych, D. From flint to metal? Techniques of bone and antler processing in the early Bronze Age Poland, (w:) A. Juan. López Padilla Nöelle Provenzano (red.), *Metal and worked bone materials. From Iberia to the Carpathians Proceedings of the international workshop at MARQ Archaelogical Museum of Alicante (14–15th October 2021)*. Alicante, 147–167.

Baron, J., Diakowski, M. 2018. Tools make tools: changes in bone and antler manufacture at Late Bronze and Early Iron Age Polish sites. *Antiquity* 92/363: 1–7.

Baron, J., Puziewicz, J., Nowak, K., Sych, D., Miazga, B., Ziobro, M. 2020. Same but different. Composition, production and use of bronze arrowheads from the Late Bronze Age deposit from Wrocław–Widawa in SW Poland. *Journal of Archaeological Science: Reports 32*.

Baron, J., Maciejewski, M., Jarysz, R., Kuźbik, R., Łaciak, D., Łucejko, J.J., Mackiewicz, M., Miazga, B., Nowak, K., Sych, D. 2019. *Fenomen powtarzalności. Skarby z Karmina*. Wrocław.

Biborski, M., Biborski, M. 2021. Archeometalurgia, (w:) A. Kurzawska, I. Sobkowiak-Tabaka (red.), *Mikroprzeszłość: Badania specjalistyczne w archeologii*. Poznań, 407–431.

Biborski, M., Stępiński, J., Żabiński, G. 2009. Nowe badania nad Szczerbcem – mieczem koronacyjnym królów polskich. *Studia Waweliana* 14: 235–252.

Bridgford, S.D. 1997. Mightier than the pen? An edgewise look at Irish Bronze Age sword, (w:) J. Carman (red.), *Material harm: archaeological studies of war and violence*. Glasgow, 95–115.

Carey, C., Tsoraki, C., Jones, A.M., Harris, O.J.T., Crellin, R.J., & Lyons, P. 2023. Beaker and Early Bronze Age tin exploitation in Cornwall: Cassiterite processing identified through microwear and pXRF analyses. *European Journal of Archaeology* 26(2): 147–167. https://doi.org/10.1017/eaa.2022.30.

Caricola, I., Charles, A., Tirillò, J., Charlton, F., Barton, H., Breglia, F., Rossi, A., Deflorian, M.C., De Marinis, A.M., Harris, S., Pellegrini, Alessio, Scacchetti, F., Boccuccia, P., Miari, M., Dolfini, A. 2022. Organic residue analysis reveals the function of bronze age metal daggers. *Scientific Reports* 12/6101 (2022). https://doi.org/10.1038/s41598-022-09983-3.

Crellin, R. J., & Harris, O. J. T.2021. What difference does posthumanism make? *Cambridge Archaeological Journal* 31(3): 469–475. https://doi.org/10.1017/S0959774321000159

Crellin, R. J., Tsoraki, C., Standish, C. D., Pearce, R. B., Barton, H., Morriss, S., & Harris, O. J. T. 2023. Materials in movement: gold and stone in process in the Upton Lovell G2a burial. *Antiquity* 97(391): 86–103. https://doi.org/10.15184/aqy.2022.162.

Dolfini, A., Crellin, R.J. 2016. Metalwork wear analysis: the loss of innocence. *Journal of Archaeological Science* 66: 78–87.

Gener, M. 2011. Integrating form, function and technology in ancient swords. The Concept of quality, (w:) M. Uckelmann, M. Mödlinger (red.), *Bronze Age warfare: Manufacture and use of weaponry, BAR International Series 2255:* Oxford: 117–124.

Gutiérrez Sáez, C., Lerma, I. 2014. Traceology on metal. Use-wear marks on copper-based tools and weapons, (w:) J. Marreiros, J. Gibaja Bao, N. Ferreira Bicho (red.), *Use-wear and residue analysis in archeology. Manuals in archaeological method, theory and technique*. Cham, 171–188.

Gutiérrez Sáez, C., López del Estal, A., Simón Martín, A., Muñoz Moro, P., Bashore Acero, Ch., Chamón Fernández, J., Martín Lerma, I., Sanz Salas, E., Pardo Naranjo, A.I., Marín de Espinosa, J.A. 2010. Puntas de Palmela: procesos tecnológicos y experimentación. *Trabajos de Prehistoria* 67(2): 405–428.

Hermann, R., Crellin, J.R., Uckelmann, M., Wang, Q., Dolfini, A. 2020. *Bronze Age Combat: An experimental approach*. Oxford.

Horn, Ch., Karck, T. 2019. Weapon and tool use during the Nordic Bronze Age. *Danish Journal of Archeology* 8: 1–20.

Horn, Ch. 2017. Combat and ritual — Wear analysis on metal halberds from the Danish Isles and the Cimbrian Peninsula. *Journal of Archaeological Science: Reports* 14: 515–529.

Ialongo, N., Lago, G. 2021. A small change revolution. Weight systems and the emergence of the first Pan-European money. *Journal of Archaeological Science* 129, 105379.

Kaczmarek, M., Szczurek, G., Krzysiak, A. 2021. *Kaliska I. Skarb przedmiotów metalowych z późnej epoki brązu na Pomorzu, Hyperborea. Poznańskie studia nad epoką brązu i wczesną epoką żelaza 6.* Poznań.

Kasprowicz, M. 2022. Use-wear analysis of copper-alloy artifacts. A window of opportunity or a dead end? *Folia Praehistorica Posnaniensia* 27: 73–85.

Kienlin, T.L., Ottaway, B.S. 1998. Flanged axes of the North-Alpine region: An assessment of the possibilities of use wear analysis on metal artifacts, (w:) C. Mordant, M. Pernot, V. Rychner (red.), *L'Atelier du bronzier en Europe du XXe au VIIIe siècle avant notre ère. Paryż*, 271–286.

Kristiansen, K. 2002. The tale of the sword – swords and swordfighters in Bronze Age Europe. *Oxford Journal of Archeology* 21(4): 319–332.

Kuijpers, M. 2017. The Bronze Age, a world of specialists? Metalworking from the perspective of skill and material specialization. *European Journal of Archaeology*21(4):1–22.

Kuijpers, M. 2015. Contradicting context: Understanding Early Bronze axes from thepPerspective ofpProduction, (w:) P. Suchowska-Ducke, S. Scott Reiter, H. Vandkilde (red.), *Forging Identities. The Mobility of Culture in Bronze Age Europe: Volume 1*. Oxford, 203-212.

Lago, G., Cianfoni, M., Scacchetti, F., Pellegrini, L., La Torre, A. 2023. Breaking sickles for shaping money. Testing the accuracy of weight-based fragmentation. *Journal of Archaeological Science: Reports* 49, 103968.

Molloy, B. 2008. Martial arts and materiality: a combat archaeology perspective on Aegean swords of the fifteenth and fourteenth centuries BC. *World Archaeology* 40(1): 116–134.

Molloy, B. 2009. For Gods or for men? A reappraisal of the function of European Bronze Age shields. *Antiquity* 83: 1052–1064.

Molloy, B. 2010. Swords and Swordsmanship in the Aegean Bronze Age. *American Journal of Archeology* 114: 403–428.

Molloy, B., Wiśniewski, M., Lynamc, F., O'Neill, B., O'Sullivan, A., Peatfield, A. 2018. Tracing edges: A consideration of the applications of 3D modelling for metalwork wear analysis on Bronze Age bladed artefacts. *Journal of Archaeological Science* 76: 79–87.

Nowak, K., Sielicka, K., Miazga, B. 2022. Skarb z Paszowic, woj. dolnośląskie. Analiza śladów produkcji i(nie)używania. *Archeologia Polski* 67: 81–115.

Nowak, K., Sych, D. 2024. Traceology of metalwork – limitations and new perspectives. *Sprawozdania Archeologiczne* 76(1): 99–121.

O'Flaherty, R. 2007. A weapon of choice – experiments with a replica Irish Early Bronze AgeHalberd. *Antiquity* 81: 423–434.

Pyżewicz, K. 2021. Traseologia, (w:) A. Kurzawska, I. Sobkowiak-Tabaka (red.), *Mikroprzeszłość. Badania specjalistyczne w archeologii*. Poznań, 333–353.

Roberts, B., Ottaway B.S. 2003. The use and significance of socketed axes during the LateBronze Age. *European Journal of Archeology* 6: 119–140.

Semenow, S.A. 1964. *Prehistoric Technology*. Londyn.

Sych, D., Nowak, K., Maciejewski, M., Miazga, B., Baron, J. 2020. Influence of conservation of copper and bronze artefacts on traces of production and use-wear, *Archaeological and Anthropological Sciences* 12: 141-152.

Sych, D. 2016. Biografie kulturowe militariów oraz narzędzi miedzianych i brązowych datowanych na neolit i epokę brązu z południowo-zachodniej Polski. Niepublikowana praca doktorska. Instytut Archeologii Uniwersytetu Wrocławskiego.

Sych, D. 2011. Badania makro- i mikrośladów na grotach strzał ze stanowiska Wrocław–Widawa 17. *Silesia Antiqua* 47: 93–101.

Sych, D., Momot, M., Pazdur, K. 2018. TraseoSkan 3D – zastosowanie skanowania 3D w analizach traseologicznych artefaktów brązowych. Śląskie Sprawozdania Archeologiczne 60(1): 399–408.

Sych, D. 2021. Analiza traseologiczna przedmiotów brązowych z depozytu z Kalisk, pow. szczecinecki, woj. zachodniopomorskie (Aneks 2), (w:) M. Kaczmarek, G. Szczurek,

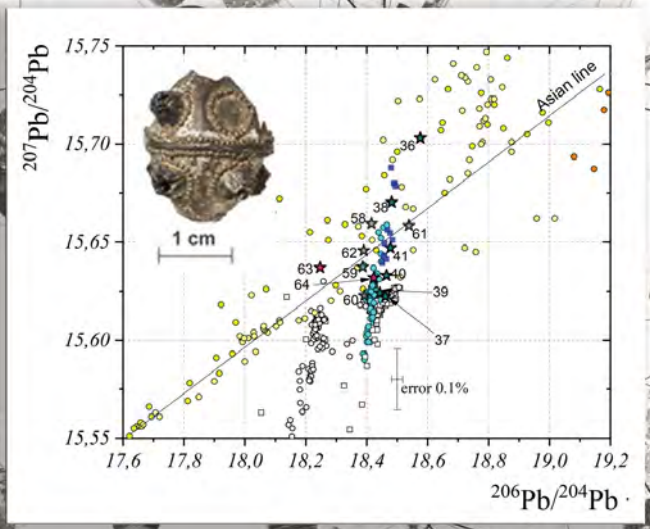
A. Krzysiak (red.), *Kaliska I. Skarb przedmiotów metalowych z późnej epoki brązu na Pomorzu.* , *Hyperborea. Poznańskie studia nad epoką brązu i wczesną epoką żelaza* 6: 357–371.

Tsoraki, C., Barton, H., Crellin, R.J., & Harris, O.J.T. 2020. Making marks meaningful: new materialism and the microwear assemblage. *World Archaeology* 52(3): 484–502. https://doi.org/10.1080/00438243.2021.1898462

Uckelmann, M., Mödlinger, M. 2011. *Bronze Age warfare: Manufacture and use of weaponry.* Oxford.

Wall, J. 1987. The Role of Daggers in Early Bronze Age Britain: The Evidence of Wear Analysis. *Oxford Journal of Archaeology* 6(1): 115–118.




15,75
15,70
15,65
15,60
15,55
207Pb/204Pb
17,6
17,8
18,0
18,2
18,4
18,6
18,8
19,0
19,2
206Pb/204Pb
Asian line
1 cm
error 0.1%
36
38
58
61
62
41
63
59
40
64
60
39
37

Izotopy metali (Pb, Sn, Ag)

Ewelina Miśta-Jakubowska

WPROWADZENIE

Badania zabytków archeologicznych wykonanych ze stopów metali (rozumiane głównie jako zabytki „metalowe", ale też szkło ołowiowe) skupiają się wokół ich opisu, sporządzenia dla nich systematyki typologicznej oraz funkcjonalnej. Następnie istotna jest technologia ich wykonania oraz pochodzenie użytego do ich produkcji kruszcu. Dwa ostatnie zagadnienia są elementem badań zwanych archeometalurgią, czyli nauką z pogranicza archeologii, badań materiałoznawczych i geochemii. Bazuje ona na wykorzystaniu do badań wykonanych ze stopów metali artefaktów narzędzi typowych dla badań materiałoznawczych w przypadku analizy technologii ich wykonania, a narzędzi geochemicznych dla badań proweniencji surowca.

Analizy technologiczne artefaktów wykonanych ze stopów metali najczęściej wykonuje się przy użyciu technik fizyko-chemicznych, opartych o oddziaływanie różnego rodzaju promieniowania z materią. Prócz mikroskopii optycznej z powodzeniem wykorzystuje się techniki rentgenowskie, neutronowe oraz te związane z oddziaływaniem światła o różnej energii (spektroskopowe). Zakres stosowanych technik jest bogaty, a ich dobór zależy od podjętego problemu badawczego, stanu zachowania zabytku oraz wymagań dysponenta. Z reguły informację o technologii wykonania w tym przypadku uzyskuje się w oparciu o dane na temat składu pierwiastkowego, chemicznego oraz struktury artefaktu. Przy czym dla opisu technologicznego na ogół wystarcza analiza zawartości pierwiastków na poziomie głównych składowych. Taka analiza materiałoznawcza jest uzupełnieniem dla badań stylistycznych oraz typologicznych i pozwala na śledzenie rozchodzenia się myśli technologicznej.

Kiedy już mamy pełny obraz technologiczny zabytku, nasuwa się pytanie: skąd czerpano surowiec do produkcji artefaktów? Wiedza na ten temat pozwala na badanie migracji ludności i myśli technologicznej dzięki odtworzeniu sieci handlowych związanych z obrotem metalami. Począwszy od chalkolitu (tj. w drugiej połowie V tysiąclecia BC w Polsce) funkcjonowanie społeczności jest oparte o pozyskiwanie kruszców metali. Poszukiwanie tych pożądanych tworów geologicznych począwszy od Epoki Brązu

DOI: 10.64158/04pptqtjnq

w Europie (3400–700 BC) zaczyna nabierać tempa, tworzy podwaliny globalizacji i trwa aż do dzisiaj. Zmieniają się jedynie trendy w modzie surowcowej, chronologicznie począwszy, od miedzi, złota, stopów miedzi, srebra, ołowiu i żelaza, od pradziejów do okresu protohistorycznego. Trzeba tu dodać, iż cechy stylistyczne zabytku niekiedy są niewystarczające albo wręcz mylące dla określenia jego pochodzenia, przynależności kulturowej. Zabytek może być bowiem wykonany z miejscowej rudy, a jego forma wskazuje na import. Może być on wielokrotnie przetapiany i mieć formę odmienną od nadanej w miejscu jego produkcji. Jak sobie z tym problemem poradzić? Wykorzystuje się do tego m.in. analizę zawartości izotopów metali.

Badania izotopowe (Pb, Sn, Ag) w archeologii, nazywane są trzecią rewolucją zaraz po osiągnięciach prahistorii ewolucyjnej i wynalezieniu datowania radiowęglowego. Umożliwiają one:

- nakreślanie szlaków handlowych,
- datowanie użytkowania złóż w okresach protohistorycznych i pradziejowych w oparciu o analizę materiału archeologicznego o rozpoznanym kontekście, a w efekcie
- reinterpretowanie i uzupełnianie wiedzy historycznej dotyczącej użytkowania kopalni, które aż do dnia dzisiejszego stanowią centra cywilizacji bazującej na wykorzystaniu surowców mineralnych.

Badania izotopowe stopów metali to połączenie wiedzy z zakresu geologii, chemii (geochemii) i fizyki. Podstawy technik izotopowych leżą w procesach fizyko-chemicznych dotyczących powstawania i frakcjonowania izotopowego w materiale geologicznym i archeologicznym. Techniki pomiarowe opierają się natomiast na zjawiskach fizycznych i chemicznych, a baza danych referencyjnych jest tworzona w oparciu o wiedzę historyczną i dane izotopowe złóż oraz wiedzę na temat samych artefaktów.

ZARYS HISTORII BADAŃ

Nowoczesna archeologia w badaniach proweniencji kruszców od lat 60. XX wieku wykorzystuje analizy izotopowe ołowiu (LIA: *lead isotope analysis:* tu izotopy ^{204}Pb, ^{206}Pb, ^{207}Pb, ^{208}Pb), uzupełnianie niekiedy badaniami składu pierwiastkowego na poziomie śladowym (<0.1% wag.). Ukazały się wtedy niezależnie dwie prace dotyczące LIA (Brill i Wampler 1965; Grögler 1966). Badania rozwijano w latach 70. i 80. XX wieku na Uniwersytecie w Oxfordzie i w ośrodkach współpracujących, przy czym inicjatorem był tu Max–Planck – Institut für Kernohysik w Haidelbergu (m.in. Cameron 1969; Gale 1979; Wagner i Weisgerber 1979). W rozwoju technik pomiarowych (od 1975 roku) uczestniczyła Polka, fizyk dr inż. Zofia Stos-Gale (Stos-Gale 1993, 2019; Stos-Gale i in. 1997). Jest ona m.in. współtwórczynią pierwszej izotopowej bazy danych OXALID (oxalid.arch.ox.ac.uk) (Stos-Gale i Gale 2009), która do dziś stanowi cenne źródło odniesienia. Niemniej, takich baz powstaje więcej, w tym IBERLID (García de Madinabeitia i in. 2021) czy GlobaLID (Global Lead Isotope Database, Westner i in. 2021). Na ten moment uznaje się, iż metodologia pomiarowa jest już ugruntowaną dziedziną i bazuje na wykorzystaniu wysokorozdzielczej spektrometrii mas.

Na świecie badania proweniencji w oparciu o LIA są prowadzone na dużą skalę i pozwoliły nakreślić szlaki dystrybucji surowca w pradziejach, ale badania dla wczesnego średniowiecza są mniej zaawansowane. W polskiej archeologii ta subdyscyplina nadal pozostaje na etapie początkowym. Do dzisiaj ukazało się sześć prac wykorzystujących wysokorozdzielczą LIA do badań materiału pradziejowego (Stos-Gale 1993, 2019; Kowalski i in. 2019; Nowak i in. 2022, 2023; Miśta-Jakubowska i in. 2024) i siedem dotyczących materiałów średniowiecznych (Miazga i in. 2022; Biermann i in. 2023; Wajda i in. 2023; Miśta-Jakubowska i in. 2024a; Mathur i in. 2024; Duczko i in. 2024; Merkel i in. 2024) na przeszło pół wieku użytkowania metody na świecie (łącznie ok. 0,2 publikacji / rok; stan na lipiec 2024), choć widać tutaj progres.

Metoda LIA ma już bogatą historię w archeologii światowej i stworzone bazy referencyjne, dodatkowo pod koniec lat 90. XX w. zaczęto rozwijać badania izotopów cyny (np. Balliana i in. 2013; Berger i in. 2018; Bower i in. 2019; Brügmann i in. 2017; Haustein i in. 2010; Gale 1997) i ostatnio, od 2018 roku – srebra (^{107}Ag, ^{109}Ag) (Mathur i in. 2018; Argapadmi i in. 2018; Arribas i in. 2020; Milot i in. 2021, 2022; Eshel i in. 2022). Prace te, we współpracy z laboratorium geochemicznym w USA, prowadzone są również na zabytkach z Polski (Mathur i in. 2024; Miśta-Jakubowska i in. 2024a). Podwaliny pod badania zmienności izotopów cyny w przyrodzie położono, podobnie jak dla LIA w archeometrii, już w latach 60. XX wieku. Niemniej uznano wówczas, iż zmienność ta jest niewielka lub wręcz jej brak (m.in. De Laeter i in. 1965; Rosman i in. 1984), co nadal jest dyskutowane. Rozwój metody badania proweniencji surowca w archeologii nastąpił dopiero w latach 1997–2002

i dotyczył mierzenia stosunku izotopowego $^{122}Sn/^{116}Sn$ (Gale 1997; Clayton i in. 2002).

METODY BADAŃ

Podstawy geologiczne

Podstawą badań izotopowych jest założenie, że oznaczone w stopie metalu (zabytku) zawartości względne (stosunki) izotopowe są analogiczne jak w złożu geologicznym, którego użyto do jego wytopu. Określa się je jako izotopowy odcisk – „*fingerprints*" – złoża (Albarède i in. 2012).

Wiedza ta opiera się na znajomości szeregów rozpadów promieniotwórczych, w wyniku których formowane są pokłady geologiczne. Budujące skorupę ziemską pierwiastki posiadają naturalne niestabilne izotopy, czyli odmiany tego samego pierwiastka o innej liczbie neutronów w jądrze. Różnią się one zatem liczbą masową, co stanowi podstawę pomiaru. Izotopy rozpadają się z określoną szybkością (zwaną czasem połowicznego rozpadu $t_{1/2}$, tzn. że w czasie $t_{1/2}$ połowa zawartości ulegnie rozpadowi). W wyniku tych procesów wytwarzane są stabilne izotopy promieniotwórcze. W pewnym momencie, w trakcie formowania się rudy, dochodzi do stanu stabilizacji geochemicznej i izotopy macierzyste są izolowane. Wówczas w nowopowstałych utworach geologicznych zawartość izotopów pochodnych pozostaje już niezmieniona. Tempo osiągania tej stabilizacji jest zależne od warunków formowania się pokładu. W związku z tym zawartość izotopów w złożu geologicznym jest zależna od czasu jego powstawania i odmienna dla poszczególnych złóż zróżnicowanych geochemicznie i geochronologicznie.

Izotopy ołowiu (Pb)

Ołów w pokładach geologicznych jest niemal wszechobecny. W artefaktach możliwe jest jego oznaczenie we wszystkich rodzajach stopów, toteż technika LIA służy do badania proweniencji obiektów wykonanych ze stopów ołowiu, srebra, miedzi, cyny i żelaza. Można powiedzieć, iż ma uniwersalny materiałoznawczo charakter.

Badanie proweniencji złożowej artefaktów to określenie w ich matrycy zawartości radiogenicznego ołowiu o liczbach masowych 206, 207, 208 (^{206}Pb, ^{207}Pb, ^{208}Pb) oraz będącego efektem bezpośredniej nukleosyntezy – izotopu ^{204}Pb. W pokładach geologicznych ołów radiogeniczny jest rezultatem szeregów rozpadów promieniotwórczych toru (Th) i uranu (U):

(1) $^{238}_{92}U \rightarrow {}^{206}_{82}Pb + 8\alpha$ – *szereg Uranowy*, $t_{1/2} = 4{,}5 \cdot 10^9$ *lat*

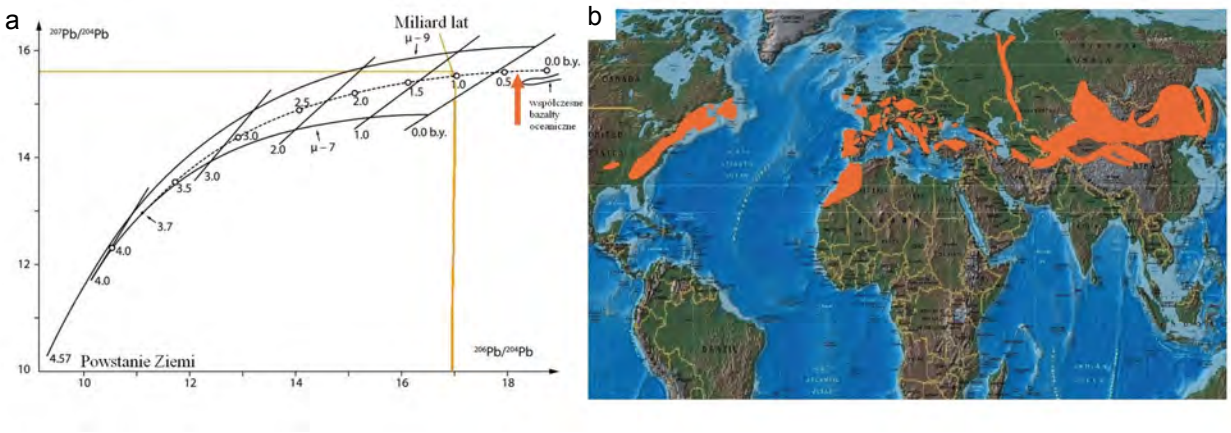
(2) $^{235}_{92}U \rightarrow {}^{207}_{82}Pb + 7\alpha$ – *szereg Aktynowy*, $t_{1/2} = 7{,}1 \cdot 10^8$ *lat*

(3) $^{232}_{90}Th \rightarrow {}^{208}_{82}Pb + 6\alpha$ – *szereg Torowy*, $t_{1/2} = 1{,}4 \cdot 10^{10}$ *lat*

W badaniach geologicznych zawartość izotopów ołowiu (wyrażona względnie jako stosunek zawartości poszczególnych izotopów ołowiu) w odniesieniu do powyższych szeregów i znajomości czasu połowicznego rozpadu pozwala oznaczyć wiek bezwzględny złoża. Skład izotopowy ołowiu w rudach jest determinowany przez wyjściowe ilości uranu i toru oraz wiek powstawania pokładów (ryc. 1) (Dziunikowski 1998; Polański 1979).

Stosowane w geochronologii stosunki izotopowe ołowiu są odniesione zawsze do ^{204}Pb, tzn. podane jako liniowe zależności $^{206}Pb/^{204}Pb$ do $^{207}Pb/^{204}Pb$ (ryc. 1) oraz $^{206}Pb/^{204}Pb$ do $^{208}Pb/^{204}Pb$. Jednak ze względu na to, że abundancja naturalna izotopu 204 wynosi zaledwie 1,4% (odpowiednio dla 206 – 24,1%, 207 – 22,1%, 208 – 52,4%), toteż błąd jego pomiaru jest największy. W związku z tym w publikacjach archeometrycznych z reguły uwzględnia się zawartości $^{207}Pb/^{206}Pb$ i $^{208}Pb/^{206}Pb$ oraz $^{207}Pb/^{206}Pb$ i $^{206}Pb/^{204}Pb$. Jednak w praktyce wybór zestawienia do celów porównawczych jest dowolny.

Jak wykazały eksperymenty (m.in. Barnes i in. 1973, 1978; Pollard i Heron 2008; Budd i in. 1995) w artefakcie stosunki izotopowe ołowiu nie wykazują istotnego dla badania proweniencji dysproporcjonowania podczas obróbki termicznej. Chcąc zatem określić pochodzenie surowca, z którego wykonano zabytek, uzyskane dla artefaktu wyniki porównuje się z danymi dla złoża (albo referencyjnymi – w tym przypadku np. dane dla artefaktów na pewno wykonanych z konkretnego złoża / przyporządkowanie stylistyczne). Uzyskane stosunki izotopowe dla artefaktu powinny być zgodne z danymi dla złoża we wszystkich rozpatrywanych wariantach liniowych zmiennych izotopowych. Wówczas zabytek można uznać jednoznacznie za wykonany z surowca pochodzącego z danego złoża. Taka zgodność przy analizowaniu danych jest wielce pożądana, ale w praktyce występują niedogodności związane z interpretacją otrzymanych wyników i jest to związane m.in. z podobnym



Ryc. 1. a – Krzywa geochronologiczna obrazująca zmiany zawartości izotopów ołowiu w skorupie ziemskiej (wg. Faure 1986) (Stos-Gale 2019, ryc. 1); b – obszary (zaznaczone na pomarańczowo) wypiętrzone podczas orogenezy hercyńskiej (428 – 250 Ma) o podobnym wieku geologicznym (wartościach stosunków izotopowych ołowiu) oznaczonym na krzywej a

okresem powstawania złoża (ryc. 1b), co opisał Killick in. (2020) oraz niejednorodnością izotopową zabytku (o czym poniżej).

Izotopy cyny (Sn)

Różnorodność form cyny jest związana z formą jej mineralizacji. Cyna posiada 10 stabilnych izotopów (^{112}Sn–^{124}Sn) – to jest więcej niż jakikolwiek inny pierwiastek. Obecnie rozpoznano 20 minerałów cyny, przy czym znaczenie użytkowe ma kasyteryt (SnO_2) oraz w znacznie mniejszym stopniu, stannit (Cu_2FeSnS_4). Złoża pierwotne kasyterytu współwystępują zawsze ze skałami magmowymi, zwłaszcza z granitem. Minerał ten może być skoncentrowany w pegmatytach oraz w pneumatolicie (wysokotemperaturowy, rzędu 350–550^{O}C) lub w hydrotermalnych żyłach kwarcowych (niskotemperaturowe).

Szczególnym przypadkiem jest *tin greisen*, czyli granit impregnowany kasyterytem. Taka mineralizacja jest charakterystyczna dla Europy, np. Kornwalii (Wielka Brytania) i regionu Erzgebirge (Niemcy). Bardzo rzadko kasyteryt może współistnieć w żyłach hydrotermalnych związanych z stannitem (typu kasyterytowo-siarczkowego) i innymi minerałami, takimi jak: turmalin, topaz, wolframit i arsenopiryt (np. wschodnie Rudawy). Pneumatolityczne (wysokotemperaturowe) osady cyny charakteryzują się wysokimi stężeniami talu, niobu i niską koncentracją wolframu. Natomiast hydrotermalne (niskotemperaturowe) rudy cyny zawierają niewielkie zawartości talu i niobu, ale są bogate w wolfram (Taylor 1979; Guilbert i Park 1986; Grant 1999; Haustein i in., 2010). Jak wykazały badania (Haustein i in. 2010; Gale 1997; Clayton i in. 2002; Yi i in. 1999) pokłady cyny powstałe w efekcie odmiennej mineralizacji różnią się izotopowo i mogą służyć jako baza referencyjna dla artefaktów, przy czym podczas obróbki cieplnej zabytków nie odnotowano istotnego frakcjonowania zawartości izotopów cyny.

Izotopy srebra (Ag)

Wszystkie pierwotne złoża rudy srebra na Ziemi są pochodzenia hydrotermalnego, tj. takiego, w którym srebro wytrąca się z gorącego roztworu wodnego (w temperaturze od ~100 do ~450 °C) krążącego w skorupie ziemskiej reagującego na różne fizyczne i chemiczne gradienty. Rozpoznanych jest co najmniej 11 różnych rodzajów złóż srebra wydzielonych w oparciu o ich genezę geologiczną i środowiskową. Dominującym typem jest epitermiczny średniosiarczkowy pokład. Inne pokłady stanowią utlenioną część osadu pierwotnego. Tworzą się one, gdy hydrotermalne (hipogeniczne) minerały srebra, takie jak: rodzime srebro i Ag-nośne siarczki i sulfosole, reagują z niskotemperaturowymi wodami powierzchniowymi w warunkach wietrzenia bogatego w tlen ze środowiska, tworząc wtórne minerały srebra. Należą do nich rodzime srebro, halogenki srebra (chlorki, bromki i jodki), uwodniony siarczan glinu srebrowego i tlenki manganu zawierające srebro. Siarczki srebra jako wtórny produkt wzbogacania, chociaż występują, mają ograniczone znaczenie.

Pomiary izotopów srebra (SI) mają zastosowanie w geologii do badania procesów powstawania rudy srebra (Mathur i in. 2018, Argapadmi i in. 2018; Arribas i in. 2020). Według badań izotopowe frakcjonowanie srebra zachodzi podczas niskotemperaturowej jego remobilizacji związanej z reakcjami redoks podczas wietrzenia oraz wśród faz mineralnych zawierających srebro. Efektem jest to, iż względna zawartość izotopów srebra zmienia się czasami w obrębie tej samej kopalni, od głębokich rud pierwotnych do utlenionych minerałów lub podczas różnych faz mineralizacji. Zmieniają się również wraz z charakterem złóż rudy, np. hydrotermalne lub sedymentacyjne. Wydaje się, że żaden systematyczny skład izotopowy srebra nie charakteryzuje konkretnego rodzaju złoża, jego położenia geograficznego czy wieku mineralizacji.

Na całym świecie hipogeniczne rodzime *(native*) srebro (Ag) i akantyt / argentyt (Ag_2S) tworzą ciasne skupisko, a ich osady utworzone w wyniku procesów mineralizacji w wysokich temperaturach mają wartości skupiające się wokół 0‰ ^{109}Ag ($-4 < \varepsilon^{109}Ag < +4$, czyli $\pm 0{,}4\ \delta^{109}Ag$). Złoża po wtórnej konstytucji wytrącającego się srebra, które miało miejsce w niższych temperaturach, mogły podlegać reakcjom redoks. Stąd srebro dla tych złóż zawiera szerszy zakres składu izotopowego w porównaniu do depozytów źródłowych ($-12 < \varepsilon^{109}Ag < 20\ \varepsilon^{109}Ag$) (Mathur i in., 2018; Arribas i in., 2020). Wobec tego izotopy srebra mogą być wykorzystywane w archeologii do klasyfikacji geologicznej eksploatowanych rud.

Wykazano (Milot i in., 2021) różnicę we frakcjonowaniu w zależności od stopnia korozji zabytków wykonanych ze stopu srebra, co determinuje sposób ich preparatyki do badań. Korozja srebra przebiega bowiem na drodze powstawania siarczku srebra: Ag_2S, którego obecność, jako elementu wtórnego względem złoża, może zakłócić pomiary. Z tego względu próbkowanie dla zabytku należy wykonać w obszarze pozbawionym korozji. Ostatnie badania wykazały również, że pomiar izotopów Ag (też Sn: Mathur i in. 2024, ryc. 9, 10 poniżej) w zestawieniu z danymi LIA może polepszyć bądź potwierdzić przyporządkowanie złożowe oraz być związanym z procesami obróbki termicznej (Miśta-Jakubowska i in., 2024a, ryc. 8 poniżej).

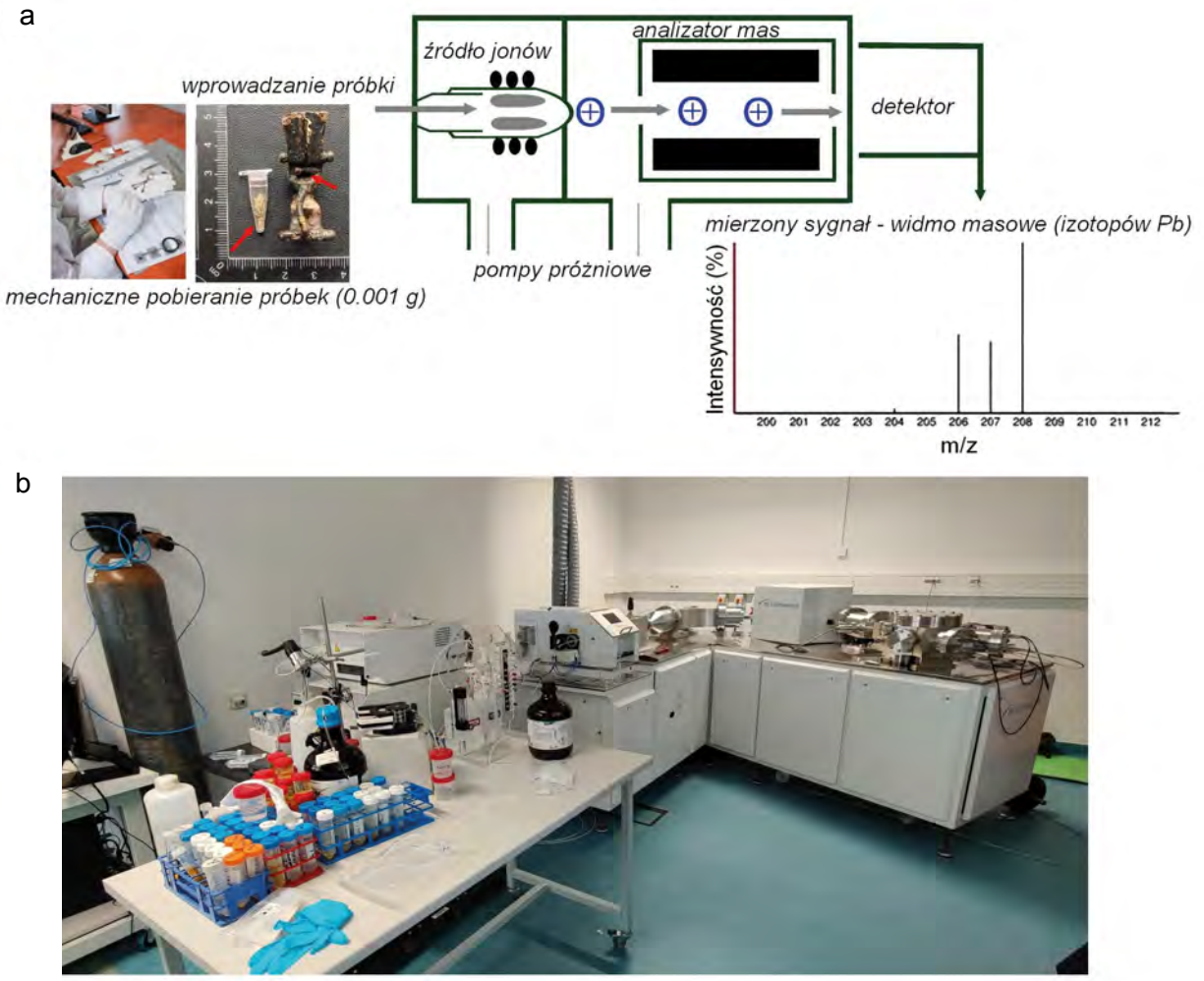
PROCEDURA BADAWCZA: APARATURA I POBÓR PRÓBEK

Obecnie do badań izotopowych oraz wykonania analiz składu pierwiastkowego na poziomie śladowym, co niekiedy jest uzupełnieniem dla badań proweniencji, stosowana jest technika spektrometrii mas (ang. *Mass Spectrometry*, MS). Rejestrowanym podczas pomiaru jest stosunek masy do ładunku danego jonu (m/z). W zależności od zastosowania istnieje wiele odmian MS różniących się konstrukcją układu pomiarowego. Różnicuje je sposób preparatyki próbki przeznaczonej do pomiaru, jonizacji cząsteczek czy atomów (fragmentaryzacji), a kolejno sposób rozdzielania zjonizowanych indywiduów chemicznych i ich pomiar (Gross 2011). To determinuje konstrukcję układu MS. Na ryc. 2a przedstawiono schemat spektrometru mas stosowanego do pomiarów izotopowych i analiz śladowych.

Pomiar polega, zgodnie z ryc. 2a, na wprowadzeniu próbki do układu, zjonizowaniu jej atomów czy cząsteczek (defragmentacji) i rejestracji powstałych jonów w formie stosunku m/z.

Do pomiarów izotopowych w badaniu proweniencji zabytków używa się techniki spektrometrii mas stosunków izotopowych (ang. *Isotope Ratio Mass Spectrometry*, IR–MS), gdzie w próbce mierzy się względne zawartości izotopów (Goetz i in., 1997). Stosuje się wysokorozdzielcze układy IRMS, to jest spektrometrię mas z jonizacją termiczną (ang. *Thermal Ionization Mass Spektrometry*, TI–MS (Yip i in., 2008), oraz bardziej popularną wysokorozdzielczą (multikolektorową) spektrometrię mas ze wzbudzeniem w plazmie indukcyjnie sprzężonej (ang. *Multiple Collector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*, MC–ICP–MS) (ryc. 2b).

Obie metody IR–MS wymagają pracy z próbkami. Od lat 60. XX wieku w badaniach proweniencji artefaktów używano TI–MS. Niemniej technika ta wymaga pobrania aż ok. 1 mg próbki z obiektu przy dokładności pomiaru ± 0,1% (Cameron 1969; Arden i Gale 1974). Wówczas zaczęto stosować też wzorce, tzw. certyfikowane materiały odniesienia – CRM (np. NIST610, NIST813) (Catanzaro i in., 1968). To umożliwiło pomiary pomiędzy laboratoriami oraz sprawdzanie wiarygodności wyników po seriach pomiarowych. Dopiero w połowie lat 90. XX wieku zaczęto stosować technikę MC–ICP–MS (Hirata 1996; Belshaw i in., 1998), która wyparła pomiary TI–MS, m.in. ze względu na możliwość pobrania znacznie mniejszej, w stosunku do TI–MS, ilości próbki oraz dokładność pomiaru: dla 1 nanograma ($1\ ng = 1\times10^{9}\ g$) próbki uzyskana jest dokładność aż 0,01%.



Ryc. 2. a – Schemat ideowy spektrometru mas. Układ pomiarowy składa się z układu wprowadzania próbki (tu przedstawiony wariant mechanicznego poboru próbki w postaci proszku o gramaturze min. 0,001), źródła jonów, gdzie następuje jonizacja indywiduów chemicznych z próbki, analizatora jonów/mas umożliwiającego podział wiązki jonów według stosunku m/z, detektora jonów oraz rejestratora (Szczepaniak 2002; Cygański 2009). Sygnałem wyjściowym jest widmo masowe; b – zdjęcie układu pomiarowego MC-ICP-MS znajdującego się w Centrum Nauk Biologicznych-Chemicznych Uniwersytetu Warszawskiego (Fot. B. Wagner)

Ze względu na prosty sposób najbardziej popularną metodą pobierania próbek jest ich mechaniczne pozyskiwanie z zabytku z użyciem np. małych wierteł czy tarcz. Ślad po pobraniu próbki w sposób mechaniczny jest niewielki (nie ujmuje wizualnym cechom zabytku, o ile jest pobrany ostrożnie) i można go zamaskować z użyciem barwionych żywic. Próbka powinna mieć gramaturę ok 0,001, przy czym im większe stężenie ołowiu w stopie, tym mniej próbki potrzeba, np. na ryc. 2a próbka pobrana jest ze stopu mosiądzu o niskiej koncentracji ołowiu (< 0,1% wagowego), stąd ma większą objętość. Lepiej żeby próbka nie zawierała produktów korozji, co ma znaczenie zwłaszcza dla pomiarów frakcjonowania srebra. Uzyskany proszek (wiór) metaliczny podlega rozpuszczeniu, kolejno wydziela się z niego chemicznie oznaczany pierwiastek i wprowadza w formie roztworu do układu pomiarowego. Taka procedura polepsza rozdzielczość oraz ogranicza błąd pomiaru. Każde laboratorium ma swój wypracowany sposób preparatyki próbek mieszczący się w standardach metodologicznych.

Znane są też sposoby pobierania próbek w sposób nieniszczący np. na drodze procesów elektrochemicznych (Arden i Gale 1974), choć są one bardziej problemowe, dlatego mniej popularne. Inny, trudniej dostępny sposób polega na pobraniu próbki za pomocą mikroniszczącego zjawiska ablacji laserowej (np. Kaiyun i in., 2013). Ablacja laserowa (ang. *laser ablation*, LA)

polega na zjawisku sublimacji. Pod wpływem oddziaływania wiązki lasera z próbką dochodzi do odparowywaniu materiału z jej powierzchni do stanu gazowego lub plazmy. Tak otrzymana próbka jest transportowana przez gaz nośny do układu pomiarowego. W procesie stosuje się lasery krótko impulsowe (ns, fs) o długości fali od nadfioletu próżniowego (10–200 nm) do podczerwieni (780 nm–1 mm). Techniki spektrometrii mas wykorzystujące LA wydają się być bardzo użyteczne przy mikroniszczącej detekcji ewentualnych niejednorodności izotopowych. Próbkowanie to pozwala bowiem na wielokrotny pomiar bez zniszczenia zabytku.

Kluczowym etapem procesu pomiarowego jest jonizacja, czyli defragmentacja indywiduów chemicznych w próbce umożliwiająca później pomiar m/z. Dobrze przeprowadzony proces pozwala na uniknięcie interferencji masowych na otrzymanym widmie. Podczas niewystarczającej defragmentacji mogą bowiem powstać jony różnych pierwiastków o tych samych liczbach masowych, a to może wprowadzić błąd w pomiarze. W TI–MS defragmentacja następuje w wyniki jonizacji termicznej (ang. *Thermal ionization,* TI) w temperaturach do 2500°C, podczas gdy w MC–ICP–MS jonizacja odbywa się w plazmie indukcyjnie sprzężonej (ang. *Inductively Coupled Plasma*, ICP), gdzie proces jest efektywniejszy ze względu na osiągane w łuku plazmowym temperatury rzędu 5000–10 000°C. Poniżej przedstawiono przykładowe procedury pomiarowe dla pomiaru MC–ICP–MS izotopów.

Procedura pomiaru dla izotopów Pb (przy małej koncentracji Pb – z rozpuszczeniem i wydzieleniem Pb na kolumnie jonowymiennej, przy znacznej koncentracji Pb – bez wydzielenia na kolumnie a z rozpuszczeniem np. w HNO_3 i przeprowadzeniem Pb do roztworu)

Pobraną z zabytku próbkę rozpuszcza się w teflonowej fiolce o pojemności 7 ml z 3 ml kwasu azotowego (V) (HNO_3). Aby ułatwić rozpuszczenie, otrzymany roztwór ogrzewa się przez noc w temperaturze 80°C. Próbki suszy się i otrzymaną sól oczyszcza jonowymiennie (używając np. żywicy Sr–Tru Spec) do analizy izotopowej Pb: (a) 0,2 ml mokrej żywicy dodaje się do 2 ml kolumienek BIORAD, (b) żywicę oczyszcza się 4 ml wody destylowanej i 4 ml 0,5 M (molowego) HNO_3, 2 ml 8 M HCl, 2 ml 0,1 M HNO_3 oraz 2 ml 8 M HNO_3, (c) próbkę nanosi się na żywicę i w 1 ml 8 M HNO3 i eluuje (wymywa) niepożądane jony za pomocą 2 ml 8 M HNO_3, 2 ml 3 M HNO_3 (x2), 2 ml 0,1 HNO_3 i 1 ml 0,5 M HNO_3, (d) Pb zbiera się w 2 ml 8 M HCl (Thibodeau i in. 2012). Otrzymany roztwór suszy się i dodaje do kulek Pb 0,1 ml 16 M HNO_3, suszy się w celu rozpuszczenia wszelkich substancji organicznych eluowanych z żywicy.

Po takiej preparatyce w roztworze mierzy się zawartość izotopów Pb za pomocą układu MC–ICP–MS. Błąd masowy koryguje się przy użyciu próbek wzbogaconych Tl (opisane w Kamenov i in., 2004). Po seriach pomiarowych wykonuje się pomiary wzorcowe dla standardowego wzorca NBS 981, sprawdzając, czy układ pracuje odpowiednio.

Procedura pomiaru izotopów Sn

Próbki (ok. 0,05–0,1 g) rozpuszcza się w ultra czystym 10 M HCl. Roztwór dalej oczyszcza się przy użyciu techniki chromatografii jonowymiennej. Oczyszczanie wykonuje się w celu uniknięcia zakłóceń pomiarowych dla pomiaru izotopów o liczbach masowych 112–124. Zakłócenia te spowodowane mogą być: a) pierwiastkowymi interferencjami izobarycznymi ^{112}Cd, ^{114}Cd, ^{115}In, ^{120}Te, ^{122}Te i ^{124}Te, b) interferencjami molekularnymi opisanymi w Haustein i in. 2010, tab. 2, np. $^{12}C^{107}Ag$ dla ^{119}Sn (z kasyterytu) w stopie srebra, c) zawartością Sb domieszkowanego w celu korekty masy (Clayton i in., 2002; Haustein i in., 2010), d) obecnością miedzi w brązach.

Aby uniknąć tych zakłóceń i uzyskać powtarzalność pomiarów, stosuje się chromatografię jonowymienną do selektywnego wydzielenia cyny. Dokładnie procedurę opisuje Haustein i in. 2010. Używana jest żywica anionowymienna TRU–Spec, czyli 13% fosfinotlenk cytolo(fenylo)-N,N-diizobutylokarbomolu metylu i 27% fosforan tributylu powlekany na nośniku kopolimerowym. Pozwala ona na wydzielenie na kolumnie Fe, U, Sn i niektórych aktynowców (Huff i Huff 1993). Na przykład jako eluentów dla roztworu 20 mg Sn, Cu i Pb oraz 2 mg Sb, Te, Cd, In i Bi używa się: a) 10 ml 1 M HCl do odzysku Cu, Pb, Sb, Te, Cd i In, b) 6 ml 5 M HNO3 dla Bi, c) 4 ml 1 M HNO3 dla Sn, przy czym wskaźniki odzysku cyny mieszczą się w przedziale 94 i 97% (Haustein i in., 2010, fig.1).

Kolejno roztwór z wydzieloną cyną rozcieńcza się do około 150 ppb cyny w dwuprocentowym roztworze azotu ze śladowymi ilościami HF i dokonuje pomiaru ICP MS (Mathur i in., 2017). Odchylenie masy koryguje się za pomocą poprawki wykładniczej (Marechal i in. 1999) z użyciem antymonu. Następnie wartości umieszcza się w nawiasach zgodnie z międzynarodowym standardem cyny NIST 3162. Wszystkie wartości podane odnoszą się do tego standardu. Wartości podane są w promilach jako:

$$\delta^{124}\mathrm{Sn}\ ‰ = \left[\frac{\frac{^{124}Sn}{^{116}Sn\ próbka}}{\frac{^{124}Sn}{^{116}Sn\ std}} - 1\right] x\ 1000$$

Błędy dla wartości izotopów zostały szczegółowo omówione w (Mathur i in., 2017) i wynoszą 0,1‰. Obecnie nie istnieje zewnętrzny standard międzynarodowy dla izotopów cyny, dlatego sproszkowana metaliczna cyna z VRW opisana w Wang i in. 2019 jest analizowana podczas sesji pomiarowych jako wzorzec. Próbki materiału geologicznego – kasyterytu, czyli głównego nośnika cyny – wymagają redukcji indukowanej piecem w celu wytworzenia czystych kulek metalicznej cyny do analizy (Mathur i in., 2017).

Procedura pomiaru izotopów Ag (w srebrze)

Chemię stabilnych izotopów Ag ($^{109}Ag/^{107}Ag$) dla zabytków wykonanych ze srebra mierzy się bez wydzielenia chromatograficznego (opisanego szerzej w Mathur i in., 2018). Małe fragmenty o masie od 0,007 do 0,02 g rozpuszcza się w 4 ml 8M HNO_3 i roztwór wprowadza się do układu pomiarowego. Składy izotopowe Ag (o liczbach masowych 107 i 109) przedstawia się w formie promila w odniesieniu do standardu NIST 978. Są one mierzone jako względna różnica między próbką i zmierzonym standardem. Wyraża się je jako:

$$\varepsilon^{109}Ag,$$

gdzie $\varepsilon^{109}Ag = 10000 \times \{(^{109}Ag/^{107}Ag)_{próbka} - (^{109}Ag/^{107}Ag)_{standard}\}/(^{109}Ag/^{107}Ag)_{standard}$;
lub $\delta\ ^{109}Ag$, gdzie $1\delta\ ^{109}Ag = 10 \times \varepsilon\ ^{109}Ag$

Odchylenie masy koryguje się, stosując prawo wykładnicze z domieszką palladu, a następnie dane umieszcza w nawiasach zgodnie ze standardem NIST 978.

WYNIKI ANALIZ

W wyniku pomiarów spektrometrycznych otrzymuje się zestaw danych liczbowych. W celu określenia proweniencji surowcowej zabytków uzyskane dla nich wartości stosunków izotopowych odnosi się do dostępnych danych złożowych lub referencyjnych (rozumianych jako artefakt dobrze datowany i wykonany ze znanego złożowo surowca). Wszystkie dane numeryczne zestawia się w formie graficznej i szuka podobieństw. Zostało przyjęte, że dane wyniki przedstawia się jako diagramy liniowe 2d, chociaż użycie wielowymiarowej analizy statystycznej w formie diagramów głównych składowych PCA (ang. *Principal Component Analysis*) czy liniowej analizy dyskryminacyjnej LDA (ang. *Linear* Discriminant *Analysis*) też bywa stosowane (Baxter 2003 i 2016; Lehmann 2011; Tomczyk i Żabiński 2023).

Kwestie problemowe

O ile techniki pomiarowe stosowane do oznaczeń izotopowych Pb, Sn i Ag są już ugruntowane w archeometrii, tak interpretacja otrzymanych danych niekiedy bywa trudna. Jest to spowodowane głównie niejednorodnością surowcową zabytków będącą efektem technologicznym (stapianie, przetapianie, warstwowość zabytków) i niekiedy skutkiem złego wydzielenia danych złożowych, co wiąże się z podobnym wiekiem pokładów geologicznych (ryc. 1b, opisane przez Killick i in., 2020) czy wręcz niewystarczającą ilością (lub brakiem) danych porównawczych. Poniższa prezentacja tych problemów oparta jest na wynikach badań przeprowadzonych przez autorkę otrzymanych dla zabytków wczesnośredniowiecznych (X–XI w.) z terenu Polski.

Przetop i niejednorodności izotopowe

W zabytkach pochodzących z okresów charakteryzujących się znaczną mobilnością społeczeństw, czyli już na pewno począwszy od okresu wczesnego średniowiecza (w Epoce Brązu przetopy surowca miedziowego nie są na ogół rejestrowane), sytuacja wykonywania jednego przedmiotu z kilku surowców jest często spotykana. Surowce te mogą pochodzić z różnych źródeł geologicznych. Złożowy marker izotopów ołowiu nie zmienia się znacząco w trakcie obróbki cieplnej, stąd ta zmienna nie wpływa na interpretację wyników izotopowych.

Problematyczna staje się natomiast ocena pochodzenia surowca w efekcie stapiania półproduktów zawierających ołów pochodzący z różnych źródeł. Stapiane to może zachodzić w efekcie działań przygotowawczych czy nanoszenia ornamentów przy pomocy lutowania surowcem zawierającym oznaczany izotop. Przyjęło się, że w przypadku stopów miedzi stapianie miedzi i cyny / cynku z reguły nie wpływa znacząco na wartość zmierzonych stosunków izotopowych ołowiu dla miedzi, gdyż zawartość ołowiu w cynie i cynku jest nieznaczna, a ich dodatek do miedzi niewielki.

Inaczej rzecz się ma w przypadku zabytków ze srebra, które dominują w gospodarce Europy

wczesnośredniowiecznej. W srebrze zawartość ołowiu może pochodzić z następujących źródeł:

- *bezpośrednio z rudy srebronośnej*: wówczas sytuacja jest względnie prosta (o ile dane złożowe są wystarczająco wydzielone i liczne) i pozwala jednoznacznie przyporządkować zabytek do złoża. W sytuacji pożądanej wartości stosunków izotopowych uzyskane dla zabytków są zbieżne z wynikiem dla złoża lub zabytków odpowiadających temu złożu, np. dirhemy azjatyckie jako nośnik izotopowego *fingerprintsu* złóż azjatyckich, z których je wykonano. Taką sytuację przedstawiają obszary oznaczone na żółto na ryc. 3;
- *z technologicznego dodatku intencjonalnego*:

(a) *w procesie uzdatniania srebra do dalszej obróbki technologicznej*, np. dodatku ołowiu w procesie kupelacji czy dodatku miedzi (pochodzącej z rudy zawierającej ołów) dla polepszenia wytrzymałości srebra. Niewykluczona jest również sytuacja złożona z obu przypadków. Wtedy uzyskany wynik jest formą uśredniania wyników od surowców, zależną od ich zawartości masowej w stopie/próbce. Przykładem mogę być półfabrykaty, tj. sztabki (nr 1, 2, ryc. 3) i inne formy (nr 4, ryc. 3);

(b) *w procesie lutowania*, z użyciem spoiw na bazie związków miedzi, cyny czy ołowiu. Taki typ lutowania (tzw. dyfuzyjnego) zachodzi np. dla wczesnośredniowiecznych srebrnych ozdób z granulacją, a jego wynik izotopowy jest podobny jak dla wariantu powyżej, o ile nie zaszło uśrednienie w trakcie pomiaru. Przykładem mogą być wyniki uzyskane dla fragmentów kaptorg oznaczonych jako 3 i 5 na rycinie 3. Przy czym mieszanie surowca może być również efektem uzdatniania srebra. Dla fragmentu paciora opisanego na rycinie 4 sprawa jest nieco odmienna: różnice w wartościach stosunków izotopowych dla bazy i ornamentu (granulatu) nalutowanego na nią mogą być efektem albo lutowania albo użycia do produkcji ornamentu srebra o odmiennym źródle (podobnie na ryc. 8a) .

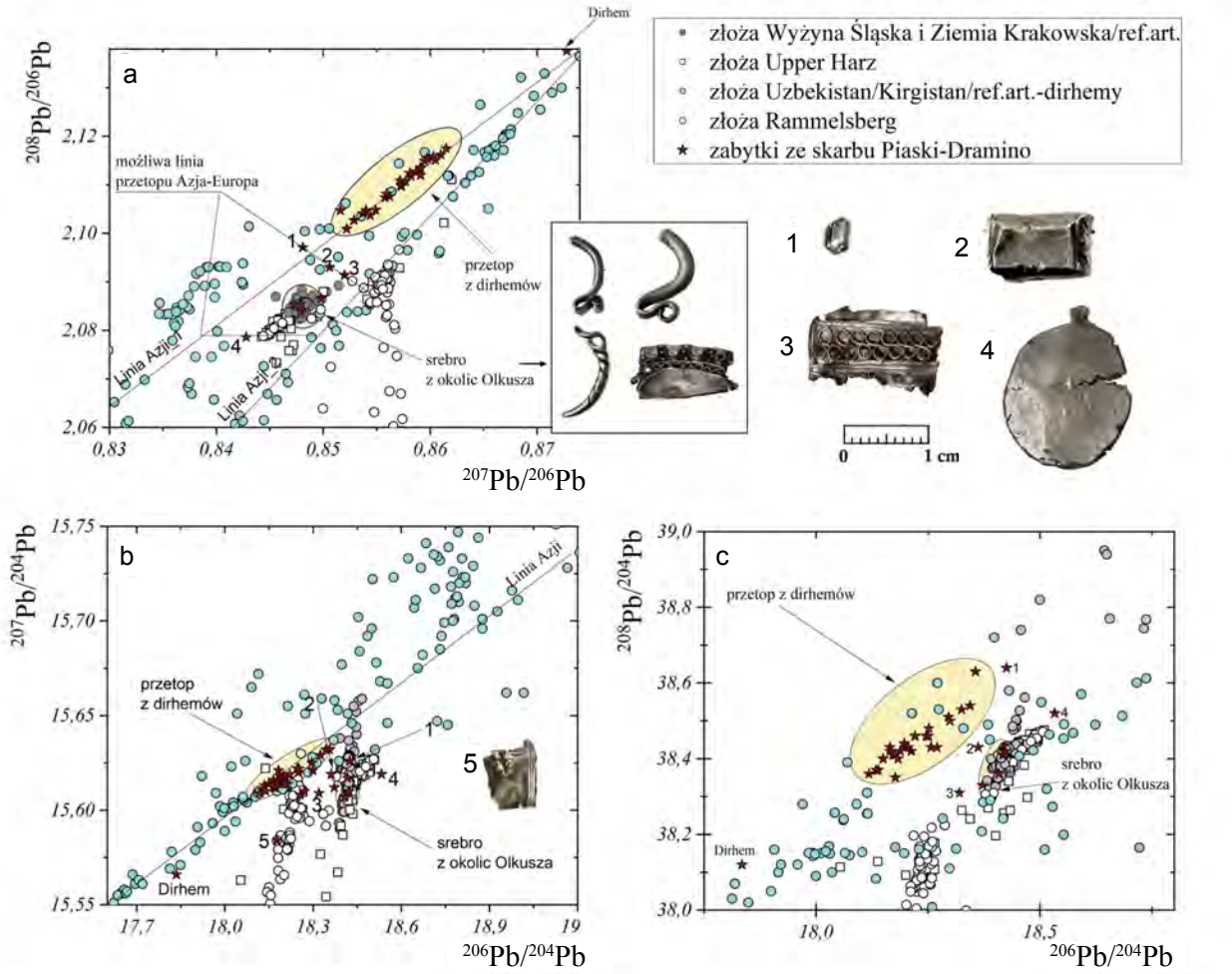
Przetop. Dane eksperymentalne

Rycina 5 przedstawia wyniki eksperymentu pokazującego efekt izotopowy dodatku ołowiu obcego do srebra. Eksperyment polegał na nadtopieniu powierzchni azjatyckiego srebrnego dirhema (moneta testowa) ołowiem z certyfikowanego materiału odniesienia NIST981. Oba surowce zatem miały znane wartości stosunków izotopów ołowiu. Monetę testową podzielono na ćwiartki, jedną nadtopiono ołowiem, pobrano próbki o nr 113–120 z trzech ćwiartek i dla nich wykonano pomiar MC–ICP–MS po pobraniu próbek.

Jak widać z zestawienia przedstawionego na rycinie 5, wyniki LIA uzyskane dla próbek pobranych z tej samej nienadtopionej ołowiem ćwiartki monety pokrywają się (to jest 113 i 114 oraz 119 i 120). Wyniki otrzymane dla próbek powstałych z nadtopienia ołowiem NIST981 powierzchni monety, jak należałoby się spodziewać, nie leżą dokładnie pomiędzy surowcami na linii łączącej ich dane LI (linia przetopu). Dla próbek nr 115 i 116 może być to uzasadnione błędem oznaczenia, a dla próbki 118, ze względu na jej znaczną odległość od linii przetopu, potencjalną niejednorodnością surowca monety. W obrębie złoża też mogą występować różnice w składzie izotopowym. Niemniej zmierzone wartości LI dla produktów leżą w pobliżu linii przetopu, a ich położenie względem niej odzwierciedla zawartość masową substratów w produkcie, tzn. im bliżej punktu dla NIST981, tym więcej tego źródła (surowca) w próbce.

Wszystkie przedstawione w rozdziale procedury pomiarowe dotyczą zastosowania wysokorozdzielczych układów pomiarowych i pracy analitycznej z próbkami pobranymi z zabytków. Ten niszczący wariant spektrometrii mas, wymagający (dla zawartości ołowiu poniżej 0,1% wagowego) wydzielenia oznaczanego pierwiastka z matrycy próbki, znacznie ogranicza błąd oznaczeń. Niemniej w świetle powyżej opisanych przykładów niejednorodności izotopowej wydaje się, że taka procedura włącznie z mechanicznym pobieraniem próbki losowo może powodować uśrednienie zawartości izotopów w pobranej objętości – nie wiemy bowiem, jaki jest stopień, i czy jest jakiś, niejednorodności izotopowej pobranego do badań obszaru. Wizualnie na ogół nie jesteśmy w stanie tego ocenić. Stopy cyny, ołowiu i cynku są podobne – są srebrzyste w kolorze. Trzeba się liczyć z tym, że pobieranie próbek z użyciem tzw. nieuzbrojonego oka może spowodować utracenie informacji o ewentualnych niejednorodnościach izotopowych powstałych w efekcie przetopów i nadtopień (lutowanie) obcym ołowiem (pochodzącym też ze stopów). Trzeba pamiętać, że nie jest możliwe powtórzenie pomiaru dla obszaru, który już uległ zniszczeniu w trakcie procedury przygotowawczej.

Podsumowując: kiedy mamy do czynienia z zabytkami wykonanymi z użyciem kilku surowców – potencjalnych nośników ołowiu, interpretacja wyników izotopowych, jak przedstawiono powyżej,



Ryc. 3. Wyniki MC-ICP-MS otrzymane dla fragmentów sreber ze skarbu Piaski-Dramino (950 r.) (woj. zachodniopomorskie) w zestawieniu z danymi izotopowymi złóż użytkowanych w danym okresie (Lehmann 2011; Hatz i in., 1991; Zartman i in., 1979; Church i Vaughn 1992) i z danymi odniesienia rozumianymi jako wartości LI otrzymane dla zabytków powstałych z wytapiania danego złoża (Miśta-Jakubowska i in., 2024; Merkel 2016: 194). Błąd pomiaru MC-ICP-MS jest mniejszy od symbolu

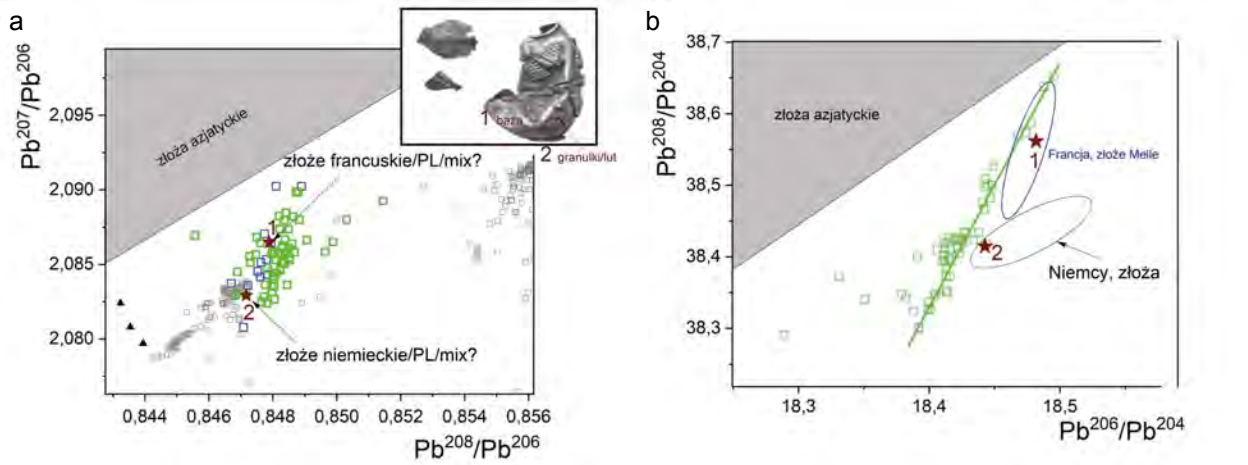
nie jest sprawą prostą. Nawet przy użyciu obowiązującego trendu metodologicznego, często opis ten stanowi próbę odnalezienia najbardziej prawdopodobnego wyniku dla proweniencji surowcowej, przy czym zagadnienie to pozostaje otwarte i w miarę gromadzenia nowych danych izotopowych dla rud i zabytków uzyskane wyniki mogą podlegać reinterpretacji.

Niekiedy pomocne przy opisie niejednoznacznych danych izotopowych otrzymanych z LIA są zestawienia z danymi dotyczącymi zawartości pierwiastków śladowych (choć tu bazy danych odniesienia są nieliczne), rozpoznanie stylistyczne i typologiczne zabytków oraz analiza zawartości innych izotopów. Przykłady takiego podejścia wielopłaszczyznowego przedstawiono poniżej dla konkretnych zabytków wykonanych ze stopów metali datowanych na X–XI wiek.

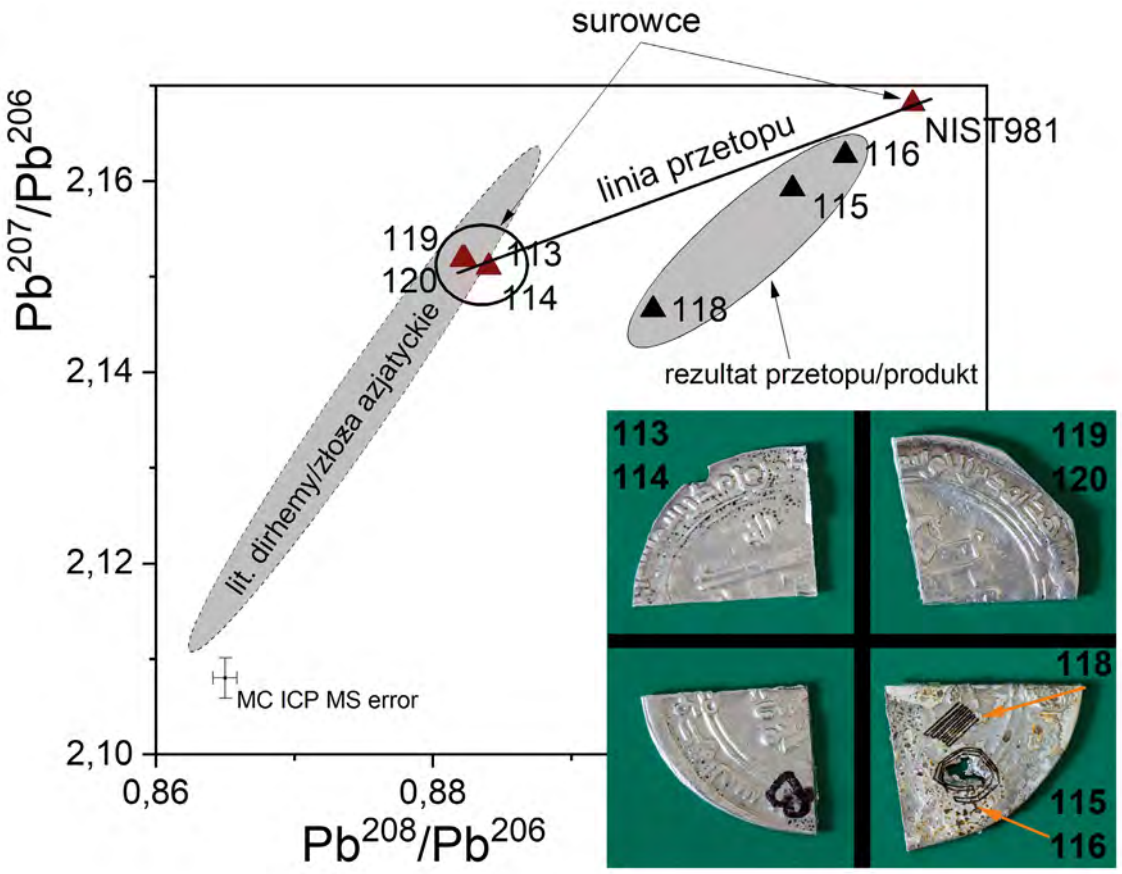
PRZYKŁADY Z BADAŃ

Ozdoby srebrne z wczesnośredniowiecznych skarbów z terenu Polski

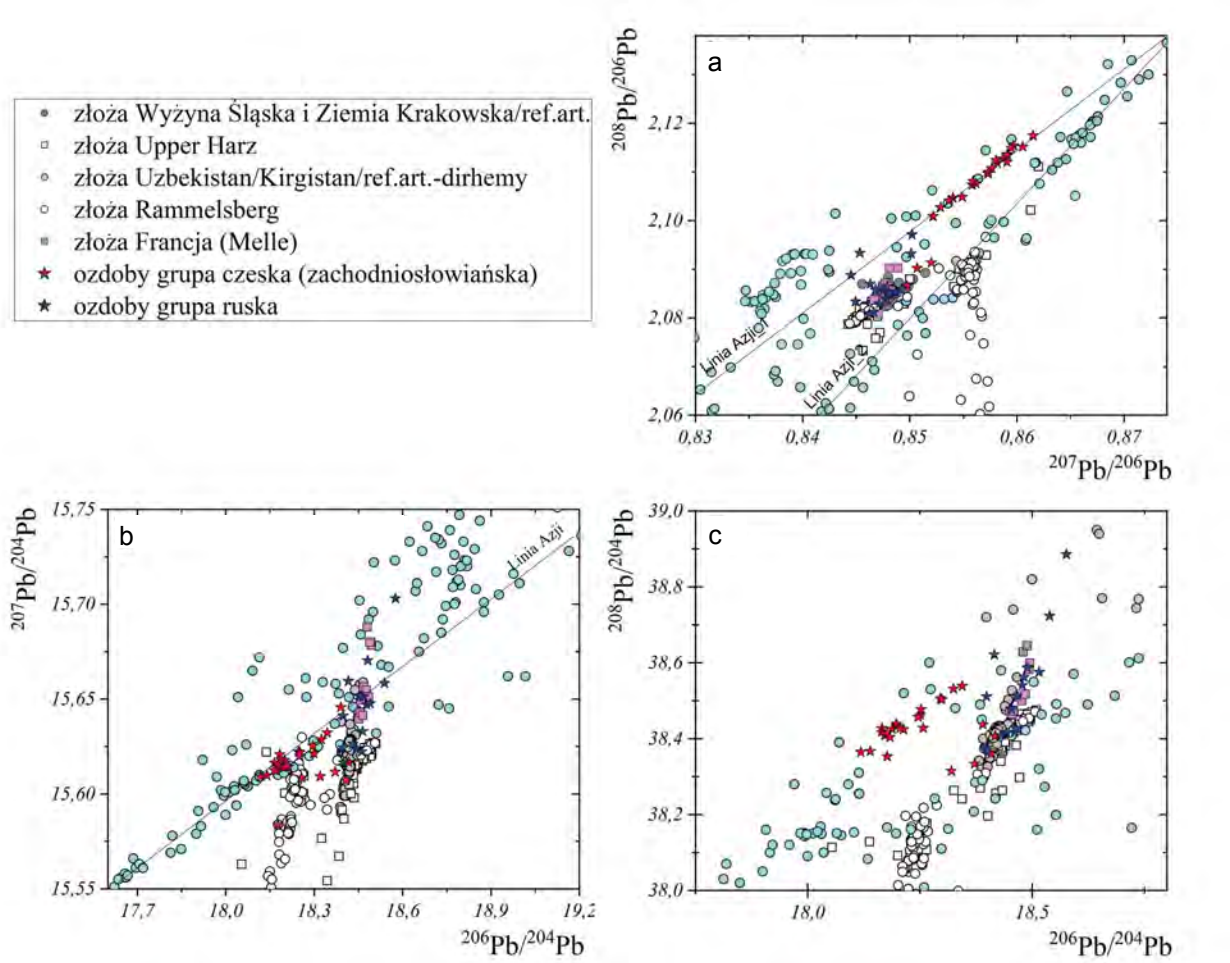
Historia ozdób wykonanych w technice granulacji i filigranu sięga czasów antycznych. Ostatnim obszarem ich występowania jest teren Wielkiej Morawy (pocz. IX w.–pocz. X w.), później w X wieku pojawiają się tego typu ozdoby w grobach czeskich.



Ryc. 4. Wyniki MC-ICP-MS otrzymane dla dwóch próbek (1 – baza na którą naniesiono ornament w postaci granulatu, 2 – granulat wraz z lutem) pobranych z granulowanego paciorka srebrnego ze skarbu Trzcianka (woj. warmińsko-mazurskie) w odniesieniu do danych złożowych i odniesienia (jak na ryc. 3, Tereygeol i in. 2005) przedstawionych schematycznie dla przejrzystości ilustracji. Przykład niejednorodności surowcowej w obrębie jednego zabytku będącej efektem albo lutowania z użyciem spoiwa z dodatkiem ołowiu obcego lub użycia do produkcji ornamentu surowca z innego źródła niż ten stopiony dla uzyskania srebra bazowego. W tym przypadku wyniki nie są jednoznaczne pod kątem proweniencji ze względu na niewystarczające rozdzielenie danych odniesienia, choć bardziej prawdopodobne (ze względu na układ wyników odniesienia) jest przyporządkowanie pokazane na diagramie b



Ryc. 5. Wyniki LIA Pb208/Pb206 i Pb207/Pb206 uzyskane za pomocą MC-ICP-MS dla próbek pobranych z dirhema i wzorca NIST981. Wyniki uzyskane dla eksperymentu, który symuluje dodatek ołowiu obcego do srebra. Monetę podzielono na ćwiartki, z czego trzy zostały nie zmienione. Powierzchnia jednej z ćwiartek została nadtopiona przy użyciu palnika ołowiem pochodzącym z wzorca certyfikowanego (NIST981) o znanym stosunku izotopowym ołowiu. Wobec czego próbki o nr 113, 114, 119, 120 i wartości LI (lead isotopes) dla wzorca stanowią materiał wyjściowy/surowce, który został stopiony dając w efekcie produkty o nr 115, 116 i 118 (Duczko i in., 2024, ryc. 96). Błąd pomiaru MC-ICP-MS jest mniejszy od symbolu

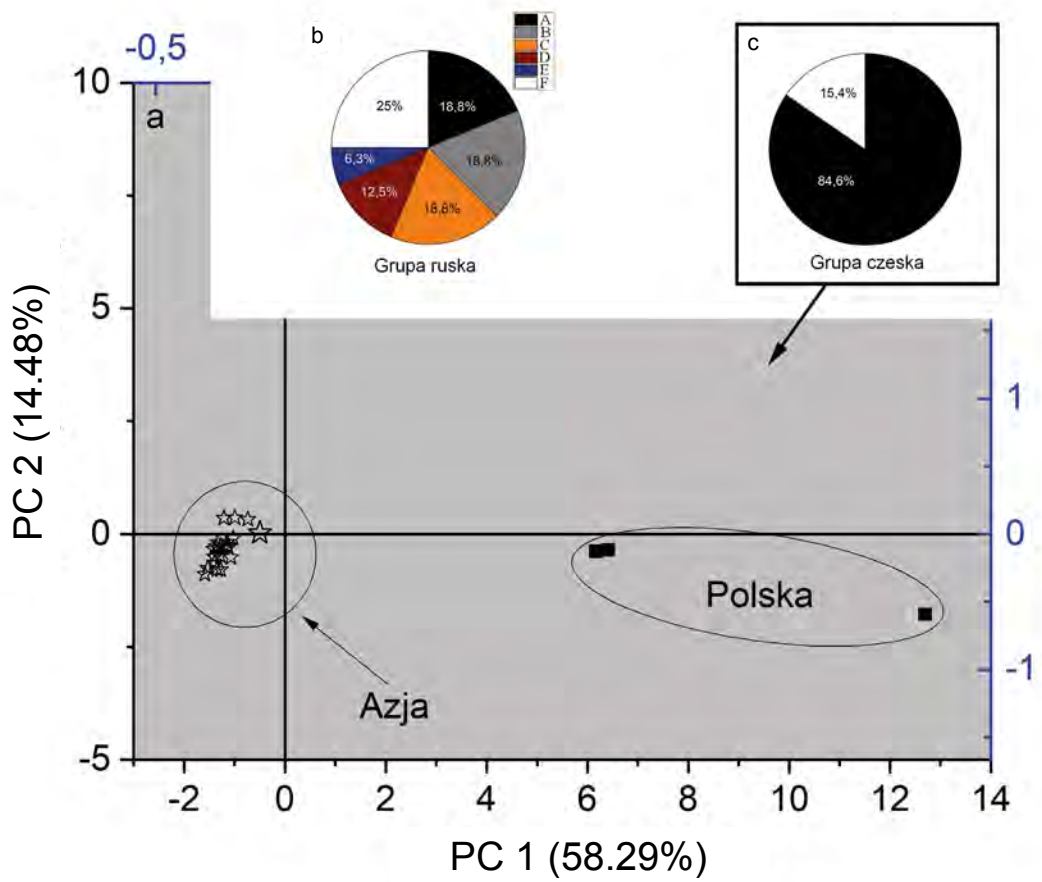


Ryc. 6. Wyniki LIA (MC-ICP-MS) otrzymane dla wybranych srebrnych ozdób z granulacją i filigranem ze skarbów wczesnośredniowiecznych (Piaski-Dramino, Pękanino, Trzcianka, Kurowo i Połczyn-Zdrój, woj. zachodniopomorskie) z podziałem na dwie grupy stylistyczne – czeską i ruską zestawione ze złożowymi danymi odniesienia

Na terenach wpływów skandynawskich występują w skarbach, głównie srebrnych. Największa ich liczba jest w Polsce, Skandynawii, na terenach dawnej Rusi Kijowskiej i w Meklemburgii. Na podstawie stylistyki ozdób srebrnych z granulacją i filigranem (Kóčka-Krenz 1993) można wydzielić dwa horyzonty: czeski (zachodniosłowiański) i ruski (skandynawski wschodni), co szerzej, wraz z procesem kształtowania się elit wczesnośredniowiecznej Europy, zostało opisane w książce Duczko i in. 2024.

Badania LIA potwierdziły koncepcję stylistycznego podziału ozdób, pokazując różnice w pochodzeniu surowca w tych dwóch wydzielonych grupach. Ryciny 6 i 7 przedstawiają wyniki analiz LIA z podziałem na grupy, pierwsza w formie zestawienia liniowego, a druga w formie diagramu analizy wieloczynnikowej PCA.

Pokrótce, jak wynika z rycin 6 i 7, grupa czeska bazowała głównie na surowcu lokalnym (z okolic Olkusza) lub lokalnie dystrybuowanym. Dirhemy były bowiem sprowadzane szlakiem na linii Azja – Kraków i stamtąd mogły być pozyskiwane przez złotników czeskich w X wieku (szerzej Miśta-Jakubowska i in., 2024a). Grupa ruska to mix surowcowy, co odzwierciedla globalny handel na terenach Rusi Kijowskiej (szerzej Duczko i in., 2024). Należy dodać, iż badania wykonano dla serii zaledwie 68 fragmentów ozdób i półfabrykatów, dlatego są one nadal na etapie wstępnym, biorąc pod uwagę liczbę dostępnych do badań obiektów (w jednym skarbie znajdują się tysiące fragmentów sreber – w formie całej lub siekańców – a skarbów na terenie Polski zinwentaryzowano do tej pory ok 700 sztuk).

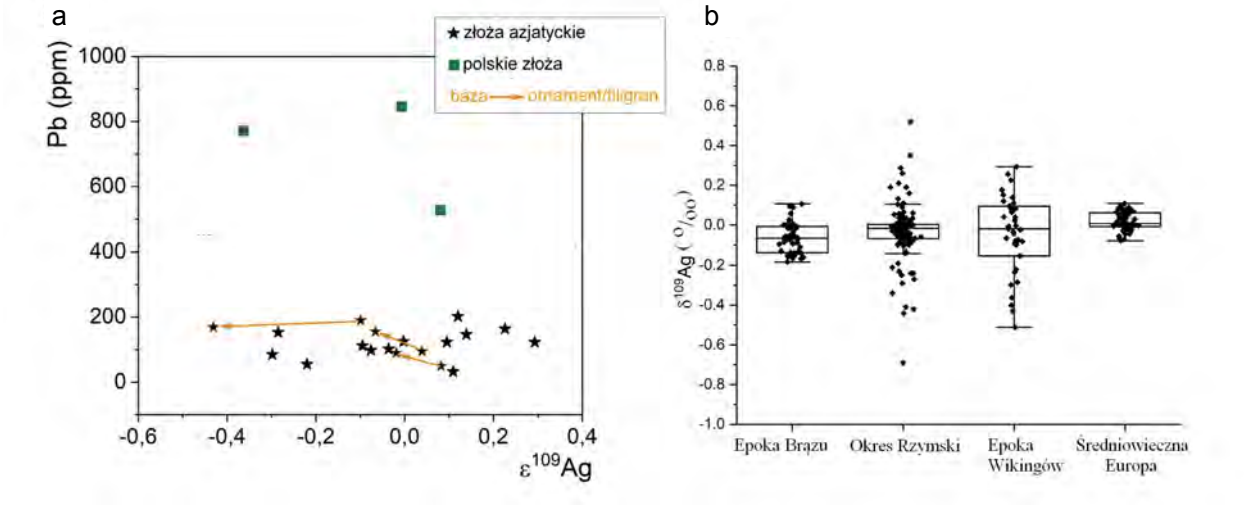


Ryc. 7. a – wyniki analizy śladowej przedstawione w formie PCA (korelacja) dla zawartości Pb, Fe, Sn, Zn, Co, Ni, As, Se, Pd, Cd, In, Sb, Tl, Bi i, Au otrzymane dla ozdób czeskich. Diagramy kołowe pokazujące wyniki LIA dla b – grupy ruskiej i c – grupy czeskiej. Oznaczenia – surowiec pochodzący: A – z przetopu srebrnych dirhemów; B – ze stopienia dirhemów i surowca pochodzącego ze złóż europejskich; C – ze stopienia kruszcu pochodzącego z różnych złóż europejskich; D – ze złóż z terenu Niemiec; E – ze złóż z terenu Francji; F – ze złóż z terenu Wyżyny Śląskiej i Ziemi krakowskiej tj. okolic Olkusza. Wyniki przedstawione na diagramach a i c są zbieżne interpretacyjnie

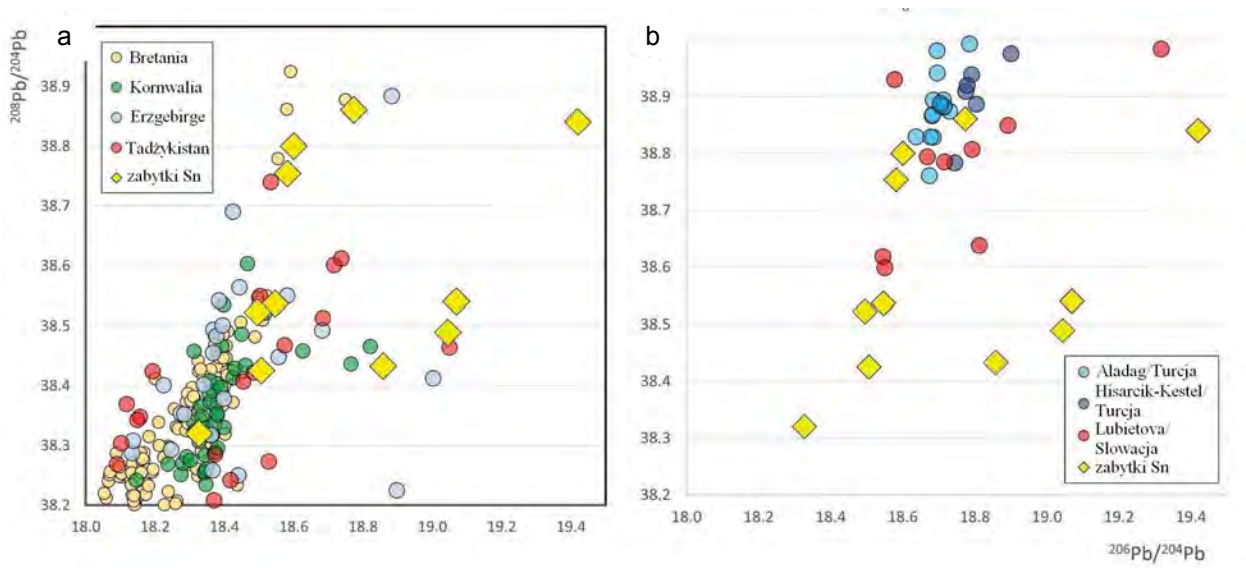
Wyniki badań frakcjonowania izotopów srebra przeprowadzone dla ozdób czeskich nie wykazują zbieżności z danymi LIA (ryc. 8b, Miśta-Jakubowska i in., 2024). Podobny wskaźnik izotopowy w tym przypadku mają również wyniki otrzymane dla sreber iberyjskich z okresu rzymskiego (ryc. 8b). W świetle wyników wydaje się, iż mineralizacja srebra może być podobna w różnych regionach, stąd rozpatrywanie pochodzenia surowca wyłącznie na podstawie zawartości izotopów srebra jest obarczone błędem. Niemniej, jak wykazano na rycinie 8a dane te różnicują się na linii odmiennych technologicznie fragmentów tego samego przedmiotu. Interpretacja tej niejednorodności może być dwojaka: 1) istnieją różnice w obrębie złoża, 2) frakcjonowanie jest efektem obróbki termicznej ozdób od strony powierzchni (lutowanie filigranu do bazy).

Wczesnośredniowieczne stopy cyny

Badając materiał datowany na XI wiek, podjęto również temat pochodzenia cyny we wczesnośredniowiecznych nadmorskich ośrodkach handlowych, takich jak: Truso i Wolin, oraz w Sypniewie – osadzie i cmentarzysku z centralnej Polski. Pytanie brzmiało, jak ogólnie wygląda dystrybucja cyny w okresie kolonizacji skandynawskiej i czy kontynuowany jest kierunek południowy jej pozyskiwania (Rudawy, Słowacja), co jest typowe dla wcześniejszych okresów. Badania zestawiono wielowymiarowo, wykorzystując dane LIA (ryc. 9), badanie frakcjonowania cyny (ryc. 10) oraz analizę zawartości pierwiastków śladowych (ryc. 11). Otrzymane wyniki są zbieżne i wykazują, że dane LIA



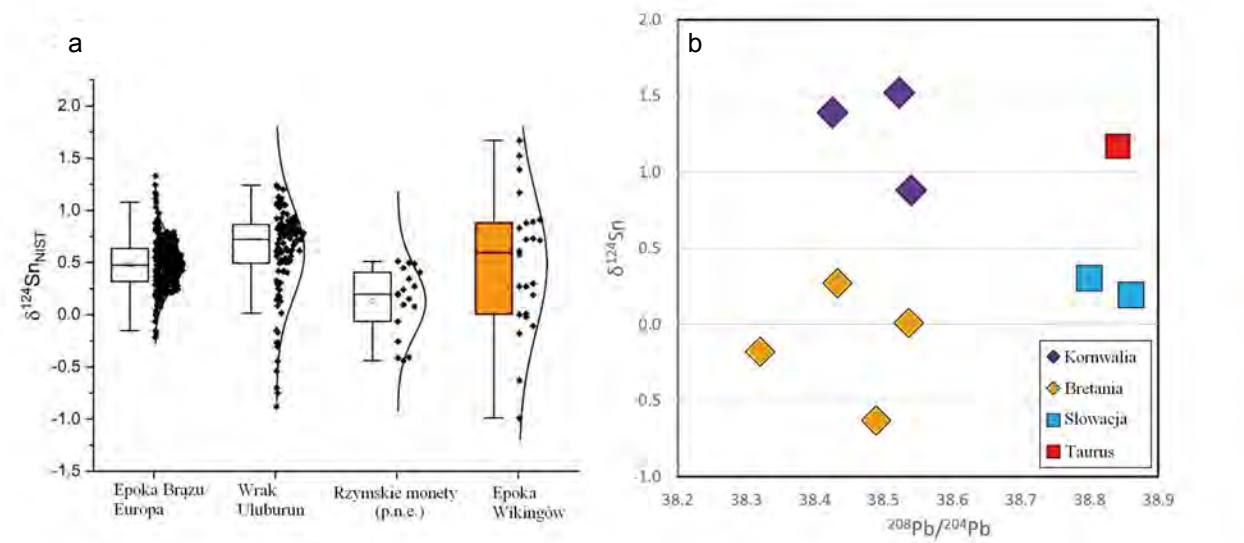
Ryc. 8. a – wyniki frakcjonowania izotopów srebra zestawione względem zawartości ołowiu (Pb) w ozdobach czeskich, b – dane odniesienia otrzymane dla różnych chronologicznie i pochodzeniowo obiektów (Epoka Wikingów – dane dla badanych ozdób) (Millot i in., 2021; 2021a, 2022; Miśta-Jakubowska i in., 2024a)



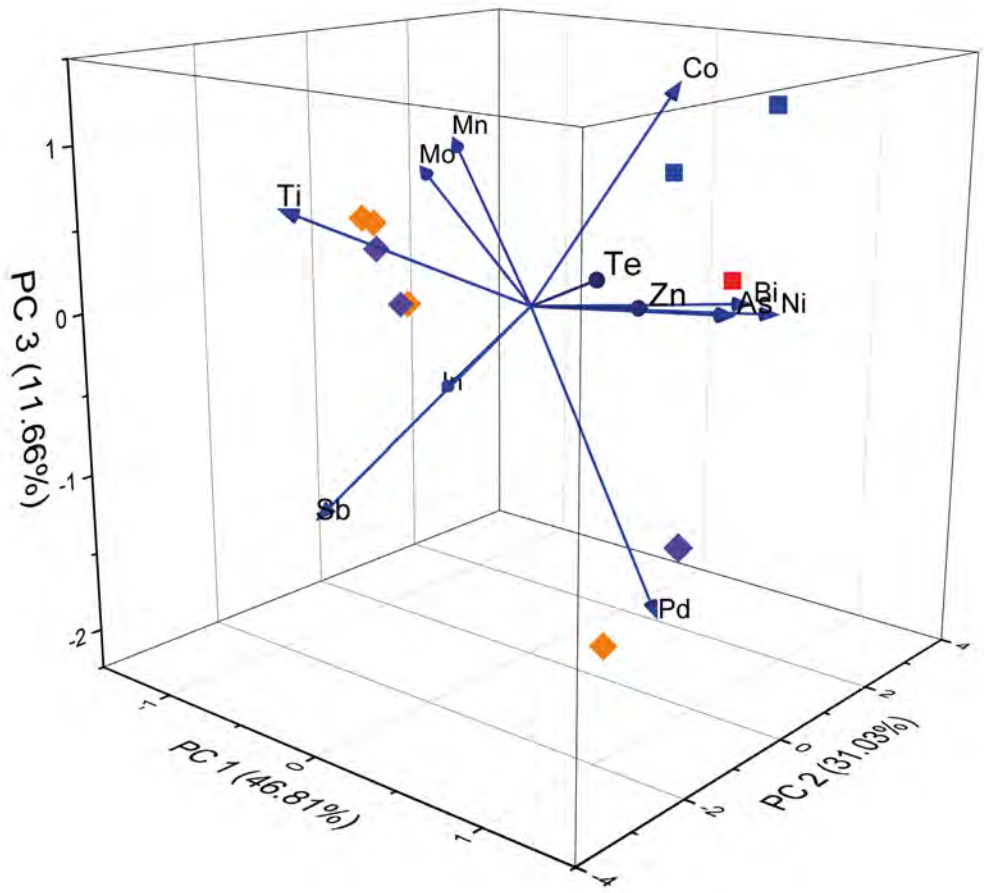
Ryc. 9. Wyniki LIA (MC-ICP-MS) Pb206/Pb204 i Pb208/Pb204 otrzymane dla zabytków XI-wiecznych z Truso, Wolina i Sypniewa wykonanych z cyny, zestawione ze złożowymi danymi odniesienia, dane dla Turcji obejmują obszar gór Taurus (Mathur i in., 2023, figs. 4, 5)

z powodzeniem pozwalają na badanie pochodzenia cyny o czystości powyżej 98% (Mathur i in. 2024).

Jak widać z ryciny 10a zakres otrzymanych wyników dla materiału z Polski jest duży, podobny jak dla sztabek cynowych z antycznego wraku handlowego z Uluburum. Zestawienie z danymi LIA (ryc. 9, 10b) pozwoliło na wydzielenie czterech możliwych kierunków handlowych, to jest wzdłuż wybrzeży Bałtyku – Kornwalii i Bretanii, Anatolii oraz znanego i dominującego kierunku w pradziejach – Słowacji. Niemniej należy zaznaczyć, iż badania te zostały wykonane dla niewielkiej liczby obiektów, stąd wymagają uzupełnienia dla liczniejszej grupy zabytków.



Ryc. 10. a – porównawcze dane dotyczące frakcjonowania izotopów cyny (Berger i in., 2018; Berger i in., 2019; Berger i in., 2022; Brügmann i in., 2017; Mason i in., 2016; Mason i in., 2020), gdzie „Epoka Wikingów" oznacza dane uzyskane dla badanych obiektów cynowych, b – przyporządkowanie pochodzeniowe zabytków (Mathur i in., 2024, fig. 6)



Ryc. 11. Wyniki analizy śladowej materiału z Truso, Wolina i Sypniewa przedstawione w formie diagramu PCA 3d (korelacja, po transformacji danych logratio). Zabytki wykonane z cyny słowackiej charakteryzuje podwyższona zawartość kobaltu (Co), z Anatolii (górny Taurus, Azja) – bizmutu (Bi), niklu (Ni), cynku (Zn) i arsenu (As) natomiast zabytki z cyny kornwalijskiej i z Bretanii mają bardziej zróżnicowany skład

PODSUMOWANIE

Badania izotopowe w archeologii mają olbrzymi potencjał naukowy. Analiza zawartości izotopów stabilnych metali ciężkich pozwala na badanie pochodzenia surowca, z którego wykonano zabytki w okresach gospodarowania metalami. To pozwala na rekonstruowanie szlaków rozchodzenia się myśli technologicznej, a przez to kontaktów i obszarów wpływów danej grupy etnicznej. Pomimo tego, że metoda pomiarowa jest już dobrze ukonstytuowana od strony metrologicznej, dla archeologii interpretacja otrzymanych wyników może nadal być niełatwa. Potrzebna jest intensyfikacja prac badawczych, która pozwoli na zgromadzenie większej liczby danych odniesienia, istotnych z punktu widzenia badania szlaków dystrybucji surowca na obszarze Polski.

Sprawa interpretacji wyników badania proweniencji jest zawsze otwarta w świetle gromadzenia nowych danych, też takich wykazujących użytkowanie danego złoża w okresie do tej pory nierozpatrywanym. Mowa tu na przykład o złożach z Wyżyny Śląskiej i Małopolski, które dotychczas uważano, na podstawie badań archeologicznych, radiowęglowych oraz źródeł historycznych, za eksploatowane od X wieku; stąd do badań proweniencji uwzględniono je dla dopasowanego chronologicznie materiału. Najnowsze wyniki badań wykonane dla ozdób ołowianych przynależnych do kultury łużyckiej wskazują jednak, że ich użytkowanie można datować już począwszy od VI wieku p.n.e (Miśta-Jakubowska i in. 2024), toteż przy analizie proweniencji materiałów pradziejowych te złoża mogą być istotne.

LITERATURA

Albarède, F., Desaulty, A.M., Blichert-Toft, J. 2012. A geological perspective on the use of Pb isotopes in archaeometry. *Archaeometry* 54(5): 853–867.

Arden, J.W. i Gale, N.H. 1974. A new electrochemical technique for the separation of lead at trace levels from natural silicates. *Analytical Chemistry* 46: 2–9.

Argapadmi, W., Toth, E.R., Fehr, M.A., Schönbächler, M., Heinrich, C.A. 2018. Silver isotopes as a source and transport tracer for gold: A reconnaissance study at the Sheba and New Consort gold mines in the Barberton Greenstone Belt, Kaapvaal Craton, South Africa. *Economic Geology* 113: 1553–1570.

Arribas, A., Mathur, R., Megaw, P., Arribas, I. 2020. The isotopic composition of silver in ore minerals. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 21/8, https://doi.org/10.1029/2020GC009097.

Balliana, E., Aramendía, M., Resano, M., Barbante, C., Vanhaecke, F. 2013. Copper and tin isotopic analysis of ancient bronzes for archaeological investigation: development and validation of a suitable analytical methodology. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 405(9): 2973–2986.

Barnes, I.L., Gramlich, J.W., Diaz, M.G., Brill, R.H. 1978. The possible change of lead isotope ratios in the manufacture of pigments: a fractionation experiment, (w:) G.F. Carter (red.), *Archaeological chemistry II, Advances in chemistry series* 171, 273–277.

Barnes, I.L., Murphy, T.J., Gramlich, J.W.,Shields, W.R. 1973. Lead separation by anodic deposition and isotopic ratio mass spectrometry of microgram and smaller quantities. *Analytical Chemistry* 45: 1881–1884.

Baxter, M. 2016. Multivariate analysis of archaeometric data: An introduction. https://www.academia.edu/24456912/Multivariate_Analysis_of_Archaeometric_Data_An _Introduction [dostęp: 28.08.2024].

Baxter, M.J. 2003. *Statistics in archaeology*. London.

Belshaw, N.S., Freedman, P.A., O'Nions, R.K., Frank, M., Guo, Y. 1998. A new variable dispersion double-focusing plasma mass spectrometer with performance illustrated for Pb isotopes. *International Journal of Mass Spectrometry* 181: 51–58.

Berger, D., Brügmann, G., Bunnefeld, J.-H., Pernicka, E. 2022. Identifying mixtures of metals by multi-isotope analysis: Disentangling the relationships of the Early Bronze Age swords of the Apa–Hajdúsámson type and associated objects. *Archaeometry* 64/S1: 44–74.

Berger, D., Figueiredo, E., Brügmann, G., Pernicka, E. 2018. Tin isotope fractionation during experimental cassiterite smelting and its implication for tracing the tin sources of prehistoric metal artefacts. *Journal of Archaeological Science* 92: 73–86.

Berger, D., Soles, J.S., Giumlia-Mair, A.R., Brügmann, G., Galili, E., Lockhoff, N.,Pernicka, E. 2019. Isotope systematics and chemical composition of tin ingots from Mochlos (Crete) and other Late Bronze Age sites in the eastern Mediterranean Sea: An ultimate key to tin provenance? *PloS one* 14(6): e0218326.

Biermann, F., Kieseler, A., Pernicka, E., Von Richthofen, J., Verlag, H. (red.) 2023. *Frumittelalterlichen Hacksilber im norlichen westslwischen Raum. Archeologie und Archeolaometallurgie.* Bonn.

Bower, N., Lundstrom, C., i Hendin, D. 2019. MC–ICP–MS analyses of tin isotopes in Roman-era bronze coins reveal temporal and spatial variation. *Archaeometry* 61(4): 891–905.

Brill, R.H. i Wampler, J.L. 1965. Isotope studies of ancient lead. *American Journal of Archaeology* 69: 165–166.

Brügmann, G., Berger, D., Pernicka, E. 2017. Determination of the Tin Stable Isotopic Composition in Tin-bearing Metals and Minerals by MC–ICP–MS. *Geostandards and Geoanalytical Research*: n/a-n/a.

Budd, P., Haggerty, A., Pollard, A.M., Scaife, B., Thomas, R.G. 1995. New heavy isotope studies in archaeology. *Israel Journal of Chemistry* 35: 125–130.

Cameron, A.E., Smith, D.H., Walker, R.E. 1969. Mass spectrometry of nanogram-size samples of lead. *Analytical Chemistry* 41: 525–526.

Catanzaro, E.J. 1967. Absolute isotopic abundance ratios of three common lead reference samples. *Earth and Planetary Science Letters* 3: 343–346.

Church, S.E., Vaughn, R.B., 1992. Lead isotopic characteristics of the Cracow-Silesia Zn-Pb ores, southern Poland. U.S. Department of Interior, U.S. *Geological Survey Open File Report* 92–93: 1–16.

Clayton, R.E., Andersson, P., Gale, N.H., Gillis, C. i Whitehouse, M. 2002. Precise determination of the isotopic composition of tin using MC–ICP–MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 17: 1248–56.

Cygański, A. 2009. *Metody spektroskopowe w chemii analityczne*j. Warszawa.

De Laeter, J.R. i Jeffery, P.M. 1965. The isotopic composition of terrestrial and meteoritic tin. *Journal of Geophysical Research* 70: 2895–903.

Duczko, W., Miśta-Jakubowska, E., Czech Błońska, R. 2022. *Metale – Ozdoby - Historia. Relacje słowiańskich i skandynawskich elit w epoce wikingów. Metals – Ornaments – History. Contacts of Slavic and Scandinavian Elites in the Viking Age*. Wrocław.

Dziunikowski, B. 1998. *Zastosowania izotopów promieniotwórczych, część II*. Kraków.

Eshel, T., Tirosh, O., Yahalom-Mack, N., Gilboa, A., Erel, Y. 2022. Silver Isotopes in Silver Suggest Phoenician Innovation in Metal Production. *Applied Sciences* 12: 741, https://doi.org/10.3390/ app12020741.

Faure, G. 1986. *Principles of Isotope Geology*. New York.

Gale, N.H. 1997. The isotopic composition of tin in some ancient metals and the recycling problem in metal provenancing. *Archaeometry* 39: 71–82.

Gale, N.H. 1979. Lead isotopes and Archaic Greek silver coins. *Archaeophysica* 10: 194–208.

García de Madinabeitia, S., Gil Ibarguchi, J.I., Santos Zalduegui, J.F. 2021. IBERLID: A lead isotope database and tool for metal provenance and ore deposits research. *Ore Geology Reviews* 137: 104279. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104279.

Goetz, A., Platzner, I.T., Itzhak, T., Habfast, K., Walder, A.J. 1997. *Modern isotope ratio mass spectrometry*. London.

Grant, M.R. 1999. The sourcing of southern African tin artefacts. *Journal of Archaeological Science* 26: 1111–17.

Grögler, N., Geiss, J., Grünenfelder, M. i Houtermans, F.G. 1966. Isotopenuntersuchungen zur Bestimmung der Herkunft römischer Bleirohre und Bleibarren. *Zeitschrift für Naturforschung* 21a: 1167–72.

Gross, H.J. 2011. *Mass Spectrometry. A textbook. 2nd ed.* Berlin.

Guilbert, J.M. i Park, C.F. 1986. *The geology of ore deposits.* New York.

Hatz, G., Hatz, V., Zwicker, U., Gale, Z., Gale, N. 1991. Otto-Adelheid-Pfennige. *Suecia Repertis. Nova Series* 7, The Royal Swedish Academy of Letters History and Antiquities.

Andras, P., Chovan, M., Dirner, V., Kral, J., Bachlinski, R., 2010. Pb-isotope study in Sb-mineralisation from western Carpathian (Slovakia). *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences* 5(2): 71–80.

Haustein, M., Gillis, C. i Pernicka, E. 2010. Tin isotopy – a new method for solving old questions. *Archaeometry* 52(5): 816–832.

Hirata, T. 1996. Lead isotopic analyses of NIST standard reference materials using multiple collector inductively coupled plasma mass spectrometry coupled with a modified external correction method for mass discrimination effect. *The Analyst* 121: 1407–1411.

Huff, E.A., i Huff, D.R. 1993. *TRU–Spec and RE–Spec chromatography: basic studies and applications, in 34th ORNL/DOE Conference on Analytical Chemistry in Energy Technology.* Gatlinburg, Tennessee.

Kaiyun, Ch., Honglin, Y., Zhian, B., Chunlei, Z., Mengning, D. 2013. Precise and Accurate *In Situ* Determination of Lead Isotope Ratios in NIST, USGS, MPI–DING and CGSG Glass Reference Materials using Femtosecond Laser Ablation MC–ICP–MS. *Geostandards and Geoanalytical Research* 38/ 1: 5-21. https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2013.00223.x

Kamenov, G.D., Mueller, P.A., Perfit, M. R. 2004. Optimization of mixed Pb-Tl solutions for high precision isotopic analyses by MC–ICP–MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 19(9): 1262–1267.

Killick, D.J., Stephens, J.A., i Fenn, T. R, 2020. Geological constraints on the use of lead isotopes for provenance in archaeometallurgy. *Archaeometry* 62: 86–105. https://doi.org/10.1111/arcm.12573.

Kóčka-Krenz, H. 1993. *Biżuteria Północno-Zachodnio-Słowiańska we wczesnym średniowieczu*. Poznań.

Kowalski, Ł., Adamczak, K., Garbacz-Klempka, A., Degryse, P., Stos-Gale, Z., Kozicka, M., Chudziak, W., Krzyszowski, A., Jedynak, A. 2019. Back to the Eneolithic: Exploring the Rudki-type ornaments from Poland. *Archaeological and Anthropological Sci*ence 11: 4355–4377.

Lehmann, R. 2011. *Archäometallurgie von mittelalterlichen deutschem Silberbarren und Münzen*. Rozprawa doktorska, Leibniz Universität Hannover, Germany.

Marechal, C. N., Telouk, P. i Albarede, F. 1999. Precise analysis of copper and zinc isotopic compositions by plasma-source mass spectrometry. *Chemical Geology* 156/ 1–4: 251–273.

Mason, A., Powell, W., Bankoff, H.A., Mathur, R., Price, M., Bulatović, A., Filipović, V. 2020. Provenance of tin in the Late Bronze Age Balkans based on probabilistic and spatial analysis of Sn isotopes. *Journal of Archaeological Science* 122: 105181.

Mason, A., Powell, W., Bankoff, H., Mathur, R., Bulatović, A., Filipović, V. i Ruiz, J. 2016. Tin isotope characterization of bronze artifacts of the central Balkans. *Journal of Archaeological Science* 69: 110–117.

Mathur, R., Arribas, A., Megaw, P., Wilson, M., Stroup, S., Meyer-Arrivillaga, D., Arribas, I. 2018. Fractionation of silver isotopes in native silver explained by redox reactions. *Geochimnica Cosmochimica. Acta* 224: 313–326. https://doi.org/10.1016/j.gca.2018.01.011.

Mathur, R., Powell, W., Mason, A., Godfrey, L., Yao, J., Baker, M.E. 2017. Preparation and Measurement of Cassiterite for Sn Isotope Analysis. *Geostandards and Geoanalytical Research* 41(4): 701–707.

Mathur, R., Powell, W., Miśta-Jakubowska, E., Duczko, W., Czech-Błońska, R., Błoński, M., Janowski, A., Żołędziowski, K., Jagodziński, M., Gójska, A., Kamenov, G. 2024. Isotopic metal compositions of Viking and medieval tin artifacts

from Poland reveal extensive trade network. *Journal of Archaeological Science: Reports* 53: 104296, doi.org/10.1016/j.jasrep.2023.104296.

Merkel, S.W. 2016. *Silver and the Silver Economy at Hedeby. Raw Materials, Innovation, Technology of Ancient Cultures*. Bochum.

Merkel, S.W., Florkiewicz, I., Jansen, M., Bode, M., Wołoszyn, M. 2024. Evidence for Slavic lead mining and trade: Early Rus' lead seals from Czermno and Gródek on the Polish Rus' border.*Journal of Archaeological Science: Reports* 56: 104539, https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2024.104539.

Miazga, B., Duma, P., Cembrzyński, P., Matyszczak, M. i Piekalski, J. 2022. Analytical studies on medieval lead ingots from Wrocław and Kraków (Poland): a step towards understanding bulk trade of lead from Kraków and Silesia Upland Pb–Zn deposits. *Heritage Science* 10: 184, https://doi.org/10.1186/s40494-022-00819-x

Milot, J., Blichert-Toft, J., Sanz, M.A., Malod-Dognin, C., Télouk, P., Albarède, F., 2022. Silver isotope and volatile trace element systematics in galena samples from the Iberian Peninsula and the quest for silver sources of Roman coinage. *Geology* 50(4): 422–426.

Milot, J., Coustures, M.P., Poitrasson, F., Baron, S. 2021a. Investigating the provenance of iron bars from Les Saintes-Maries-de-la-Mer Roman shipwrecks (Southwest France) with iron isotopes. *Archaeometry* 64(2), 385-407. https://doi.org/10.1111/arcm.12715.

Milot, J., Malod-Dognin, C., Blichert-Toft, J., Télouk, P., iAlbarède, F. 2021. Sampling and combined Pb and Ag isotopic analysis of ancient silver coins and ores. *Chemical Geology* 564: 120028.

Miśta-Jakubowska, E., Dzięgielewski, K., Rozmus, D., Czech-Błońska, R., Szymaszkiewicz, M., Michnik, M., Gójska, A., Karasiński, J., Garbacz-Klempka, A., Wagner, B., Duczko, W. 2024. The first isotopic evidence of Early Iron Age lead ore exploitation in the Silesian-Krakow upland, Poland: a provenance study of Lusatian culture lead ornaments. *Archaeometry*: 1–18. https://doi. org/10.1111/arcm.13022.

Miśta-Jakubowska, E., Duczko, W., Kowalska, A.B., Czech-Błońska, R., Mathur, R., Gójska, A., Oleszak D., Siuda, R., Klimaszewski, J. 2024a. Amulets from Viking-age Baltic coast: A unique hoard from Piaski-Dramino (Poland) in the light of provenance and technological research of silvercraft art. *Journal of Archaeological Science: Reports* 53: 104356. doi.org/10.1016/j.jasrep.2023.104356

Nowak, K., Tarbay, J.G., Stos-Gale, Z.A., Derkowski, P., Sielicka, K. 2023. A complex case of trade in metals: The origin of copper used for artefacts found in one hoard from a Late Bronze Age Lusatian Urnfield Culture in Poland. *Journal of Archaeological Science: Reports* 49: https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2023.103970

Nowak, K., Stos-Gale, Z.A.A., Stolarczyk, T., Miazga, B. 2022. The Late Bronze Age ‚metallurgists' graves' in south-western Poland. Tracing the provenance of the metal raw material using casting moulds. *Journal of Archaeological Science: Reports* 42: 103393.

Polański, A. 1979. *Izotopy w geologii*. Warszawa.

Pollard, A.M., Heron, C. 2008. *Archaeological chemistry. 2nd ed.* London.

Rosman, K.J.R., Loss, R.D. i De Laeter, J.R. 1984. The isotopic composition of tin. *International Journal of Mass Spectrometry and Ion Processes* 56: 281–91.

Stos-Gale, Z. 2019. Lead isotopes and the origin of bronze artefacts, (w:) J. Sobieraj (red), *The origins of the Bronze Age in Warmia and Masuria revealed by scientific analyses*: 83–118.

Stos-Gale, Z.A. 1993. The origin of copper based metals from the Roman period settlement of Jakuszowice in Southern Poland. *Journal of European Archaeology* 1(2): 101–131.

Stos-Gale, Z.A., Gale, N.H., 2009. Metal provenancing using isotopes and the Oxford archaeological lead isotope database (OXALID). *Archaeological and Anthropological Sciences* 1(3): 195–213.

Stos-Gale, Z.A., Maliotis, G., Gale, N.H., Annetts, N., 1997. Lead isotope characteristics of the Cyprus copper ore deposits applied to provenance studies of copper oxhide ingots. *Archaeometry* 39/1: 83–124.

Szczepaniak, W. 2002. *Metody instrumentalne w analizie chemicznej*. Warszawa.

Taylor, R.G. 1979. *Geology of tin deposits.* Amsterdam.

Tereygeol, F., Hoelzel, S., Horn, P. 2005. Journee archaeologique de Melle – Le monnayage de Melle au haut Moyen Age: etat de la recherche. Association des archeologues de Poitou-Charentes. *Bulletin de liaison et d'information* 34: 49–56.

Thibodeau, A.M., Chesley, J.T., Ruiz, J. 2012. Lead isotope analysis as a new method for identifying material culture belonging to the Vázquez de Coronado expedition. *Journal of Archaeological Science* 39(1): 58–66.

Tomczyk, C., Żabiński, G., 2023. A PCA-AHC approach to provenance studies of non-ferrous metals with combined Pb isotope and chemistry data. *Journal of Archaeological Method and Theory*. https://doi.org/10.1007/s10816-022-09598-y.

Wagner, G.A. i Weisgerber, G. 1979. The ancient silver mine at Ayios Sostis on Siphnos (Greece). *Archaeophysica* 10: 209–222.

Wajda, S., Merkel, S.W., Florkiewicz, I., Jansen, M., Marciniak-Maliszewska, B., Wagner, B., Wołoszyn, M. 2023. Early mediaeval lead glass bangles from Czermno, Poland: Results of elemental and lead isotopes analyses. *Archaeometry*: 1–20. https://doi.org/10.1111/arcm.12907.

Wang, D., Mathur, R., Powell, W., Godfrey, L. i Zheng, Y. 2019. Experimental evidence for fractionation of tin chlorides by redox and vapor mechanisms. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 250: 209–218.

Westner, K.J., Thomas, R., Klein, S., Yiu-Kang, H. 2021. GlobaLID – Global Lead Isotope Database. V. 1.0. *GFZ Data* Services. https://doi.org/10.5880/fidgeo.2021.031

Yi, W., Budd, P., McGill, R.A.R.S., Young, M.M., Halliday, A.N., Haggerty, R., Scaife, B. i Pollard, A.M. 1999. Tin isotope studies of experimental and prehistoric bronzes, in The beginnings of metallurgy, (w:) A. Hauptmann, E. Pernicka, T. Rehren and Ü. Yalcin (red.), *Der Anschnitt, Beiheft* 9, 285–90.

Yip, Y., Lam, J.Ch., Tong, W. 2008. Applications of lead isotope ratio measurements. *Trends in Analytical Chemistry* 27(5): 460–480.

Zartman, R.E., Pawlowska, J., Rubinowski, Z. 1979. Lead isotopic composition of ore deposits from the Silesia-Cracow mining district: in Research on the genesis of zinc-lead deposits of upper Silesia, Poland. *Przegląd Geol*ogiczny 95: 133–151.





Konserwacja ruchomych zabytków archeologicznych

Magdalena Majorek-Lipowicz

WPROWADZENIE

Konserwacja ruchomych zabytków archeologicznych jest nieodłącznym elementem badań archeologicznych zapewniającym zachowanie wydobytych z ziemi lub wody artefaktów dzięki zastosowaniu odpowiednich procedur konserwatorskich. Termin konserwacja (łac. *conservātiō* – zachowywanie, utrzymanie, ochrona) jest definiowany jako „działanie mające na celu utrzymanie zabytku w stanie należytym. Obejmuje czynności zapobiegawcze i utrwalające" (Kurzątkowski 1989: 35), wyklucza jednak wprowadzanie zmian, ulepszeń lub uzupełnień (Pruszyński 1989: 30). Równocześnie konserwacja ruchomych zabytków archeologicznych stanowi składową działań służących zabezpieczeniu dziedzictwa archeologicznego obejmującego zarówno bierną, prawno-administracyjną ochronę zabytków (ruchomych i nieruchomych), jak i aktywną działalność na rzecz opieki nad tymi zabytkami, tj. zabezpieczenie, badania, dokumentowanie, interpretację, prezentację i współczesne wykorzystanie (Kobyliński 2001: 13–14).

Celem konserwacji ruchomości rozumianych jako ruchome zabytki pochodzące z badań archeologicznych, to jest przedmioty związane z działalnością człowieka w przeszłości i/lub wytwory rąk ludzkich, jest: spowolnienie procesów niszczących, zabezpieczenie zabytków przed dalszą destrukcją (zarówno w trakcie eksploracji, jak i w transporcie, w przestrzeniach magazynowych, na ekspozycjach); utrwalenie i wzmocnienie (formy, kształtu, struktury); zachowanie oryginalnych elementów (reperacji, patyn, śladów technologicznych); umożliwienie wykonania analiz specjalistycznych, identyfikacji i opracowania; przywrócenie pamięci (o zabytku, dawnej technice i technologii, wytwórcy, użytkowniku itd.); ocalenie dla przyszłych pokoleń (Majorek 2024: 369).

ZARYS HISTORII KONSERWACJI

Konserwacja zabytków archeologicznych ma swoje korzenie w badaniach greckich i rzymskich starożytności już w początkach naszej ery. Najwcześniejsze pisemne wzmianki o działaniach je zabezpieczających pochodzą bowiem od Pliniusza Starszego z I wieku naszej

DOI: 10.64158/twsqufh10l

ery. Jednak za podwaliny współczesnej konserwacji można dopiero uznać działalność antykwaryczną i kolekcjonerską, której rozwój przypada na okres renesansu (Jażdżewski 1966: 29) i kolejne stulecia, przy czym dopiero wykopaliska w Pompejach i Herkulanum uświadomiły badaczom potrzebę opracowania technik konserwatorskich, które zabezpieczałyby przedmiot w takiej formie, w jakiej został odnaleziony. Zatem koniec XVIII i początek XIX wieku to czas, gdy badacze bardziej interesują się problematyką dotyczącą ochrony materiałów archeologicznych. Wyniki ich obserwacji w połączeniu z technikami terenowymi opracowanymi przez takich archeologów XIX i XX wieku, jak: Heinrich Schliemann, William Matthew Flinders Petrie i Howard Carter (Sease 1996: 157–161), tworzą trzon współczesnej konserwacji archeologicznej.

W ostatnim stuleciu na rozwój myśli konserwatorskiej bezpośrednio wpływa definiowanie pojęcia „zabytku" prezentowane w tekstach doktrynalnych (Szmygin 2000; *Międzynarodowe teksty doktrynalne…* 2023) i aktach prawnych (Kowalski 2008: 52–56). Wraz z rozwojem metod i technik badawczych oraz pojawianiem się nowych urządzeń i narzędzi ewoluują także koncepcje dotyczące ochrony i konserwacji zabytków. Za pierwsze polskie dokumenty regulujące kwestie opieki nad zabytkami uznaje się: Dekret Rady Regencyjnej w opiece nad zabytkami sztuki i kultury z 31 października 1918 roku oraz Rozporządzenie Prezydenta Rzeczypospolitej o opiece nad zabytkami z 1928 roku (Jażdżewski 1966: 86–87).

Jak pisze Zbigniew Kobyliński:

> najwcześniejszym wyrazem istnienia akceptowanej na poziomie międzynarodowym doktryny konserwatorstwa archeologicznego jest dopiero wydane w roku 1956 „Zalecenie Organizacji Narodów Zjednoczonych do spraw Oświaty, Nauki i Kultury (UNESCO) na temat międzynarodowych zasad, które winny być stosowane podczas wykopalisk archeologicznych" (Kobyliński 2008: 35).

Próżno jednak szukać w tych dokumentach wytycznych dotyczących konserwacji ruchomych zabytków archeologicznych.

Uwarunkowania prawne i pozaprawne w konserwacji zabytków archeologicznych

Aktami prawnymi regulującym obecnie kwestie konserwacji zabytków archeologicznych w Polsce jest Rozporządzenie Ministra Kultury i Dziedzictwa Narodowego z 27 lipca 2011 roku w sprawie prowadzenia prac konserwatorskich, prac restauratorskich, robót budowlanych, badań konserwatorskich, badań architektonicznych i innych działań przy zabytku wpisanym do rejestru zabytków oraz badań archeologicznych (Rozporządzenie…, 2011) oraz Ustawa z 23 lipca 2003 roku o ochronie zabytków i opiece nad zabytkami (z późniejszymi zmianami) (Ustawa o ochronie…, 2003). Wskazane dokumenty niestety nie dookreślają, kto i w jakim zakresie może wykonywać konserwację zabytków archeologicznych, przy czym w odniesieniu do prac konserwatorskich ruchomych zabytków archeologicznych znajduje zastosowanie artykuł 108 ust. 1 u.o.z.: „kto niszczy lub uszkadza zabytek podlega karze pozbawienia wolności od 3 miesięcy do lat 5" (Rowińska 2014: 227–231).

W konserwacji zabytków archeologicznych należy zatem kierować się zasadami i praktykami konserwatorskimi ujętymi w kodeksach etyki zawodowej (np. Wolski 1998: 16–17; Rouba 1998: 32–33; Rodgers 2004) oraz treściami i umiejętnościami przyswojonymi podczas studiów na kierunku konserwacja dzieł sztuki lub archeologia w jednostkach naukowych, w których znajduje się moduł kształcenia bądź specjalizacja w zakresie konserwacji zabytków archeologicznych. Jak podaje Bogumiła Rouba, w realizacji zadań konserwatorskich należy przestrzegać kilku zasad, z których najważniejszą jest: *Primum non nocere*, to jest „po pierwsze nie szkodzić"! Kolejne zasady wymagają od konserwatora przede wszystkim poszanowania oryginalnej substancji zabytku, minimalnej niezbędnej ingerencji w strukturę przedmiotu, przestrzegania zasady czytelności i odróżnialności ingerencji, zasady odwracalności / usuwalności metod i materiałów oraz wykonywania wszelkich prac zgodnie z najlepszą wiedzą wraz z pełną dokumentacją z przebiegu procesu konserwatorskiego, uzupełnioną o wyniki badań specjalistycznych (www.zpap-orkds.pl).

RODZAJE KONSERWACJI

W odniesieniu do ruchomości termin konserwacja używany jest zarówno w znaczeniu wąskim – jako prace konserwatorskie prowadzone przy konkretnym zabytku bazujące na ocenie stanu zachowania, wynikach wstępnych analiz surowcowych, sformułowanych podstawowych pytaniach badawczych i potrzebach, oraz w znaczeniu szerokim – jako proces, w którym mieści się również wykonanie (lub zlecenie) pełnych analiz specjalistycznych, zabezpieczenie przedmiotu

na stanowisku, jak również w przestrzeniach magazynowych lub/i na ekspozycjach.

Przyjmując za kryterium podziału miejsce podejmowanych działań konserwatorskich, należy wyróżnić zabiegi zabezpieczające wykonywane *in situ* – na stanowisku / w terenie, oraz *ex situ* w pracowni / laboratorium, w magazynie / podczas ekspozycji. Gdy dany przedmiot poddawany jest procesowi konserwacji po raz wtóry i kolejny – to takie działanie określa się mianem re-konserwacji. Z kolei mianem pośredniej konserwacji przez dokumentację określić należy działania konserwatorskie ograniczone do wykonania dokumentacji, przy czym ten rodzaj konserwacji archeolog powinien niezwłocznie wdrożyć, gdy zabytki cechuje zły stan zachowania, wystąpiły zdarzenia ekstremalne, brakuje kadry konserwatorskiej na stanowisku, wydłuża się czas oczekiwania na konserwację. Ostatnich dwóch nieprawidłowości można uniknąć, odpowiednio przygotowując program badań wykopaliskowych i stosując właściwe kosztorysowanie projektu.

Pozostałe czynności w zakresie konserwacji powinny być wykonywane przez specjalistów – archeologów ze specjalizacją konserwacja zabytków archeologicznych i konserwatorów – restauratorów dzieł sztuki. W ograniczonym zakresie (zabezpieczenie na czas transportu, ochrona przed przesuszeniem) – przez doświadczonego archeologa po konsultacji ze specjalistą.

PROCES KONSERWACJI

Zabezpieczeniu konserwatorskiemu w odpowiednim zakresie powinny być poddawane wszystkie rodzaje ruchomych zabytków archeologicznych, organiczne i nieorganiczne (ryc. 1), wbrew powszechnemu przekonaniu, że zabytki nieorganiczne, niemetalowe, zarówno modyfikowane (wyroby z gliny), jak i naturalne (skały, minerały), takiej interwencji nie potrzebują. Stan zachowania zabytku to wynik interakcji surowca z otaczającym środowiskiem. To samo środowisko może chronić lub niszczyć materialne pozostałości różnych grup surowcowych. Kluczowym jest nabycie umiejętności rozpoznawania poszczególnych materiałów z użyciem wiedzy w zakresie chemii archeologicznej (Goffer 2007), stanu zachowania zabytków archeologicznych (np. Machnowski i in., 2010: 45–59), czynników wpływających na ich degradację (Majorek 2017: 191–193) celem odpowiedniego zabezpieczenia zabytków oraz dobrania odpowiednich metod konserwatorskich. Współczesny proces konserwacji obejmuje zatem działania w terenie (*Pierwsza pomoc…,* 1998; Krukowska i Grochowska-Jasnos 2013), a następnie w pracowni / laboratorium (*Studies in Archaeological Conservation* 2020).

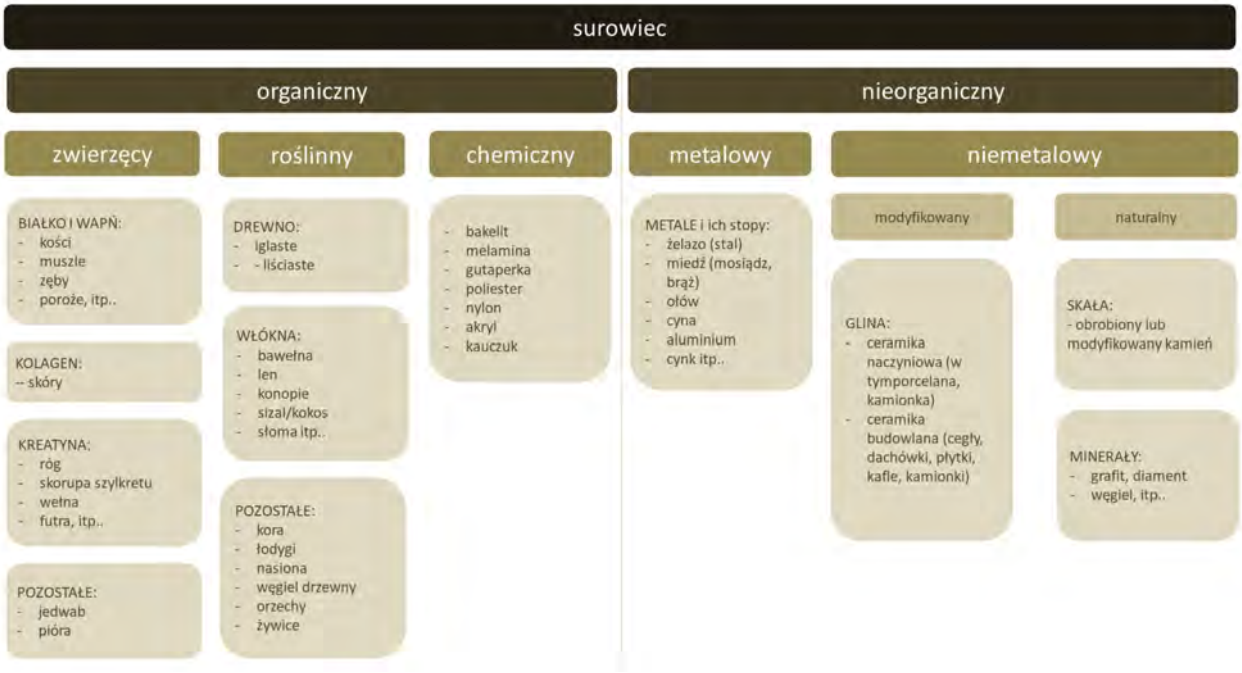
W terenie

Stan zachowania zabytków na stanowisku określa się na podstawie oceny organoleptycznej / wizualnej, najlepiej posiłkując się lupami i mobilnymi (np. cyfrowymi) mikroskopami, stosując jedną z dwóch rodzajów skali: liczbową (w zakresie od 1 do 5, gdzie 1 – oznacza bardzo dobry stan zachowania, a 5 – oznacza bardzo słaby stan zachowania) lub opisową (np. bardzo dobry, dobry, dostateczny, słaby, bardzo słaby stan zachowania). Analogicznie, wstępnie określa się surowiec, z którego przedmiot został wykonany. Dodając wyniki obserwacji środowiska, w którym odnaleziono przedmiot – podejmowana jest decyzja o sposobie zabezpieczenia zabytku *in situ.*

Za czynniki bezpośrednio oddziałujące na zabytek archeologiczny uznaje się: wodę, światło, temperaturę, tlen, wiatr / prądy wodne, stopień zasolenia, kwasy i alkalia, zanieczyszczenia, czynniki biologiczne i ludzkie. Krytyczne dla zabytku są nagłe zmiany warunków środowiskowych, czyli przede wszystkim ich eksploracja, ale również fluktuacje stopnia uwodnienia i wartości temperatury wynikające z wahań poziomu wód gruntowych, przemarzanie gruntu, zamarzanie wody itp. Zatem kluczowe dla zachowania zabytków jest zapewnienie im stabilnych, zbliżonych do tych w gruncie/wodzie warunków przechowywania. Postępowanie to zyskało miano pierwszej pomocy dla zabytków archeologicznych (Kobyliński 1998: 7–12).

Pierwsza interakcja z zabytkiem wymaga od osoby eksplorującej uważności, delikatności, cierpliwości, umiejętności manualnych i podstawowej wiedzy konserwatorskiej. Nie należy zabytku oczyszczać szczotkami, rękawiczkami, przecierać palcami, polewać wodą lub innymi płynami, bowiem bezpowrotnie można usunąć / zniszczyć warstwę informatywną (np. pozostałości organiki na naczyniach ceramicznych, ozdobach, nawarstwienia korozyjne na numizmatach, elementach uzbrojenia, biżuterii, innych przedmiotach) lub zanieczyścić przedmiot – równocześnie uniemożliwiając analizy specjalistyczne.

Od badacza wymagane jest niezwłoczne dokumentowanie, znakowanie poszczególnych przedmiotów lub ich grup, np. z użyciem metryczek, oraz właściwe pakowanie służące ochronie przed nowymi warunkami środowiska i uszkodzeniami mechanicznymi.



Ryc. 1. Podział ruchomych zabytków archeologicznych wg kryterium surowcowego

Zalecane jest przygotowanie odpowiedniego zaplecza prac terenowych – elementów infrastruktury terenowej zaopatrzonej w odpowiednie narzędzia, pojemniki, opakowania itd. (ryc. 2).

W pracowni/laboratorium

Po bezpiecznym przetransportowaniu zabytków do pracowni / laboratorium proces konserwacji *ex situ* zwykle rozpoczyna się od ustalenia programu prac konserwatorskich odrębnie dla każdego obiektu (rzadziej grupy obiektów), w którym po uzyskaniu informacji dotyczących kontekstu znaleziska, na podstawie oceny stanu zachowania oraz surowca dobiera się odpowiednie metody dokumentacji i konserwacji, pobierane są próbki, ustala się zakres i rodzaj analiz specjalistycznych.

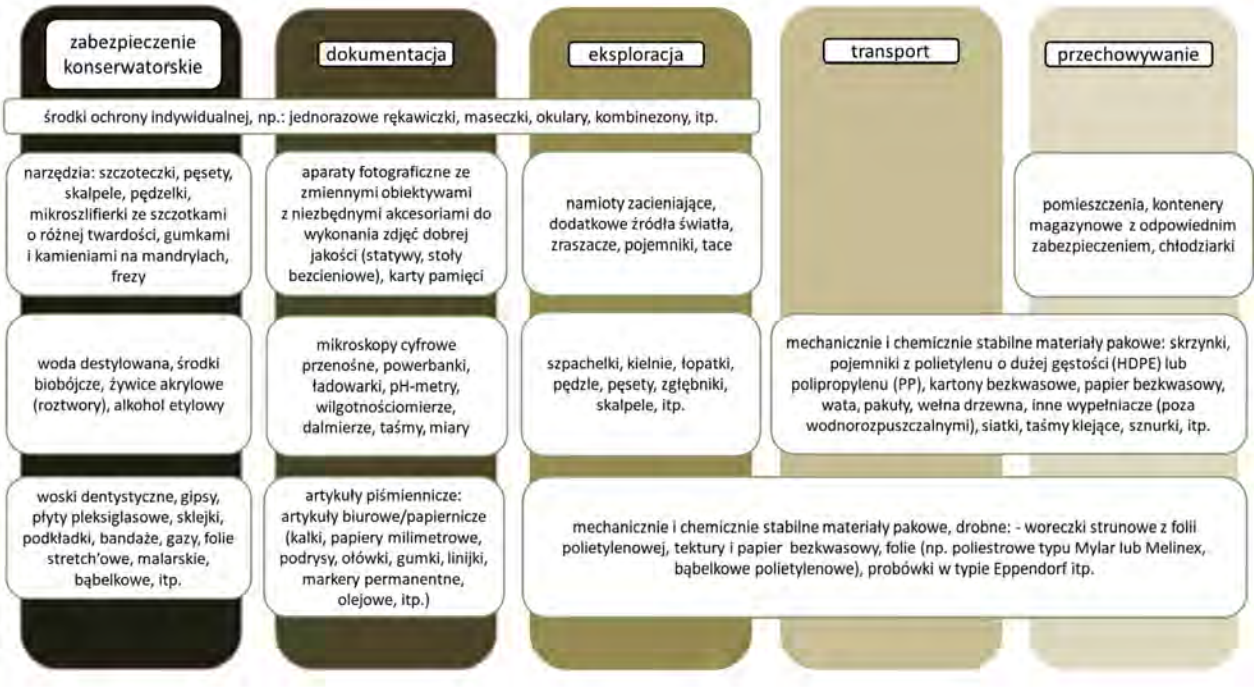
Ocenę stanu zachowania w warunkach laboratoryjnych – poza metodą organoleptyczną – umożliwia skanowanie laserowe powierzchni zabytku, profilometria, ultrasonografia oraz zaawansowane metody mikroskopowe i techniki rentgenowskie (Miazga 2017: 33–34). W identyfikacji surowca zastosowanie mają metody archeometryczne – spektroskopowe (XRF – fluorescencyjna analiza rentgenowska, XRD – dyfrakcja rentgenowska, FTIR – spektroskopia fourierowska w podczerwieni, IR – spektroskopia w podczerwieni, UV-VIS – spektroskopia w ultrafiolecie i świetle widzialnym), chromatograficzne (TLC – cienkowarstwowa chromatografia cieczowa, HPLC – wysokosprawna chromatografia cieczowa), mikroskopowe (Rumiński 2009: 121; Miazga 2017: 56–77) i inne.

Po zatwierdzeniu programu prac konserwatorskich i realizacji działań z pierwszego etapu rozpoczyna się szereg komplementarnych, indywidualnie i odpowiednio dobranych do zabytku zabiegów dezynfekujących, oczyszczających, wzmacniających i stabilizujących (ryc. 3). Konserwację kończy właściwe pakowanie i przygotowanie dokumentacji powykonawczej prac konserwatorskich, a następnie przekazanie do zleceniodawcy, muzeum lub innej jednostki wskazanej w promesie stanowiącej załącznik do wniosku o wydanie pozwolenia na badania archeologiczne.

Dokumentacja

Pełna dokumentacja konserwatorska uwzględnia:

- identyfikację zabytku,
- jego opis, analizę treści formy i funkcji; technikę i technologię,
- stan zachowania i przyczyny zniszczeń,
- cel oraz założenia konserwacji,



Ryc. 2. Podstawowe wyposażenie konserwatorskie do zabezpieczenia zabytków in situ, na czas transportu i w oczekiwaniu na konserwację w pracowni/laboratorium

- program prac,
- przebieg konserwacji,
- zalecenia dla użytkownika oraz dokumentację fotograficzną i rysunkową uzupełnioną o wyniki analiz specjalistycznych (ryc. 4) (*Schemat dokumentacji konserwatorskiej…* 1983; Kwaśniewicz 2021: 194–202).

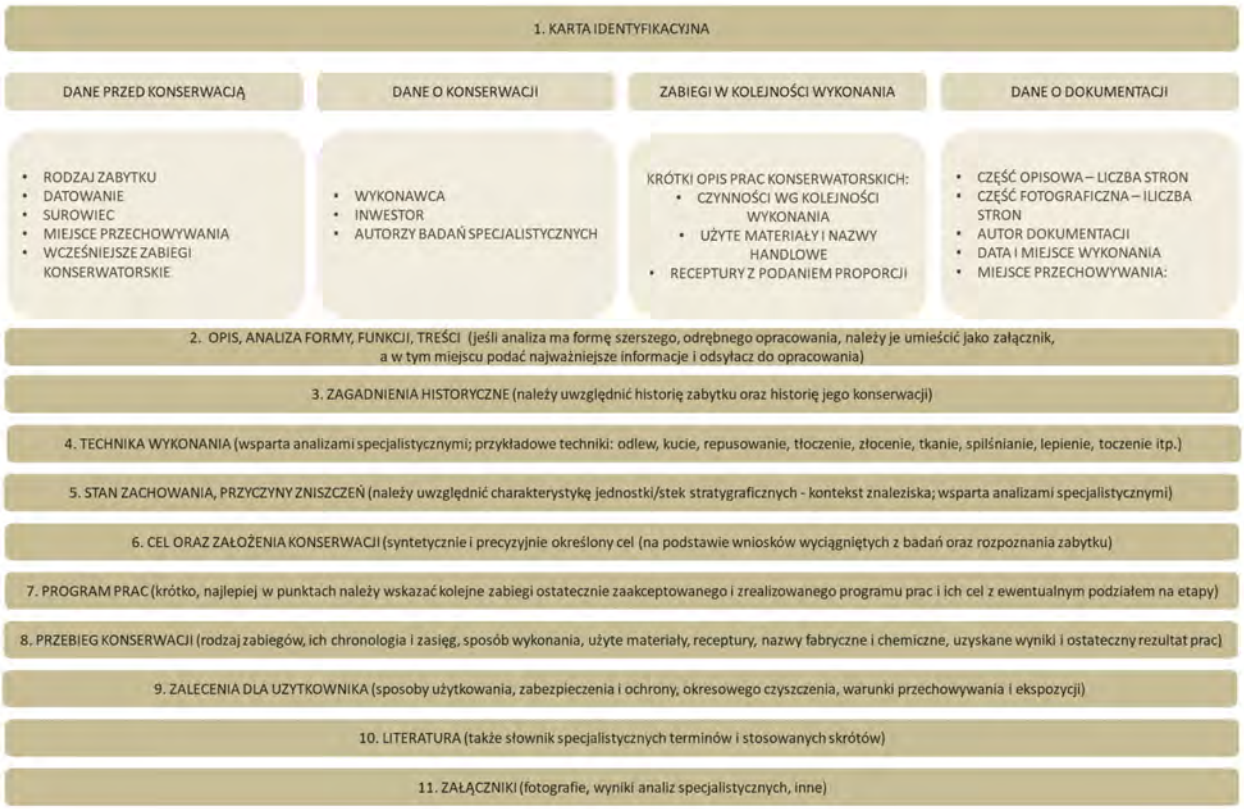
Część fotograficzną i rysunkową bezwzględnie należy przygotować przed i po konserwacji. Dodatkowo szczegółowe dokumentowanie wszystkich etapów konserwacji służy śledzeniu postępów prac, kontroli i ocenie skuteczności stosowanych zabiegów. Obecnie najlepszym wyborem jest cyfrowa dokumentacja wizualna – makrofotografia (ryc. 5a–d, 6a–d) (np. aparaty z wymiennymi obiektywami, stoły i komory bezcieniowe, statywy), mikrofotografia (ryc. 7a–d) (różnego rodzaju mikroskopy z kamerami / aparatami), uzupełniona o dokumentację 3D (ryc. 8a–b) przy użyciu różnych technik pomiarowych (Bunsch i Sitnik 2014: 10–24) (np. fotogrametria, triangulacja laserowa, metoda z oświetleniem strukturalnym, itd.) lub 2D (np. zautomatyzowana sfera do rejestracji wielomianowych map tekstur: Polynomial Texture Mapping [PTM] (Malzbender i in., 2001: 1–10; MacDonald i Robson 2010: 422–427) nazywane także obrazowaniem z transformacją połysku – Reflectance Transformation Imaging [RTI] (M. Mackiewicz w tym tomie).

Pobieranie próbek

Pobieranie próbek służy różnym celom, m.in. identyfikacji surowca, zniszczeń, rozpoznaniu zagrożeń mikrobiologicznych, doprecyzowaniu chronologii. Działanie to uznaje się aktualnie za czynność obligatoryjną oraz prewencyjną wobec przedmiotów wymagających pilnej interwencji konserwatorskiej lub niepoddawanych konserwacji (np. podczas prac inwentaryzacyjnych lub ekshumacyjnych) oraz równocześnie selektywną – nie dotyczy każdego przedmiotu, jak również nie każda analiza wymaga pobrania próbki (np. spektrometria fluorescencji rentgenowskiej XRF, analizy technologiczne tekstyliów). W każdym przypadku – jest działaniem destrukcyjnym, a zatem musi być przemyślane (związane z pytaniem badawczym) i uzasadnione. W odniesieniu do zabytków archeologicznych cechujących się olbrzymią różnorodnością każdorazowo przed pobraniem próbki należy skonsultować się z laboratorium w celu ustalenia szczegółowych zasad pobierania próbek (wielkość, objętość, waga, miejsce pobrania próbki, warunki przechowywania) indywidualnie



Ryc. 3. Metody, techniki i narzędzia konserwatorskie używane podczas oczyszczania, dezynfekcji, wzmacniania i stabilizacji zabytków organicznych i nieorganicznych



Ryc. 4. Uproszczony schemat dokumentacji konserwatorskiej

dla poszczególnych grup surowcowych, a nawet poszczególnych przedmiotów.

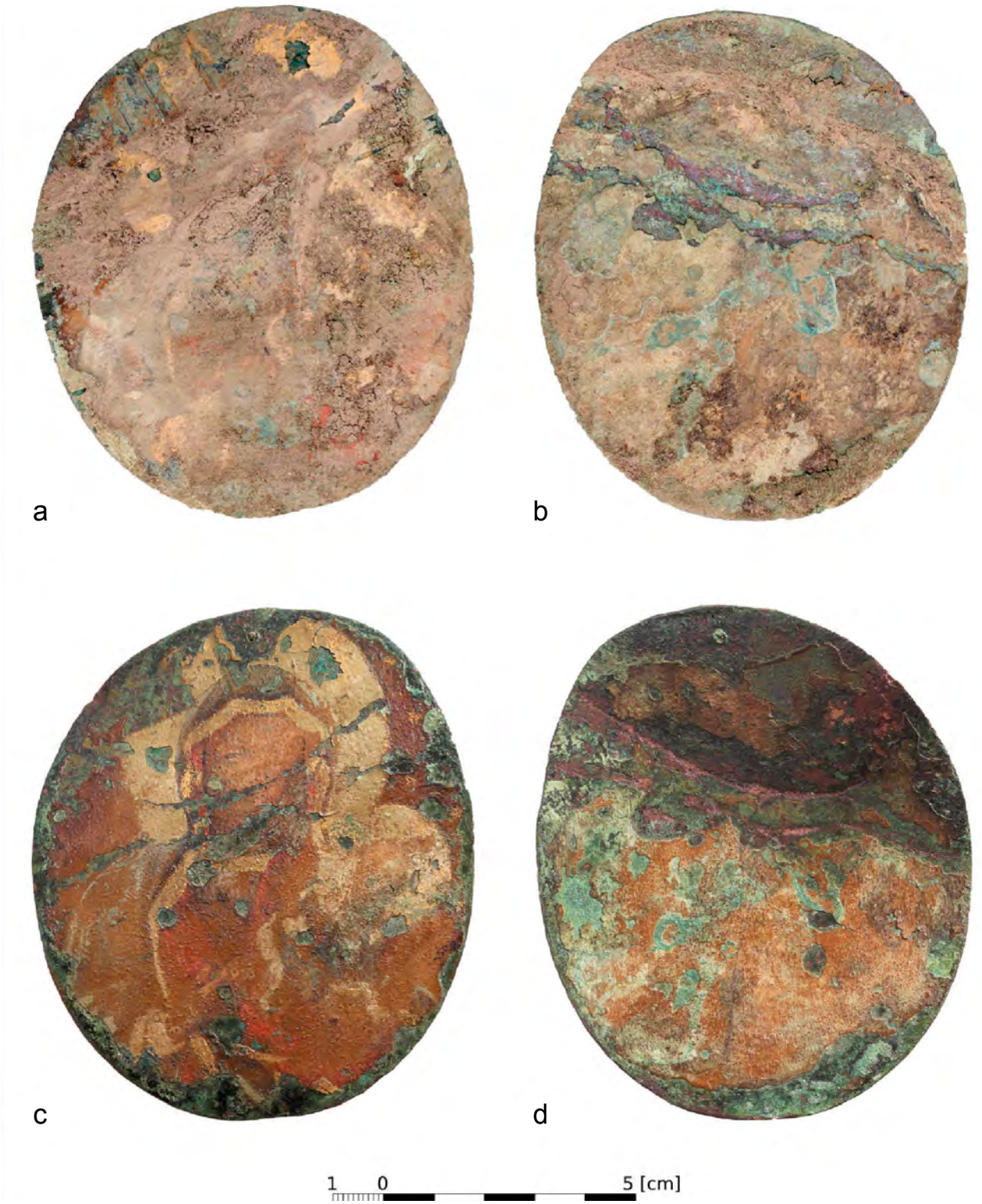
Zgodnie z ogólnymi zasadami pobierania próbek i transportu, należy przygotować odpowiedniej wielkości, czyste, suche, szczelne, bezwonne, neutralne, najlepiej jałowe pojemniki i torebki, akcesoria do chwytania, cięcia, wiercenia, skrobania. Pobierający próbki dokłada wszelkich starań, by próbka nie została zgnieciona lub zanieczyszczona, z drugiej strony – by została odpowiednio opisana, zinwentaryzowana, jak najszybciej przekazana do laboratorium wykonującego badanie lub odpowiednio przechowywana. Szczególnie w odniesieniu do przedmiotów organicznych zaleca się przechowywanie ich w warunkach obniżonej temperatury.

Próbki można pobierać na wiele sposobów, przykładowo:

- w technice wymazu – np. badania bioluminometryczne, badania mikrobiologiczne (Karbowska-Berent 2014: 443),
- w technice odcisku na taśmę klejącą czy zdjęcia (zeskrobania), np. warstwy biologicznej/produktów korozji,
- przez wycięcie fragmentu zabytku przed oczyszczeniem, np. z warstwą biologiczną / produktami korozji,
- przez wycięcie fragmentu zabytku po oczyszczeniu z zabrudzeń ziemnych i/lub produktów korozji.

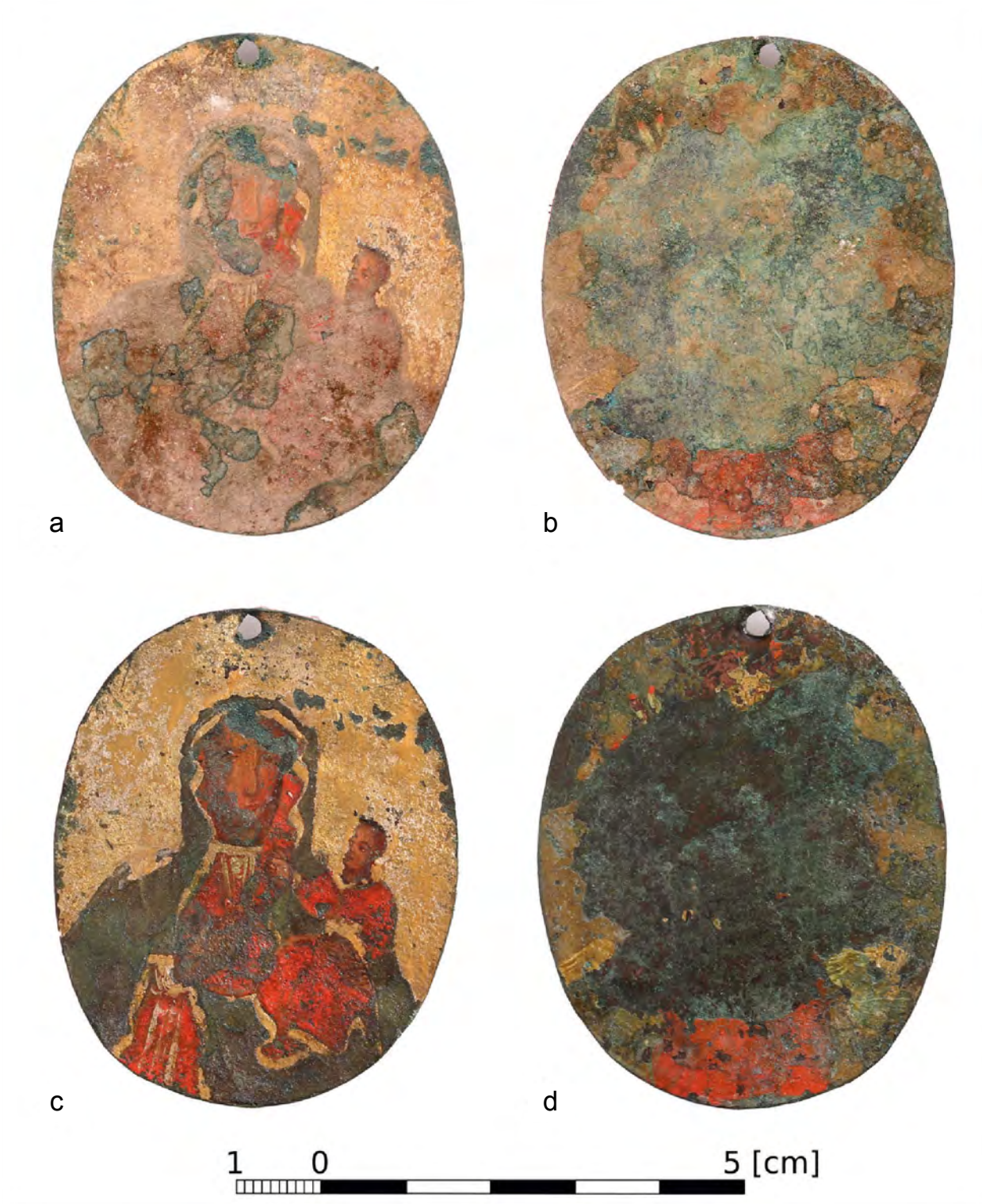
Dezynfekcja

W zakresie dezynfekcji i dezynsekcji ostatnie lata przyniosły wiele zmian. Proces służący eliminacji czynników biokorozji musi być skuteczny oraz bezpieczny tak dla zabytku, jak i środowiska. Skuteczna dezynfekcja ma na celu zmniejszanie liczby mikroorganizmów o minimum trzy rzędy w skali logarytmicznej. Konserwatorzy dążą do wykonywania jej bezpieczniejszymi metodami fizycznymi: termiczną, z wykorzystaniem promieniowania UV, gamma i rentgenowskiego oraz plazmy niskotemperaturowej (Strzelczyk i Karbowska-Berent 2004: 195–197), przy równoczesnym ograniczaniu bardziej inwazyjnych metod chemicznych – stosowania biocydów i innych środków biobójczych (Szulc i in., 2022: 197–219).



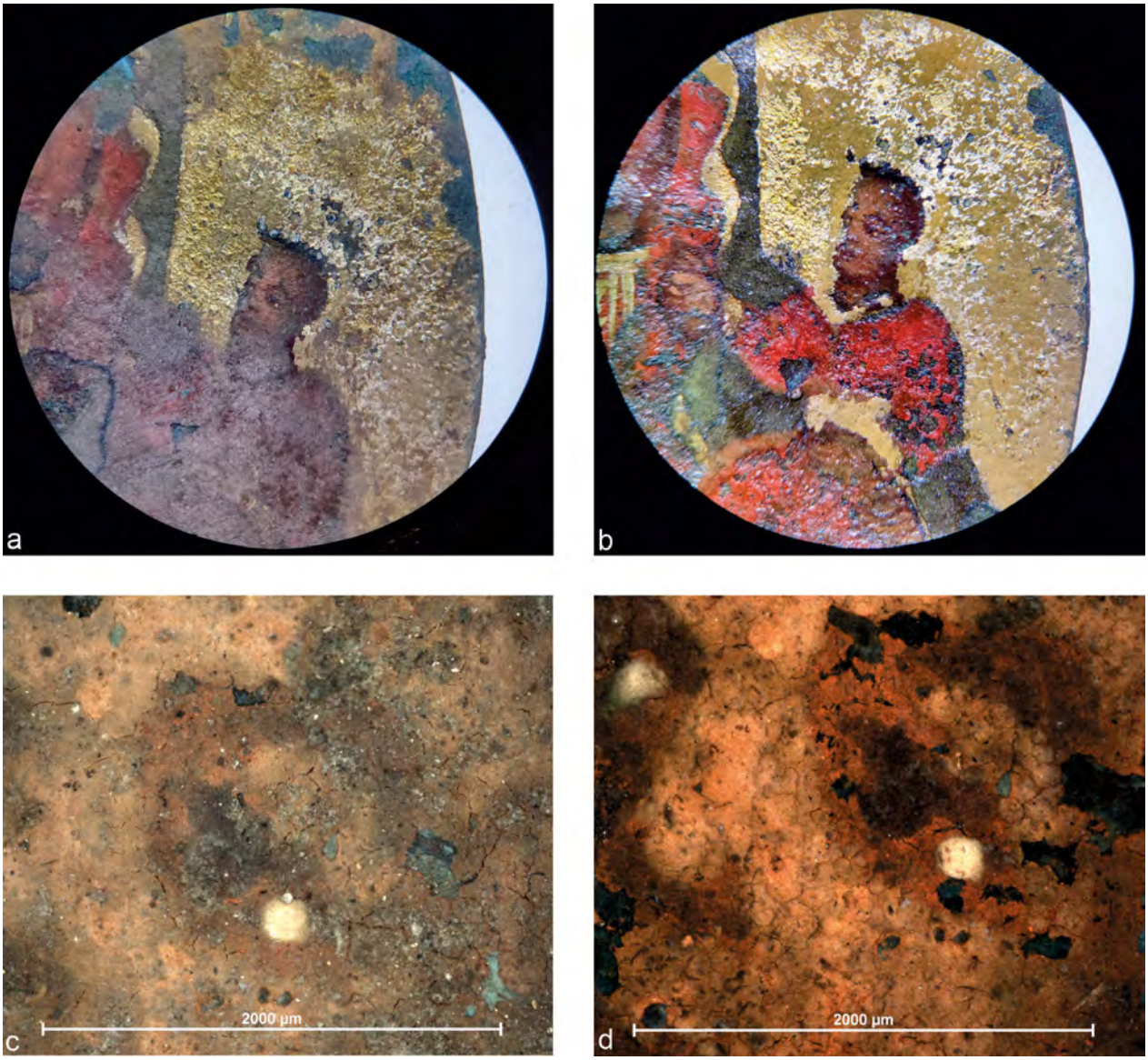
Ryc. 5. Kaplerz z badań w Białej Rawskiej. a – awers przed konserwacją; b – rewers przed konserwacją; c – awers po konserwacji; d – rewers po konserwacji (fot. M. Majorek-Lipowicz)

Wbrew powszechnemu przekonaniu, że tylko zabytki organiczne wymagają ochrony przed korozją biologiczną, dezynfekcji i/lub dezynsekcji niekiedy poddawane są przedmioty z surowców nieorganicznych.



Ryc. 6. Kaplerz z badań w Białaczowie. a – awers przed konserwacją; b – rewers przed konserwacją; c – awers po konserwacji; d – rewers po konserwacji (fot. M. Majorek-Lipowicz)

Zadbać należy również o czystość biologiczną w pracowniach konserwacji i pomieszczeniach magazynowych. Należy także odseparować zabytki przed konserwacją od tych po zabiegach zabezpieczających. W przypadku

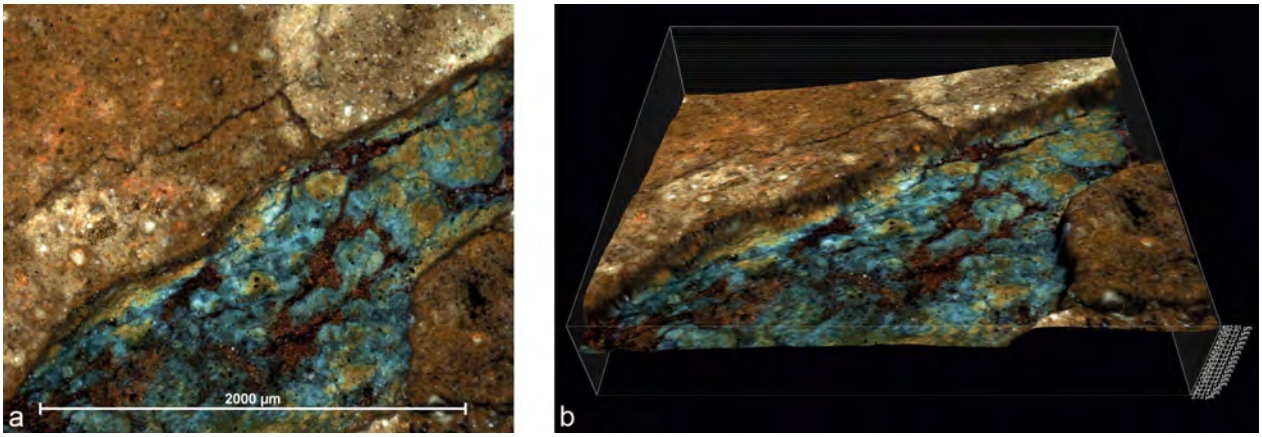


Ryc. 7. Kaplerz z badań w Białaczowie – zbliżenia. a – przed oczyszczeniem x8; b – po oczyszczeniu x8; c – przed oczyszczeniem x50; d – po oczyszczeniu x50 (fot. M. Majorek-Lipowicz)

przedmiotów powtórnie zaatakowanych przez drobnoustroje czy narażonych kolekcji muzealnych coraz częściej stosuje się tzw. metodę dynamiczną uzyskiwania zmodyfikowanej atmosfery – wypierania tlenu z powietrza – w specjalnych komorach (Karbowska-Berent 2015: 199).

Metody oczyszczania

Usuwanie różnorodnych zabrudzeń, zbędnych nawarstwień na powierzchni, szkodliwych związków penetrujących strukturę zabytku odbywa się metodami mechanicznymi, chemicznymi, ultradźwiękowymi, laserowymi, redukcyjnymi i termicznymi (ryc. 3). Wybór metody, techniki, narzędzi leży po stronie konserwatora i zależy przede wszystkim od rodzaju zabytku, surowca, stanu zachowania. Zwykle w trakcie oczyszczania jednego zabytku łączy się wiele różnych metod i technik. Równocześnie ta sama metoda nie jest zalecana do oczyszczania przedmiotów nawet w obrębie tej samej grupy surowcowej. W pierwszej kolejności stosuje się sprawdzone, łatwe do kontroli i powszechnie dostępne narzędzia, techniki i środki konserwatorskie. Zawsze w trakcie oczyszczania zabytku należy kierować się zasadą małych kroków



Ryc. 8. Kaplerz z badań w Białaczowie. a – zbliżenie na ubytek powłoki malarskiej; b – 3d powierzchni kaplerza – ubytek powłoki malarskiej.

i przede wszystkim nie pozostawiać przedmiotów bez opieki specjalisty.

Wzmocnienie i stabilizacja

Metody stabilizacji są wysoce zindywidualizowane i uznaje się je za surowcowo zależne. Jedne preparaty zalecane są więc jako impregnaty i konsolidatory przedmiotów z surowców organicznych (np. roztwory glikoli polietylenowych, dyspersje kopolimeru na bazie polioctanu winylu i estru butylowego kwasu maleinowego), inne zaś służą pasywacji powierzchni lub jako inhibitory korozji przedmiotów z surowców nieorganicznych (np. roztwory taniny, benzotriazolu), a jeszcze odmienne mają na celu konsolidację zabytku lub stworzenie na nim powłok zabezpieczających o odpowiednich właściwościach (zwykle są to żywice akrylowe i woski mikrokrystaliczne). Odpowiednie suszenie kończy proces stabilizacji.

Wybrane procedury konserwacji archeologicznych zabytków ruchomych

Próżno szukać jednej recepty na konserwację. Dla zabytków organicznych – np. drewnianych, skórzanych, włókienniczych – sprawdzonych i skutecznych jest wiele procedur obejmujących czyszczenie, dezynfekcję, impregnację i suszenie (m.in. Ważny i Kurpik 2005: 101–121; Kite i Thomson 2006; Thomson 2006, 92–120; Babiński 2008: 353–367; Ceynowa 2012: 316–317). Proces czyszczenia odbywa się na sucho i/lub mokro.

W przypadku tekstyliów dobre rezultaty przynosi zastosowanie preparatu Pretepon B (Hryszko 2017: 140), środków powierzchniowo-czynnych, glikolu polietylenowego 200 (PEG 200) (Norton 1990: 195–285; Grupa 2004–2007: 207–218; Drążkowska 2014: 70–79; Drążkowska i Nowak 2020: 173–179; Drążkowska i in., 2015: 355–366; Grupa 2012b: 253–279; Djordjević i in., 2017: 94–99; Hryszko 2017: 136–155), a także mydła konserwatorskiego czy korzenia mydlnicy.

Przy oczyszczaniu zabytków skórzanych sprawdza się niskoprocentowy roztwór kwasu cytrynowego (Ceynowa 2012: 317; Grupa 2012a: 323). Pamiętać należy jednak o odpowiednim zneutralizowaniu zabytku po kąpielach oczyszczających. Dezynfekcję ruchomości najczęściej wykonuje się przez zanurzenie lub tamponowanie / pędzlowanie, stosując etanol (Drążkowska i in., 2015: 362), preparaty biobójcze o nazwach handlowych: Aldewir (Ceynowa 2012: 316), Preventol CMK – p-Chloro-m-Cresol (Perjés i in., 2009a: 32), Dodigen 226 – alcyl-dimethyl-benzil-ammonium-chloride (Perjés i in., 2009b: 19).

Osłabione struktury organiczne są wzmacniane odpowiednimi kompozycjami impregnatów. Konserwatorzy stosują wodne roztwory na bazie gliceryny (Ceynowa 2012: 317) i/lub glikoli polietylenowych (Grupa 2012a: 324–325) wzbogacane czasem o żywice akrylowe – wówczas przygotowywane z wykorzystaniem rozpuszczalników organicznych. Małe, pojedyncze przedmioty stabilizowane są w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych z wykorzystaniem eksykatorów, mierników temperatury i wilgotności. W przypadku dużych, monosurowcowych zbiorów, jak również obiektów



Ryc. 9. Fragmenty tekstyliów z badań w Radziejowie. a – przed konserwacją; b – po konserwacji (fot. M. Majorek-Lipowicz)

wielkoformatowych do stabilizacji organiki z powodzeniem używana jest zaimplementowana z wytwórczości spożywczej technika próżniowego suszenia w niskiej temperaturze (Grupa i in., 2009: 166–174; Drążkowska i in., 2011: 357–385; Grupa 2012a: 321–328; Grupa i in., 2012: 411–430).

Kompleksowe ujęcie metodyki prac konserwatorskich w zakresie oczyszczania i wzmacniania obiektów, wzbogacone o zagadnienia teoretyczne i historyczne, jest widoczne także w odniesieniu do zabytków nieorganicznych – metalowych (*Ancient and Historic Metals*… 2007; Sękowski 2008; Safarzyński i Weker 2010; Garbacz-Klempka i in., 2015: 12–17; Kołyszko 2020). W procesie oczyszczania zabytków archeologicznych bardzo dobre efekty przynosi połączenie metod mechanicznych wspieranych metodami chemicznymi, które należy indywidualnie dobierać do poszczególnych stopów metali (np. Ślesiński 1995: 100–125, Kołyszko 2020: 33–94).

Sprawdzone i skuteczne preparaty stosowane do usuwania korozji żelaza (Safarzyński i Weker 2010: 45–47) mogą zniszczyć wyroby ze stopów metali kolorowych i odwrotnie. Niektóre procesy korozyjne powodują powstanie na zabytkach metalowych specyficznych warstw izolacyjnych – tzw. patyn – które zabezpieczają obiekt, spowalniając niszczenie pod wpływem warunków atmosferycznych (Shreir 1966: 23–97), a których usuwać nie należy.

W miejscach. gdzie obserwowane są agresywne procesy korozyjne, w celu usunięcia nawarstwień korozyjnych – w zależności od stopu – zastosowanie znajdują kilkuprocentowe wodne roztwory winianu potasu (potasu sodu winian 4hydrat), wersenianu sodu (di-Sodu wersenian 2hydrat) i cytrynianu tri-amonu (tri-Amonu cytrynian) lub kwasu cytrynowego (Kołyszko 2012: 20–74; Nowak i Drążkowska 2020: 181) podczas kąpieli statycznych, ultradźwiękowych, okładów, uzupełnione zabiegami mechanicznymi. Po niezbędnych kąpielach zobojętniających obiekty należy odwodnić, a następnie ustabilizować procesy korozyjne. Jako inhibitory korozji wykorzystuje się – dla przedmiotów ze stopów metali kolorowych – np. benzotriazol (BTA); dla stopów żelaznych – np. taninę (Ślesiński 1995: 117). Finalne zabezpieczenie powierzchni najczęściej wykonuje się z użyciem żywicy akrylowej (Paraloidu B-44, B44N, B72) i wosku mikrokrystalicznego (np. Cosmoloid 80H) (Ślesiński 1995: 122–125; Nowak i Drążkowska 2020: 181).

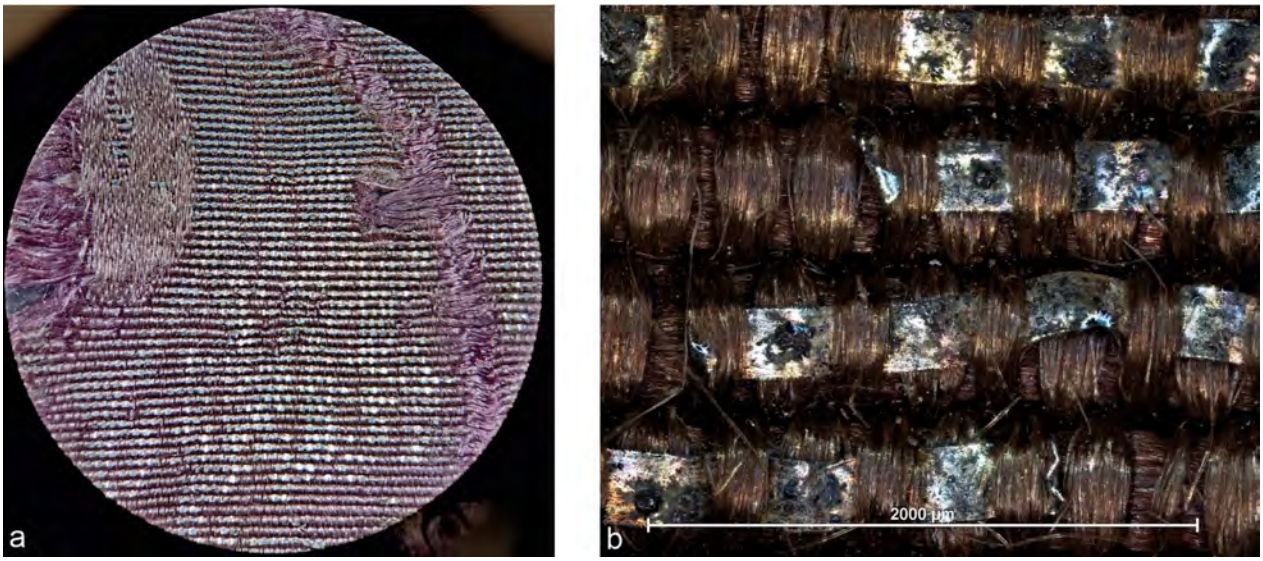
Zdecydowanie mniej uwagi poświęcono dotychczas innym wyrobom nieorganicznym – kamiennym, glinianym i szklanym, przez lata mylnie traktowanym jako przedmioty stabilne i trwałe, niewymagające pełnej konserwacji – a jedynie oczyszczenia mechanicznego. Liczność tych kolekcji utrudnia bieżącą konserwację. Schemat postępowania jest podobny do tych wskazanych powyżej: po oczyszczeniu, wyprowadzeniu szkodliwych substancji z wnętrza zabytku, przedmioty te mogą być wzmacnianie przez wprowadzenie np. niskoprocentowego polimeru winylobutyralu (Mowital B60 HH) – ceramika naczyniowa i budowlana; związków krzemoorganicznych lub żywicy akrylowej (Paraloid B72) – kamień, szkło i wyroby gliniane (Domosłowski 2011: 251–484; Łukaszewicz 2002; Miazga 2017: 33–36; Soldenfoff 1991: 97–123; Pasternak-Zabielska 2022: 139), a następnie temperaturowo i wilgotnościowo stabilizowane w warunkach laboratoryjnych.

PRZYKŁADY Z BADAŃ / KONSERWACJI

Jako przykład procedur konserwatorskich użytych dla zabezpieczenia zabytków archeologicznych posłużą kaplerze (ryc. 5a–d; 6a–d; 7a–d; 8a–d) – reprezentując grupę przedmiotów nieorganicznych, i fragmenty tekstyliów (9a–b; 10a–b) – jako zabytki organiczne, pozostające pod opieką Pracowni Datowania i Konserwacji Zabytków (Instytut Archeologii, Uniwersytet Łódzki). Zabytki te noszą kilka cech wspólnych: pochodzą z nowożytnych przemieszanych nawarstwień o charakterze cmentarnym, a zabrudzenia uniemożliwiały ich identyfikację przed konserwacją oraz różnią się pod wieloma względami, takimi jak: surowiec, cechy metryczne, stan zachowania, czas oczekiwania na konserwację (ryc. 11).

Za cel prac przyjęto zabezpieczenie zabytków przed dalszą destrukcją przy równoczesnym zachowaniu cech pozwalających na pełną identyfikację tych przedmiotów. Było to możliwe dzięki połączeniu metod archeometrycznych z metodami konserwatorskimi (ryc. 12). Taka konfiguracja działań przyczyniła się m.in. do rejestracji następujących spostrzeżeń i zmian w schemacie postępowania konserwatorskiego:

- analiza mikroskopowa kaplerzy potwierdziła przypuszczenia o silnych spękaniach i wielu drobnych ubytkach barwnych powłok – zatem po wstępnym, bardzo delikatnym oczyszczeniu podjęto decyzję o przeprowadzeniu konsolidacji, a dopiero w następnym kroku kontynuowano oczyszczanie celem odsłonięcia pełnego rysunku;
- analiza mikroskopowa kaplerzy ujawniła zaawansowany proces korozyjny na styku podłoża ze stopu



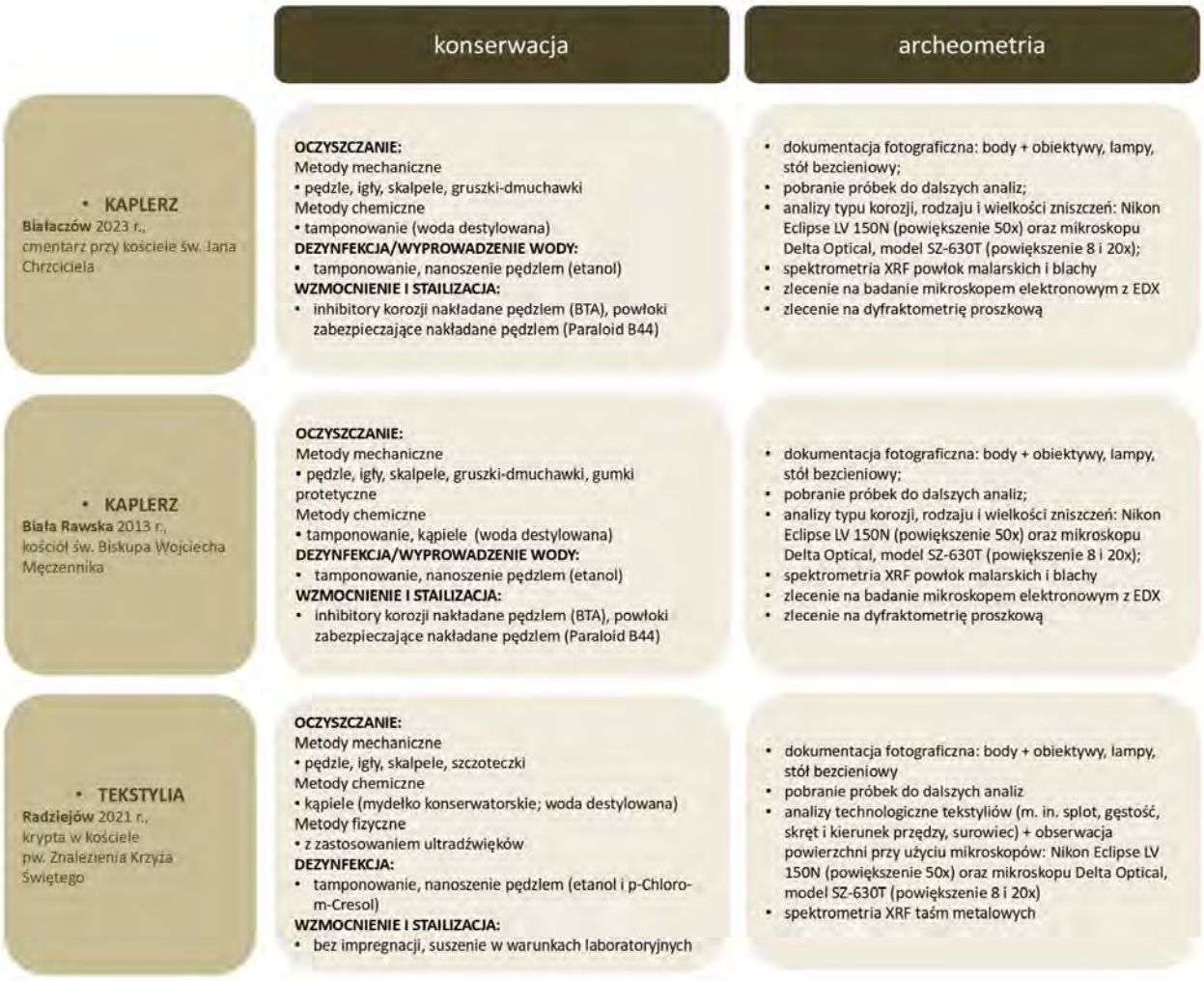
Ryc. 10. Fragmenty tekstyliów z badań w Radziejowie. a – po oczyszczeniu x8; b – po oczyszczeniu x50 (fot. M. Majorek-Lipowicz)

	Data zakończenia konserwacji	Identyfikacja przed konserwacją	Identyfikacja po konserwacji	Stan zachowania przed i po konserwacji	Surowiec	Cechy metryczne
• KAPLERZ Białaczów 2023 r., cmentarz przy kościele św. Jana Chrzciciela	2023	przedmiot nieokreślony, metalowy	kaplerz z wizerunkiem Matki Bożej z Dzieciątkiem na awersie, rewers nieczytelny; malowany na blasze miedzianej, XVIII w. (?)	przed: grube zanieczyszczenia kryjące powłoki malarskie; uszkodzenia mechaniczne, ubytki, odpryski, odcisk tkaniny w splocie płóciennym; po: ustabilizowane barwne powłoki	stop miedzi, powłoki malarskie wymagające dalszych analiz (zarejestrowano Cu, Hg, Ca w trakcie oczyszczania)	waga: 48,143 [g] wymiary: 9,74 [cm] x 8,30 [cm]
• KAPLERZ Biała Rawska 2013 r., kościół św. Biskupa Wojciecha Męczennika	2023	dewocjonalia	kaplerz z wizerunkiem Matki Bożej z Dzieciątkiem na awersie, postać w czerwonej szacie na rewersie, malowany na blasze miedzianej; XVIII w. (?)	przed: zanieczyszczenia ziemne umożliwiające rozpoznanie zabytku; widoczne liczne ogniwa korozyjne, silne spękanie powłoki malarskiej; po: ustabilizowane barwne powłoki	stop miedzi, powłoki malarskie wymagające dalszych analiz (zarejestrowano Cu, Fe, Pb, Ag w trakcie oczyszczania)	waga: 7,782 [g] wymiary: 5,70 [cm] x 4,78 [cm]
• TEKSTYLIA Radziejów 2021 r., krypta w kościele pw. Znalezienia Krzyża Świętego	2021-2024	fragmenty tekstyliów	fragmenty tekstyliów o charakterze liturgicznym – stuły lub manipularza; XIX w.	przed: zanieczyszczenia ziemne, przesuszenie włókien, brak elastyczności, ubytki, rozdarcia, przetarcia, zagniecenia; po: ustabilizowane włókna i metalowe oploty przędzy	jedwab, stop miedzi, stop srebra (?)	wymiary: 17,5 [cm] x 14,0 [cm]; 14,0 [cm] x 6,0 [cm]; obecnie barwy bordowej, brązowej i srebrzystej, tkanina z wzorem roślinnym z wplecioną taśmą metalową

Ryc. 11. Zestawienie podstawowych danych o zabytkach

miedzi z powłokami malarskimi, który należało natychmiast spowolnić przy użyciu bezpiecznych dla malowanych wizerunków metod chemicznych;

- spektrometria XRF kaplerzy wykazała występowanie odmiennych składów pierwiastkowych dla farb o tym samym kolorze w ocenie wizualnej, stanowiąc asumpt do dalszych analiz specjalistycznych – być może wyniki przybliżą miejsce (warsztat), czas powstania, koszt przygotowania; uchwycono m.in. występowanie ołowiu (być może biel ołowiowa – używana do XIX w.) i rtęci, a zatem



Ryc. 12. Zestawienie użytych metod konserwatorskich i archeometrycznych

utrzymano dalszą szczególną ostrożność przy pracy z zabytkiem (ochrona zdrowia konserwatora);

- analiza mikroskopowa tekstyliów w świetle przechodzącym pozwoliła określić rodzaj surowca w użytej przędzy i dopasować odpowiedni preparat do oczyszczania w kąpieli;
- analiza mikroskopowa tekstyliów w świetle odbitym dostarczyła informacji na temat występowania taśm metalowych, tym samym wykluczając w procesie konserwacji użycie impregnatu na bazie glikolu polietylenowego, który mógłby przyspieszyć proces korozji tych elementów.

W efekcie sukcesem zakończono proces konserwacji, a przygotowana dokumentacja konserwatorska uzupełniona o wyniki analiz specjalistycznych stanowi podstawę do przygotowania naukowego opracowania tych przedmiotów. Zabytki zyskały walory ekspozycyjne i mogą być prezentowane szerokiemu gronu odbiorców.

KONSERWACJA I CO DALEJ?

Podkreślić należy, że większość preparatów używanych w konserwacji wpływa na rezultaty badań specjalistycznych – uniemożliwia analizę lub zafałszowuje wyniki. Zatem wszelkie czynności analityczne / badania archeometryczne należy przeprowadzać na próbkach lub zabytkach przed konserwacją, ewentualnie – w wyjątkowych sytuacjach (np. zabytek wymagał pilnej interwencji konserwatorskiej, przedmiot konserwowano kilka lat temu etc.) po konsultacji z konserwatorem. Dla osób bez doświadczenia usuwane z powierzchni zabytków zanieczyszczenia wydają się

bezwartościowe, ale dla świadomego konserwatora współpracującego z przedstawicielami innych dyscyplin są to cenne wskazówki wykorzystywane w toku postępowania badawczego, które na bazie faktów (wyników analiz) pozwala m.in. na doprecyzowanie chronologii, obserwację śladów użytkowania, ustalenie techniki i technologii wytworzenia, a w dalszej kolejności na rekonstrukcję środowiska naturalnego i kulturowego czasów minionych.

Nierzadko wygląd zabytków archeologicznych po pracach konserwatorskich odbiega od oczekiwań z uwagi na brak cech ekspozycyjnych zabytków. Najczęściej ubytki uzupełnia się w naczyniach ceramicznych, kaflach, tekstyliach, papierze, najrzadziej w przedmiotach metalowych. Zgodnie z obecnymi wytycznymi konserwatorskimi, służąca odtworzeniu formy zabytku rekonstrukcja powinna zostać w taki sposób wykonana i oznakowana, by obserwator mógł odróżnić oryginalne fragmenty przedmiotu od elementów dodanych, współczesnych. Tym samym ubytki w wyrobach glinianych, po konserwacji i sklejeniu, wypełniane są np. masą na bazie pochodnych celulozy i dyspersji akrylowych z gipsem (Rudy 1995: 218).

W przypadku tekstyliów używana jest metoda dublażu (Potocka 2000: 325-327) – całościowego lub częściowego oraz metoda fibrylizacji. Ta pierwsza polega na skonsolidowaniu wyrobu włókienniczego archeologicznego z odpowiednio dobranym współczesnym materiałem przez działanie na sucho lub mokro z wykorzystaniem specjalnego kleju akrylowego lub mieszanin klejów (np. Acrylkleber 360 HV, Acrylkleber 498 HV firmy Lascaux). Podobne założenia metodyczne, to jest uzupełnienie ubytków i konsolidacja, prezentuje druga metoda rekonstrukcji tekstyliów – fibrylizacja, przy czym w tym przypadku nie używa się żadnych środków chemicznych (klejów), a korzysta się z doświadczeń i narzędzi rękodzielniczego czerpania papieru (Hryszko 2017: 141). Przy użyciu urządzenia w typie maszyny do uzupełniania ubytków papieru odpowiednio przygotowana masa z włókien naturalnych w trakcie przepływu wody osadza się odpowiednio zadaną grubością warstwy, wypełniając miejsca uszkodzeń ułożonych i ustabilizowanych fragmentów tekstyliów archeologicznych. Nadmiar wody usuwany jest na stole niskociśnieniowym (Hryszko 2001, 57-59). Po wysuszeniu ściśle przylegające włókna z masy tworzą arkusz podtrzymujący i uzupełniający ubytki w tkaninie archeologicznej.

Na przestrzeni ostatnich dekad stosowano wiele metod konserwatorskich i używano różnych materiałów, którymi spowalniano proces destrukcji, łączono, klejono, uzupełniano ubytki w zabytkach. Część z nich sprawdza się do dziś, a część niestety okazała się nieskuteczna lub wręcz szkodliwa. Należy zatem na bieżąco śledzić literaturę przedmiotu.

PODSUMOWANIE

Podsumowując opisane powyżej zagadnienia należy podkreślić, że konserwacja ruchomych zabytków archeologicznych jest nieodłącznym elementem badań archeologicznych. Prace konserwatorskie nad zabytkiem archeologicznym zakończą się sukcesem tylko wtedy, gdy zostaną:

rozpoczęte niezwłocznie po jego odnalezieniu,

przeprowadzone zgodnie z zasadami etyki konserwatorskiej (przede wszystkim umiejętności manualne należy połączyć z rzetelną i aktualną wiedzą konserwatorską),

wykonane z użyciem odpowiednich metod, technik, narzędzi (zaplecza konserwatorskiego), z dbałością o bezpieczeństwo zabytku i konserwatora,

wykorzystane możliwości badań archeometrycznych i konsultacji z innymi specjalistami,

odpowiednio sfinansowane na bazie realnych kosztorysów.

Dynamicznie rozwijający się rynek potrzeb konserwatorskich implikuje intensyfikację prac na rzecz nowoczesnych metod konserwacji. W poszukiwaniu nowych rozwiązań angażuje się przedstawicieli wielu dyscyplin, a proces konserwacji traktuje jako ciąg działań multi- i interdyscyplinarnych. Niestety nadal aktualny pozostaje, sformułowany ponad dekadę temu, apel o traktowane konserwatora jako partnera w procesie badawczym, a nie jako bezwolnego usługodawcę (Rowińska i Weker 2010: 233). To właśnie podczas konserwacji można dokonywać skrupulatnych obserwacji w zakresie techniki wykonania, technologii, śladów użytkowania, uszkodzeń i wielu innych zmian struktury i powierzchni zabytku będących w kręgu zainteresowań archeologów.

LITERATURA

Ancient and Historic Metals…, 2007. *Ancient and Historic Metals. Conservation and Scientific Research*, D.A. Scott, J. Podany, B.B. Considine (red.). Electronic Edition: The J. Paul Getty Trust.

Babiński, L. 2008. Konserwacja mokrego drewna wykopaliskowego. Metody stabilizacji wymiarowej. *Fontes Archaeologici Posnanienses* 44: 353–367.

Bunsch, E., Sitnik, R. 2014. Kryteria doboru techniki 3D do dokumentacji obiektów dziedzictwa kulturowego, *Digitalizacja w muzeach* 02/14: 1–32.

Ceynowa, B. 2012. Conservation and restoration of leatherwork recovered from excavation in Gdańsk, (w:) *Parchment and leather heritage. Conservation – Restoration*, E. Jabłońska, T. Kozielec (red.). Toruń, 311–320.

Djordjević, D., Smelcerović, M., Urošević, S., Djordjević, S. 2017. Textile protection through conservation and restoration, *Zastita Materijala* 58 (1): 94–99.

Domosłowski, W. (red.). 2011. *Zabytki kamienne i metalowe, ich niszczenie i konserwacja profilaktyczna.* Toruń.

Drążkowska, A. 2014. *Odzież i insygnia grobowe biskupów przemyskich obrządku łacińskiego*. Toruń.

Drążkowska, A., Grupa, M., Płóciennik, P., Rybka, K., Szatkowski, J., Zawadzka, A. 2011. Using vacuum freeze-drying of waterlogged archaeological leather conservation/Wykorzystanie techniki suszenia próżniowego w niskich temperaturach do konserwacji zabytkowych skór. *Sprawozdania Archeologiczne* 63: 357–385.

Drążkowska, A., Nowak, M. 2020. Prace konserwatorskie i restauratorskie przeprowadzone na zabytkach tekstylnych, (w:) *Krypty grobowe kościoła św. Franciszka z Asyżu w Krakowie w świetle badań interdyscyplinarnych*, *Tom II,* A. Drążkowska (red.). Toruń, 173–179.

Drążkowska, A., Siemińska, D., Grupa, M. 2015. Prace konserwatorskie i restauratorskie przeprowadzone na zabytkach tekstylnych, (w:) *Kultura funeralna elit Rzeczypospolitej od XVI do XVIII wieku,* A. Drążkowska (red.). Toruń, 355–366.

Garbacz-Klempka, A., Legoń, K., Dyga, A. 2015. Metodyka badawczo-konserwatorska zabytków pochodzenia archeologicznego ze stopów miedzi, *Przegląd Odlewnictwa* 1–2/2015: 12–17.

Goffer, Z. 2007. *Archaeological Chemistry*, Second Edition. New Jersey.

Grupa, M. 2004–2007. Konserwacja jedwabnych tkanin i rekonstrukcja szat, *Prace i Materiały Muzeum Archeologicznego i Etnograficznego w Łodzi. Seria Numizmatyczna i Konserwatorska* 13: 207–218.

Grupa, M. 2012a. Conservation methods of archaeological leather applied in the Institute of Archaeology of NCU in Toruń, (w:) *Parchment and leather heritage. Conservation – Restoration*, E. Jabłońska, T. Kozielec (red.). Toruń, 321–328.

Grupa, M. 2012b. *Wełniane tekstylia pospólstwa i plebsu gdańskiego (XIV–XVII w.) i ich konserwacja*. Toruń.

Grupa, M., Kaźmierczak, R., Rybka, K., Płóciennik, P., Zawadzka, A. 2012. Ash Wood and European Hazel Conservation with Polyethylene Glycol 400 Using Vacuum Freeze Drying. *Sprawozdania Archeologiczne* 64: 411–430.

Grupa, M., Płóciennik, P., Zawadzka, A. 2009. Conservation of waterlogged archaeological wood with polyethylene lycol 4000 using vacuum drying in low temperature. *Sprawozdania Archeologiczne* 61: 159–184.

Hryszko, H. 2001. Fibrylizacja – metoda uzupełniania ubytków i konsolidacji tkanin masą z włókien naturalnych, *Ochrona zabytków* 54/1 (212): 56–62.

Hryszko, H. 2017. Prace konserwatorskie, (w:) *Tkaniny z grobu królowej Jadwigi.* Warszawa,136–155.

Jażdżewski, K. 1966. *Ochrona zabytków archeologicznych. Zarys historyczny.* Warszawa.

Karbowska-Berent, J. 2014. Metody pobierania próbek do badań organizmów niszczących zabytki, *Acta Universitatis Nicolai Copernici. Zabytkoznawstwo i Konserwatorstwo* XLV: 441–457. http://dx.doi.org/10.12775/AUNC_ZiK.2014.017.

Karbowska-Berent, J. 2015. Nowe tendencje w dezynfekcji i dezynsekcji zabytków na podłożu papierowym, *Toruńskie Studia Biologiczne* 2: 189–202. http://dx.doi.org/10.12775/TSB.2015.024.

Kite, M., Thomson, R. 2006. *Conservation of leather and related materials.* Amsterdam, Boston, Heidelberg, London, New York, Oxford, Paris, San Diego, San Francisco, Singapore, Sydney, Tokyo.

Kobyliński, Z. 2001. *Teoretyczne podstawy dziedzictwa archeologicznego*. Warszawa.

Kobyliński, Z. 2008. Problemy współczesnej teorii konserwacji dziedzictwa archeologicznego w Polsce, (w:) B. Szmygin (red.), *Współczesne problemy teorii konserwatorskiej w Polsce*, . Warszawa-Lublin, 35–44.

Kołyszko, M. 2012. *Konserwacja monet i medali.* Warszawa.

Kołyszko, M. 2020. *The Conservation of Metal Artifacts from the Archaeological Context.* Toruń.

Kowalski, W. 2008. Prawna problematyka konserwacji zabytków, (w:) B. Szmygin (red.), *Współczesne problemy teorii konserwatorskiej w Polsce*, . Warszawa–Lublin, 51–62.

Krukowska, B., Grochowska-Jasnos, M. 2013. *Zalecane metody postępowania z ruchomymi zabytkami archeologicznymi w trakcie badań terenowych*. Głogów.

Kurzątkowski, M. 1989. *Mały słownik ochrony zabytków.* Warszawa.

Kwaśniewicz, K. 2021. *Współczesne trendy i kierunki w rozwoju konserwacji archiwaliów w Polsce w XX i XXI wieku.* Praca doktorska. Archiwum Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach. Katowice.

Łukaszewicz, J. 2002. *Badania i zastosowanie związków krzemoorganicznych w konserwacji zabytków kamiennych.* Toruń.

MacDonald, L., Robson, S. 2010. Polynomial texture mapping and 3D representations, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*: XXXVIII, Part 5: 422–427.

Machnowski, W., Perkowski, J., Wrzosek, H. 2010. Wybrane metody instrumentalne przydatne w ocenie stanu zachowania oraz ochronie tekstylnych obiektów zabytkowych, (w:) B. Więcek i J. Perkowski (red.), *Rola nauki w zachowaniu*

dziedzictwa kulturowego. Współpraca między uczelniami wyższymi a muzeami i służbami konserwatorskimi na terenie regionu łódzkiego. Łódź.

Majorek, M. 2017. Właściwości gleby a zachowanie zabytków archeologicznych – przyczynek do dyskusji. *Acta Universitatis Nicolai Copernici. Archeologia* 35: 187–198.

Majorek, M. 2024. Konserwacja ruchomości archeologicznych, (w:) A. Marciniak, A.I. Zalewska, D. Cyngot, S. Iwaniszewski, H. Kowalewska-Marszałek, F.M. Stępniowski (red.), *Leksykon terminów archeologicznych*, Kraków–Poznań–Warszawa–Łódź, 369–377.

Malzbender, T., Gelb, D., Wolters, H. 2001. Polynomial Texture Maps. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*.http://doi.org/10.1145/383259.383320.

Miazga, B. 2017. *Zabytek archeologiczny jako źródło informacji o przeszłości. Badania specjalistyczne śladów produkcji, użytkowania i depozycji artefaktów.* Wrocław.

Międzynarodowe teksty doktrynalne… 2023. *Międzynarodowe teksty doktrynalne ochrony i konserwacji zabytków,* B. Szmygin (wprowadzenie i wybór), Lublin–Warszawa.

Norton, R.E. 1990. Conservation of Artifacts made from Plant Materials, (w:) *The conservation of Artifacts Made from Plant Materials*. Electronic Edition: The J. Paul Getty Trust, 195–285.

Nowak, M., Drążkowska, A. 2020. Konserwacja zabytków metalowych i drewnianych oraz przedmiotów o złożonych strukturach surowcowych, (w:) A. Drążkowska (red.), *Krypty grobowe kościoła św. Franciszka z Asyżu w Krakowie w świetle badań interdyscyplinarnych*, tom II, Toruń, 180–185.

Pasternak-Zabielska, M. 2022. Problematyka konserwatorska szklanych zabytków archeologicznych wydobytych na terenie zespołu parkowo-pałacowego w Wilanowie/Conservation of glass archaeological relics excavated in the park and palace complex in Wilanów, (w:) P. Niemcewicz, H. Rubnikowicz-Góźdź (red.), *Dziedzictwo rzemiosła artystycznego. Tradycyjne techniki oraz nowoczesna konserwacja i restauracja*. Tom 2. Toruń, 129–145.

Perjés, J.B., Nagy, K., Tóth M. 2009. Conservation of silk finds dating to the Anjou period (1301–1387), (w:) Conserving Textiles. Studies in honour of Ágnes Timár-Balázsy, I. Éri (red.), Series: *ICCROM Conservation Studies* 7: 1–19.

Perjés, J.B., Ráduly, E., Újvári, M. 2009. Excavation of the crypt of the Dominican Church in Vac: preserving coffins, dress and other funerary paraphernalia, 1731–1808, (w:) Conserving Textiles. Studies in honour of Ágnes Timár-Balázsy, I. Éri (red.), Series: *ICCROM Conservation Studies* 7: 20–32.

Pierwsza pomoc… 1998. *Pierwsza pomoc dla zabytków archeologicznych*, Zbigniew Kobyliński (red.). Warszawa.

Potocka, A.D. 2000. Laminacja czy dublaż: próba uściślenia pojęć, *Ochrona Zabytków* 53/3 (210): 325–328.

Pruszyński, J. 1989. *Ochrona zabytków w Polsce. Geneza, organizacja, prawo.* Warszawa.

Rouba, B. 1998. Potrzeba rozszerzenia Kodeksu Etyki Zawodowej, *Biuletyn Informacyjny Konserwatorów Dzieł Sztuki* 9/4 (35)9 (4): 32–33.

Rowińska, A. 2014. Konserwacja ruchomych zabytków archeologicznych – uwarunkowania prawne i pozaprawne, (w:) *VI Międzynarodowa Konferencja Konserwatorska. Problemy muzeów związane z zachowaniem i konserwacją zbiorów*. Szreniawa, 227–235.

Rozporządzenie MKiDN… 2011. Rozporządzenie Ministra Kultury i Dziedzictwa Narodowego z dnia 27 lipca 2011 r. w sprawie prowadzenia prac konserwatorskich, prac restauratorskich, robót budowlanych, badań konserwatorskich, badań architektonicznych i innych działań przy zabytku wpisanym do rejestru zabytków oraz badań archeologicznych (Dz.U. 2011.165.987) [dostęp: 10.06.2024].

Rudy, M. 1995. Kształcenie studentów w zakresie konserwacji ceramiki artystycznej. *Ochrona Zabytków* 48/2 (189): 212–219.

Safarzyński, S., Weker, W. 2010. *Wprowadzenie do sztuki konserwacji metalu*. Warszawa.

Schemat dokumentacji konserwatorskiej… 1983. Schemat dokumentacji konserwatorskiej zabytków ruchomych, K. Nowiński (red.*). Seria Biblioteka Muzealnictwa i Ochrony Zabytków. Seria B* 73. Warszawa.

Sease, C. 1996: A short history of archaeological conservation. *Studies in Conservation*, *41*(sup1), 157–161. https://doi.org/10.1179/sic.1996.41. Supplement-1.157.

Sękowski, J. 2008. *Konserwacja broni białej z elementami bronioznawstwa.* Warszawa.

Shreir, L.L. (red.). 1966. *Korozja. Korozja metali i stopów.* Tom I. Warszawa.

Soldenhoff, B. 1991. Próba określenia typów zniszczeń szkieł archeologicznych, *AUNC, Archeologia XIX, Nauki Humanistyczno-Społeczne* 223: 97–123.

Strzelczyk, A., Karbowska-Berent J. 2004. *Drobnoustroje i owady niszczące zabytki i ich zwalczanie.* Toruń.

Ch. Caple, V. Garlick (red.). 2020. *Studies in Archaeological Conservation*, London.

Szmygin, B. 2000. *Kształtowanie koncepcji zabytku i doktryny konserwatorskiej w Polsce w XX wieku*. Lublin.

Szulc, J., Gutarowska, B., Karbowska-Berent, J. 2022. Dezynfekcja zabytkowych tkanin, (w:) J. Karbowska-Berent i T. Kozielec (red.), *Zabytki, biologia, konserwacja*. Toruń.197–219.

Ślesiński, W. 1995. *Konserwacja zabytków sztuki. Rzemiosło artystyczne.* Warszawa.

Thomson, R. 2006. Leather, (w:) E. May, M. Jones (red.), *Conservation Science. Heritage Materials*. Cambridge.

Ustawa o ochronie… 2003. Ustawa z 23 lipca 2003r. o ochronie zabytków i opiece nad zabytkami (Dz. U. 2003 r. Nr 162, poz. 1568 z późniejszymi zmianami) [dostęp: 10.06.2024].

Ważny, J., Kurpik, W. 2005. Konserwacja drewna zabytkowego w Polsce. *Nauka* 1: 101–121.

Wolski, J.. 1998. Kodeks etyki zawodowej konserwatorów dzieł sztuki. *Biuletyn In-formacyjny Konserwatorów Dzieł Sztuki* 9/4 (35): 16–17.

www.zpap-orkds.pl. b.d. *Zasady konserwatorskie i zasady adaptacji,* B.J. Rouba (opr.), https://zpap-orkds.pl/zasady-konserwatorskie-i-zasady-adaptacji-opr-b-j-rouba/, oraz *Kodeks etyki konserwatora – restauratora dzieł sztuki,* https://zpap-orkds.pl/kodeks-etyki-konserwatora-restauratora-dziel-sztuki/ [dostęp: 10.08.2024].





Archeomuzykologia. Miary i wymiary dźwięku

Anna Gruszczyńska-Ziółkowska

WPROWADZENIE

Metody *stricte* archeometryczne stanowią skromny skrawek szerokiego pola współpracy muzykologii i archeologii, stojącej u podstaw osobnej subdyscypliny badawczej – archeomuzykologii. Jeśli przez archeometrię rozumieć wykorzystywanie narzędzi tworzonych współcześnie przez nauki ścisłe do badania zabytków archeologicznych, należałoby interesujący nas zakres badania muzykologicznego ograniczyć do studium nad akustycznymi walorami instrumentu muzycznego i ewentualnie poszerzyć je o analogiczne badanie przestrzeni. Tymczasem rzecz jest bardziej złożona.

Świat dźwięków intencjonalnie tworzonych przez człowieka to zarówno muzyka, jak i różnego rodzaju sygnały (od użytkowych po rytualne), emitowane przy użyciu narzędzi celowo kształtowanych tak, by wydawały określony, zamierzony dźwięk. Same w sobie są więc narzędzia dźwiękowe świadectwem myśli architektonicznej swych konstruktorów, a także ich doświadczenia z zakresu zjawisk akustycznych, planowania na podstawie poczynionych obserwacji i empirycznych analiz. Badając właściwości dźwiękowe instrumentów, nie można pominąć świadectw historycznych dowodzących, że właśnie zjawiska akustyczne, jako takie, były w starożytności przedmiotem precyzyjnych rozważań (Platon 1986; Arystoksenos z Tarentu 2016; Diogenes Laertios 1984). Do realizacji eksperymentów tworzone były specjalne urządzenia miernicze (np. grecki monochord), służące do wyznaczania interwałów wyrażanych stosunkiem liczbowym (Franklin 2005; Landels 2003; West 2003). Rozwinięte kalkulacje, opis oraz objaśnienia dotyczyły zarówno drobiazgowych, jak i skomplikowanych zjawisk akustycznych (np. wyznaczenie przez pitagorejczyków komatu ((2187:2048):(254:243)) (Drobner 1973) oraz harmonii kosmosu (Hagel 2005).

W osadzonej w antyku tradycji europejskiej dźwięk rozumiany był jako zjawisko podlegające liczbie, mierze, proporcji, a to w późniejszych okresach sytuowało muzykę w *quadrivium*, obok arytmetyki, geometrii i astronomii. Obserwacje powszechności zjawiska drgań czy naturalne powiązanie ruchu harmonicznego z liczbą wyraźne są także w innych starożytnych koncepcjach dźwięku, porządku świata czy wręcz kosmosu (również w teoriach nowożytnych i nawet całkiem

DOI: 10.64158/wiqjwbrb3f

współczesnych, jak np. teoria strun) (Li 2012). Trudno jest ocenić w ogólnym wymiarze, w jakim stopniu teoretyczne rozważania czy nawet proste obserwacje miały swoje odzwierciedlenie w codziennej praktyce. Jednak zarówno współczesny materiał etnograficzny z dowolnej kultury świata, jak i zachowane najstarsze instrumenty z okresu paleolitu dowodzą, że nawet tam, gdzie nie rozwijały się skomplikowane systemy filozoficzne, proces budowy instrumentu muzycznego poprzedza idea dźwięku (określenie jego rodzaju i celu), wybór odpowiedniego materiału oraz pomiar i kalkulacja.

W *Przedmowie* do I tomu „Mikroprzeszłości" Profesor Andrzej Michałowski napisał, że „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 ożywają przy odpowiednim kwestionariuszu pytań, jakże często wywodzących się z nauk doświadczalnych" (Michałowski 2021:5). Archeometria muzykologiczna nie ma jednej metody badawczej, dlatego ów „kwestionariusz pytań" jest niezwykle obszerny i ogromnie zróżnicowany.

DŹWIĘK PRZESZŁOŚCI JAKO PRZEDMIOT ROZWAŻAŃ

Wydawać by się mogło, że podstawą i zasadniczym aspektem badania archeometrycznego w zakresie muzykologicznym jest przywrócenie brzmienia dawnym instrumentom i – w dalszej kolejności – akustyczna analiza ich dźwięków. W istocie jednak działania te są tylko wstępnym etapem badawczym. Szeroko pojęte μέτρον objawia się nie tylko w samym dźwięku, ale również w całym instrumencie jako materialnym efekcie koncepcji konstruktorskiej i świadectwie rodzaju prowadzonych kalkulacji, a także w tradycji estetyki brzmienia i systemu dźwiękowego, osadzonych w pełnym kontekście kulturowym (Gruszczyńska-Ziółkowska i Kruszyńska 2017). Ważnym aspektem zjawiska dźwiękowego jest jego wybrzmiewanie w przestrzeni i sposób jego odbioru. Dlatego w polu zainteresowań archeomuzykologii znajdują się analizy środowiska akustycznego, w jakim prowadzona była aktywność dźwiękowa, w tym również te, które dotyczą użycia najpowszechniejszego w dziejach ludzkości instrumentu – głosu. W latach ostatnich wzrasta też zainteresowanie badaniami z zakresu antropologii fizycznej, które dotyczą rozwoju narządu słuchu oraz fizjologii słuchu i psychoakustyki (głównie percepcji dźwięku).

Trudno jest wyznaczyć momenty początków archeomuzykologii, jeszcze trudniej ustalić początek poszukiwań sztuki pomiaru i analizy dźwięku. Z pewnością szukać go należy w odległej przeszłości, ponieważ pomiar (choćby tylko polegający na wyznaczeniu proporcji) jest podstawą konstrukcji instrumentu muzycznego. Wyraźne nacięcia, interpretowane jako ślady dokonywania pomiarów, noszą już instrumenty z górnego paleolitu (przynajmniej flety). Jeśli jednak zechcemy uznać jedynie zdefiniowane i teoretycznie uzasadnione czynności z zakresu pomiaru dźwięku, sięgnąć musimy do greckiego antyku (jeśli nie szerzej – tradycji śródziemnomorskich). Postępowanie analogiczne do precyzyjnych pomiarów pitagorejskich i podobny typ rozważań teoretycznych można odnaleźć także w starożytnych źródłach chińskich, a dowodami ich praktycznego stosowania z pewnością są sposoby strojenia zestawów wiszących kamieni (litofonów) czy dzwonów.

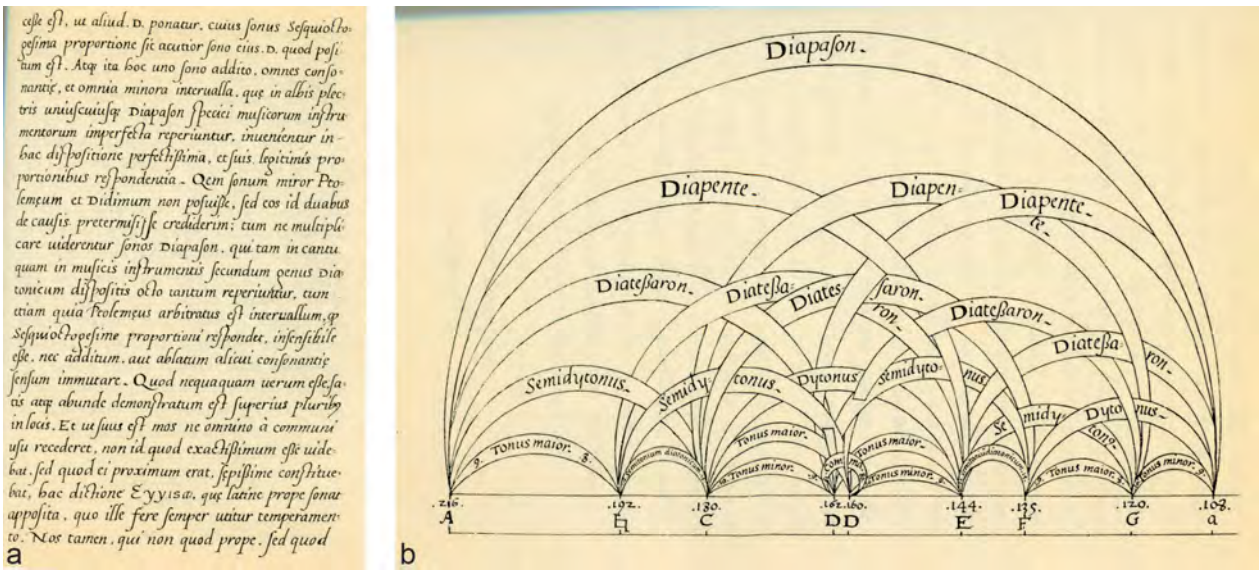
Kształtowana na osiągnięciach antyku europejska nauka o mierze dźwięku rozwijała się w sposób ciągły. Naturalne jest więc, że teoretyczna myśl zarówno średniowieczna, jak i nowożytna nawiązywała właśnie do tych źródeł. Ciekawym przykładem są dyskusje podejmowane przez Francisco Salinasa, XVI-wiecznego uczonego w muzyce spekulatywnej. W swoim fundamentalnym dziele *De Musica Libri Septem* z 1577 r. Salinas skrupulatnie omawia reguły kalkulacji dźwiękowych nie tylko w zakresie budowy systemów interwałowych i wręcz systemu temperowanego, ale także w zakresie formuł melodycznych i rytmicznych. W każdym z działów, jak wielu ówczesnych teoretyków, wprowadza dyskusję z autorytetami antyku – Teokrytem, Ptolemeuszem, Platonem. Interesującą próbką takiej jednostronnej polemiki czy też komentarza, pochodzącą z wcześniejszej i nieco jeszcze skromniejszej jego pracy – *Musices Liber Tertius* z 1566 r. jest krytyka stosowanego przez starożytnych sposobu kalkulacji dźwięków nominalnie tożsamych: „*jestem zaskoczony, że Ptolemeusz i Didymos nie wykryli tego dźwięku, ale myślę, że przeoczyli go z dwóch powodów: z jednej strony, by nie sprawiać wrażenia powielania dźwięków oktawy, których jest tylko osiem* (...); *z drugiej – Ptolemeusz uważał także, że interwał odpowiadający stosunkowi 81:80 jest niezauważalny i zmysł nie dostrzega go, nawet jeśli zostanie dodany lub odjęty od jakiegoś współbrzmienia*". Na wykreślonej przez Salinasa skali proporcji, wyrażających różne wewnętrzne podziały oktawy („*Diapason*" 216:108),

dźwięk D występuje w dwóch postaciach, oznaczonych liczbami „*162.160*", co oznacza dyskutowany w tekście interwał 81:80 (ryc. 1) (Salinas 1993: 187, 189 [fol. 56a, fol. b.n. – między fol. 56b i 57a]). Istotnie chodzi o komat wielkości ok. 1/9 tonu (ok. 22 ct), czyli właściwie mikroton, który jednak – jak słusznie uważał Salinas – jest interwałem całkiem zauważalnym.

Zagadnienia, jakie przewijają się w księgach nowożytnych uczonych jako nawiązania do znacznie wcześniej sformułowanych wątków poszukiwań, ustaleń i procedur kalkulacyjnych, odzwierciedlają szeroki zakres zainteresowań myślicieli starożytnych. Przykładem mogą być przywoływane przez Athanasiusa Kirchera treści wykładów Witruwiusza o architekturze teatrów, które – wzbogacone ilustracjami poglądowymi – znajdujemy w *Musurgia Universalis* z 1650 r. Kircher doskonale rozumiał antyk i cenił zabytki starożytności, a osobiście zainteresowany tzw. magnetyzmem, szczególnie pochylał się nad poruszanymi przez Witruwiusza kwestiami pomiarów akustycznych, echa i koncepcji rozmieszczenia brązowych urządzeń wzmacniających dźwięk (Kircher 1650: 262, 264).

Zainteresowania starożytnościami muzycznymi, wcześnie i na stałe osadzone w dziejach wiedzy o muzyce, uzupełnione nowożytną fascynacją egzotyki Orientu i krajów zamorskich, szczególnie ciekawie przedstawiają się w dokonaniach badaczy inspirowanych duchem ewolucjonizmu w drugiej połowie XIX w. W dziejach kształtującej się wówczas muzykologii jako dyscypliny uniwersyteckiej jest to okres uformowania się silnego pionu systematycznego, co było efektem zintensyfikowanego wkraczania muzykologii w relacje z innymi naukami, zarówno społecznymi, jak i przyrodniczymi. Sytuacja ta wpłynęła w dość istotny sposób na poszerzenie tematyki badań, ale też i rozwój stosowanych narzędzi, przejmowanych z innych dyscyplin.

Najwcześniejsze, jeszcze XIX-wieczne analizy dźwięku w badaniach archeologicznych prowadzone były metodą słuchową. Wynik takiego badania pozwalał zatem jedynie subiektywnie ocenić cechy wrażeniowe brzmienia (wysokość, barwę, głośność) i nie miał waloru badania obiektywnego – ustalenia cech fizycznych dźwięku (odpowiednio: częstotliwości, składowych, natężenia). Opisy brzmień uzupełniano transkrypcjami w powszechnie stosowanym zapisie nutowym. Notacja ta dostosowana jest do europejskiego systemu temperowanego, więc obserwowane oboczności odnotowywano, podobnie jak w zapisie etnomuzykologicznym, za pomocą dodatkowych oznaczeń. Bardziej zobiektywizowane i precyzyjniejsze analizy akustyczne materiału archeologicznego szeroko upowszechniły się w końcu XX w., ale stosowane były wcześniej, w zasadzie od czasu spopularyzowania prac Hermanna von Helmholtza, poświęconych akustyce muzycznej, fizjologii słyszenia i psychoakustyce. Jego fundamentalne w tej materii dzieło z 1863 r.,



Ryc. 1. Francisco Salinas Musices Liber Tertius z 1566 r.; a – fragment komentującego wykres tekstu (dyskusja z Ptolemeuszem i Didymosem); b – wykres proporcji wewnątrzoktawowych, w środku skali – dyskutowany interwał 162:160 (Salinas 1993: 187 [fol. 56a], 189 [fol. b.n. – między fol. 56b i 57a])

zostało przetłumaczone na angielski i zredagowane przez Alexandra Johna Ellisa, który trzecie wydanie bogato rozszerzył o własne materiały (Helmholtz 1895). Sam Ellis kilka lat wcześniej przedstawił nową, właściwie w pełni rewolucyjną koncepcję badań muzykologicznych. Zwrócił uwagę na trudność prowadzenia analiz porównawczych w sytuacji wielości i silnego zróżnicowania kultur muzycznych, które tworzą swoje własne skale i systemy dźwiękowe. Co ważne, wskazał też narzędzie, przy pomocy którego dokonuje się wygodnego pomiaru interwałów i ich porównywania w całkowitym uwolnieniu od europejskiego systemu zapisu nutowego: skalę centów (Ellis 1885).

Interwał oktawy, który jest naturalnym interwałem (proporcja częstotliwości 1:2) najbliższym dźwiękom tożsamym (1:1) ma 1200 centów. Dowolny szereg dźwięków (oryginalną skalę muzyczną, układ systemowy czy też skalę instrumentu) można więc przedstawić jako serię częstotliwości (w skali herców [Hz]) albo w skali centowej [ct] – jako serię interwałów wyznaczonych z udziałem logarytmów stosunków tych częstotliwości. To dwa różne typy skal, więc ich stosowanie zależy od zjawiska, które mają mierzyć czy odzwierciedlać. Skala częstotliwości, arytmetyczna, jest bardziej przydatna w przedstawianiu stroju instrumentu, ponieważ nie tylko oddaje konkretne dźwięki, ale wskazuje też ich rejestr. Natomiast skala centów, logarytmiczna, ukazuje relacje pomiędzy dźwiękami, znajduje więc zastosowanie przede wszystkim we wszelkiego rodzaju studiach porównawczych (także w obrębie jednego instrumentu, np. dla wskazania cech systemu muzycznego).

Pod wpływem ewolucjonizmu i za sprawą rodzącego się i szybko wówczas rozwijającego się nurtu muzykologii porównawczej (tzw. komparatystyki), zainteresowania muzycznym instrumentarium archeologicznym szczególnie rozwinęły się w początkach XX w. Pozyskiwane w toku badań archeologicznych instrumenty zyskiwały szczególne miejsce w rozrastających się kolekcjach, dokonywano dokumentacji emisji ich dźwięków, zajmowano się pomiarem całych instrumentów i poszczególnych ich elementów (np. Sachs 1981; von Hornbostel i Sachs 1919; Hickmann 1949). Do istotnych osiągnięć komparatystów należy stworzenie przez Curta Sachsa i Ericha von Hornbostla powszechnej (do dziś zresztą stosowanej i uznawanej za najlepszą) klasyfikacji instrumentów muzycznych, w której zasadniczym kryterium są zjawiska akustyczne (sposób wzbudzania dźwięku).

Choć archeomuzykologia jako wspólna, środowiskowa przestrzeń wymiany myśli i dyskusji naukowej, czy wręcz subdyscyplina nauk humanistycznych formuje się znacznie później, te właśnie badania silnie ją ukształtowały. Rozwiniętą kontynuację systematycznych, dokumentacyjnych i analitycznych badań nad dźwiękiem przeszłości widzieć by można w latach 70. i 80. XX w. Rodzą się wtedy zresztą dwa odmienne (ale niekoniecznie rozdzielne) nurty zainteresowań – teorią i praktyką. W ramach pierwszego, z wybitnych osiągnięć tego przełomu należy przywołać odczytanie klinowego zapisu muzycznego (akkadyjskiego, towarzyszącego zapisowi huryckiego tekstu hymnu) z tabliczki z Ugarit z ok. 1400 r. przed Chr., dokonane za pośrednictwem dokumentów zawierających systemowe instrukcje strojenia liry oraz operacje matematyczne (Draffkorn Kilmer i in., 1976). Drugi nurt zapoczątkowuje Cajsa S. Lund szeroko zakrojonym programem dokumentacji oryginalnych dźwięków i rekonstrukcji instrumentów archeologicznych Skandynawii (Lund 1981; 1984).

Pod względem zastosowania nowoczesnych metod pomiaru dźwięku, które rozwojowy impet uzyskały dzięki postępowi technik nagraniowych i mikroprocesorom, swoistym *big-beatem* o charakterze zdarzenia zwrotnego była dla środowiska archeomuzykologicznego jednoczesna publikacja w 1994 r. (w tym samym tomie) trzech obszernych artykułów, poświęconych zabytkom górnego paleolitu. Znalazły się wśród nich instrumenty już wtedy bardzo dobrze znane, ale wcześniej analizowane głównie z innej perspektywy, takie jak np. flet magdaleński z Groty Placard, który uważano za przykład obiektu z nacięciami, służącymi do rachuby kalendarza lunarnego, czy czurynga pełniąca podobną funkcję (Marschack 1972). Tym razem zabytki te zostały ukazane jako instrumenty i rozważane przede wszystkim jako źródła dźwięku. Analizowana jest także przestrzeń akustyczna słynnych grot. Przygotowany przez trzech autorów materiał jest tak duży (120 stron w formacie A4), że mógłby stanowić całkiem sporą, odrębną publikację (Dauvois 1994; Dauvois i Boutillon 1994; Buisson 1994).

W latach następnych grono badaczy prowadzących studia ukierunkowane na badanie dźwięku powiększało się, poszerzała się także tematyka i zakres prac, wychodząc poza samą analizę dźwięków oryginalnych ku dźwiękom otrzymywanym dzięki tworzonym rekonstrukcjom, kopiom instrumentów, kalkulacji (Purser 2006) i modelowaniu matematycznemu (Hagel 2004). Rozszerzają się także pola tematów typowo muzykologicznych. Warto zaznaczyć, że wiele nowych przestrzeni badawczych i dyskutowanych

zagadnień rodzi się właśnie w wyniku pogłębionych analiz akustycznych (Psaroudakēs 2002; Byrne 2002). Na gruncie polskiej archeomuzykologii przykładem jest książka poświęcona wyłącznie idiofonom emitującym dźwięki znajdujące się na granicy słuchu ludzkiego, co zostało ujawnione w toku badań prowadzonych w ostatnim dziesięcioleciu (Gruszczyńska-Ziółkowska i in., 2021).

KIERUNKI I METODY BADAWCZE

Specyfiką, ale i paradoksem muzykologicznych studiów nad zabytkiem archeologicznym, które obejmują pomiar i analizę zjawiska dźwiękowego, jest to, że bada się to, czego nie ma, co nie istnieje. Jako zjawisko fizyczne dźwięk pojawia się w przestrzeni jedynie wtedy, gdy dokona się jego wzbudzenia (a i wtedy występuje w czasie ograniczonym i analizowany jest jako zjawisko zmienne). Często stan zabytku uniemożliwia emisję dźwięku, są wówczas badane jego potencjalne możliwości, ewentualnie także prowadzone są estymacje, kalkulacje i modelowanie dźwięków. Analizie poddawany jest więc nie sam dźwięk, a obiekt – pod kątem cech nadających mu właściwości akustyczne (bryła, materiał). Jak sygnalizowałam wcześniej, pozyskiwanie danych dotyczących dźwięków wytwarzanych przez instrumenty nie jest celem samym w sobie. Dane te są przede wszystkim punktem wyjścia do formułowania zagadnień wyższego rzędu, w tym również takich badań, w których też posłużyć się trzeba narzędziami właściwymi naukom przyrodniczym, choć tym razem już innego zakresu. Nie ma więc jednej procedury badawczej dla muzykologicznych studiów nad zabytkami archeologicznymi, które opierają się na pomiarze – każdy zestaw danych i rodzaj podjętej analizy determinowany jest wyznaczonym przedmiotem badania, właściwościami obiektu archeologicznego, stanem jego zachowania, kontekstem znaleziska. W dotychczasowych studiach archeomuzykologicznych, które wchodzą w interesujący nas tutaj obszar archeometrii, wskazać można pięć zasadniczych kierunków badawczych, charakteryzujących się odrębną tematyką, zakresem i metodami. Zastrzec jednak należy, że często, w konkretnych badaniach nad jednym zabytkiem lub integralnym zespołem zabytków, kierunki te (i metody) krzyżują się i uzupełniają.

Właściwości akustyczne instrumentów

Przeznaczony do badania materiał dźwiękowy niekoniecznie musi być pozyskiwany w warunkach laboratoryjnych i przy użyciu najwyższej klasy aparatury. Do ustalenia zasadniczych cech piszczałki z otworami palcowymi, takich jak rejestr instrumentu i podstawowe częstotliwości serii dźwięków, wystarczą dźwięki nagrane najprostszym urządzeniem. Specjalistyczne urządzenia nagrywające dobierane są zazwyczaj we współpracy z akustykiem lub inżynierem dźwięku. Uwzględnia się przy tym przede wszystkim cechy instrumentu, warunki nagrania, a przede wszystkim – kierunek i aspekt planowanych badań analitycznych. Przy zastosowaniu metod cyfrowych nagrania, w których sygnał ciągły przekształcany jest w sygnał dyskretny, wskazane jest zaplanowanie wysokiej częstotliwości próbkowania (np. 96 kHz). Podkreślić przy okazji warto, że wysoką jakością nagrania charakteryzują się niejednokrotnie analogowe nagrania archiwalne, dokonywane na taśmach magnetofonowych. Podobnie jest, jeśli chodzi o wyznaczenie warunków rejestracji dźwięku. Zazwyczaj przyjmuje się, że najlepsze czy też najbardziej obiektywne i dające najczystszy sygnał są nagrania dokonywane w specjalnych warunkach laboratoryjnych (np. w komorze bezechowej), ale znane mi są przykłady wystarczającej jakości nagrań realizowanych w niewielkim kąciku obłożonym materiałem pochłaniającym, dobranym odpowiednio do typu dźwięku badanych instrumentów (w tym przypadku kartonami od jajek). Trzeba też zaznaczyć, że do pewnych celów właściwe jest badanie dźwięku instrumentu w jego naturalnych warunkach użytkowania (np. w otwartej przestrzeni czy w kontekście architektonicznym, w którym został znaleziony). Warto wtedy uwzględnić temperaturę i wilgotność powietrza i jeśli są istotnie zmienne (np. duże wahania dobowe, różne pory roku), wykonać kilkakrotny zapis w różnych warunkach.

Obwiednia widma amplitudowo-częstotliwościowego każdego dźwięku ujawnia wzmocnienie niektórych składowych (lub ich grup) w postaci szczytów. Są to częstotliwości formantowe, a części widma, w których one się pojawiają nazywane są formantami (Jorasz 1998). Dźwięki wszystkich instrumentów mają swoje charakterystyczne formanty, kształtujące się w wyniku rezonansu akustycznego. Analizy dźwięku instrumentów archeologicznych zazwyczaj koncentrują się na podstawowej częstotliwości składowej, która często (choć nie zawsze) ma największe natężenie, a więc i decydujący wpływ na kształtowanie wrażenia

wysokości dźwięku. Jednak równie ważna jest struktura widmowa sygnału (układ i relacje wszystkich składowych) i zachowania poszczególnych składowych w przebiegu czasowym, bo to one kształtują barwę instrumentu. Co ciekawe, najbardziej charakterystyczne momenty, właśnie te, które budują specyfikę brzmienia (barwę), mają miejsce nie w czasie pełnej ekspozycji dźwięku (w tzw. stanie ustalonym), a w transjentach – fazach jego narastania i wybrzmiewania (Więcławski 2002). Szereg składowych jest stałą cechą dźwięku danego instrumentu i sposób emisji nie ma wpływu na jego podstawową kompozycję. Może jednak wpływać na zmienność funkcji poszczególnych składowych (wzmocnienie jednych, osłabienie innych) i powstawanie zjawisk dodatkowych (np. składowych wypadkowych, zdudnień), a w efekcie także modyfikować brzmienie instrumentu. To ważne aspekty badania, bo to właśnie percepcja dźwięku – czynnik psychoakustyczny – jest dla muzyków decydująca przy doborze instrumentów, a nawet w tworzeniu ich konstrukcji.

Dźwięki oryginalne – podstawowy materiał do analizy

W akustycznym badaniu instrumentu największe znaczenie ma dostęp do dźwięków instrumentów oryginalnych, jednak takie możliwości są ograniczone. Zazwyczaj najlepiej zachowane są instrumenty w całości wykonane z materiału nieorganicznego, jak np. kamień, ceramika, metal, kość, poroże czy muszle. Nietrwałość niektórych rodzajów materiałów często używanych do budowy instrumentu (lub jego części) sprawia, że znaczenie mają też cechy konstrukcyjne i łatwość uszkodzenia czy wręcz utraty pewnych elementów. Np. nie można badać oryginalnych dźwięków archeologicznych instrumentów strunowych ani bębnów, nawet jeśli dobrze zachowane są ich korpusy, ponieważ ich wibratory – struna lub membrana – wykonane były z materiałów nietrwałych.

Najbogatszy zespół danych oryginalnych wnoszą instrumenty z dwóch grup – aerofonów (instrumentów dętych) i idiofonów (instrumentów samobrzmiących, drgających całą swoją masą). O ile nie są uszkodzone, są przedmiotami wdzięcznymi do badań, ponieważ są wciąż dobrymi nośnikami dźwięku sprzed wieków czy nawet tysięcy lat. Wśród aerofonów warto zwrócić uwagę przede wszystkim na instrumenty ceramiczne. Często zachowują precyzję stroju i barwy, dają więc materiał dość wyrazisty, interesujący również w zakresie interpretacji ich funkcji. Jeśli zaś chodzi o idiofony, to widma ich dźwięków są szumowe, mogą więc sprawiać trochę kłopotów interpretacyjnych. W zależności od typu materii rezonującej, formanty mogą się wyodrębniać wyraziście, mogą się także kształtować strefy szerokich pasm szumów barwnych o charakterze formantów. Analiza takich dźwięków jest dość trudna, szczególnie więc przydatne w badaniach są nie tylko wykresy widma, ale przede wszystkim spektrogramy, czyli wykresy równocześnie uwzględniające trzy zmienne: czas, amplitudę i częstotliwość sygnału.

Dźwięki rekonstruowane – wtórny materiał do analiz

Większość znalezisk muzycznych pojawia się w materiale archeologicznym w postaci fragmentarycznej lub wręcz szczątkowej. Ale nawet jako takie stanowić mogą cenny materiał diagnostyczny, pomocny np. w studiach porównawczych czy w pracach przygotowujących różnego rodzaju rekonstrukcje, kalkulacje numeryczne czy symulacje i modelowanie. Nawet niepełny, uszkodzony instrument może być źródłem informacji istotnych statystycznie, np. przez potwierdzenie powtarzalności cech konstrukcyjnych czy ukazanie elementów wariantowych. Tego typu dane mają wysoki walor w tworzeniu modeli i rekonstrukcji wirtualnych. Znajdują zastosowanie nie tylko w zabiegach zmierzających do odtwarzania kształtów, cech konstrukcji (jak w przypadku innych obiektów archeologicznych), ale także w procedurze matematycznego modelowania dźwięku.

Psychoakustyka i antropologia

Badania pomiarowe znajdujące zastosowanie w archeomuzykologii nie ograniczają się jedynie do analiz samych instrumentów. Interesujące wyniki uzyskiwane są na polach wiążących się z psychoakustyką – antropologii fizycznej, praktyki muzycznej, rekonstrukcji systemów muzycznych. Wspominana wcześniej istotna różnica w sposobie analizy danych – poprzez badanie audytywne (koncentrujące się na cechach wrażeniowych brzmienia) i z użyciem narzędzi pomiarowych (obiektywne badanie cech zjawiska fizycznego) – ma szczególne zastosowanie w obszarze tego rodzaju studiów. Co więcej, badania lat ostatnich pokazują, że najciekawsze wyniki uzyskuje się, traktując

komplementarnie oba sposoby analizy zjawisk – subiektywny i obiektywny. Niezależnie bowiem od cech akustycznych, dany obiekt (narzędzie, przestrzeń) projektowany był i wykorzystywany przez człowieka, mającego istotne ograniczenia w zakresie percepcji zdarzeń akustycznych (np. w zakresie słyszalnych częstotliwości), ale też realizującego potrzeby estetyczne (np. upodobanie do współbrzmień przez konstruowanie instrumentu o podwójnych piszczałkach).

Akustyka przestrzeni

Zdolność słyszenia dźwięków ma swoją gatunkowo niezmienną charakterystykę. Jednak na ich percepcję w niektórych sytuacjach mogą istotnie wpływać specjalne warunki akustyczne przestrzeni. Odkrywanie wyjątkowych zjawisk akustycznych, zachodzących w szczególnych warunkach przestrzeni (np. w wąwozach, zagłębieniach skalnych czy w podziemnych korytarzach i galeriach) należy do typowych doświadczeń każdego człowieka, a możliwość modyfikowania ich i wpływania na ich przebieg zazwyczaj wiązana jest z tajemnicą, jeśli nie wręcz interpretowana jako przekraczanie granicy światów.

Praktyka wykonawcza – archeologia dźwięku

Kształtowanie się archeoakustyki czy też archeometrii stosowanej w obrębie muzykologii w postaci badań wieloaspektowych, w tym opierających się na praktyce muzycznej, jest w zasadzie naturalne. Badanie akustyczne jest obiektywnym badaniem dźwięku lub przestrzeni, w której on rozbrzmiewa. Ale – jak już zaznaczyłam wcześniej – dźwięk nie istnieje, dopóki nie zostanie wzbudzony. Tymczasem od zarania studiów nad „dźwiękami archeologicznymi" poważnym i budzącym dyskusje problemem badawczym jest nie tylko sprawa materiału, kształtu czy nawet sposobu montowania wykorzystywanych wibratorów, ale także kwestia sposobów ich pobudzenia do drgań.

Niekiedy w wyborze metody wzbudzenia dźwięku pomocne są wskazówki, jakie niosą źródła innego rodzaju – etnograficzne, historyczne czy ikonograficzne (Martinelli i Melini 2010). Podobnie jak archeologia (Buko 2005), muzykologia, a tym bardziej archeomuzykologia, korzysta z nich powszechnie (Dahlig 1990). Ale trzeba podkreślić, że również w zakresie badania samego dźwięku wartość tych źródeł – o ile są dostępne i uzasadnione metodologicznie – jest nie do przecenienia.

Systemy dźwiękowe

Większe kolekcje instrumentów pochodzących z jednego kontekstu archeologicznego czy instrumenty wieloelementowe (np. zestawy piszczałek, kamieni, dzwonów) są często inspiracją do podejmowania badań nad systemem dźwiękowym danej kultury. Zespół homogenicznych danych akustycznych jest w takich badaniach podstawą, ale niemniejsze znaczenie ma kwestia techniki emisji dźwięku, a także to, czy praktyka muzyczna opiera się na współbrzmieniach. Pomocne w tych badaniach są źródła ikonograficzne, historyczne (o ile istnieją) oraz etnograficzne (o ile ciągłość kulturowa w zasadzie jest zachowana).

BADANIA – PRZYKŁADY

Dźwięki zabytkowych instrumentów

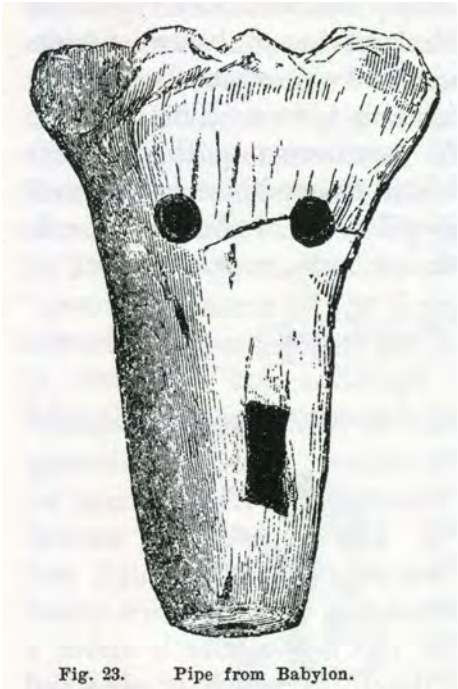
Badania instrumentów dających możliwość emisji dźwięków są bardzo zróżnicowane. Wynika to w sposób oczywisty z różnorodności samych instrumentów, ich konstrukcji i budulca, ale także z liczebności zabytków, która wpływa na podejmowanie szczegółowych analiz konkretnych cech, które są przedmiotem porównań i często w dalszej kolejności stanowią podstawę do ustalania cech systemowych muzyki danej kultury. Warto też podkreślić, że chociaż obecne możliwości techniczne dają duże pole wieloaspektowych badań pomiarowych obiektywnych, nie bez znaczenia są obserwacje badaczy działających bez pomocy szczególnej aparatury.

Dźwięki oryginalne

Aerofony

W 1864 r. Carl Engel opublikował pionierską pracę o muzyce w starożytności, w której znajdujemy przykład oryginalnego opracowania zabytkowego aerofonu, swoistą, „udźwiękowioną kartę katalogową" instrumentu. Jest to obszerne pod względem muzykologicznym omówienie ceramicznej piszczałki o dwóch otworach palcowych, zawierające także opis sposobu emisji podstawowych dźwięków i ich

identyfikację (Engel 2015[1864]). Analizowany przez Engela instrument (ryc. 2) został „*znaleziony przez Kapitana Willocka w babilońskich ruinach Birs Nimrud i podarowany Muzeum Królewskiemu Towarzystwa Azjatyckiego. Ma ok. 3 cali długości i tylko dwa otwory palcowe rozmieszczone obok siebie w równej odległości od otworu zadęciowego (...). Kiedy oba otwory są zasłonięte, [gwizdek] produkuje dźwięk C; jeśli tylko jeden z nich jest zamknięty, produkuje E; a kiedy oba są otwarte, produkuje G*". Istotne jest, że w swojej analizie autor zaznacza, że minimalnie różnią się dźwięki G, osiągnięte dwoma sposobami (przedęciem przy obu otworach zamkniętych i zwykłym zadęciem przy obu otworach otwartych), a także, że „*tercja uzyskana przez zamknięcie lewego otworu palcowego jest w przybliżeniu ćwierć tonu niższa niż tercja uzyskana przez zamknięcie prawego otworu palcowego*". Przyczyn powstawania takich oboczności upatrywał autor w możliwym niedostatecznym oczyszczeniu zabytku (Engel 2015 [1864]: 75–76).

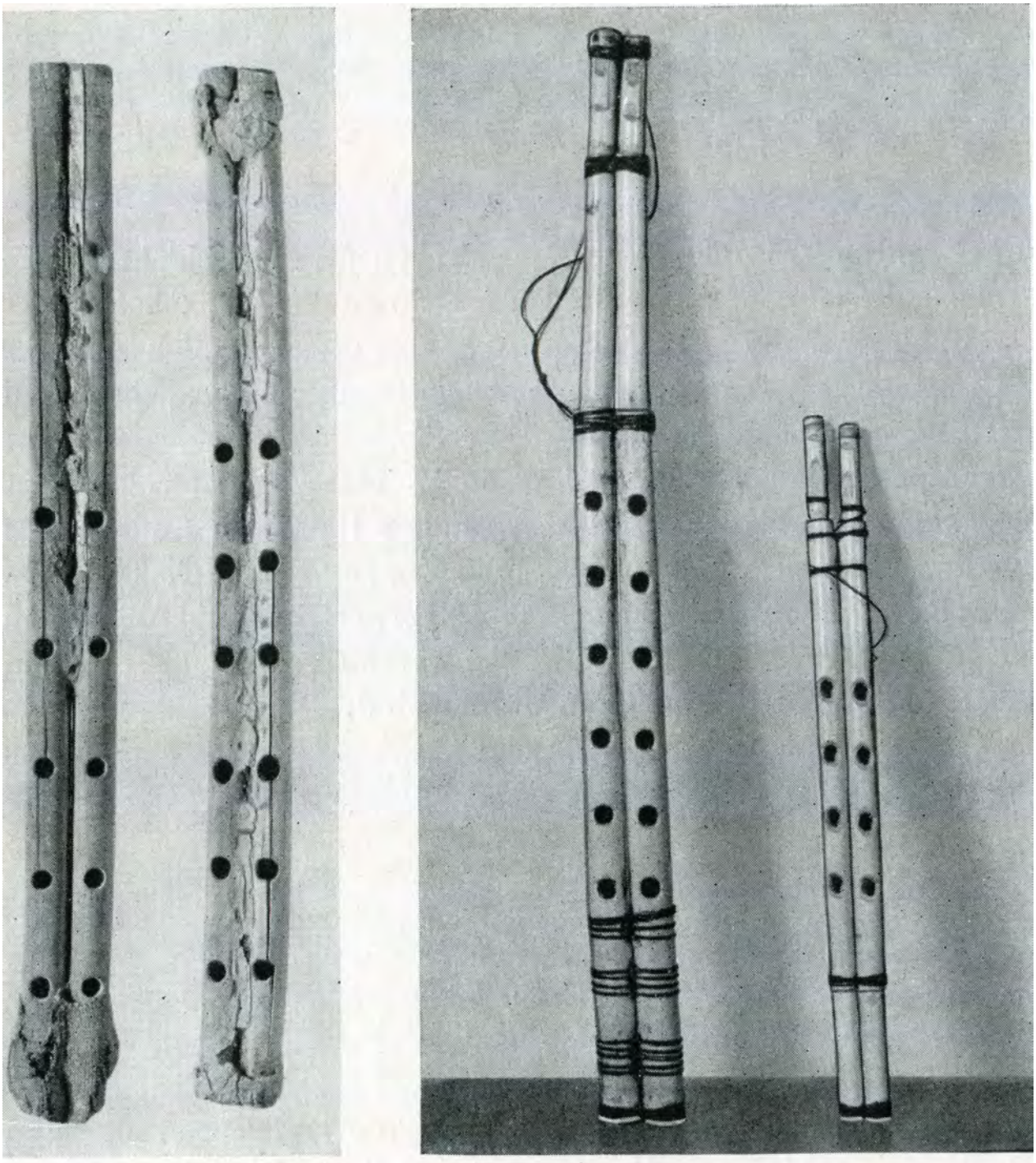

Fig. 23. Pipe from Babylon.

Ryc. 2. Analizowany przez Carla Engela dwuotworowy „gwizdek" babiloński (Engel 2015 [1864]: 76, fig. 23)

Tymczasem w świetle badań poczynionych w ciągu półtora wieku od powstania tej analizy, gdy znacznie lepiej rozumiemy opisywane przez Engela zjawiska, z uznaniem przyjmujemy jego szczegółowe obserwacje, w istocie bowiem wykryte przez niego zróżnicowanie dźwięków o około ćwierć tonu było intencjonalne. Kierując się doświadczeniem i pomiarem dźwięku (audytywnym – jaki był mu dostępny), Engel sygnalizował obecność akurat takiej właściwości piszczałki, która jest jedną z cech systemowych i wynika z odpowiedniej kalkulacji geometrii instrumentu przy jego tworzeniu.

Estetyka zmiennych, minimalnie różnicowanych interwałów (także emitowanych jednocześnie, dających wówczas ostre współbrzmienia), jest charakterystyczną i trwałą cechą wielu kultur muzycznych, w tym także bliskowschodnich. Dobitnie zilustrował to w 1961 r. Hans Hickmann, zestawiając dwa podwójne klarnety archeologiczne z okresu Nowego Państwa (Muzeum Kairskie, Nr 69837 i 69838) z dwoma analogicznymi instrumentami ludowymi. Porównanie to opisał: „*klarnet składa się z dwóch ściśle połączonych piszczałek, grających jednocześnie, unisono. Ponieważ rozmieszczenie otworów palcowych, a tym samym – dźwięków, w obu piszczałkach nie jest dokładnie takie samo, we współbrzmieniach powstają pewne efekty dudnienia i tworzą się ostrzejsze, bardziej przenikliwe dźwięki niż w przypadku dźwięku pojedynczych instrumentów (...). Jak widać na tej współczesnej ilustracji instrumentów ludowych, istnieje pełna zgodność między egipskimi starożytnymi i współczesnymi klarnetami podwójnymi*" (Hickmann 1975 [1961]: 120–121, il. 86, 87) (ryc. 3).

Najczęściej podejmowane badania archeomuzykologiczne dotyczą instrumentów znajdujących się w kolekcjach muzealnych. Po ponad 150 latach od innowacyjnego opisu instrumentu przez Carla Engela, Jean-François Brohée przedstawia udział dokumentacji dźwiękowej w niemal idealnym współczesnym wzorcu muzealnej karty katalogowej dętego instrumentu muzycznego (w publikacji, która jest wycinkiem większej pracy autora). Brohée prezentuje instrumenty kostarykańskie, zgromadzone w kolekcjach Musée Art et Histoire i Muziekinstrumentenmuseum w Brukseli w różnych czasach, często pozbawione kontekstu archeologicznego. Spośród ok. 160 obiektów, które były przedmiotem dokumentacji i analizy, autor przedstawia 17 ceramicznych instrumentów dętych. Jest to grupa reprezentatywna, obejmuje instrumenty o zróżnicowanych typach konstrukcji, pochodzące ze wszystkich archeologicznych regionów Kostaryki. W zakresie danych typowych dla obiektów muzealnych autor dokonuje próby identyfikacji stylistycznej zabytków, podaje wymiary, materiał (typ i kolor ceramiki, rodzaj glinki, cechy wypału), rodzaj dekoracji, treść przedstawienia. Dokumentacja ta obejmuje również fotografie (wieloaspektowe, koncentrujące się na cechach istotnych organologicznie) oraz niekiedy



Ryc. 3. Przykład egipskiej tradycji intencjonalnej dysonansowości: zespolone, a niejednakowo strojone piszczałki podwójnych klarnetów – archeologicznych i etnograficznych (Hickmann 1975 [1961]: 120-121, il. 86, 87)

także fotografie endoskopowe i radiografie. W zakresie danych muzykologicznych każdy instrument opatrzony jest następującymi informacjami: wymiary i analizy typu organologicznego w celu określenia sposobu użytkowania obiektu jako instrumentu, zapis dźwięków, możliwości akustyczne i rejestr (zakres częstotliwości). Wszystkie dane istotne akustycznie zestawione są w tabeli (częstotliwości uzyskiwane dla wszystkich układów krycia otworów palcowych instrumentu przy trzech sposobach zadęcia: słabego, silnego i mocnego), do tego dołączone są spektrogramy i wykresy widma dźwięku. Poza grupą tych danych, prezentowanych systematycznie, według jednego schematu, każda z „kart" zawiera też autorskie

studium instrumentu z elementami interpretacji i dyskusji oraz bibliografię (Brohée 2020).

Postępowanie Brohée i wprowadzenie do standardu badania instrumentu zespołu rozwiniętych i pogłębionych analiz sprawia, że po niespełna stu latach historia studiów nad aerofonami archeologicznymi z zastosowaniem nowatorskich narzędzi i pomiaru dźwięku w pewnym sensie zatacza krąg. Nie jest przy tym przypadkiem, że najbardziej znaczące etapy postępu badania w tym zakresie dokonały się na gruncie instrumentarium z Ameryki Łacińskiej (Ameryki Środkowej i Południowej). Wynika to z faktu, że regiony te są obszarami występowania archeologicznych kultur specjalizujących się w tego typu instrumentach, które tworzą niezliczone warianty form gwizdków, okaryn, fletów, fletni czy trąb (Sánchez Santiago 2005). Poza tym większość z tych aerofonów to instrumenty ceramiczne, a zatem dobrze zachowujące właściwości dźwiękowe. Badaniom wieloaspektowym, ale przede wszystkim koncentrującym się na zjawiskach dźwiękowych, poddawane są zarówno liczne zabytki odkrywane współcześnie, jak i pochodzące z dawnych kolekcji (w tym także europejskich). Zapoczątkował je w 1928 r. Raoul d'Harcourt, amerykanista znany już w tym czasie z interesujących badań prowadzonych wspólnie z małżonką, słynną kompozytorką Marguerite Béclard d'Harcourt. Otóż zwrócił się on do Ericha von Hornbostla i Curta Sachsa, którzy wówczas kierowali laboratoriami w Fonogramm Archive w Berlinie, z prośbą o analizę 38 okaryn pochodzących z Ameryki Łacińskiej (Kostaryki, Nikaragui, San Salwadoru i Kolumbii). Otrzymał opracowanie, które zawierało zestawione w łącznej tabeli precyzyjne wyniki serii interwałów w rzadko wtedy jeszcze używanej skali centowej (d'Harcourt 1930).

Ceramiczne instrumenty dęte są w badaniach akustycznych obiektami bardzo cennymi, ponieważ dobrze zachowują swoje właściwości. Do szczęśliwych zbiegów okoliczności należy odnalezienie dużego zbioru niedokończonych instrumentów, których wykonanie przerwano na różnych etapach produkcji. Znaleziska takie ujawniają wiele ważnych szczegółów praktyki konstruktorskiej, które z kolei wyjaśniają pewne zjawiska akustyczne obserwowane w badaniach instrumentów grających. Przykładem są stosunkowo liczne zabytki fletni Pana i gwizdków kultury Nasca (ok. II–III w.). Ujawniają stosowanie dużej ilości materiału organicznego (kwiatu bawełny), co ma wpływ na ostateczną postać ceramiki. Ukazują też sposób planowania przez konstruktorów kształtowania się i propagacji fali dźwiękowej przez zastosowanie przemyślnej separacji sąsiadujących ze sobą kanałów czy komór akustycznych „otuliną" powietrza, chroniąca przed bezpośrednim przejmowaniem drgań (Gruszczyńska-Ziółkowska 2013, 2013–2014) (ryc. 4).

Wśród najnowszych badań nad zabytkami aerofonicznymi z obszaru ziem polskich na uwagę zasługuje studium neolitycznego ceramicznego gwizdka odkrytego w 2017 r. w Kiełczewie, gm. Kościan (woj. wielkopolskie). Jest to gwizdek ornitomorficzny. Chociaż brak jest niewielkiego fragmentu obiektu (główki ptaka), cały układ akustyczny pozostał nienaruszony. Obraz spektralny i widmo amplitudowo-częstotliwościowe ukazują dźwięk czysty, o licznych składowych zbliżonych do harmonicznych i ciekawie komponujących się transjentach (ryc. 5). Zwraca uwagę zakres strojenia gwizdka – ok. 2,5 kHz, co mieści się w granicach dość wąskiego pasma najwyższej czułości ucha ludzkiego. Wyraziste i stosunkowo głośne brzmienie było inspiracją do przeprowadzenia eksperymentów przestrzennych, które dały interesujący wynik zasięgu słyszalności gwizdka – ok. pół kilometra w obszarze leśnym. Ustalono przy tym, że specyfika dźwięku tego instrumentu (usytuowanie składowych) porównywalna być może z charakterystyką odgłosu drapieżnego ptaka – kani rudej (*Milvus milvus*). Warto też pokreślić znaczenie ciekawych wyników analiz XRF, które wskazują, że glina użyta do budowy gwizdka mogła mieć inne źródło niż ceramika znajdująca się w bliskim sąsiedztwie (Sobkowiak-Tabaka i in., 2023). Wszechstronne badanie gwizdka z Kiełczewa, ze znacznym udziałem analiz akustycznych, przynosi zespół danych, które – interpretowane w całości i komplementarnie – mogą prowadzić do interesujących sugestii na temat funkcji i znaczenia obiektu w czasie, gdy był użytkowany.

Idiofony

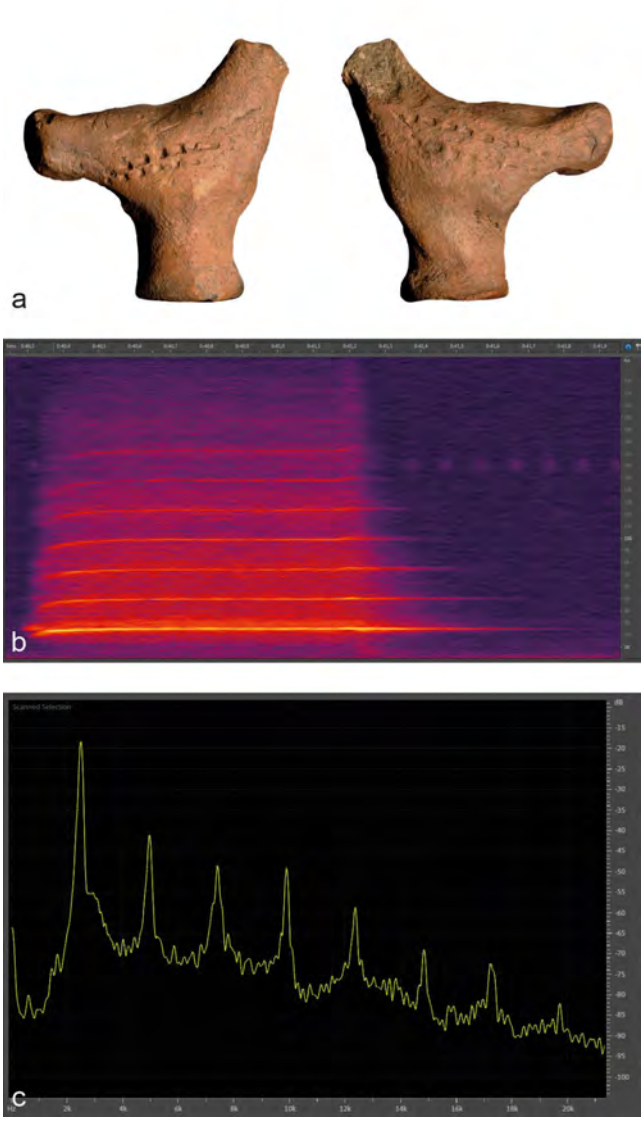
Do grupy idiofonów niezwykle ciekawych pod względem zachodzących zjawisk dźwiękowych należą litofony (popularnie zwane dźwięczącymi kamieniami). Są to instrumenty dwóch rodzajów – zestawy specjalnie formowanych płyt kamiennych (Blake i Cross 2008) lub pojedynczo występujące kamienie, także skały o naturalnie rezonującej strukturze, które na powierzchni noszą ślady uderzeń (często wręcz zagłębienia) (Arciszewska 2016; Kleinitz 2008). Dźwięki wzbudzane właśnie w tych miejscach ukazują istotne zróżnicowanie brzmienia, co może budzić



Ryc. 4. Przykłady zachowanych niewypalonych instrumentów ceramicznych i analogiczne instrumenty ukończone (Centrum ceremonialne Cahuachi, Nasca, Peru): a – fragmenty13-piszczałkowej fletni Pana; b – 15-piszczałkowa fletnia Pana (rekonstrukcja: Anna Gruszczyńska-Ziółkowska); c – fragment dwudźwiękowego gwizdka; d – dwudźwiękowy gwizdek (fot. Anna Gruszczyńska-Ziółkowska)

zdumienie, bo przecież rezonująca płyta kamienna jest jedna, w każdym przypadku ta sama. W rzeczywistości litofon nie ma różnych dźwięków, a jedynie pewne miejsca, gdzie drgania o określonej częstotliwości przyjmują dużą amplitudę (strzałki) oraz inne miejsca, gdzie amplituda tych częstotliwości jest mała lub nawet zerowa (węzły). Uderzeniem w konkretne miejsce litofonu trafia się w rejon strzałek jednych

częstotliwości, rejon węzłów drugich i miejsca pomiędzy strzałkami i węzłami jeszcze innych pasm (Misiurewicz 2017) (ryc. 6).



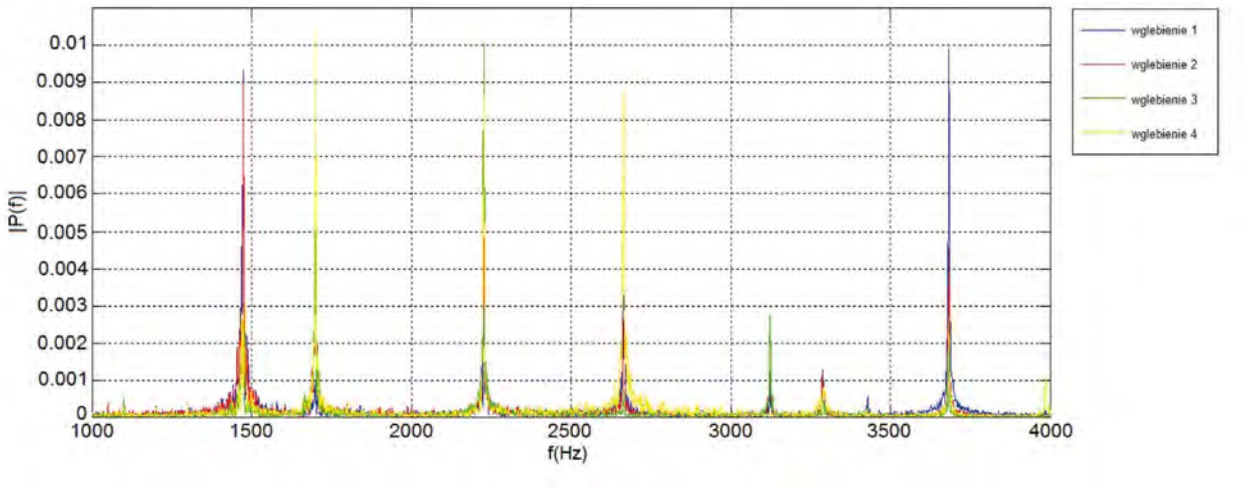
Ryc. 5. Neolityczny ceramiczny gwizdek ornitomorficzny z Kiełczewa, gm. Kościan (woj. wielkopolskie) (nr inw. C48, kolekcja Wydziału Archeologii UAM: a – gwizdek; b – obraz spektralny dźwięku, c – widmo amplitudowo-częstotliwościowe. Czysty dźwięk o wyrazistych, licznych składowych i ciekawie komponujących się transjentach (fot.: Iwona Sobkowiak-Tabaka, nagr. i analiza dźwięku: Anna Gruszczyńska-Ziółkowska)

Właściwości rezonansowe litofonów prawdopodobnie rozpoznane były już przez kromaniończyka, co ukazują wcześniej wspomniane badania Dauvois i Boutillona w grotach użytkowanych w paleolicie. Warto tu wskazać dwa rodzaje tych naturalnych, podziemnych instrumentów. Przykładem pierwszego są kolumny stalagmitowe w grocie Portel w Ariège (Francja): dwie bliskie sobie draperie (A i C) noszą ślady uderzeń, a morfologia nacięć wskazuje nawet kierunki uderzeń. Zaobserwowano również, że spośród kilkunastu kolumn w tym sektorze tylko dwie (F i G) nie nosiły takich śladów. Badanie akustyczne wykazało, że akurat te dwie kolumny nie mają szczególnych walorów rezonansowych. Drugi rodzaj to draperie stalaktytowe. W tym przypadku wyniki badań są analogiczne – analiza draperii w Trois-Frères i w Portel wykazała dobre własności rezonansowe akurat tych nacieków, na których stwierdzono ślady uderzeń (Dauvois i Boutillon 1994).

Występowanie dobrej klasy litofonów dużych i brzmiących niemal jak dzwony, rejestrowane jest w Europie na terenach raczej północnych (Purser 2014; Lawson 2014; Rainio 2014; Kolltveit 2021). Na obszarze Polski takie obiekty nie są dokumentowane, jednak warto zwrócić uwagę na inny typ litofonu – skałę o nazwie Dudniacz k. Szufnarowej (pow. strzyżowski) w woj. podkarpackim, która emituje infradźwięki. Zainteresowanie tym naturalnym obiektem ma prawdopodobnie długą tradycję. Świadczy o tym nazwa skały oraz związane z nią legendy zawierające obrazowe elementy akustyczne (np. lamenty jeńców uwięzionych w podziemnych lochach). Warto też odnotować bliskość (w promieniu 10–20 km) udokumentowanych śladów działalności człowieka sprzed ponad 12 tysięcy lat (*Objaśnienia*… 2007: 42–43) i osadnictwa co najmniej wczesnośredniowiecznego (Lubelczyk 2015: 57).

Dudnienie skały wzbudzane jest dość łatwo – tupnięciem lub uderzeniem drewnianą laską w odpowiednim jej miejscu, a infradźwiękowa odpowiedź w zakresie częstotliwości 5–10 Hz pojawia się w postaci nawet wielokrotnych sygnałów (Gruszczyńska-Ziółkowska 2021) (ryc. 7).

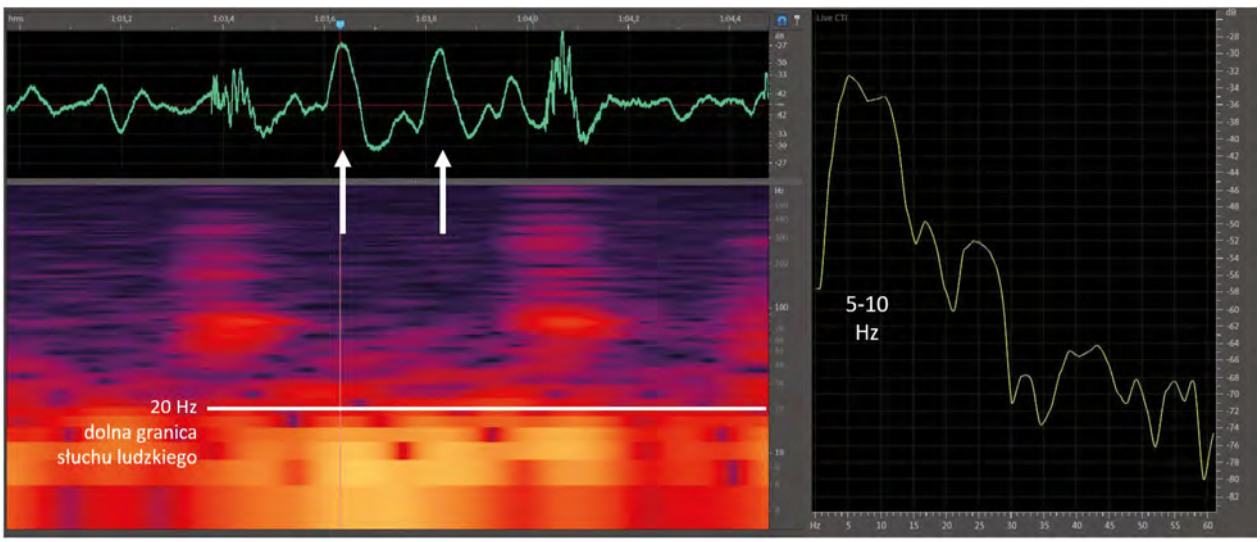
W polskim materiale archeologicznym dość dużą grupę idiofonów mobilnych, zachowujących swoje właściwości dźwiękowe, stanowią metalowe dzwonki i ceramiczne grzechotki. Niektóre z nich są instrumentami bardzo cichymi. Ponieważ w badaniu ich do niedawna stosowano głównie metodę audytywną, ocena brzmienia tego rodzaju idiofonów nie była najwyższa, w związku z tym do pogłębionych studiów nad nimi nie przykładano większej wagi (Kamiński 1971; Gruszczyńska-Ziółkowska 2020). Przełom w badaniach stanowią analizy natężenia dźwięku trzech grzechotek z tarnobrzeskiej grupy łużyckiej (ze stanowisk: Kliszów w pow. mieleckim, Terliczka w pow. rzeszowskim, Zamiechów w pow. jarosławskim),



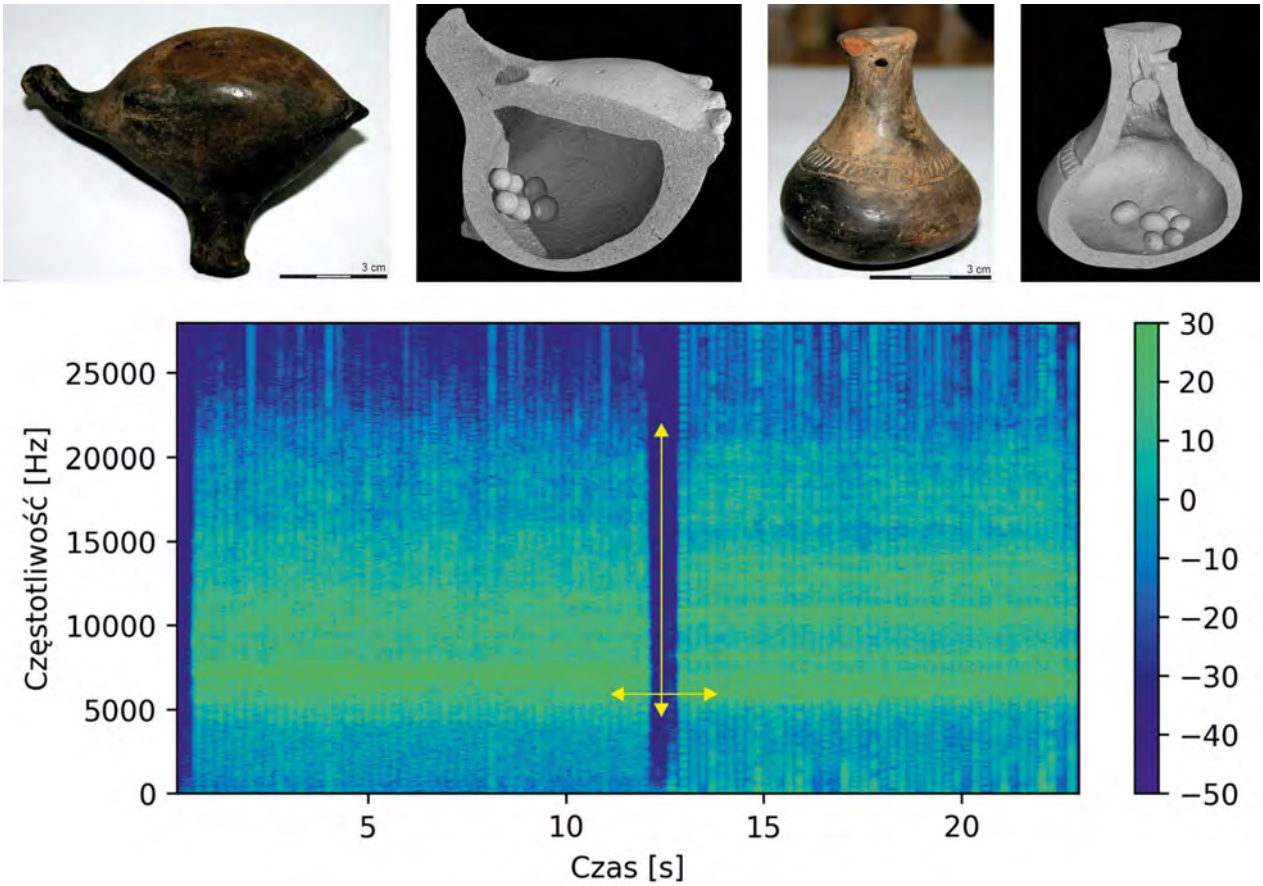
Ryc. 6. Dźwięki litofonu sudańskiego ze zbiorów Muzeum Archeologicznego w Gdańsku: widma amplitudowe odpowiedzi impulsowych z czterech różnych wgłębień ukazują powtarzalność składowych i jednocześnie ich zróżnicowane natężenie. Nagr. dźwięku: Przemysław Ziółkowski i Adam Jankowski, analiza: Marcin Misiurewicz (Misiurewicz 2017)

przeprowadzone w warunkach idealnych akustycznie, tzn. w komorze bezechowej i z zastosowaniem odpowiednich metod optymalizujących, które dodatkowo skorelowano z analizą obrazowania wnętrza obiektów (zdjęcia rentgenowskie). Wieloaspektowa obiektywizacja pomiarów i analiz dała wynik głośności dwóch grzechotek na poziomie 51,1 dB(A) i 43,1 dB(A), który zazwyczaj obrazowo ocenia się jako odpowiadający poziomowi zwykłej rozmowy (40 dB(A)), zaś głośność trzeciej (31,6 dB(A)) lokuje się na poziomie bliskim granicy słyszalności (pomiędzy rozmową a szelestem liści) (Czopek 2013).

Podjęte nieco później badania dużej, istotnej statystycznie liczby ceramicznych grzechotek, ukierunkowane na obserwację widma dźwięku, ukazały kilka interesujących zagadnień, m.in. wyróżniono typy dźwięków powiązane z określoną formą instrumentów (Czajka 2021b). Jednocześnie sygnalne, zespolone



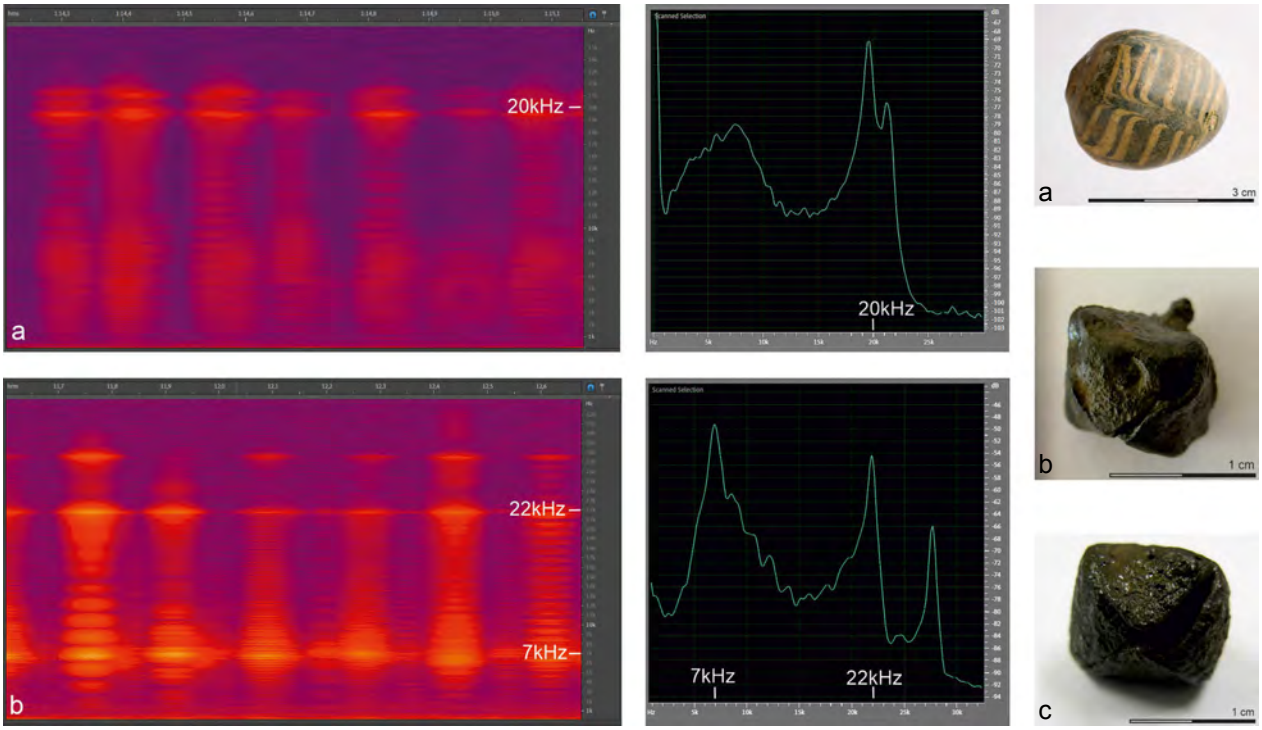
Ryc. 7. Dudnienie skały Dudniacz k. Szufnarowej (pow. strzyżowski, woj, podkarpackie): białe strzałki na sonogramie (dolny obraz) i w wykresie przebiegu fali (górny obraz) wskazują dwie wyraźne odpowiedzi skały w zakresie częstotliwości niższych od progu słuchu ludzkiego (ok. 20 Hz); widmo amplitudowo-częstotliwościowe (obraz z prawej) wskazuje najwyższe natężenie tych odpowiedzi w zakresie częstotliwości 5-10 Hz. Nagr. Przemysław Ziółkowski, analiza: Anna Gruszczyńska-Ziółkowska



Ryc. 8. Zewnętrzne formy dwóch ceramicznych grzechotek łużyckich z Brzezia (Muzeum Okręgowe Ziemi Kaliskiej w Kaliszu, nr kat. 1922 i nr kat. 3287) są całkiem odmienne (zdjęcia zabytków). Jednak instrumenty emitują bardzo podobne dźwięki (sonogramy), co wynika z podobnie formowanych wnętrz komór akustycznych (tomografie). Fot. Katarzyna Tatoń, tomogram: urządzenie NANOTOM S w Laboratorium Mikro i Nano Tomografii AGH w Krakowie, nagr. Przemysław Ziółkowski, Katarzyna Tatoń, analiza dźwięku: Katarzyna Tatoń (Tatoń 2021: 86, ryc. 23)

badania widma dźwięku i struktury wewnętrznej zabytków ujawniły rzecz niespodziewaną – występowanie grzechotek o formach, które obrazowo można by nazwać zwodniczymi. Przykładem są dwie ceramiczne grzechotki łużyckie z Brzezia, których zewnętrzne formy są całkiem odmienne. W klasyfikacji obiektów archeologicznych zapewne lokalizowane byłyby te instrumenty w odległych od siebie grupach: jeden znalazłby się wśród zoo- lub ornitomorficznych (przedstawia ptaka), drugi wśród geometrycznych. Badanie akustyczne przynosi jednak niespodziankę: dźwięki obu grzechotek dają bardzo podobne sonogramy. Biorąc pod uwagę fakt, że narzędzie dźwiękowe budowane było po to, by brzmieć, wydaje się sensowne klasyfikowanie takich obiektów przede wszystkim według ich cech akustycznych. Obie grzechotki powinny więc być przyporządkowane do grup sobie bliskich bądź nawet do grupy wspólnej. Słuszność takiego rozwiązania potwierdzają obrazowania tomograficzne, ukazujące niemal identyczne wewnętrza komór akustycznych (Tatoń 2021) (ryc. 8).

Innym ciekawym zjawiskiem, jakie ukazały szczegółowe badania akustyczne, jest tendencja dawnych wytwórców zarówno grzechotek, jak i dzwonków do nadawania im bardzo wysokich tonów, właściwie strojenie ultradźwiękowe: najsilniejsze składowe tych obiektów w większości przekraczają 5 kHz (u człowieka jest to próg dyskryminacji tonów), a często lokalizują się na granicy słuchu ludzkiego lub nawet powyżej niej. Górną granicę zakresu słyszenia człowieka wyznacza się, teoretycznie, na ok. 20 kHz. Jednak próg czułości słuchu, najniższy w zakresie ok. 2–4 kHz, powyżej 5 kHz gwałtownie się podnosi, co oznacza, że dla cichych dźwięków, jakie wydają grzechotki i dzwonki, górna granica słyszenia jest znacznie niższa (ok. 13–14 kHz). Ta właściwość słuchu ludzkiego sprawia, że umyka postrzeżeniu najistotniejsza cecha dźwięku tych instrumentów, to znaczy determinujące strój



Ryc. 9. Ultradźwiękowe strojenie idiofonów: a – grzechotka ceramiczna, tzw. „pisanka" (Sąsiadka, pow. zamojski, st. 1 – Podgrodzie II, nr inw. IA UW 20/2009/szk, Wydział Archeologii UW). Fot. Miron Bogacki, nagr. Anna Gruszczyńska-Ziółkowska, Ireneusz Czajka, Katarzyna Tatoń w komorze bezechowej AGH, analiza: Anna Gruszczyńska-Ziółkowska. b, c – dzwoneczki metalowe (Szurpiły, pow. suwalski, st. VIII, nr inw. 433/09 (67), 3062/10 (70), Muzeum Okręgowe w Suwałkach). Fot., nagr., analiza: Anna Gruszczyńska-Ziółkowska

wzmocnione częstotliwości formantowe z zakresu ok. 20 kHz i wyższe (ryc. 9). Odkrycie tak specyficznej charakterystyki dźwięków tego typu obiektów rodzi liczne pytania o jej sens (praktyczny? symboliczny?) i niezależnie od merytorycznej dyskusji na ten temat wskazuje, że pogłębione badania akustyczne służą nie tylko opisowi obiektów dźwiękowych, ale niekiedy także odgrywają rolę w wytyczaniu nowych kierunków badawczych (Siemianowska i Gruszczyńska-Ziółkowska 2017; Gruszczyńska-Ziółkowska i in., 2021).

Dźwięki rekonstruowane

Kiedy w początku lat 90. XX w. Dominique Buisson badał kolekcję tzw. fletów z Isturitz, ze zrozumiałych względów nie prowadził badania *stricte* akustycznego (żaden z fletów nie zachował się w stanie umożliwiającym emisję dźwięku). Dokonał jednak szczegółowego oglądu i pomiarów piszczałek pod kątem ich geometrii i sensu muzycznego. Postępowanie to było zasadne, ponieważ intencjonalnie wykonane otwory palcowe bez wątpienia świadczą o funkcji tych piszczałek nie tyle nawet jako użytkowych narzędzi dźwiękowych, co wręcz melodycznych instrumentów muzycznych o przemyślanej konstrukcji i bardzo dobrym wykonaniu. Istotnym dokonaniem Buissona było scalenie dwóch znalezisk w jeden obiekt. Jest to zabytek datowany na ok. 35 tys. lat, jeden z najsłynniejszych zarówno ze względu na cechy budowy, jak i stan zachowania (Buisson 1994). Kilka lat później Michel Dauvois opublikował omówienie stroju tej piszczałki, objaśniając, że „*ponieważ oryginalny instrument jest zbyt delikatny, aby można było na nim bezpośrednio grać, przeprowadzono symulację numeryczną, obliczając propagację dźwięku, wewnętrzne straty energii akustycznej, emisję z otworów i ustnika oraz układ ust przy zadęciu*" (Dauvois 2002: 40–41).

Inną procedurę w badaniu właściwości dźwiękowych tego instrumentu zastosowali Graeme Lawson i Ian Cross, tworząc doświadczalną replikę piszczałki w laminacie poliestrowo-epoksydowym. Zabytek sam w sobie jest ogólnie rozumianą piszczałką (nazwa wynikająca z uporządkowania systematycznego stosowanego w instrumentologii), ale z powodu braku zasadniczego elementu części wlotowej, nie zawiera informacji o sposobie wzbudzania dźwięku. Jest więc kwestią interpretacji szczegół muzykologicznie istotny,

bo wskazujący na typ instrumentu. Posłużywszy się jednym z licznych, najbardziej powszechnych modeli tradycyjnych trzcinowych stroików pojedynczych (typ klarnetowy), badacze uzyskali pięciodźwiękową skalę o zróżnicowanych interwałach: 169, 99, 215 i 250 centów. Zwrócili przy tym uwagę, że ważny wpływ na strój instrumentu mają cechy użytych stroików i sposób ich mocowania (Lawson i d'Errico 2002).

Podobny kierunek studiów empiryczno-kalkulacyjnych nad tym samym zabytkiem obrała ostatnio grupa hiszpańskich badaczy, ale w tym przypadku badanie właściwości akustycznych nie było celem samym w sobie, a raczej narzędziem weryfikującym trzy koncepcje interpretacyjne dotyczące typu instrumentu i sposobu wzbudzania dźwięku. Wykonano dwie repliki z kości, obie badano jako flet ukośny o zadęciu krawędziowym, jako flet z ustnikiem (jak trąbka) i jako instrument pojedynczostroikowy (jak klarnet) (Mazo Pérez i in., 2015). Uzyskane wyniki nie są jednoznaczne przede wszystkim ze względu na wielość wprowadzonych zmiennych, ale warto odnotować, że pod względem stroju, czyli serii uzyskanych częstotliwości, wielkości odchyleń są w zasadzie akceptowalne: wynoszą średnio ok. 30 ct (niespełna 1/7 tonu), przy czym największe różnice obserwowane są tam, gdzie zaistniała jakaś trudność w emisji konkretnego dźwięku. Analogiczne próby zastosowania zróżnicowanej techniki wzbudzania dźwięku (obojowa, fletu podłużnego i klarnetowa) przyjęto ostatnio w polskich badaniach kościanych piszczałek średniowiecznych (Popławska i in., 2021).

Tego rodzaju doświadczenia pokazują, że wynik analizy dźwięku może być swoistym probierzem w ocenie prawidłowości proponowanych rekonstrukcji instrumentów. Taką właśnie metodę weryfikacji zastosowały Aleksandra Gruda (aspekty muzykologiczne) i Marta Pakowska (aspekty modelowania stosowanego w rekonstrukcjach architektonicznych) w studium nad rekonstrukcją uszkodzonego, XVII-wiecznego fletu z Cieszyna. Badanie pomocnicze przeprowadzono na dwóch fletach: podobnym do cieszyńskiego, oryginalnym, dość dobrze zachowanym zabytku z Danii oraz jego kopii – wydruku powstałego w wyniku skanowania i modelowania 3D. Dźwięki (zapis wielokrotnych emisji) zostały zbadane akustycznie, a obie odczytane serie częstotliwości wzajemnie porównane. Uzyskano odchylenia średnio ok. 23 ct, czyli ok. 1/9 tonu, przy czym największy rozrzut powtarzał się w przypadku dźwięku, którego emisja na oryginalnym instrumencie była bardzo utrudniona. Tym samym wynik porównania potwierdził prawidłowość procedur zastosowanych w toku skanowania i modelowania w celu rekonstrukcji instrumentu cieszyńskiego (Jagosz-Zarzycka i in., 2020; *Ulotny*... 2021).

Ciekawą propozycję zastosowania modelowania numerycznego w archeomuzykologii daje Ireneusz Czajka na przykładzie grzechotek ceramicznych. Na podstawie analizy widmowej dźwięków dużej grupy zabytków określa „*wpływ kształtu grzechotek na strukturę częstotliwościową generowanego przez nie dźwięku*". W ten sposób tworzy zbiór klas grzechotek – modeli drgań własnych obiektów, przekładających się na charakter widma dźwięku. Jak podkreśla autor, „*modelowanie numeryczne pozwala uzyskać nową wiedzę, niedostępną na drodze badania samych artefaktów*", a jego zaletą jest „*względna łatwość, z jaką można manipulować kształtem obiektu*" (Czajka 2021a: 146). Metody te mogą znaleźć zastosowanie zarówno w procesach badawczych, jak i w muzealnictwie – zwłaszcza w takich działaniach konserwatorskich, jak rekonstrukcje (mimo uszkodzenia grzechotki można w przybliżeniu odtworzyć jej dźwięk) czy diagnostyka dotycząca integralności obiektu: istotne odstępstwo widma dźwięku instrumentu od widma modelowego wskazywać może np. na mikrouszkodzenia wewnętrznej ścianki korpusu (Gruszczyńska-Ziółkowska i in., 2021; *Ulotny*... 2021).

Człowiek – twórca i odbiorca dźwięków

Sięgając po ciekawe przykłady badań z zakresu psychoakustyki i antropologii, warto pochylić się nad przełomowymi pracami Michela Dauvois, który publikując zabytki paleolitu, zwrócił uwagę, że dźwięk gwizdków z falang rena (2–3,5 kHz) mieści się w zakresie najwyższej czułości ucha ludzkiego, zdolności rozpoznawania różnic wysokości i intensywności dźwięków, wykraczającym jednak poza zakres ludzkiego głosu. Oznacza to, że współczesny człowiek, ale także neandertalczyk czy kromaniończyk posługują się dźwiękami trudnymi do słuchania i niemożliwymi do naturalnego emitowania głosem, uzyskując je za pośrednictwem specjalnego narzędzia – gwizdka. W pogłębionych, późniejszych badaniach autor porównuje zakres dźwięków ponad 30 zabytków, a wyniki odnosi do współczesnej praktyki komunikacji gwizdem. Sugeruje także praktyczne zastosowanie tych gwizdków do polowań. Dauvois zwraca też uwagę, że wszystkie trzy kosteczki ucha środkowego Neandertalczyka (młoteczek, kowadełko i strzemiączko) są w pełni porównywalne z kostkami człowieka współczesnego. W tej kwestii przywołuje znaleziska,

które dowodzą wykształcenia aparatu słuchowego we wczesnym dzieciństwie, zatem w procesie ontogenetycznym, a nie kulturowym (kosteczki należące do 10-latka z La Ferrasie 3 oraz 12-latka z Kafzy) (Dauvois 1994; Dauvois 2005).

Interesujące poszerzenie tej oryginalnej grupy materiału w postaci trzech kosteczek słuchowych ucha środkowego oraz kostek ucha wewnętrznego (kanały półkoliste, ślimak) *Homo heidelbergensis* przyniosły eksploracje w górach Atapuerca (Hiszpania), szczególnie na stanowisku Sima de los Huesos (Arsuaga i in., 2003; Conde Valverde 2023). Jednym z ciekawych zagadnień, w których ten zbiór znalezisk okazał się być pomocny, jest kwestia ewolucyjnej transformacji ludzkiego audiogramu. Badacze przyjmują, że takie cechy, jak rozszerzony obszar słyszenia i największa czułość słuchu powyżej 3,5 kHz były już poważnie zaawansowane co najmniej w środkowym plejstocenie, dzięki posługiwaniu się komunikacją wokalną krótkiego zasięgu (zwłaszcza dzięki używaniu spółgłosek o wysokiej częstotliwości) (Quam i in., 2015). Warto też wspomnieć, że najnowsze badania na podstawie zabytków z Sima de los Huesos dotyczą rozwoju ślimaka (części ucha wewnętrznego) i wynikających z tego szerszych interpretacji rozwoju hominin (Conde Valverde 2023).

Dźwięk w przestrzeni

Doświadczenia zróżnicowania wrażeń dźwiękowych w zależności od zmieniających się warunków środowiska (pogłosy, echa, nagłe zanikanie dźwięku), podobnie jak emocje rodzące się pod wpływem nadzwyczajnych odgłosów natury, zawsze wzbudzały ciekawość człowieka. Liczne, wywodzące się ze starożytności mity (np. o muzykach schodzących do podziemi czy niezwykłych istotach dominujących swymi głosami nad określoną, tajemną zazwyczaj przestrzenią, także elementy akustyczne w mitach kosmogonicznych) dowodzą chęci wyjaśniania tego rodzaju zjawisk, a przynajmniej potrzeby kategoryzowania ich i sensownego lokowania w rozpoznawalnej przestrzeni dźwiękowej (również tej imaginowanej). W wielu przypadkach chodzi o doświadczenia, które odczytywane są jako wspomnienia przeżyć mistycznych, inicjacyjnych wędrówek magicznych.

Przeżycia takie są ulotne i – poza pewnymi śladami – trudno jest datować ich początki w dziejach ludzkości, ale jak wskazują badania ostatnich 30 lat, można ich świadectwa odnajdywać w działalności człowieka prawdopodobnie przynajmniej od czasu górnego paleolitu. Mowa tu o interesujących obserwacjach i wynikach badań akustyki tych korytarzy podziemnych, grot i jaskiń, w których w jakiś sposób odznaczyła się aktywność człowieka. Ogólnie rzecz ujmując, obserwacje te wskazują na istniejącą korelację szczególnych właściwości akustycznych środowiska i aktywności ludzkiej. Wraz z rozwojem badań przykładów jest coraz więcej, wzrasta też złożoność ujawnianych zjawisk zarówno w zakresie ich walorów akustycznych, jak i psychoakustycznych (Kolltveit 2014). Warto przy tym wspomnieć, że architektoniczne zabytki starożytności w postaci amfiteatrów czy komór w grobowcach kurhanowych właściwie dowodzą intencji imitacji atrakcyjnych akustycznie przestrzeni naturalnych (Purser 2002). Można też zastanawiać się, czy opisywany przez Witruwiusza pomysł rozstawiania w teatrach antycznych naczyń akustycznych, czy też montowanie w ścianach średniowiecznych kościołów ceramicznych „głośników" (Minns 1872; Gloger 1978 [1900–1903]) nie jest przedłużeniem i unowocześnieniem praktyk wykorzystywania podziemnych korytarzy z niszami, które sprzyjały modyfikacji efektów zjawisk dźwiękowych.

Inspirujące obserwacje czynił Iegor Reznikoff, który przemierzał wybrane przestrzenie jaskiń znanych m.in. z występowania sztuki naskalnej, penetrując je przede wszystkim dźwiękiem. Wykorzystując swoje umiejętności i możliwości stosowania różnych technik emisji głosu, przyjął metodę, że sygnałem do uważnej obserwacji otoczenia jest pojawienie się wyjątkowego efektu brzmieniowego. Stwierdził w ten sposób istnienie pewnej prawidłowości – związku obecności jakiegoś znaku lub rysunku na ścianie z występowaniem wyjątkowego w swoim charakterze zjawiska akustycznego (Reznikoff 2006). *Stricte* naukową weryfikację i kontynuację badań z zastosowaniem aparatury i procedury akustycznej podjęli Michel Dauvois i Xavier Boutillon, poddając drobiazgowej analizie przede wszystkim wskazane przez Reznikoffa obszary. Badania obiektywne dodały wiele nowych szczegółów i w pewnym sensie potwierdziły subiektywne obserwacje Reznikoffa, choć autorzy początkowo byli ostrożni w podjęciu jednoznacznej konkluzji: „*zaznacza się pewna koincydencja między silnymi rezonansami a czerwonymi znakami lub figurami. Są one dalekie od systematyczności* (...). *To, co zaobserwowano w galerii Jeannel i Boyau jako znaczące zbieżności między znakami i rezonansami, skłania nas do dopuszczenia możliwości paleolitycznego zdefiniowania określonej przestrzeni akustycznej, oznaczonej małymi, a nawet bardzo małymi punkcikami, podczas gdy istnieją także takie punkty, które nie nakładają*

się na żadną wartość akustyczną" (Dauvois i Boutillon 1994: 226, podkr. autorów).

W późniejszych pracach Dauvois powraca do tej problematyki: „*wąska przestrzeń w galerii Régnault w grocie Portel (Ariège) jest miejscem korespondencji między zjawiskami akustycznymi a dwiema czerwonymi kropkami na suficie. Przykucnąwszy pod kropkami, można odnieść wrażenie, że wchodzi się w ciekawy dialog z tylną ścianą galerii* (...). Dźwięk, który wydaje się powracać, *jest przekształcany. Precyzyjne pomiary akustyczne pokazują, że istnieją cztery bardzo podobne częstotliwości rezonansowe: 80, 81, 83, 84 Hz. Przez pół sekundy wysyłany jest pierwszy dźwięk o częstotliwości 80 Hz, wówczas wzbudzane są rezonanse 80 i 81 Hz. Ton wypadkowy ma częstotliwość między 80 i 81 Hz, fluktuuje: jego amplituda wzrasta, następnie maleje, po czym ponownie wzrasta po około sekundzie, dając wrażenie echa, które jest zarazem bardzo intensywne i bardzo odległe* (...). *Podczas gdy to pseudo-echo jest odbierane, emitowany jest dźwięk o częstotliwości 85 Hz: oba dźwięki mieszają się. Różnica częstotliwości powoduje kolejne szybsze uderzenia, pięć razy na sekundę* (...). *Tak oto śpiew lub mowa w zakresie częstotliwości ok. 80 Hz wzbudza w galerii kilka rezonansów. Głos nadal emitowany jest w nieco innej wysokości, podczas powrotu pseudo-echa uzyskuje się imponujące wrażenie, że toczy się dialog z tylną częścią galerii, tak jakby 'duch groty' odpowiadał z głębi ciemności, z usytuowanego w odległości 26 m panelu koni. W rzeczywistości źródłem tego zjawiska jest niewielka, naturalna fluktuacja głosu*" (Dauvois 2005: 234–236). Nie jest wykluczone, że penetracja podziemi, jaskiń czy grot odbywać się mogła pierwotnie przy pomocy dźwięku, a wyjątkowe zjawiska akustyczne stawały się przyczyną zwrócenia uwagi na daną przestrzeń. Możliwość takiej praktyki znakomicie oddają mity i ludowe opowieści o muzykach typu Orfeusza (Gruszczyńska-Ziółkowska 2003).

Jaskinią oryginalną, o skrajnie odmiennej akustyce – braku echa i fal stojących – jest Parpalló w Walencji (Hiszpania) nazywana „pomieszczeniem świątynnym" (znaleziono tu ok. 5 tys. zabytków późnopaleolitycznej sztuki ruchomej – od graweckich po magdaleńskie). Jest ona wysoka i przestronna, z obszernym otworem wejściowym i charakterystycznym podwyższeniem w postaci rozległej, płaskiej platformy, interpretowanej jako scena dla mówców. Wnętrze to, które, jak się podkreśla, jest naturalne, nie modyfikowane, charakteryzuje się specyficzna akustyką – bardzo krótkim czasem pogłosu. Jak wykazały zaawansowane badania, są to idealne warunki dla dobrej propagacji sygnałów mowy: wysoki poziom czytelności i przejrzystości (wskaźnik C-50), precyzji (wskaźnik D-50) oraz zrozumiałości (wskaźnik RASTI). Ze względu na sedymentację przestronność jaskini w okresie jej użytkowania ulegała zmianie. Na podstawie symulacji metodą śledzenia promieni z użyciem różnych trójwymiarowych modeli pomieszczenia dla różnych czasów jej użytkowania stwierdzono, że precyzja sygnałów była mniejsza w okresie kultur graweckich niż w okresie kultury późnomagdaleńskiej (Picó i in., 2006; Jiménez González 2007; Jiménez González i in., 2008).

W badaniach środowiska akustycznego dość intensywnie rozwija się ostatnio nurt, który obejmuje nie tylko określenie własności pomieszczeń, czy też archeologicznych bądź historycznych struktur architektonicznych (Fontaine i Jouenne 1994; Knight 2010), ale także poddaje ocenie zjawiska dźwiękowe powstające w otwartej czy półotwartej przestrzeni. Prace te dotyczą najczęściej obszaru większych centrów ceremonialnych, także walorów instrumentów, które w danej przestrzeni mogły rozbrzmiewać (Brown 2014; Herrera i in., 2014). Wskazówki wyboru tych miejsc, a także praktyki wykonawczej podsuwa lokalna tradycja i źródła historyczne oraz ikonograficzne. Dobrym przykładem jest andyjska trąba z muszli morskiej, obecna w tradycji współczesnej i w różnych okresach i kulturach przynajmniej od XIII w. przed Chr. (Bolaños 1985). Niewątpliwie liczne pytania – jak kwestia kształtowania się dźwięków i rozmaitych dodatkowych efektów akustycznych czy choćby zasięg słyszalności tych instrumentów w kontekście wysokogórskich przestrzeni – podsuwają dokumenty historyczne z XVI i XVII w. Mówi się w nich o dwóch funkcjach instrumentu używanego w otwartych przestrzeniach górskich: jako rytualnego i sygnałowego, anonsującego. Jedno z ostatnich opracowań poświęconych konchom określa te zagadnienia mianem „archeoakustyki komunikacji dźwiękowej", proponuje się też nowy typ modelu badawczego – „naukę o performatywnym pejzażu dźwiękowym" (Kolar 2020).

Archeologia dźwięku

O badaniach archeomuzykologicznych mówi się nierzadko jako o „archeologii dźwięku". Tymczasem, jak podkreślałam wcześniej, dźwięk, który poddawany może być jakimkolwiek badaniom, jest wprawdzie zjawiskiem fizycznym, ale ulotnym, o ograniczonym czasie trwania. Ów „dźwięk przeszłości", jak to się często mówi, w istocie istnieje jedynie potencjalnie. Przy

pomocy zabytkowego narzędzia dźwiękowego możemy go przywołać, ale wymaga to podjęcia określonej czynności lub czasem nawet serii działań. W każdej więc sytuacji badawczej, szczególnie w chwili emisji dźwięku, dokonujemy swoistej interpretacji przeszłości, ta natomiast może niekiedy budzić wątpliwości, może podlegać dyskusji.

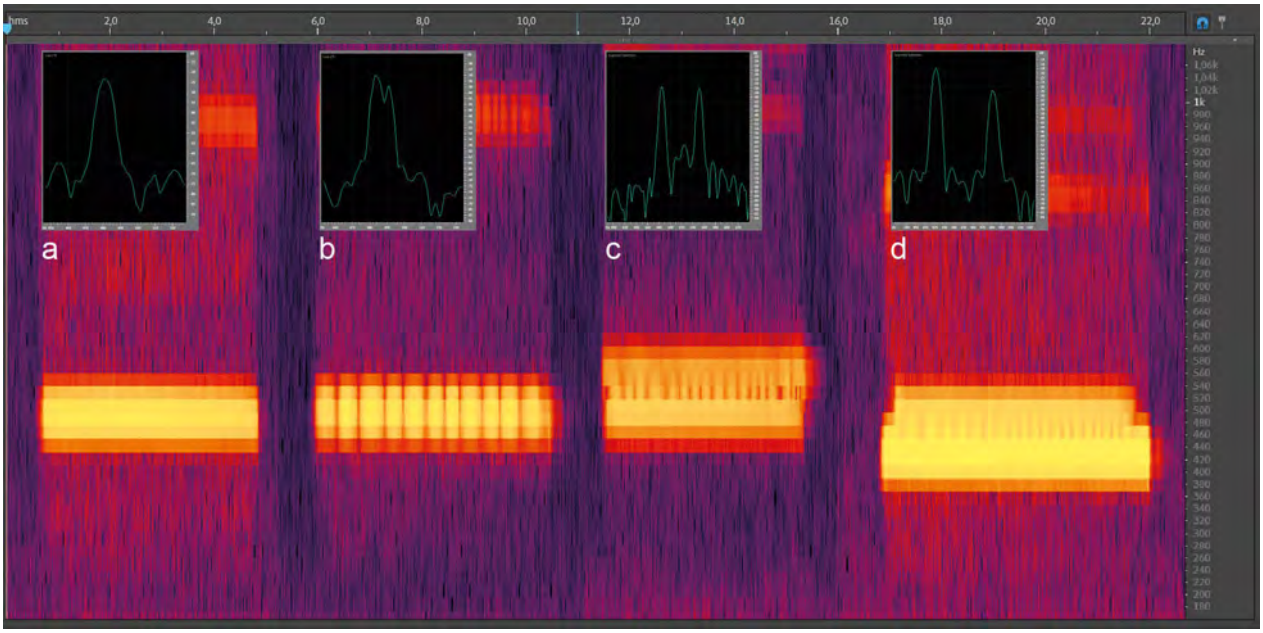
Przykładem kontrowersyjnej koncepcji działania odtwórczego jest dwukrotny akt ożywienia dźwięków dwóch oryginalnych trąb Tutanchamona – srebrnej i miedzianej. Pierwszy był dziełem Percivala R. Kirby'ego w Kairze w lutym 1933 r. (na każdej z trąb uzyskał on dwa dźwięki w interwale decymy). Później publicznej prezentacji dźwięków dokonał James Tappern z 11 Pułku Królewskich Huzarów Księcia Alberta, co zostało zarejestrowane w studiu radia BBC i wyemitowane w międzynarodowej transmisji 16 kwietnia 1939 r. Doświadczenie to i sama audycja były w latach powojennych szeroko i dość krytycznie komentowane, ponieważ pierwotnie trąbki miały ustniki przysłonięte utrudniającymi zadęcie pierścieniami, natomiast trębacz królewski zastosował ustnik współczesny. To w sposób oczywisty zmodyfikowało oryginalne możliwości emisji serii dźwięków i operowania nimi (Kirby 1949).

Niekiedy w wyborze metody wzbudzenia dźwięku pomocne są wskazówki, jakie niosą źródła innego rodzaju – etnograficzne, historyczne czy ikonograficzne (Martinelli i Melini 2010). Podobnie jak archeologia (Buko 2005), muzykologia, a tym bardziej archeomuzykologia korzysta z nich powszechnie (Dahlig 1990). Ale trzeba podkreślić, że również w zakresie badania samego dźwięku wartość tych źródeł – o ile są dostępne i uzasadnione metodologicznie – jest nie do przecenienia. Przykładem istotnego wpływu źródeł pomocniczych na badania praktyki dźwięku instrumentów archeologicznych są studia nad ceramicznymi fletniami Pana kultury Nasca (Peru, ok. IV w.). Analiza akustyczna oryginalnych dźwięków zachowanych piszczałek ujawniła wyróżniające się dwie, bliskie sobie częstotliwości podstawowe, powodujące niestabilność i oscylację dźwięku (w granicach interwału ok. 20 ct). Był to efekt zastosowania specjalnej, złożonej konstrukcji piszczałek, należało więc uznać go za zjawisko intencjonalne. Ciekawy wynik przyniosły dalsze eksperymenty, w których uwzględniono zarówno fakt, że w materiale archeologicznym instrumenty te występowały parami, jak i praktykę gry w duetach, sugerowaną ikonografią. Okazało się, że emisja dwudźwięków dawała wyraźną tremolację (wibrację intensywności dźwięku). Wykorzystanie pary instrumentów pozwalało na znaczne różnicowanie dźwięków – od łagodnej fluktuacji dźwięku solowego (ryc. 10a) poprzez tremolację w wyniku współbrzmienia dźwięków identycznych, ale niestabilnych, oscylujących (ryc. 10b), po silniejszą tremolację i dysonans dwudźwięków piszczałek strojonych bardzo blisko siebie (ryc.10c, 10d – tu odpowiednio interwały 200 ct, 230 ct). Kalkulacje częstotliwości piszczałek dużych rozmiarów (z których z powodu ich uszkodzenia nie można było wydobyć dźwięków eksperymentalnie) oraz ich współbrzmień dawały ciekawe dysonanse, w wyniku których spodziewać się można było nawet zdudnień (Gruszczyńska-Ziółkowska 2003, 2014).

Podobnemu zjawisku obserwowanemu w tradycyjnej muzyce andyjskiej przyglądali się szczegółowo zwłaszcza dwaj badacze, prowadzący wieloletnie i pogłębione studia. Henry Stobart odkrył i zdefiniował istotę różnicowania dźwięków instrumentów typu fletowego, którą w wielkim skrócie przedstawić można jako budowanie przeciwwagi brzmienia stabilnego (określanego w języku keczua jako *q'iwa*) i pulsującego (*tara*) (Stobart 2006; 2007). Analogiczne zjawiska analizował akustycznie Arnaud Gérard Ardenois, pierwotnie w odniesieniu do współczesnych instrumentów typu fletni Pana (Gérard Ardenois 1999), a następnie, cofając się w coraz starszy materiał archeologiczny – rekonstruowanych piszczałek z kości pelikana ze stanowiska Caral (Peru, ok. 2500 BC). Wyróżnia przy tym dwa rodzaje efektów współbrzmień – zdudnienia i właśnie tremolacje, te ostatnie uznając za charakterystyczne dla estetyki brzmienia w całym obszarze andyjskim (Gérard Ardenois 2015).

Wytwory kulturowe wyższego rzędu – systemy dźwiękowe

Celem analizy akustycznej dźwięków instrumentów archeologicznych jest nie tylko możliwość ich scharakteryzowania. Perspektywa muzykologiczna takich badań narzuca pytanie o właściwy danej kulturze sposób myślenia dźwiękiem, kompozycję i zasadę systemu dźwiękowego. Duże zbiory danych (wysoka liczebność instrumentów) dają możliwość podejmowania takich studiów. Przykładem może być rekonstrukcja modelu strojenia przedhiszpańskich fletów ze środkowego wybrzeża Peru na podstawie analizy ok. 60 instrumentów kościanych (*radio*, *ulna*, *femur*, *tibia* lamy): regułą postępowania okazało się być rozmieszczanie otworów palcowych po uprzednim



Ryc. 10. Różne efekty estetyczne współgry pary fletni Pana kultury Nasca: a – dźwięk piszczałki pojedynczej – niestabilny, oscylujący (w granicach interwału ok. 20 ct); b – dwudźwięk piszczałek identycznie strojonych – efekt tremolacji w wyniku współbrzmienia dźwięków oscylujących (interwał ok. 20 ct); c – dwudźwięk piszczałek strojonych blisko siebie (interwał 200 ct) – efekt tremolacji i dysonansu; d – dwudźwięk innej pary piszczałek strojonych blisko siebie (interwał 230 ct) – inny efekt tremolacji i dysonansu. Nagr. Przemysław Ziółkowski, Anna Gruszczyńska-Ziółkowska, analiza: Anna Gruszczyńska-Ziółkowska

wyznaczeniu środka akustycznie aktywnej części kości (Gudemos 2000). Z kolei analiza porównawcza stroju ponad 200 piszczałek fletni Pana wyłoniła system dźwiękowy kultury Nasca: szereg dźwięków tworzących ciąg naturalny i monotonicznie rosnący ($a_{n+1}>a_n$) wynikający ze stosowania w procesie budowy postępowania arytmetyczno-geometrycznego. Konstrukcja instrumentów jest wprawdzie dość skomplikowana, ale u jej podstaw stoi działanie modelowe, w zasadzie proste, opierające się na multiplikacji przyjętego wzorca (Gruszczyńska-Ziółkowska 2014). Łatwość posługiwania się takim wzorcem pokazują analogie etnograficzne – może to być patyczek z odznaczonymi na nim miarami (Borras 1996) albo multiplikacja stałej miarki, np. odcinka nici, źdźbła słomy lub trawy (Gérard Ardenois 1996). Pełny system dźwiękowy nie musi się odzwierciedlać w stroju instrumentów składających się z kilku lub kilkunastu piszczałek wybranych zgodnie z zamierzoną funkcją melodii czy współbrzmień. Dlatego poszczególne instrumenty znane z kolekcji archeologicznych mają różne, nieporównywalne serie dźwięków, charakteryzujących się występowaniem dużych interwałów i mikrotonów (Gruszczyńska-Ziółkowska 2014). Szczegółowe analizy tych serii w celu wykrycia skali muzycznej właściwej kulturze Nasca prowadzili przed niemal 100 laty Raoul d'Harcourt (d'Hacourt 1930) i Andrés Sas (Sas 1939). Były to głównie badania audytywne, więc obserwowane przez nich, a wynikające z systemu mikrotonalna bliskość dźwięków czy „nieczyste" interwały większe stanowiły kłopot, trudno było je precyzyjnie określić, a tym bardziej zapisać na pięciolinii w europejskim systemie temperowanym. O ile więc badacze ci nie uchwycili prostoty samego systemu dźwiękowego, komplikującego się jedynie przez zwykłą multiplikację prostych operacji (np. mikroton 44 ct wynika z proporcji 41:42, „niepełna" oktawa 1115 ct wynika z proporcji 20:38), już wtedy zwrócili uwagę na wysoki stopień złożoności jego efektów: serii dźwiękowych konkretnych instrumentów. Celnie to ujął w konkluzjach swoich badań Andrés Sas: „*używanie interwałów mniejszych lub nieco większych od półtonu oraz interwałów, których nie można zmierzyć wyłącznie za pomocą tonów i półtonów, było wśród Naskeńczyków powszechne i częste*" (Sas 1939: 136). Potwierdzili to późniejsi badacze, znajdując prawidłowości harmoniczne (Haeberli 1979) czy odkrywając konstruktywną w systemie rolę trytonu, tzw. „interwału nasca" (Bolaños 1988).

PODSUMOWANIE

Omówiona powyżej tendencja tworzenia ostrych, dysonujących współbrzmień i ich wysoka waloryzacja są dość powszechnie obecne w tradycji muzycznej wielu kultur, a liczne zabytki archeologiczne i czasowa odległość źródeł potwierdzają systemowość i trwałość takich koncepcji brzmienia. Kwestia ta pojawiła się na początku niniejszego przeglądu przykładów badań nad dźwiękiem instrumentów archeologicznych jako zagadka, którą do badań wniósł w XIX w. instrument babiloński. Wybrałam ją także jako zagadnienie konkludujące. Może być ono traktowane jako jedynie przykład relacji między obiektem a efektem jego użytkowania – dźwiękiem. Jednak w istocie pozwala uzmysłowić sobie, że obiektywne badanie cech akustycznych instrumentów, przy użyciu nawet najnowocześniejszej aparatury i metod pomiaru, jest wciąż jedynie częścią drogi ku próbie rozpoznania narzędzia. Jego konstruowanie i używanie w celu tworzenia dźwięku jest zjawiskiem złożonym, wynikającym z doświadczenia i praktyki posługiwania się dźwiękiem, a także z tradycji utrwalonych koncepcji brzmienia, pożądanych efektów akustycznych i psychoakustycznych.

Finansowanie i podziękowania

Cytowane prace badawcze nad zabytkami z kolekcji polskich autorstwa Natalii Arciszewskiej, Ireneusza Czajki, Aleksandry Grudy, Anny Gruszczyńskiej-Ziółkowskiej, Marcina Misiurewicza, Katarzyny Tatoń powstały w Instytucie Muzykologii UW dzięki finansowaniu w ramach programu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego pod nazwą „Narodowy Program Rozwoju Humanistyki" w latach 2014–2021. Ich realizacja możliwa była dzięki otwartości i współpracy licznych placówek muzealnych i uniwersyteckich. Opiekunom zabytków należą się serdeczne podziękowania.

Cytowane prace archeomuzykologiczne Anny Gruszczyńskiej-Ziółkowskiej nad kolekcją instrumentów kultury Nasca dofinansowane przez Komitet Badań Naukowych (lata 1996–1997; 1999–2001) i Narodowy Program Rozwoju Humanistyki (lata 2008–2011), realizowane były w Instytucie Muzykologii UW. Możliwe były dzięki współpracy Andyjskiej Misji Archeologicznej (obecnie Centrum Badań Andyjskich) UW pod kierunkiem prof. Mariusza Ziółkowskiego z Proyecto Nasca, Centro Italiano Studi e Ricerce Archeologiche Precolombiane w Brescii pod kierunkiem dra Giuseppe Oreficiego i dr Elviny Pieri. Kierownikom tych Instytucji składam niniejszym gorące podziękowania.

LITERATURA

Arciszewska, N. 2016. Litofony w Nigerii Północnej, (w:) *Archeologiczne instrumenty muzyczne w polskich zbiorach muzealnych* (opracowanie: NPRH Projekt nr 11H 13 0382 82). Instytut Muzykologii UW, Warszawa, 1–18.

Arsuaga, J. L., Carbonell, E., Bermúdez de Castro, J. M. 2003. *The First Europeans: Treasures from the Hills of Atapuerca / Los primeros europeos: Tesoros de la Sierra de Atapuerca*. Junta de Castilla y León.

Arystoksenos z Tarentu. 2016. *Harmonika* (tłum. i oprac. A. Maciejewska). Łódź.

Blake, E. C., Cross, I. 2008. Flint Tools as Portable Sound-Producing Objects in the Upper Palaeolithic Context: An Experimental Study, (w:) P. Cunningham, J. Heeband, R. Paardekooper (red.), *Experiencing Archaeology by Experiment* (proceedings of the Experimental Archaeology Conference, Exeter 2007). Oxford, 1–19.

Bolaños, C. 1985. La música en el antiguo Perú, (w:) *La música en el Perú*. Lima, 3–64.

Bolaños, C. 1988. *Las antaras Nasca: historia y análisis*. Lima.

Borras, G. 1996. „*Poco varía*": *le sésame de l'organologie aymara* (maszynopis). Sikuluriri.

Brohée, J.-F. 2020. Aliento ístmico. Artefactos sonoros de la Costa Rica precolombina en las colecciones museales bruselenses, (w:) M. Stöckli, M. Howell (red.), *Flower World. Music Archaeology of the Americas / El Mundo Florido. Arqueomusicología de las Américas* 6: 81–131.

Brown, E. 2014. Music of the Center Place. The Instruments of Chaco Canyon, (w:) M. Stöckli, M. Howell, *Flower World. Music Archaeology of the Americas / El Mundo Florido. Arqueomusicología de las Américas* 3: 45–65.

Buisson, D. 1994. Les flûtes paléolithiques d'Isturitz, (w:) A. Bélis, A. Buckley, C. Homo-Lechner, F. Picard (red.) *La pluridisciplinarité en archéologie musicale* (VI[e] recontres internationales d'archéologie musicale de l'ICTM, 8–12 octobre 1990 r., Saint-Germain-en-Laye). Paris, 257–276.

Buko, A. 2005. *Archeologia Polski wczesnośredniowiecznej*. Warszawa.

Byrne, M. 2002. Understanding the Aulos II. Extended Pipes and Drone, (w:) E. Hickmann, A. D. Kilmer, R. Eichmann (red.), *The Archaeology of Sound: Origin and Organisation*. (papers from the 2nd Symposium of the International Study Group on Music Archaeology at Monastery Michaelstein, 17–23 September 2000. oraz Music Archaeology of the Aegean and Anatolia. Papers from the colloquium on

Music Archaeology organised by the Deutsches Archäologisches Institut (Istanbul) in cooperation with the ICTM Study Group on Music Archaeology (6th meeting) and the Institut Français d' Archéologie (Istanbul), Mimar Sinan University, Istanbul, 12–16 April 1993). *Studien zur Musikarchäologie III, Orient-Archäologie* 10: 367–373.

Conde-Valverde, M., Martínez, I., Quam, R., Arsuaga, J. 2023. The ear of the Sima de los Huesos hominins (Atapuerca, Spain). 2023. *Wiley Periodicals LLC on behalf of American Association for Anatomy*, 8 February. [DOI: 10.1002/ar.]. link do strony

Cook, P. R., Abel, J. S., Kolar, M. A., Huang P., Huopaniemi, J., Rick, J. W., Chafe, Ch., Chowning, J. 2010. Acoustic Analysis of the Chavín Pututus (*Strombus galeatus* Marine Shell Trumpets). *The Journal of the Acoustical Society of America* 128(4): 2359. [DOI: 10.1121/1.3508370]. link do strony

Czajka, I. 2021a. Odzyskać zamilkłe brzmienia: o numerycznej syntezie dźwięku grzechotek ceramicznych, (w:) A. Gruszczyńska-Ziółkowska, I. Czajka, K. Tatoń, *Wydobyte z ciszy*. Warszawa, 128–143.

Czajka, I. 2021b. Określenie struktury częstotliwościowej dźwięku grzechotek modelowych, (w:) A. Gruszczyńska-Ziółkowska, I. Czajka, K. Tatoń, *Wydobyte z ciszy*. Warszawa, 144-159.

Czopek, S. 2013. Geometryczne grzechotki gliniane z południowo-wschodniej Polski (w:) J. Kolenda, A. Mierzwiński, S. Moździoch, L. Żygadło (red.), *Z badań nad kulturą społeczeństw pradziejowych i wczesnośredniowiecznych. Księga jubileuszowa dedykowana Profesorowi Bogusławowi Gedidze, w osiemdziesiątą rocznicę urodzin przez przyjaciół, kolegów i uczniów*. Wrocław, 451–460.

Dahlig, E. 1990. *Ludowa gra skrzypcowa w Kieleckiem*. Kraków.

Dauvois, M. 1994. Les témoins sonores paléolithiques, (w:) A. Bélis, A. Buckley, C. Homo-Lechner, F. Picard (red.) *La pluridisciplinarité en archéologie musicale* (VI[e] recontres internationales d'archéologie musicale de l'ICTM, 8-12 octobre 1990 r., Saint-Germain-en-Laye). Paris, 151–206.

Dauvois, M. 2002. Instruments sonores et musicaux préhistoriques, (w:) *Préhistoire de la musique. Sons et instruments de musique des âges du Bronze et du Fer en France. Exposition: du 17 mars au 10 novembre 2002 au Musée de Préhostoire de Nemours*. Nemours, 33–45.

Dauvois, M. 2005. Homo musicus palaeolithicus et Palaeoacustica // Homo musicus palaeolithicus y la Paleoacústica. *MUNIBE (Antropologia-Arkeologia)* 57-3: 225–241.

Dauvois, M. 2018. Néandertal et Cro-Magnon, le renne et le son. *Revue de Paléobiologie* 37(2): 457–468.

Dauvois, M., Boutillon, X. 1994. Caractérisation acoustique des grottes ornées et de leurs lithophones naturels, (w:) A. Bélis, A. Buckley, C. Homo-Lechner, F. Picard (red.), *La pluridisciplinarité en archéologie musicale* (VI[e] recontres internationales d'archéologie musicale de l'ICTM, 8–12 octobre 1990 r., Saint-Germain-en-Laye). Paris, 207–256.

Diogenes Laertios. 1984. Żywoty słynnych filozofów. Warszawa.

Draffkorn Kilmer, A., Crocker, R. L., Brown, R. R. 1976. *Sounds from Silence. Recent Discoveries in Ancient Near Eastern Music* (album z płytą LP). Berkeley.

Drobner, M. 1973. *Akustyka muzyczna*. Kraków.

Ellis, A. J. 1885. On the Musical Scales of Various Nations. *The Journal of the Society of Arts* 33, No. 1688: 485–527.

Engel, C. 2015 [1864]. *The Music of the Most Ancient Nations, Particularly of the Assyrians, Egyptians, and Hebrews; With Special Reference to Discoveries in Western Asia and in Egypt. Commented Reprint*. Berlin.

Fontaine, J-M., Jouenne, Ph. 1994. Archéologie acoustique, monumentale et liturgique dans quelques édifices religieux du XII[e] siècle, (w:) A. Bélis, A. Buckley, C. Homo-Lech ner, F. Picard (red.), *La pluridisciplinarité en archéologie musicale* (VI[e] recontres internationales d'archéologie musicale de l'ICTM, 8–12 octobre 1990 r., Saint-Germain-en-Laye). Paris, 257–276.

Franklin, J. C. 2005. Hearing Greek Microtones, (w:) S. Hagel, Ch. Harrauer (red.), *Ancient Greek Music in Performance. Symposion Wien 29. Sept. – 1. Okt. 2003*. Wien, 9–50.

Gérard Ardenois, A. 1999. *Acústica de las siringas andinas de uso actual en la parte andina de Bolivia* (praca dyplomowa). Universidad Autónoma Tomas Frías. Potosí.

Gérard Ardenois, A. 2015. Tara. La estética del sonido pulsante – Una síntesis (w:) M. Stöckli, M. Howell (red.), *Flower World. Music Archaeology of the Americas / El Mundo Florido. Arqueomusicología de las Américas* 4: 43–64.

Gloger, Z. 1978 [1900–1903]. *Encyklopedia staropolska ilustrowana*. Warszawa.

Gruszczyńska-Ziółkowska, A. 2003. Koncert w Hadesie: jaskinia i grota jako źródło dźwiękowych inspiracji, (w:) S. Żerańska-Kominek (red.), *Mit Orfeusza. Inspiracje i reinterpretacje w europejskiej tradycji artystycznej*. Gdańsk, 7–21, 340–344.

Gruszczyńska-Ziółkowska, A. 2013. Unveiling the Secrets of Ancient Nasca Whistles, (w:) M. Stöckli, A. A. Both (red.), *Flower World. Music Archaeology of the Americas / El Mundo Florido. Arqueomusicología de las Américas* 2: 11–24.

Gruszczyńska-Ziółkowska, A. 2013-2014. Los silbatos que nunca sonaron. *Estudios Latinoamericanos* 33/34: 97–123.

Gruszczyńska-Ziółkowska, A. 2014. *Detrás del silencio. La música en la cultura Nasca*. Lima.

Gruszczyńska-Ziółkowska, A. 2020. Pod powierzchnią ciszy, (w:) A. Jabłońska (red.), *Kultura muzyczna w początkach państwa polskiego.* Gniezno, 131–154.

Gruszczyńska-Ziółkowska, A. 2021. Dudnienie na granicy światów, (w:) A. Gruszczyńska-Ziółkowska, I. Czajka, K. Tatoń, *Wydobyte z ciszy*. Warszawa, 160–181.

Gruszczyńska-Ziółkowska, A. Czajka, I., Tatoń, K. 2021. *Wydobyte z ciszy*. Warszawa.

Gruszczyńska-Ziółkowska, A., Kruszyńska, A. 2017. „Muzyka zaczyna się wraz z człowiekiem – nie ma jej przed nim, jego nie ma bez niej". Wywiad z Anną Gruszczyńską-Ziółkowską, prowadzenie – Anna Kruszyńska. *Meakultura. Muzyka, edukacja, artyści*. Data publikacji: 6.07.2017. https://meakultura.pl/artykul/muzyka-zaczyna-sie-wraz-z-czlowiekiem-nie-ma-jej-przed-nim-jego-nie-ma-bez-niej-wywiad-z-prof-anna-gruszczynska-ziolkowska-1826/

Gudemos, M. 2000. Módulos de afinación prehispanos. *Baessler-Archiv*, *Neue Folge* XLVIII: 43–105.

Haeberli, J. 1979. Twelfe Nasca Panpipes: A Study. *Ethnomusicology* 23: 57–74

Hagel, S. 2004. Calculating Auloi: the Louvre Aulos Scale, (w:) E. Hickmann, R. Eichmann (red.), *Music-Archaeological Sources: Finds, Oral Transmission, Written Evidence*

(Papers from the 3rd Symposium of the International Study Group on Music Archaeology at Monastery Michaelstein, 9–16 June 2002. Studien zur Musikarchäologie IV, Orient-Archäologie) 15: 373–390.

Hagel, S. 2005. Twenty-four in auloi. Aristotle, *Met*. 1093b, the harmony of the spheres, and the formation of the Perfect System, (w:) S. Hagel, Ch. Harrauer (red.), *Ancient Greek Music in Performance. Symposion Wien 29. Sept. – 1. Okt. 2003*. Wien, 51–91.

d'Harcourt, R. 1930. L'ocarina a cinq sons dans l'Amérique préhispanique, *Journal de la Société des Américanistes* 22-2: 347–364.

Helmholtz, H. L. F. (tłum. i uzup. Ellis, A. J.). 1895. *On the sensations of tone as a physiological basis for the theory of music*. London.

Herrera, A., Espitia Hurtado, J.P., García Moncada, J.G., Morris, A. 2014. Arqueomusicología de las trompetas de caracol andinas de concha y cerámica. Distribución, organología y acústica, (w:) M. Stöckli, M. Howell (red.), *Flower World. Music Archaeology of the Americas / El Mundo Florido. Arqueomusicología de las Américas* 3:141–168.

Hickmann, H. 1949. *Catalogue Général des Antiquités Égyptiennes du Musée du Caire N^os^ 69201-69852. Instruments de musique*. Le Caire.

Hickmann, H. 1975 [1961]. Ägypten. Leipzig.

von Hornbostel E. M., Sachs C. 1914. Systematik der Musikinstrumente. Ein Versuch. *Zeitschrift für Ethnologie* 46 (4–5): 553–590.

Jagosz-Zarzycka, Z., Gruda, A., Pakowska, M., Borowski J. P. 2020. Siedemnastowieczny flet z ciosu mamuciego znaleziony w kamienicy Rynek 19 w Cieszynie. *Cieszyńskie Studia Muzealne. Tesinsky muzejni sbornik* 7: 251–266.

Jiménez González, N. 2007. *Estudio de las Características Acústicas de la Cueva del Parpalló* (praca dyplomowa). Universidad Politécnica de Valencia, Escuela Politécnica Superior de Gandía, Gandía.

Jiménez González, N., Picó, R., Redondo, J. 2008. The Parpalló Cave: A singular archaeological acoustic site, (w:) *Acoustics Paris 2008, June 29-July 4*, Proceedings, 4999–5003.

Jorasz, U. 1998. *Wykłady z psychoakustyki*. Poznań.

Kamiński, W. 1971. *Instrumenty muzyczne na ziemiach polskich. Zarys problematyki rozwojowej*. Kraków.

Kirby, P. 1949. The Trumpets of Tut-ankh-amen and their Successors. *Man* 49: 19.

Kircher, A. 1650. *Musurgia Universalis, sive Ars Magna Consoni et Dissoni*. Romae.

Kleinitz, C. 2008. Soundscapes of the Nubian Nile Valley "Rock Music" in the Fourth Cataract Region (Sudan), (w:) A. A. Both, R. Eichmann, E. Hickmann, L.-Ch. Koch (red.), *Studies in Music Archaeology VI. Challenges and Objectives in Music Archaeology* (Papers from the 5th Symposium of the International Study Group on Music Archaeology at the Ethnological Museum, State Museums Berlin, 19–23 September, 2006) 22: 132–146.

Kolltveit, G. 2014. Classification of Sound, Sound Tools, and Sounscapes, (w:) J. Ikäheimo, A.-K. Salmi, T. Äikäs (red.), *Sounds Like Theory. XII Nordic Theoretical Archaeology Group Meeting in Oulu 25–28.4.2012*. Monographs of the Archaeological Society of Finland 2, 73–84.

Kolltveit, G. 2021. *Ringing stones, Norway and Scandinavia. Documentation and analyses of ringing stones* (opracowanie z dostępem do dźwięków). https://magmageopark.no/en/ringing-stones/

Knight, D. J. 2010. *The Archaeoacustics of San Vitale, Ravenna* (magisterium). University of Southampton, Faculty of Law, Arts and Social Sciences, School of Humanities. Southampton.

Kolar, M. A. 2020. Situating Inca Sonics: Experimental Music Archaeology at Huánuco Pampa, Peru, (w:) M. Stöckli, M. Howell (red.), *Flower World. Music Archaeology of the Americas / El Mundo Florido. Arqueomusicología de las Américas* 6: 13–46.

Landels, J.G. 2003. *Muzyka starożytnej Grecji i Rzymu*. Kraków.

Lawson, G. 2014, How old are rock gongs? Landscape, change, and the dating of early stone-ringing behaviours, referat na konferencji *Ringing Stones*, Muzeum Archeologiczne w Gdańsku, Gdańsk, 12–15 grudnia 2014 (*Archeologiczne instrumenty muzyczne w polskich zbiorach muzealnych*: NPRH Projekt nr 11H 13 0382 82).

Lawson, G., d'Errico, F. 2002. Microscopic, Experimantal and Theoretical Re-Assessment of Upper Paleolithic Bird-Bone Pipes from Isturitz, France: Ergonomics of Design, Systems of Notation and the Origins of Musical Traditions, (w:) E. Hickmann, A. D. Kilmer, R. Eichmann (red.), *The Archaeology of Sound: Origin and Organisation* (Papers from the 2nd Symposium of the International Study Group on Music Archaeology at Monastery Michaelstein, 17–23 September 2000. oraz Music Archaeology of the Aegean and Anatolia. Papers from the colloquium on Music Archaeology organised by the Deutsches Archäologisches Institut (Istanbul) in cooperation with the ICTM Study Group on Music Archeology (6th meeting) and the Institut Français d' Archéologie (Istanbul), Mimar Sinan University, Istanbul, 12–16 April 1993. Studien zur Musikarchäologie III, Orient-Archäologie 10: 119–142.

Li, M. 2012. Unexpected Resource. Pre-Qin Period Bamboo Slips *Lü Shu* in Fangmatan, Gansu Province, (w:) R. Eichmann, J. Fang, L.-C. Koch (red.), *Sound from the Past. The Interpretation of Musical Artifacts in an Archaeological Context* (Papers from the 7th Symposium of the International Study Group on Music Archaeology at the Tianjin Conservatory of Music, Tianjin, China, 20–25 September, 2010. Studien zur Musikarchäologie VIII, Orient-Archäologie 27: 241–247.

Lubelczyk, A. 2015. Ziemia Strzyżowska od wczesnego średniowiecza po połowę XIV wieku w świetle źródeł archeologicznych. *Strzyżowski Rocznik Muzealny* 1: 56–132.

Lund, C. 1981. The Archaeomusicology of Scandinavia. *World Archaeology* 12(3): 246–265.

Lund, C. 1991 [1984]. *Musica Sveciae. Fornnordiska klanger. The sounds of Prehistoric Scandinavia*. Antologia i płyta CD (LP).

Marshack, A. 1972. *The Roots of Civilization. The Cognitive Beginnings of Man's First Art, Symbol and Notation*. New York, London.

Martinelli, M., Melini, R. 2010. L'aulòs etrusco di Chinciano: indagini attraverso la comparazione archeologica ed iconografica, (w:) M. Caresse, E. Li Castro, M. Martinelli (red.), *La musica in Etruria* (Atti del convegno internazionale, Tarquinia 18–20 Settembre 2009), 93–120.

Mazo Pérez, C., García Benito, C., Alcolea Gracia, M. 2015. Un caso de Arqueología Experimental aplicado a la Arqueología Musical / A case of Experimental Archaeology applied to Music Archaeology. *Saldvie: Estudios de prehistoria y arqueología* 15: 65–91.

Michałowski, A. 2021. Przedmowa, (w:) A. Kurzawska, I. Sobkowiak-Tabaka (red.), *Mikroprzeszłość. Badania specjalistyczne w archeologii*. Poznań, 5.

Minns, G.W. 1872. Acoustic Pottery. *Norfolk Archaeology* 7: 93–101.

Misiurewicz, M. 2017 Odpowiedź litofonu ze zbiorów Muzeum Archeologicznego w Gdańsku na wymuszenia w miejscach wgłębień. Analiza widmowa, (w:) *Archeologiczne instrumenty muzyczne w polskich zbiorach muzealnych* (opracowanie: NPRH Projekt nr 11H 13 0382 82) Instytut Muzykologii UW, Warszawa, 1–9.

Objaśnienia do Mapy Geośrodowiskowej Polski 1:50 000 arkusz Frysztak (1003). Opracowanie zamówione przez Ministra Środowiska, Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 2007.

Picó, R., Hortelano Piqueras, L., Roig, B., Redondo, J. 2006. Simulación acústica de la cueva del Parpalló mediante el método de elementos finitos. *Conferencias y comunicaciones de Tecniacústica 2006 -37º Congreso Nacional de Acustica, Encuentro Ibérico de Acústica y EAA European Symposium on Hydroacoustics, Gandia, España. Octubre 2006*, 1–6.

Platon. 1986. Timajos, (w:) *Timajos, Kritias albo Atlantyk*. Warszawa, 3–128.

Popławska, D., Kander-Marchewka, A., Skibińska, A., Zawadzki, P. 2021. Bone Pipes with Parallel Tone Holes. Materials from Medieval Poland (until the End of the 12th C), (w:) EXARC Journal Issue 2021/4 | EXARC. https://exarc.net/issue-2021-4/ea/bone-pipes-parallel-tone-holes-materials-medieval-poland-until-end-12th-c

Psaroudakēs, S. 2002. The Aulos of Argithea, (w:) E. Hickmann, A. D. Kilmer, R. Eichmann (red.), *The Archaeology of Sound: Origin and Organisation* (Papers from the 2nd Symposium of the International Study Group on Music Archaeology at Monastery Michaelstein, 17–23 September 2000. oraz Music Archaeology of the Aegean and Anatolia. Papers from the colloquium on Music Archaeology organised by the Deutsches Archäologisches Institut (Istanbul) in cooperation with the ICTM Study Group on Music Archaeology (6th meeting) and the Institut Français d' Archéologie (Istanbul), Mimar Sinan University, Istanbul, 12–16 April 1993. Studien zur Musikarchäologie III, Orient-Archäologie 10: 335–366.

Purser, J. 2006. Ogam and Interlace Notation, Fact or Fiction? (w:) E. Hickmann, A. A. Both, R. Eichmann, (red.), *Music Archaeology in Contexts* Papers from the 4th Symposium of the International Study Group on Music Archaeology at Monastery Michaelstein, 19–26 September 2004. Studien zur Musikarchäologie V, Orient-Archäologie 20: 305–318.

Purser, J. 2002. The Womb of Sound, (w:) E. Hickmann, A. D. Kilmer, R. Eichmann (red.), *The Archaeology of Sound: Origin and Organisation* (Papers from the 2nd Symposium of the International Study Group on Music Archaeology at Monastery Michaelstein, 17–23 September 2000. oraz Music Archaeology of the Aegean and Anatolia. Papers from the colloquium on Music Archaeology organised by the Deutsches Archäologisches Institut (Istanbul) in cooperation with the ICTM Study Group on Music Archaeology (6th meeting) and the Institut Français d' Archéologie (Istanbul), Mimar Sinan University, Istanbul, 12–16 April 1993. Studien zur Musikarchäologie III, Orient-Archäologie 10: 27–38.

Purser, J. 2014. The archaeology, mythology, distribution, function and history of rock gongs in Scotland, referat na konferencji *Ringing Stones*, Muzeum Archeologiczne w Gdańsku, Gdańsk, 12–15 grudnia 2014 (*Archeologiczne instrumenty muzyczne w polskich zbiorach muzealnych*: NPRH Projekt nr 11H 13 0382 82).

Quam, R., Martínez, I., Rosa, M., Bonmatí, A., Lorenzo, C., de Ruiter, D. J., Moggi-Cecchi, J., Conde Valverde, M., Jarabo, P., Menter, C. G., Thackeray, J. F., Arsuaga, J. L. 2015. Early hominin auditory capacities. *Science Advances*1(8): e1500355 [DOI: 10.1126/sciadv.1500355]. link do strony

Rainio, R. 2014. Sound analysis of the Klockarstenen, a ringing stone in the SW archipelago of Finland, referat na konferencji *Ringing Stones*, Muzeum Archeologiczne w Gdańsku, Gdańsk, 12–15 grudnia 2014 (*Archeologiczne instrumenty muzyczne w polskich zbiorach muzealnych*: NPRH Projekt nr 11H 13 0382 82).

Reznikoff, I. 2006. The Evidence of the Use of Sound Resonance From Paleolithic to Medieval Times, (w:) C. Scarre, G. Lawson (red.) *Archaeoacustics*. Cambridge, 77–84.

Salinas, F. 1983[1577] *Siete Libros Sobre la Música*. Madrid.

Salinas, F. 1993[1566]. *Musices Liber Tertius.* Madrid.

Sánchez Santiago, G. A. 2005. *Los artefactos sonoros del Oaxaca prehispánico*. Oaxaca.

Sas, A. 1939. Ensayo sobre la música nasca. *Revista del Museo Nacional* VIII:124–136.

Siemianowska, S., Gruszczyńska-Ziółkowska, A. 2017. Dwugłos w sprawie grzechotek. *Meakultura. Muzyka, edukacja, artyści.* Data publikacji: 6.07.2017. https://meakultura.pl/artykul/dwuglos-w-sprawie-grzechotek-1833/

Sobkowiak-Tabaka, I., Kurzawska, A., Gogol, R., Gruszczyńska-Ziółkowska A., Krueger, M. 2023. Sound from the past. A Neolithic clay whistle from Kiełczewo (western Poland). *Journal of Archaeological Science: Reports* 51, 104159.

Stobart, H. 2006. *Music and the Poetics of Production in the Bolivian Andes*. Aldershot.

Stobart, H. 2007. *Tara* i *Q'iwa*. Wymiary dźwięku i jego znaczenia, (w:) K. Zajda (red.), *Estetyka Indian Ameryki Południowej. Antologia*. Kraków, 185-197.

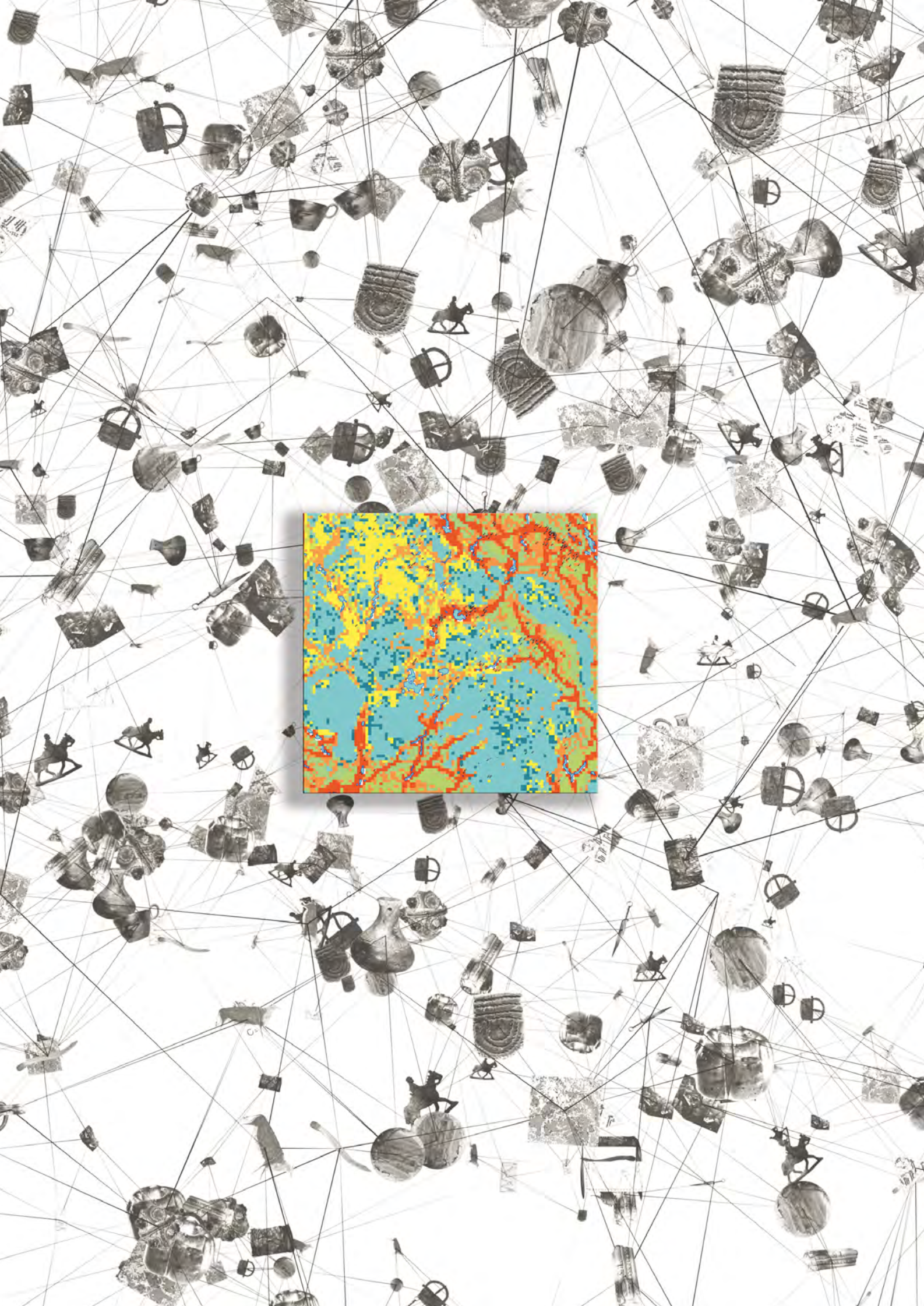
Tatoń, K. 2021. Grzechotki archeologiczne porządkowane dźwiękiem,,. (w:) A. Gruszczyńska-Ziółkowska, I. Czajka, K. Tatoń, K. *Wydobyte z ciszy*. Warszawa, 60–93.

Ulotny dźwięk przeszłości. 2021. Film dokumentalny, scen. A. Gruszczyńska-Ziółkowska. http://www.zmsim.uw.edu.pl/historia/publikacje-on-line/ulotny-dzwiek-przeszlosci.html

West, M. L. 2003. *Muzyka starożytnej Grecji*. Kraków.

Więcławski, P. 2002. *Analiza dźwięku dzwonu Tuba Dei* (licencjat). Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu, Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej. Toruń.





System Informacji Geograficznej (GIS)

Jarosław Jasiewicz

WPROWADZENIE

Według klasycznej definicji deMers'a (2009) Systemy Informacji Geograficznej (SIG) ang. *Geographical Information System – GIS* to zintegrowany system obejmujący sprzęt komputerowy i oprogramowanie, przeznaczony do przechowywania, zarządzania, edycji, analizy i wizualizacji danych geograficznych. Rozwiązania te wywodzą się z koncepcji automatyzacji prac kartograficznych i kartometrycznych, zaproponowanych przez Toblera (1959), ale szybko wyewoluowały w złożony ekosystem, który oprócz rozwiązań technicznych, użytkowników i wsparcia obejmuje przede wszystkim zasób wiedzy na temat metod, założeń i organizacji (Maline i in., 2011). Taka konkluzja wprost prowadzi do koncepcji określanej jako Geographic Information Science (GIScience – GISc), zaproponowanej przez Goodchilda (1991, 2010). GISc to przede wszystkim pole badań dotyczących rozumienia i jak używania danych geoprzestrzennych. Dzięki temu GIScience nie jest ograniczona wyłącznie do geografii czy szerzej nauk o Ziemi, ale znajduje zastosowanie wszędzie tam, gdzie pojawia aspekt przestrzenny informacji.

ZARYS HISTORII BADAŃ

Buckland (1973) był prawdopodobnie jednym z pierwszych badaczy, który zaproponował użycie technik komputerowych do rejestracji znalezisk pradziejowych, a archeologia, na bazie doświadczeń z metodami ilościowymi (Aldenderfer 1987; Arnold i in., 1991) oraz analizami przestrzennymi (Hodder i Orton 1976) szybko zaczęła adaptować koncepcje stojące u podstaw Systemów Informacji Geograficznej (Allen i in., 1990; Kwamme 1992; Aldenderfer i Maschner 1996). Miało to miejsce przede wszystkim w środowisku amerykańskich badaczy, podczas gdy archeolodzy w Europie początkowo podchodzili do tych metod sceptycznie (Harris i Lock 1995; Lock i Stančič 1995). Początek XXI wieku zaowocował licznymi badaniami aplikacyjnymi opracowań adaptujących technologie GIS do badań zjawisk przestrzennych w archeologii (McKoy i Ladefoged 2009; Wagtendonk i in., 2009; Wheatley i Gillings 2013). Podjęto również próby konceptualizacji nowych trendów badawczych na pograniczu archeologii, nauk ścisłych i przyrodniczych. Kriegel i in. (2010) zaproponowali termin

DOI: 10.64158/mr6a4abwx7

Archeoinformatyka (ang. *archaeo-informatics*), uściślony przez Fishera (2020) jako *Archaeoinformatics*. Archeoinformatyka jako trend badawczy zajmuje się od lat 60. XX wieku szerokim zastosowaniem metod obliczeniowych i narzędzi informatycznych w archeologii, a Systemy Informacji Geograficznej stanowią jedynie jeden z jej nurtów (Fisher 2020). Badając problematykę standaryzacji danych archeologicznych, Llobera (2011) zaproponował termin *Archaeological Information Science (AISc)*. Zauważył, że podobnie jak rozwój Systemów Informacji Geograficznej doprowadził do problemów badawczych stojących za GISciene, tak samo cyfrowa rewolucja stawia przed archeologią podobne wyzwania (Llobera 2011: 219). Termin Archeologia Cyfrowa – *Digital Archeology* – (Daly i Evans 2004; Averett i in., 2016; Morgan 2022) jest coraz częściej stosowany do badań integrujących archeologię z technologiami informacyjnymi, Systemami Informacji Geograficznej, teledetekcją, cyfrowymi mediami, rekonstrukcjami 3D i rzeczywistością wirtualną – Virtual Archaeology (Reilly 1991).

Geoarcheologia, trend badawczy rozwijający się na styku Nauk o Ziemi i Archeologii, również obejmuje zastosowanie Systemów Informacji Geograficznej, nie tylko bezpośrednio do danych archeologicznych, ale również w szerszym kontekście Archeologii Krajobrazu – *Landscape Archaeology* (Conolly 2016) czy Cyfrowej Geoarcheologii – ang. *Digital Geoarchaeology* – (Siart i in., 2017). Ten ostatni termin obejmuje przede wszystkim zastosowania GIS na styku Nauk o Ziemi i Archeologii, ale również wykorzystanie cyfrowych danych pozyskanych za pomocą metod geologicznych i geofizycznych (Wroniecki i in., 2019) oraz technik skanowania powierzchni w technologii laserowej (De Boer 2005; Schindling i Gibbes 2014), radarowej i fotogrametrycznej (Kucukkaya 2004).

W Polsce na możliwości zastosowania metod analiz przestrzennych do badań procesów osadniczych jeszcze przed epoką Systemów Informacji Geograficznej zwrócili uwagę Dulinicz (1983) i Kobyliński i Urbańczyk (1984) oraz Dulinicz i Kobyliński (1990). Widacki (2001) wskazał archeologię jako jedną z dyscyplin, w których Systemy Informacji Geograficznej mogą odgrywać znaczącą rolę; Szady (2008) zaproponował wykorzystanie GIS w geografii historycznej, a Jasiewicz (2009) przedstawił przegląd wybranych metod analiz przestrzennych w badaniach procesów osadniczych. Rys historyczny zastosowań Systemów Informacji Geograficznej przedstawił Zapłata (2011), a Jażdzewska (2010) wskazała na Zastosowanie Systemów Informacji Geograficznej w ochronie szeroko rozumianego dziedzictwa kulturowego. Wyniki badań na temat potencjalnych wdrożeń Systemów Informacji Geograficznej w inwentaryzacji zabytków archeologicznych przedstawili Gawrysiak i in. (2011), Kołodziej (2012) oraz Zapłata i Zborowski (2013). Bryk i Chyla (2014) wskazali na rolę technologii GIS w badaniach powierzchniowych, a Zapłata (2012) przedstawił pierwszą w Polsce próbę konceptualizacji wykorzystania systemów informacji geograficznej w dokumentacji archeologicznej.

ZASTOSOWANIA SYSTEMÓW INFORMACJI GEOGRAFICZNEJ

Zastosowania Systemów Informacji Geograficznej to złożone zagadnienie, będące raczej systemem łączącym różne aspekty począwszy od przygotowania i wizualizacji danych poprzez zarządzanie danymi aż do zastosowania analiz wykorzystujących odpowiednio przygotowane dane. Metody i narzędzia dostarczane przez systemy informacji geograficznej dowiodły swojej przydatności w czterech obszarach ściśle powiązanych z badaniami archeologicznymi. Są to obserwacja, dokumentacja, wizualizacja i analiza.

Obserwacja jest domeną teledetekcji, czyli badań wykonywanych przy pomocy czujników, metodami nieinwazyjnymi, czyli takimi, które nie naruszają struktury badanego obiektu. Do metod teledetekcyjnych należą obserwacje satelitarne, lotnicze (Rączkowski 2014) i z statków powietrznych niskiego pułapu (Hanus 2015) w świetle widzialnym i podczerwieni oraz obserwacje wykonywane przy pomocy skaningu mikrofalowego i laserowego (Banaszek 2014; Fiz i in., 2022), a także z użyciem fal akustycznych (Banaszek, w tym tomie). Dane pozyskiwane metodami teledetekcyjnymi są następnie przetwarzane w celu wydobywania interesujących zjawisk i obiektów, zarówno bezpośrednią obserwacją, jak i pośrednią, na przykład poprzez analizę zmian wilgotności.

Działania dokumentacyjne to zastosowanie systemów informacji geograficznej do tworzenia przestrzennych baz danych obiektów archeologicznych zarówno w skali regionalnej, jak i skali stanowiska badawczego. Obecnie takie bazy tworzone są doraźnie na potrzeby wybranych badań (Jasiewicz

i Hildebrandt-Radke 2009; Zapłata i Zborowski 2011; Bujno i in., 2019). W literaturze naukowej trwa dyskusja nad standaryzacją takich systemów (Gupta 2020; Trepal i in., 2020), które są wdrażane na różnych poziomach jako część infrastruktury przestrzennej (Kozioł i in., 2012).

Trzeci aspekt wykorzystania systemów informacji geograficznej to wizualizacja danych. Oprogramowania będące częścią systemów informacji geograficznej wyposażone są podstawowe narzędzia agregacji danych i wizualizacji kartograficznej, połączonej z realizacją zapytań geoprzestrzennych. Specjalistyczne oprogramowanie posiada również narzędzia wspomagające wizualizację 3D, niemniej jednak zaawansowane wizualizacje architektoniczne i krajobrazowe możliwe są przy pomocy specjalistycznego oprogramowania 3D.

Analizy geoprzestrzenne uważane są za jedno z najbardziej złożonych zagadnień powiązanych z wykorzystaniem systemów informacji geograficznej (Gupta i Devillers 2017), a często wymagają użycia dodatkowych narzędzi programistycznych (Jasiewicz i Hildebrandt-Radke 2009; Sobkowiak-Tabaka i Jasiewicz 2015; Jasiewicz i Sobkowiak-Tabaka 2015). Do najczęściej stosowanych analiz należą:

- eksploracyjna analiza danych z wykorzystaniem informacji geoprzestrzennej;
- percepcja wizualna dawnych krajobrazów z wykorzystaniem metod analizy widoczności;
- badania zasięgu oddziaływania dawnych osad z wykorzystaniem analiz kosztów przemieszczania się;
- modelowanie dawnych szlaków przemieszczania się i transportu z wykorzystaniem, metody najmniejszego kosztu;
- badanie dawnych układów osadniczych z wykorzystaniem metody analiz układów punktowych;
- badanie preferencji osadniczych dawnych społeczeństw poprzez metody modelowania predykcyjnego i algorytmy uczenia maszynowego.

Systemy Informacji Geograficznej postrzegane są poprzez odpowiednie narzędzia. Obecnie rynek zdominowany jest przez dwa kanały dystrybucji oprogramowania: komercyjny i otwartoźródłowy. Sercem kanału komercyjnego jest oprogramowanie firmy ESRI ArcGIS (ESRI 2023), składające się z kilku modułów rozszerzanych przez liczne zastawy narzędziowe tzw. *Toolboxy,* w tym również przeznaczone do wybranych analiz w zakresie archeologii (Fernandez 2021). Kanał otwartoźródłowy integruje program QGIS (QGIS 2023), który stanowi bezpłatną alternatywę dla rozwiązań komercyjnych, coraz powszechniej wykorzystywanych w instytucjach publicznych (Martyniuk-Drobysz 2019). Oprogramowanie to dostarcza niezbędnych narzędzi do wizualizacji i analizy danych, a także integruje moduły analityczne z innych otwartoźródłowych systemów: SAGA GIS i GRASS GIS. Obecnie QGIS uważany jest za narzędzie przewyższające możliwościami tańsze opcje licencyjne ArcGIS, ustępując jedynie kompletnej, najdroższej wersji oprogramowania ESRI. Bardziej złożone analizy wymagają użycia programistycznych środowisk obliczeniowych, głównie R (R 2024) i Python, które posiadają biblioteki, pozwalające na bezpośrednią pracę z formatami geoprzestrzennymi.

Kwestie związane z teledetekcją informacji archeologicznej to osobne i bardzo obszerne zagadnienie, które powinno być tematem osobnego opracowania. Z drugiej strony proces dokumentacji archeologicznej nie posiada obecnie ustanowionych standardów. Z tego powodu niniejsza praca skupia się przede wszystkim na procesie przygotowania danych do analiz geoprzestrzennych oraz wybranych procedurach analitycznych. W pracy zostaną omówione struktury, organizacja, proces cyfryzacji i wizualizacji danych oraz wybrane przykłady analiz geoprzestrzennych. Praca ma na celu przedstawienie ogólnego obrazu zastosowania Systemów Informacji Geograficznej w archeologii, ale zawiera liczne odwołania zarówno do opracowań o charakterze podręcznikowym, jak i publikacji prezentujących zastosowania wybranych analiz, które powinny być podstawą realizacji konkretnych zadań badawczych.

ŹRÓDŁA DANYCH GEOPRZESTRZENNYCH

Zbiór danych archeologicznych z precyzyjną lokalizacją obiektów oraz prawidłowo przypisanych do obiektów atrybutów nazywamy warstwą bazy danych geoprzestrzennych (ang. *geodatabase – GDB*). Szczegółowe rozważania o sposobach przechowywania danych wykraczają poza cel tego opracowania, niemniej jednak w tym rozdziale zostaną przedstawione podstawowe modele i typy danych oraz ich potencjalne zastosowanie w badaniach archeologicznych. Systemy informacji geograficznej korzystają z kilku różnych modeli danych. Ogólnie, w najprostszym podziale, dane dzieli się na rastrowe i wektorowe, gdzie model rastrowy przeznaczony

jest do przetwarzania zjawisk ciągłych, natomiast model wektorowy do danych opisujących zjawiska dyskretne (nieciągłe). Jest to obraz mocno uproszczony. W praktyce różnice pomiędzy wspomnianymi modelami wynikają ze sposobu wewnętrznej organizacji danych, a modele rastrowe i wektorowe mogą być używane wymiennie do opisywania tych samych zjawisk. Dodatkowo, jako samodzielny komponent, występują dane tabelaryczne, pozbawione informacji przestrzennej, które mogą być dołączane do zbiorów geoprzestrzennych. Czwarty typ danych, strumienie czasu rzeczywistego, nie jest powszechnie wykorzystywany w archeologii. Zbiorczy schemat zróżnicowania danych przedstawia Rycina 1. Obecnie zastosowanie baz danych geoprzestrzennych w archeologii staje się coraz powszechniejsze (Kvamme 1989; Richards 1998; Prinke 2002; Gawrysiak i in., 2011; De Roo i in., 2016; Marvick 2017; Buckland i in., 2018; Bujno i in., 2018), a sama baza danych z reguły składa się z kolekcji wielu warstw, nie tylko zawierających informację archeologiczną, ale również wybrane komponenty środowiska geograficznego, jak zróżnicowanie powierzchni terenu czy przebieg cieków wodnych.

Rastrowy model danych

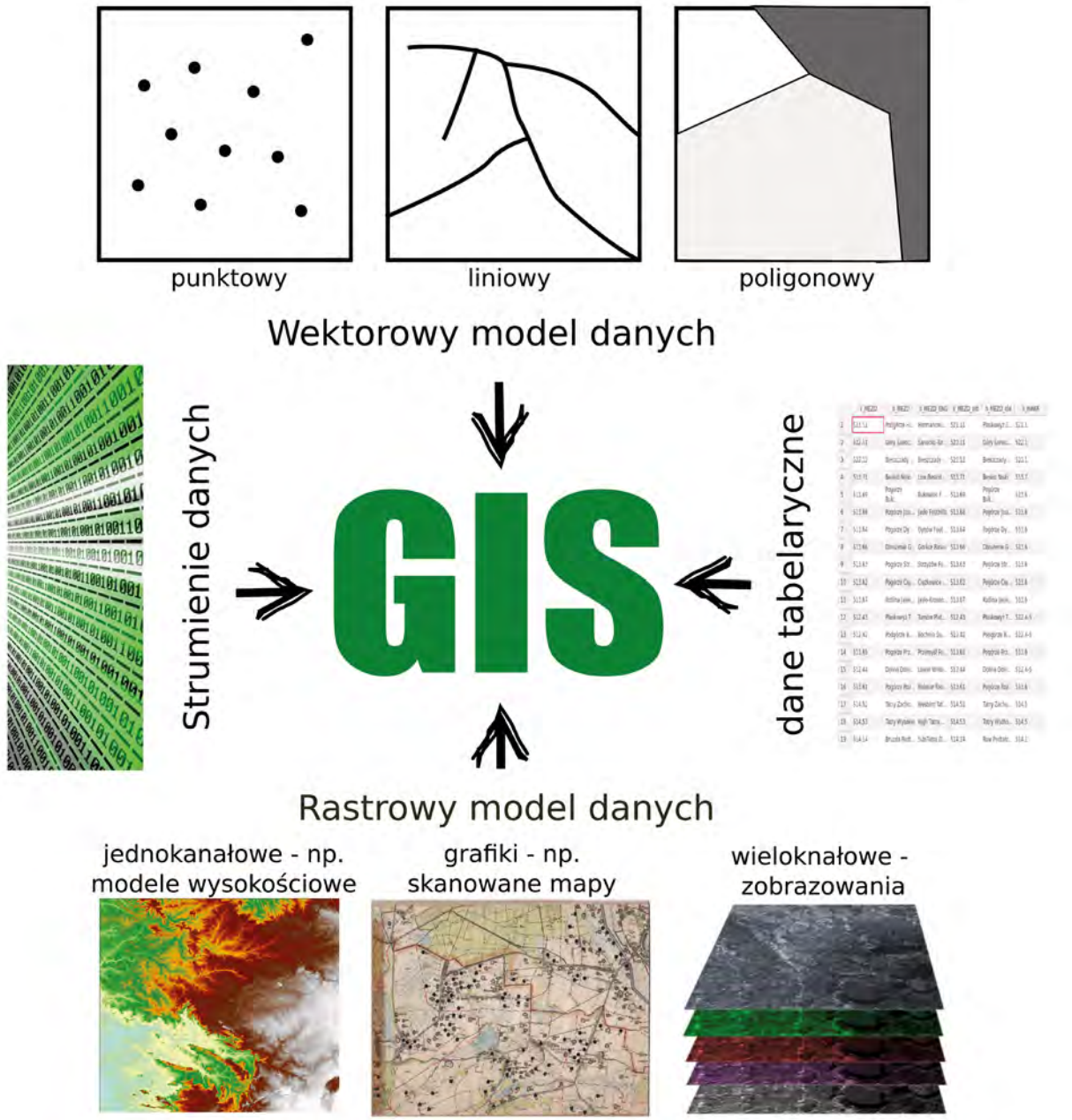
W modelu rastrowym dane zorganizowane są w postaci regularnej struktury - macierzy - gdzie najbardziej elementarną jednostką jest komórka. Komórki same w sobie nie posiadają informacji o położeniu w przestrzeni geograficznej, a jedynie przechowują wartości opisywanego zjawiska. Położenie geograficzne jest definiowane dla całego zbioru poprzez określenie współrzędnych krawędzi oraz rozdzielczości przestrzennej komórek. Dzięki takiemu zabiegowi komórki w przestrzeni geograficznej układane są automatycznie, a model rastrowy może przechowywać i szybko przetwarzać dane gęsto upakowane. W modelu rastrowym komórki są niezależne od siebie, każda może przechowywać osobną wartość. Tym samym modele rastrowe nadają się do obsługi danych o dużym zróżnicowaniu, gdzie zmienność przestrzenna nie może być wyrażona formułami matematycznymi. Nie wyklucza to jednak wykorzystania modelu rastrowego do danych dyskretnych, szczególnie gdy taka postać danych jest wymagana w procesie geoprzetwarzania. Dane w modelu rastrowym mogą być przechowywane w postaci jednokanałowej (dane kategoryzowane i numeryczne), trójkanałowej (RGB) lub wielokanałowej (zobrazowania multispektralne).

Źródłem danych przechowywanym w modelu rastrowym mogą być: cyfrowe modele wysokościowe i cyfrowe modele powierzchni; skanowane archiwalne opracowania kartograficzne, którym nadano odniesienie geoprzestrzenne; zobrazowania lotnicze i satelitarne. Jako źródło danych można również traktować produkty analiz i interpretacji geoprzestrzennych. Wyniki wstępnych procedur geoprzetwarzania, mogą stanowić dane wejściowe dla kolejnych kroków analiz. Każde z tych źródeł danych pozyskiwane jest w inny sposób, pełni inną funkcję i obciążone jest innym rodzajem błędu. Dane rastrowe mogą być przechowywane w ponad 200 formatach obsługiwanych przez bibliotekę GDAL – Geographic Data Abstraction Layer (GDAL), ale w praktyce stosuje się zaledwie kilka. Najpopularniejszym formatem jest GeoTiff (tif). Jest to najbardziej uniwersalny format obsługujący dowolną precyzję danych (do 32 bitów na kanał), dużą liczbę kanałów, wewnętrzną kompresję, metadane, a nawet dane wektorowe. Podobną rolę pełni format Erdas Imagine (img) czy jpeg2000 (jp2). W związku z koniecznością wymiany danych również z systemami nie-geoprzestrzennymi, które nie używają biblioteki GDAL, ważną rolę pełni także format tekstowy ASCII grid (asc).

Cyfrowe modele wysokościowe

Cyfrowe modele wysokościowe, bardziej znane pod angielskim skrótem DEM (Digital Elevation Model), są jednym z najważniejszych źródeł danych w badaniach archeologicznych. Modele wysokościowe określane popularnie jako DEM (ze względu na popularność dla tego typu danych będziemy używać skrótu anglojęzycznego) odnoszą się do najniższej powierzchni terenu, pozbawionej budynków i roślinności. Modele zawierające najwyższą powierzchnię, czyli powierzchnię dachów budynków czy roślinności określa się jako DSM – Digital Surface Model.

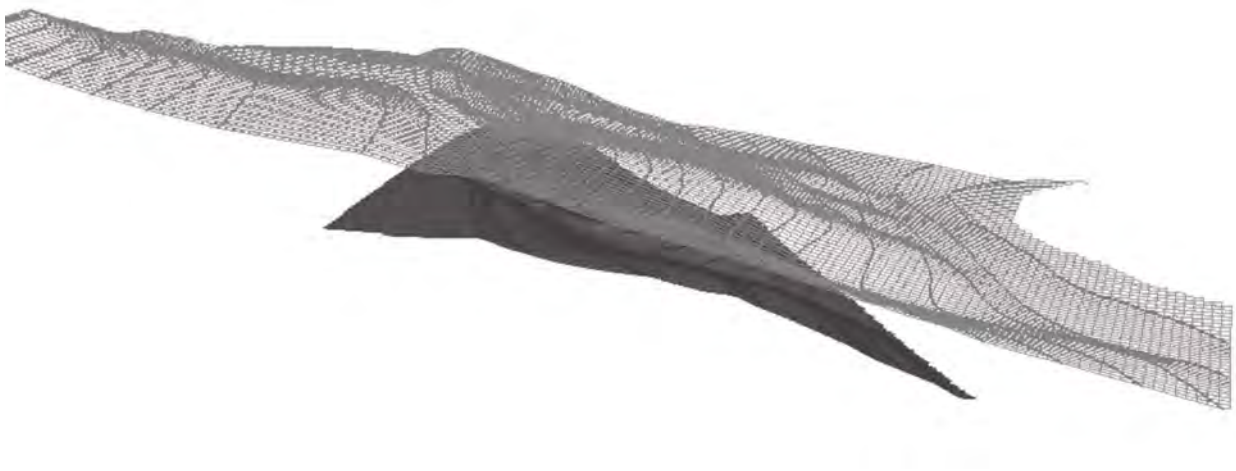
Współcześnie cyfrowe modele wysokości i modele powierzchni pozyskuje się w wyniku skanowania powierzchni lub przy pomocy metod fotogrametrycznych (Bitelli 2012; Lasaponara i Masini 2013; Štular 2021). Pierwsza grupa metod polega na mierzeniu opóźnienia odbicia fal radarowch (SAR) lub promienia laserowego (LIDAR), druga grupa metod opiera się na fotogrametrii, czyli



Ryc. 1. Schemat źródeł danych w Systemach Informacji Geograficznej

interpretacji zdjęć powierzchni wykonywanych z różnych ujęć. Jednakże w badaniach archeologicznych, zwłaszcza przy rekonstrukcjach dawnych powierzchni terenu posługujemy się pomiarami punktowymi (Niebieszczański i in., 2019), które następnie poddane zostają interpolacji przy pomocy jednego z dostępnych algorytmów (ryc. 2). Dokładność DEM i DSM zależy od zastosowanej metody. W przypadku skanowania powierzchni warunkuje ją gęstość skanu oraz dokładność informacji na temat rodzaju powierzchni odbicia (grunt, budynek, roślinność). W przypadku fotogrametrii wpływa na nią rozdzielczość zdjęć i ilość ujęć, natomiast dokładność modeli wykonanych na podstawie danych punktowych jest pochodną gęstości opróbowania oraz użytych algorytmów.

Cyfrowe modele wysokościowe to jedno z najczęściej wykorzystywanych źródeł geoprzestrzennych w badaniach archeologicznych (McCoy i Landefoged 2009). Eksploatowane są do znajdowania nowych



Ryc. 2. Przykład zestawienia cyfrowego modelu wysokościowego wytworzonego na podstawie mapy poziomicowej, przedstawiającego współczesną powierzchnię terenu (górna siatka) z modelem powierzchni kopalnej wykonanym na podstawie danych pochodzących z badań terenowych (sond geologicznych). Źródło: opracowanie autora, według koncepcji i na podstawie danych dostarczonych przez Iwonę Hildebrandt-Radke

obiektów zaznaczających się w rzeźbie terenu, wyszukiwania dawnych budynków w gęstej roślinności, jako źródło informacji w badaniu dawnych procesów osadniczych oraz w wizualizacjach i rekonstrukcjach archeologicznych (ryc. 2).

Skanowane opracowania archiwalne

Źródła danych o charakterze historycznym, a także dane archiwalne przechowywane są jedynie w postaci analogowej (drukowanej lub jako rysunki). Taki typ danych jest powszechny w archeologii, jako przykład można wymienić archiwalne mapy, arkusze Archeologicznego Zdjęcia Polski (Kempisty i in., 1981; Prinke 1992; Kozioł i in., 2012) czy dokumentację wykopaliskową. Warunkiem koniecznym wykorzystania skanowanych źródeł danych jest zarejestrowanie skanów w jednym z układów odniesień geoporzestrzennych (więcej w rozdziale dotyczącym metod). Skanowane mapy nie stanowią źródła danych *per se,* to znaczy, nie mogą być bezpośrednio wykorzystane w procesie geoprzetwarzania, ale mogą stanowić podkłady topograficzne lub być poddane cyfryzacji, czyli zostać zamienione na jeden z formatów geoprzestrzennych, najczęściej wektorowych. Sam proces cyfryzacji zostanie omówiony w kolejnej sekcji. Dokładność takich źródeł danych jest pochodną precyzji odwzorowania informacji geoprzestrzennej na źródłach analogowych oraz obecności zniekształceń na mapach, wpływającej na dokładność rejestracji geoprzestrzennej.

Zobrazowania lotnicze i satelitarne

Są to jedne z najpowszechniejszych źródeł danych geoprzestrzennych. Dane są pozyskiwane przy pomocy czujników (sensorów) umieszczonych na satelitach, samolotach czy bezosobowych statkach powietrznych (BSP) – czyli popularnych dronach. Wspólną cechą tych systemów jest pozyskiwanie danych w zintegrowanym systemie odniesień przestrzennych. Wybrane dane satelitarne, pozyskiwane przez czynniki publiczne jak amerykańska NASA (National Aeronautics and Space Administration) czy europejska ESA (European Space Agency) udostępniane są bezpłatnie. Są to jednak dane o średniej rozdzielczości (10–30m/komórkę) czy niskiej (poniżej 100m na komórkę). Dane satelitarne o wysokiej rozdzielczości są z reguły płatne. Alternatywą dla źródeł satelitarnych są zobrazowania lotnicze i BSP (ryc. 3) (por. Banaszek, w tym tomie).

Zobrazowania rejestrują odbicie promieniowania słonecznego od powierzchni terenu. Rejestracja odbicia może odbywać się w całym zasięgu widma



Ryc. 3. Grodzisko pierścieniowe „Barbara" w Kłecku, z X wieku. Widoczne również ślady nowożytnej zabudowy w formie przebarwień gruntu. Źródło Google Earth

(zdjęcia panchromatyczne) w formie jednego kanału lub w wybranych kanałach odpowiadających wybranym długościom fal widma elektromagnetycznego (ryc. 4). Najczęściej są to trzy kanały w świetle widzialnym, odpowiadające barwie czerwonej, zielonej i niebieskiej (zobrazowania RGB) i mogą być rozszerzone o wybrane kanały bliskiej i średniej podczerwieni (zobrazowania multispektralne).

W badaniach archeologicznych zobrazowania satelitarne i lotnicze wykorzystywane są przede wszystkim do identyfikacji potencjalnych obiektów archeologicznych, poprzez identyfikowanie różnic w ubarwieniu ziemi, zróżnicowania roślinności (Lasaponara i Masini 2013; Rączkowski 2014). Obserwacje przy pomocy BSP są coraz częściej wykorzystywane do wstępnego rozpoznania terenu (Banaszek 2014; Hanus 2014; Fiz i in., 2022), na których planowane są badania wykopaliskowe (por. Banaszek, w tym tomie).

Model wektorowy

Dane geoprzestrzenne określane jako wektorowe są przechowywane w sposób podobny do relacyjnych systemów baz danych, a w praktyce większość współczesnych formatów geoprzestrzennych wykorzystuje istniejące systemy baz danych. Model wektorowy integruje dowolną ilość atrybutów połączonych z obiektem geometrycznym zdefiniowanym precyzyjnie w przestrzeni geograficznej. W przeciwieństwie do danych rastrowych, gdzie współrzędne przypisywane są do całej macierzy, położenie i kształt geometrii opisywany jest osobno dla każdego obiektu przy pomocy współrzędnych w jednym z układów odniesienia. Każdy obiekt jest przestrzennie niezależny, to znaczy jego atrybuty i położenie w przestrzeni geograficznej nie są zależne od atrybutów i położenia innego obiektu. W zaawansowanych systemach geoprzestrzennych baz danych (podobnie jak w klasycznych systemach baz danych) możliwe jest jednak wprowadzenie dodatkowych ograniczeń (tak zwanych ograniczeń topologicznych), pozwalających na sprawdzenie strukturalnej poprawności



Ryc. 4. Grodzisko w Kłecku (Figura 3). Zobrazowanie Panchromatyczne, RGB i Pseudokolor z użyciem pasma podczerwieni. Źródło: Sentinel 2. Zobrazowanie wykonano 30 maja 2022 roku

zbioru. Najczęściej stosowana jest reguła przylegania granic sąsiadujących poligonów.

Geometryczne struktury danych wektorowych opisywane są przez standard OGC *simple fea*ture, który dopuszcza następujące typy geometrii: punkt, linia (polilinia), poligon oraz typy złożone: multipunkt, multipolilinia, multipoligon i kolekcja geometrii. Różnice pomiędzy prostymi typami oraz złożonymi sprowadza się do definicji pojedynczego obiektu. W przypadku struktur złożonych pojedynczy obiekt składa się z kilku geometrii, do których przypisany jest pojedynczy identyfikator i zestaw atrybutów. Złożone typy danych są wykorzystane w stopniu ograniczonym, nie są obsługiwane przez wszystkie typy zbiorów modelu wektorowego (na przykład popularny, ale nie zalecany ESRI shapefile), a większość algorytmów pracuje dobrze jedynie ze strukturami prostymi.

Atrybuty obiektów w modelu wektorowym mogą być opisywane typami numerycznymi, tekstowymi oraz daty i czasu. Każdy format posiada własne ograniczenia co do typów danych atrybutowych, ale zazwyczaj dostępne są: typ całkowity do przechowywania kategorii i wartości porządkowych, typ zmiennoprzecinkowy przechowujący dowolne liczby, typ tekstowy przechowujący łańcuchy znaków (napisy) z reguły o ograniczonej długości oraz typ data i czas. Liczba i rodzaj atrybutów są niezależne od rodzaju geometrii, z którą są połączone.

W systemach informacji geograficznej dane wektorowe obsługiwane są poprzez bibliotekę OGR, która jest częścią projektu GDAL. Najważniejsze formaty to m.in. wychodzący już ESRI Shapefile (shp). Rolę tego formatu przejmuje otwartoźródłowy geopackage (gpkg), będący uproszczoną wersją bazy danych SQLite oraz promowany przez ESRI plikową geobazę File Geodatabase (gdb). Do wymiany danych z systemami niegeoprzestrzennymi służy oparty na XML (Extensible Markup Language) format GML (Geographic Markup Language) oraz format GeoJSON, będący geoprzestrzennym rozszerzeniem populanego formatu JSON (JavaScript Object Notation).

Punktowy typ danych

Punkt to obiekt, który nie posiada wymiarów, tj. długości, powierzchni czy objętości, a jedynie położenie w przestrzeni geograficznej. Jest ono opisywane parą współrzędnych x i y, zawierających współrzędne geograficzne (długość i szerokość geograficzną) lub geodezyjne, wyrażone w metrach. Niektóre formaty obsługują również dodatkowe wartości "z" i "m", z których pierwszy przechowuje trzeci wymiar (wysokość) a drugi dodatkowy parametr, na przykład kategorię. Jeżeli punkty przechowują współrzędne geograficzne, wewnętrznie zapisywane są one w postaci stopni dziesiętnych, gdzie minuty i sekundy zamieniane są na dziesiąte części stopnia. Punkty nadają się do opisu zjawisk, dla których istotne jest tylko położenie. Dodatkowe informacje, jak na przykład powierzchnia, mogą być przechowywane jako atrybut numeryczny. Tym samym punkty nadają się do opisu położeń artefaktów w siatce arowej, położenia znalezisk w bazie Archeologicznego Zdjęcia Polski czy lokalizacji miejsc poboru prób do badań specjalistycznych. Informację o położeniu

obiektów zbiera się przy pomocy pomiarów geodezyjnych, z użyciem lokalizacji GPS, a w przypadku danych archiwalnych odczytuje się na podstawie położenia na mapie lub szkicu lokalizacyjnym.

Liniowy typ danych

Linia to obiekt, który posiada długość, a jego struktura to lista punktów. W systemach informacji geograficznej obiekty liniowe nie mogą być przedstawiane w postaci krzywych, tym samym obiekty liniowe o dużej złożoności kształtu przybliża się liniami prostymi, połączonych punktami położonymi bardzo blisko siebie. Obiekt liniowy nie posiada szerokości, ale ta, podobnie jak powierzchnia „punktu", może być przechowywana jako atrybut. Atrybuty są przypisywane do całego obiektu liniowego. W modelu *simple feature* nie można przypisywać ich do poszczególnych punktów. Obiekt reprezentowany przez linię musi być ciągły, dlatego w przypadku konieczności wyrażenia linii w postaci kilku odcinków, należy użyć innego typu danych – multilinii. Linie nadają się do opisu zjawisk opisujących długość, gdzie zróżnicowanie szerokości jest pomijalne, na przykład linii fortyfikacji czy szlaków komunikacyjnych. Dodatkowo obiekty linijne będą powszechnie opisywały naturalne obiekty geograficzne, jak drogi, cieki wodne czy linie kolejowe.

Poligonowy typ danych

Podobnie jak obiekty liniowe, obiekty powierzchniowe nie mogą wykorzystywać krzywych, tym samym, powierzchnia wyrażona jest poligonem, czyli wielokątem. W przeciwieństwie do linii, które muszą być ciągłe, poligony mogą zawierać pustki (*holes*). Poligony opisują zjawiska, które posiadają powierzchnię oraz obwód. Obiekty poligonowe mogą przedstawiać każde zjawisko opisane jako geometria 2D: zasięg osady pradziejowej, obrys grodziska, kształt obozowiska, a w przypadku dokumentacji wykopaliskowej każdy obiekt opisywany powierzchnią: zarys obiektów, jam czy dołków posłupowych. Należy zaznaczyć, że poligony opisują zjawiska o jednoznacznie wyznaczonych granicach, nie obsługują przejść tonalnych. Do wyrażania zjawisk, których natężenie zmienia się w przestrzeni lub jest określone jako rozmyte, należy użyć rastrowego modelu danych.

Tabelaryczny model danych

Przechowywanie obiektów geometrycznych połączonych z dużą ilością danych atrybutowych nie jest nadmiernie wydajne. Systemy informacji geograficznej stosując mechanizmy łączenia tabel (*join*), poprzez specjalne pola atrybutowe pozwalają na łączenie danych geoprzestrzennych ze zwykłymi bazami danych, tabelami przechowywanymi w arkuszach kalkulacyjnych, a nawet w zwykłych plikach tekstowych. Warunkiem wykonania takiego połączenia jest obecność w obu łączonych zbiorach danych geoprzestrzennych i tabelarycznych pól, określanych jako klucze główne i obce. Oba pola powinny być tego samego typu, a te same obiekty, muszą być reprezentowane przez te same wartości, najlepiej liczby całkowite lub łańcuchy tekstów. Proces łączenia pozwala na dołączanie tylko tych obiektów, w których wartość kluczy jest dokładnie taka sama. Po połączeniu kolumny dołączonego zbioru widoczne są jako kolejne atrybuty zbioru geoprzestrzennego i mogą być wykorzystywane w taki sam sposób jak oryginalne atrybuty. Ten mechanizm pozwala na niezależne zarządzanie bardzo dużymi zbiorami danych, ale również szybkie dołączanie do struktur geoprzestrzennych archiwalnych tabel lub wyników badań terenowych.

Obiekty geoprzestrzenne a skala

Obiekty liniowe i poligony są zdefiniowane listą punktów, nie mają jednak reprezentanta, który symbolizowałby wyłącznie położenie obiektu w przestrzeni. Podobna sytuacja dotyczy relacji poligon – linia. W zależności od skali mapy obiekt może być reprezentowany jako poligon lub linia, lub punkt. Na przykład system okopów z I wojny światowej może być reprezentowany jako struktura linijna w skali powyżej 1:1000, natomiast w skali lokalnej, 1:100 lub mniejszej, będzie to poligon precyzyjnie oddający zarys struktur ziemnych. Podobnie np. baza danych grodzisk wczesnośredniowiecznych (Michalski i in., 2016), może być reprezentowana przez obrysy poszczególnych pozostałości konstrukcji, jak i punkty reprezentujące położenie grodów na mapie Polski. W takiej sytuacji obiekty muszą być reprezentowane przez różne typy geometrii (ryc. 5), ale powinny współdzielić tabele atrybutów.



Ryc. 5. Reprezentacja grodziska na wyspie Lednicy. Zarys wału grodziska (poligon), linia reprezentująca oś wału (linia) oraz punkt reprezentujący lokalizację grodziska, w przybliżeniu środek obiektu. Źródło: materiały dydaktyczne autora

Produkty analiz geoprzestrzennych jako źródło danych

Liczne zbiory danych geoprzestrzennych, zarówno w modelu rastrowym, jak i wektorowym, wykorzystywane w analizach to nie są dane podstawowe, efekt cyfryzacji lub rejestracji danych w terenie, są one wynikiem procesów geoprzetwarzania przeprowadzonych na innych zbiorach danych. Przykładami wybranymi z bardzo długiej listy powszechnie wykorzystywanych zbiorów danych są mapy pokrycia i użytkowania terenu, które powstają w wyniku przetwarzania zobrazowań satelitarnych i lotniczych lub mapy form terenu powstałych w wyniku przetwarzania modeli wysokościowych, na przykład mapy spadków. Dokładność takich opracowań jest pochodną

dokładności pierwotnych danych źródłowych wykorzystywanych do opracowania źródeł wtórnych. Mapy pokrycia terenu mogą być wykorzystywane do oceny stopnia rozpoznania obiektów archeologicznych metodą powierzchniową (pola orne i tereny leśne), natomiast pochodne terenu wykorzystywane są między innymi w badaniach procesów osadniczych.

POZYSKIWANIE I ZARZĄDZANIE DANYMI GEOPRZESTRZENNYMI W BADANIACH ARCHEOLOGICZNYCH

W szeroko rozumianych badaniach archeologicznych zarówno archeolodzy, jak i współpracujący z nimi specjaliści z innych dziedzin mogą pozyskać dane geoprzestrzenne na jeden z dwóch sposobów: z zewnętrznego źródła lub wytworzyć je samodzielnie. Wdrożenie dyrektywy INSPIRE (Kołodziej 2012) sprawiło, że liczne zbiory danych geoprzestrzennych są udostępniane publicznie (Horáková 2013; Serlorenzi 2014) zarówno w ramach usługi przeglądania, jak i pobierania. Sama informacja geograficzna, czyli przebieg dróg, cieków wodnych, wysokość nad poziomem morza, lokalizacja budynków i innych obiektów obecnych w przestrzeni geograficznej, jak również przebieg granic jednostek administracyjnych i działek nie jest chroniona autorskim prawem majątkowym i może być wykorzystywana przez wszystkich użytkowników (Jankowska 2017). Jednak w przypadku, gdy korzystamy ze zbioru danych przygotowanego przez instytucje lub osoby trzecie, należy bezwzględnie wskazać źródło, zgodnie z wymogami autora danych, lub jeśli takie wymogi nie zostały sformułowane, na ogólnych zasadach cytowania. W przypadku danych pochodzących z publikacji drukowanych można dokonać konwersji do postaci cyfrowej, również ze wskazaniem źródła. Podobnie możemy korzystać z publicznie dostępnych zobrazowań satelitarnych, na przykład misji Sentinel czy Landsat, oraz dostępnych ortofotomap. Również w tym przypadku istnieje obowiązek podania źródła danych. Dane geoprzestrzenne można pobrać z publicznych serwisów, np. geoportal.gov.pl i geoportal2.pl. Ten pierwszy udostępnia głównie podstawowe dane kartograficzne i mapy. Geoportal2 udostępnia również dane specjalistyczne (w tym cyfrowe zbiory Instytutu Dziedzictwa Narodowego) oraz dane i serwisy lokalne.

Chronione prawem autorskim są natomiast nieopublikowane dane zbierane w wyniku własnej inicjatywy instytucji lub osób prywatnych, samodzielnie wykonywane obserwacje BSP czy pomiary wybranych parametrów środowiska, o ile prawo nie stanowi inaczej. Również analogowe archiwa podlegają ochronie i nie mogą być digitalizowane bez zgody dysponenta tych zbiorów. Chronione są również dane wrażliwe, dotyczące osób oraz zastrzeżone ze względu na ważny interes społeczny. Dotyczy to szczególnie lokalizacji występowania potencjalnych zabytków archeologicznych. Ochronie poprzez prawa autorskie podlega koncepcja wizualizacji kartograficznej (redakcja mapy) i publikowane opracowania kartograficzne, które moglibyśmy użyć jako podkład do naniesienia danych. W takiej sytuacji należy upewnić się czy dane opracowanie może być wykorzystane w formie publicznej, czy nie.

Cyfryzacja danych archiwalnych

Dane archeologiczne obejmują zarówno dokumentację wykopaliskową, jak i opracowania o charakterze syntetycznym, ale pomimo wzrastającej dostępności danych geoprzestrzennych wiele archeologicznych zbiorów archiwalnych nie jest dostępna cyfrowo, tym samym w archeologii cyfryzacja jest wciąż jedną z najważniejszych metod pozyskiwania danych do analiz geoinformacyjnych (Witcher 2008). Dominującą formą zarządzania danymi są analogowe zbiory przechowywane w formie papierowych map, szkiców czy fotokopii. Aby archiwalne dane archeologiczne mogły zostać włączone w proces analiz geoprzestrzennych, muszą zostać poddane procesom cyfryzacji, czyli zamiany do postaci zrozumiałej dla



Ryc. 6. Uniwersalny schemat cyfryzacji danych archiwalnych

algorytmów geoprzetwarzania. Poniżej przedstawiono schemat postępowania (ryc. 6), który właściwy jest dla większości źródeł analogowych.

Skanowanie i rejestracja danych archiwalnych

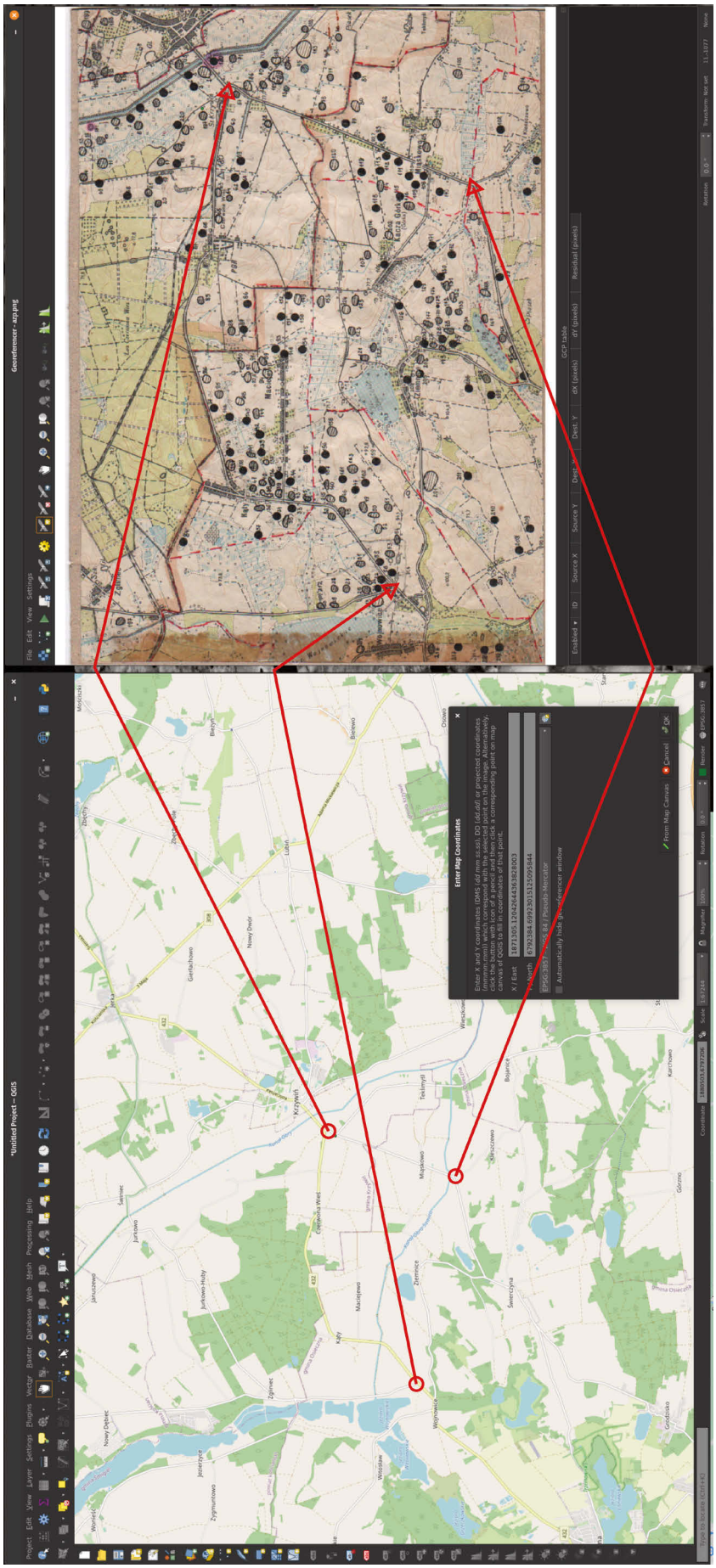
Pierwszym krokiem procesu cyfryzacji jest skanowanie materiałów archiwalnych. W przypadku materiałów papierowych, proces skanowania powinien być poprzedzony analizą nośnika w celu wyeliminowania potencjalnych zgięć, uszkodzeń czy przerwań. Starsze materiały mogą wymagać również ograniczonych prac konserwatorskich. Następnie materiały poddaje się skanowaniu. Rozdzielczość skanu powinna być dostosowana do szczegółowości informacji zawartej na materiałach analogowych. Sztuczne zwiększanie rozdzielczości nie podnosi precyzji analizowanych danych, a jedynie prowadzi do zwiększania wielkości pliku. W przypadku materiałów monochromatycznych lub takich, dla których użyto ograniczonej palety kolorów, należy ograniczyć skanowanie do trybu czarno-białego (monochromatycznego) lub indeksowanego (ograniczonej palety barwnej) dla uniknięcia niepożądanych artefaktów utrudniających stosowanie półautomatycznych metod digitalizacji. Po zakończeniu skanowania pozyskany obraz można poddać obróbce graficznej w celu usunięcia obramowań, objaśnień i innych zbędnych fragmentów, które nie stanowią danych przestrzennych. Można również przy pomocy narzędzi retuszu usunąć zbędne treści lub uzupełnić braki, co może wspomóc pracę automatycznych lub półautomatycznych narzędzi digitalizacji. Po zakończeniu obróbki graficznej zapisujemy plik w jednym z formatów obsługiwanych przez systemy informacji geograficznej.

Aby można było wykorzystać skanowany dokument w systemach informacji geograficznej, musi on zostać zarejestrowany w jednym z przestrzennych układów odniesienia. Jeśli to możliwe, tj. znamy układ odniesienia skanowanego źródła danych, do rejestracji geoprzestrzennej powinniśmy wykorzystać ten układ, w którym zostało sporządzone źródło danych. Przedwojenne źródła mogą być rejestrowane w układzie odniesienia "Borowa Góra". Mapy tworzone w latach 1945–1990 wykorzystywały Państwowe Układy Współrzędnych Geodezyjnych (PUWG) "1942" lub "1965". Nowsze, tworzone od lat 90. XX wieku, mogą wykorzystywać już obecnie obowiązujący PUWG "1992". Często, przy opracowaniach o charakterze poglądowym, jedynym układem odniesienia będzie układ geograficzny, czyli długość i szerokość geograficzna. Ręcznie wykonywane szkice mogą nie być powiązane z żadnym układem odniesienia.

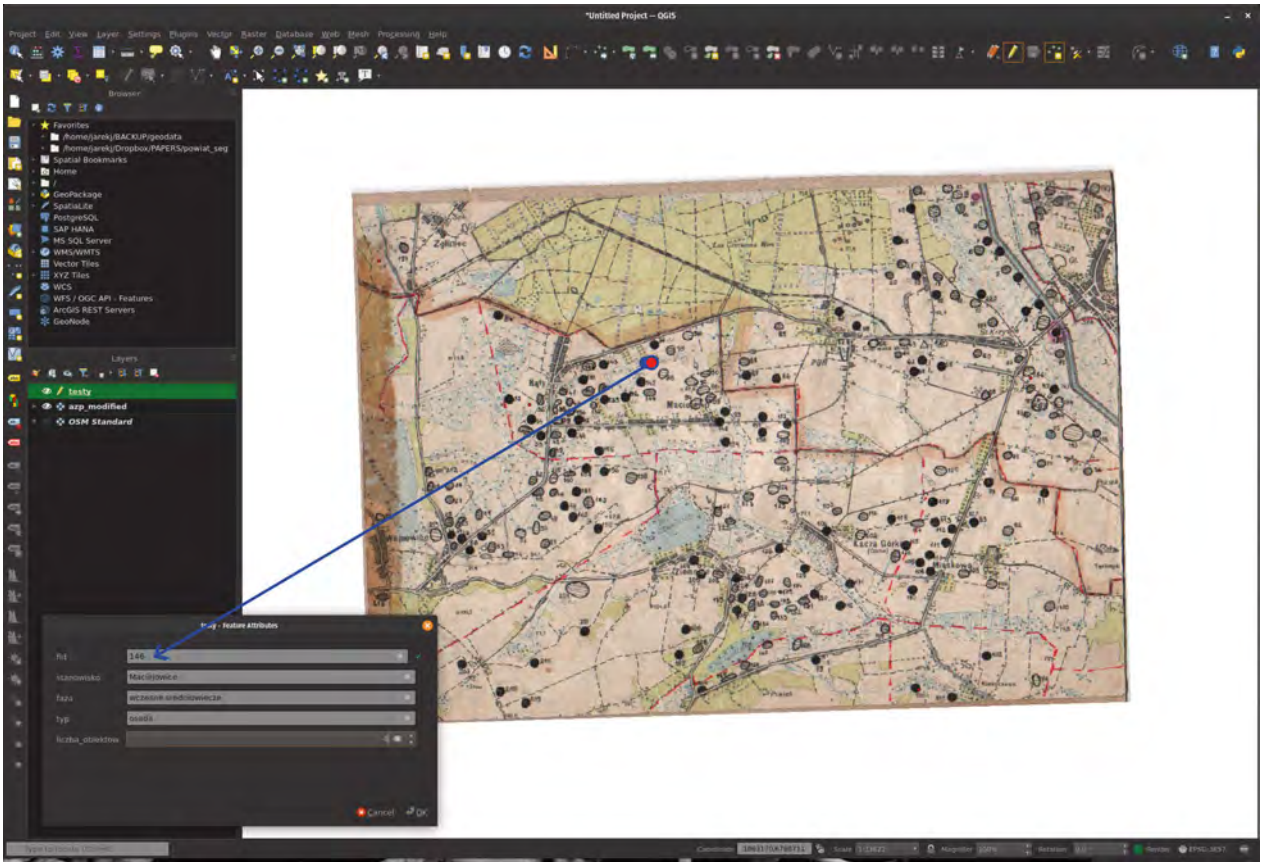
Jeżeli źródło danych o znanym układzie odniesienia zawiera siatkę geodezyjną (metry) lub geograficzną (długość i szerokość geograficzna), do procesu rejestracji należy wykorzystać punkty siatki o znanych wartościach współrzędnych. Jeżeli taka informacja nie jest dostępna, proces rejestracji można wykonać, wykorzystując charakterystyczne punkty na mapach, co do położenia których jesteśmy pewni, na przykład skrzyżowania dróg, układ sieci hydrograficznej czy granice administracyjne (ryc. 7). Tak wykonana rejestracja z reguły będzie mniej dokładna niż ta oparta na współrzędnych (Kozioł i in., 2012). Sam proces rejestracji polega na powiązaniu punktów na rejestrowanej mapie (GCP – *Ground Control Points*) ze współrzędnymi w układzie geograficznym lub geodezyjnym. W przypadku gdy na rejestrowanym materiale są elementy układu odniesienia, zaznaczamy te punkty, a następnie przypisujemy im właściwe współrzędne. W przypadku gdy korzystamy z tak zwanych "punktów charakterystycznych", wskazujemy punkt na rejestrowanej mapie, a następnie odnajdujemy jego odpowiednik w wysokiej jakości źródle danych geoprzestrzennych, na przykład Bazie Danych Obiektów Topograficznych (BDOT) (Chałka i in., 2011) czy Państwowym Rejestrze Granic. Po dodaniu odpowiedniej liczby punktów – od minimum 3 do kilkudziesięciu – dokonujemy transformacji jedną z dostępnych metod, a następnie weryfikujemy jakość rejestracji, porównując wynik z innym, prawidłowo zarejestrowanym źródłem danych. Jeżeli wynik jest niezadowalający, dodajemy kolejne punkty kontrolne i, jeżeli to konieczne, zmieniamy metodę transformacji. Proces kontynuujemy do momentu uzyskania zadowalającej zgodności rejestrowanego źródła danych z odniesieniem.

Cyfryzacja: automatyczna, półautomatyczna i ręczna

Skanowane i zarejestrowane źródło danych nie może być poddane analizom geoprzestrzennym, gdyż zawarta tam informacja nie jest zrozumiała dla algorytmów geoprzetwarzania i musi zostać poddana procesowi cyfryzacji (dygitalizacji), polegającej na przeniesieniu



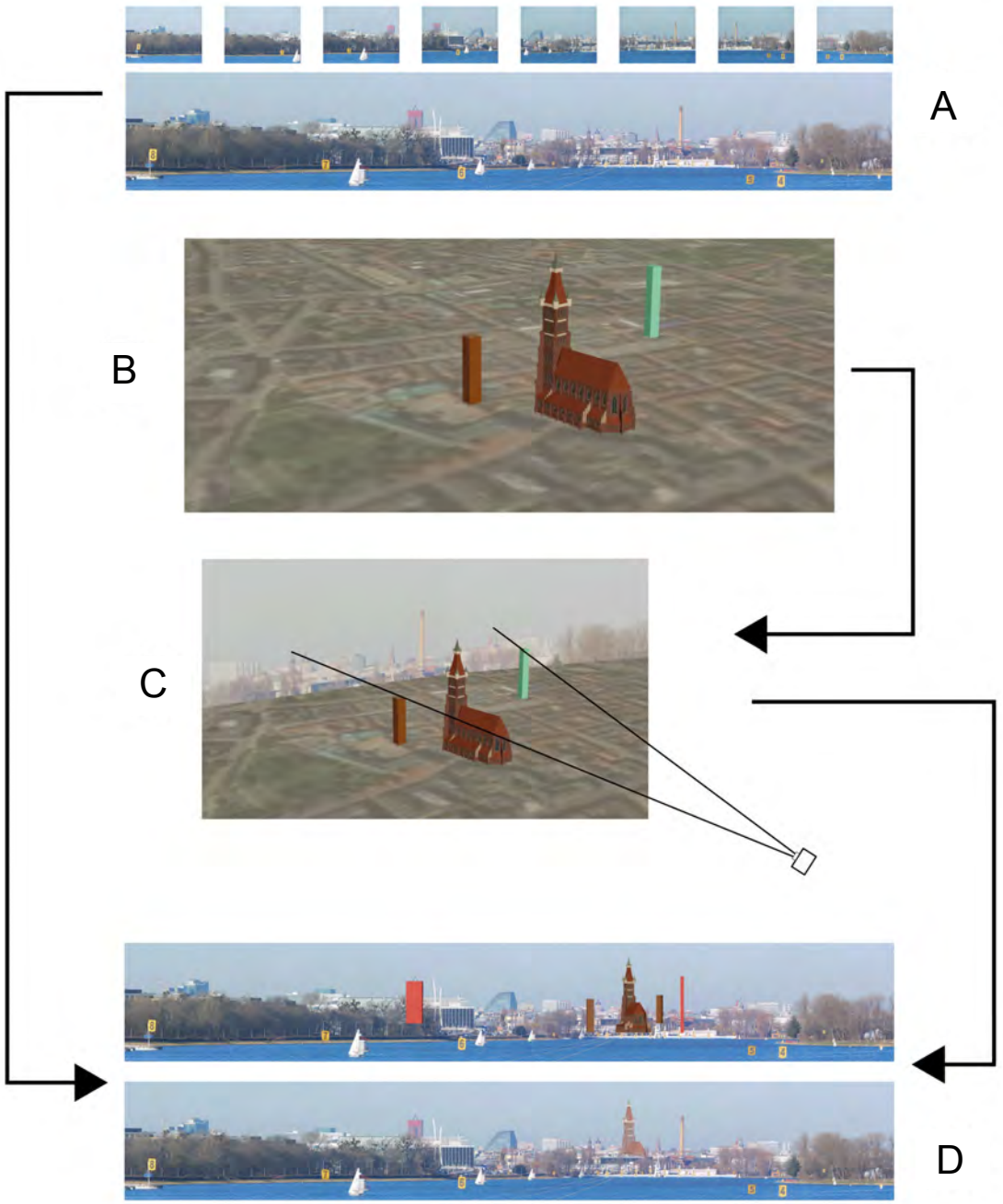
Ryc. 7. Rejestracja arkusza AZP w układzie 92. Archwalne arkusze AZP często nie posiadają żadnej informacji na temat współrzędnych geograficznych, często posiadają również zniekształcenia. W takiej sytuacji jedyną formą rejestracji jest użycie punktów orientacyjnych na mapie, na przykład skrzyżowań dróg



Ryc. 8. Proces cyfryzacji danych punktowych. Operator GIS musi przede wszystkim zapewnić prawidłowe przypisanie identyfikatora obiektu (punktu AZP). Pozostałe atrybuty dodane w tym kroku są nadmiarowe, ale pozwalają na kontrolę prawidłowości procesu dygitalizacji i znalezienie potencjalnych błędów

części lub całości informacji do przestrzennej bazy danych. Zeskanowane mapy zawierają nie tylko interesującą nas informację archeologiczną, ale również tzw. podkład topograficzny, np. sieć hydrograficzną, zabudowę czy układ dróg. Te ostatnie nie wymagają digitalizacji, gdyż można je użyć z innych, istniejących już źródeł danych. W pierwszym kroku należy zorientować się, jaki typ informacji będziemy cyfryzować – punktowy, liniowy czy poligonowy i następnie wybrać odpowiedni typ geometrii oraz określić, jakie atrybuty będziemy przypisywać tworzonym obiektom (ryc. 8). Minimum to identyfikator obiektu, pozostałe parametry będzie można dodać po zakończaniu dygitalizacji lub pozyskać z innego zbioru danych, wykorzystując wspomniane mechanizmy złączeń. Jest to bardzo wygodna forma przeprowadzenia cyfryzacji, gdyż pozwala rozdzielić pracę na grupę osób. Cyfryzację lokalizacji obiektów można powierzyć wykwalifikowanemu operatorowi Systemów Informacji Geograficznej, natomiast cyfryzację danych atrybutowych specjalistom z zakresu archeologii. W przypadku cyfryzacji obiektów punktowych należy zwrócić uwagę jedynie na precyzję, w przypadku obiektów liniowych, a zwłaszcza poligonowych, dodatkowo należy uwzględnić połączenia i granice między obiektami, tak aby linie nie przecinały się.

W przypadku dobrze przygotowanego i oczyszczonego skanu, który zawiera jedynie zdigitalizowaną informację, można użyć metod automatycznych, czyli konwersji danych rastrowych do wektorowych, a na końcu jedynie uzupełnić identyfikatory obiektów. Ze względu na jakość danych taka sytuacja nie jest powszechna. Z reguły stosuje się metody półautomatyczne, gdzie algorytm wstępnie proponuje ścieżkę digitalizacji, którą operator zatwierdza, koryguje lub odrzuca, a w ostatnim kroku dodaje obiekty nierozpoznane przez oprogramowanie digitalizujące. W przypadku danych zawierających dużo informacji nadmiarowej metody automatyczne i półautomatyczne nie będą się sprawdzać, w takiej sytuacji pozostają wyłącznie metody ręczne. Po zakończeniu procesu cyfryzacji należy dokonać

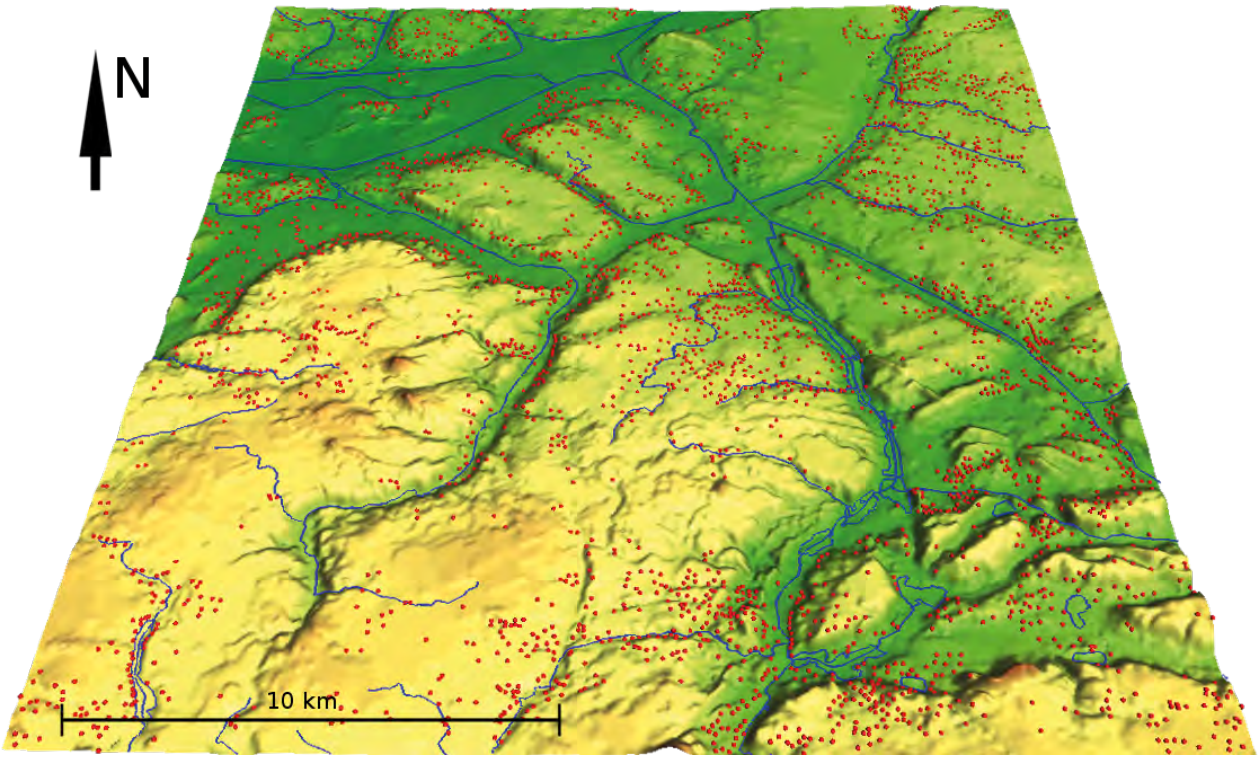


Ryc. 9. Przykład wykorzystania Systemów Informacji Geograficznej do zaawansowanych wizualizacji architektonicznych i krajobrazowych, na przykładzie rekonstrukcji nie istniejącej już Kolegiaty pw. św. Magdaleny w Poznaniu. Źródło: Hajdrowski i Jasiewicz, w druku

weryfikacji uzyskanych wyników (Gupta i Devillers 2017), uzupełnić ewentualne niezgodności i zapisać dane do geoprzestrzennej bazy danych. Tak przygotowane dane będą mogły być wielokrotnie używane zarówno w procesie analitycznym, jak i do wizualizacji, łączone z innymi zbiorami danych oraz uzupełniane wraz z pojawieniem się nowych informacji.

Wizualizacja danych

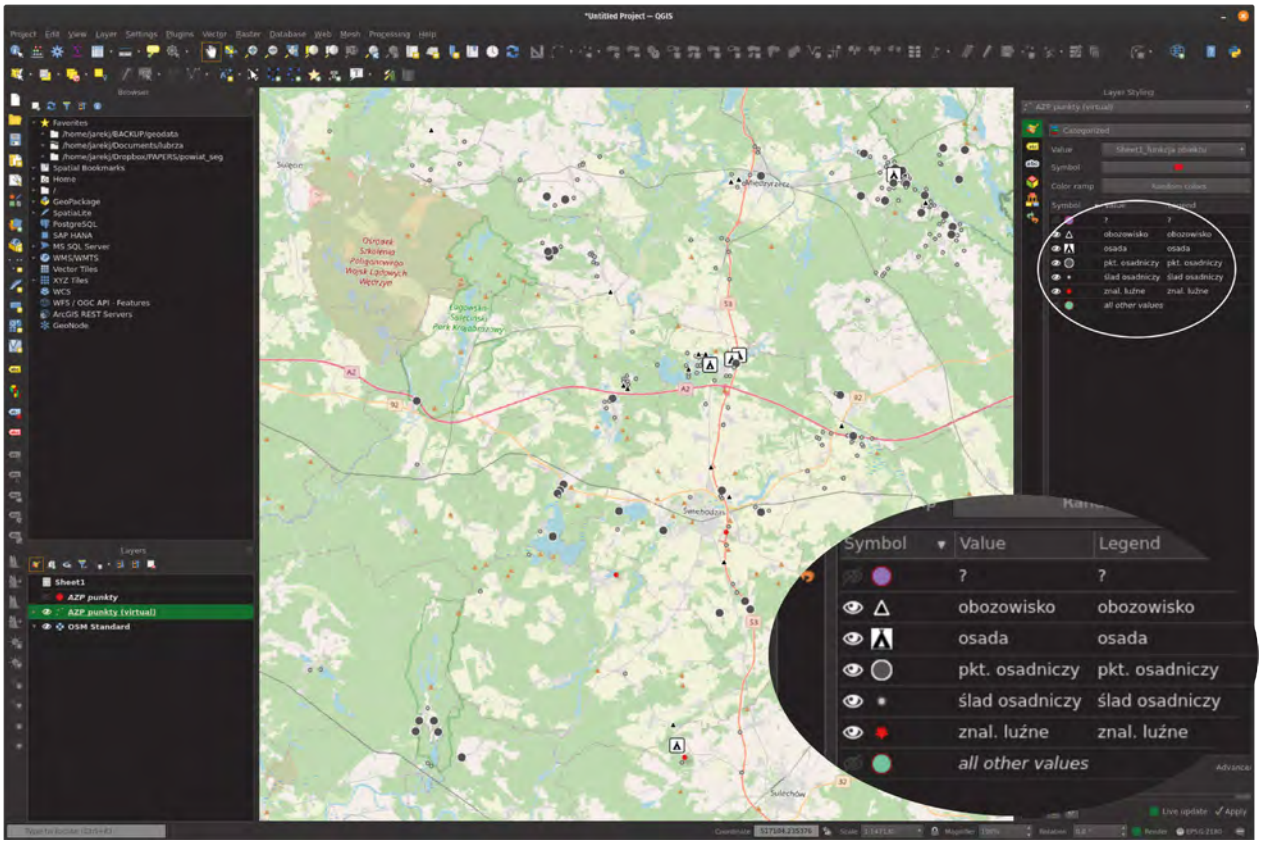
Dane przechowywane w postaci cyfrowej, nawet uporządkowane w formie tabelarycznej, są trudne w analizie, szczególnie jeżeli przypadki są zróżnicowane, a ich liczba przekracza kilkanaście. W takich sytuacjach stosuje się narzędzia wizualizacji, które mają na celu przedstawienie przestrzennej



Ryc. 10. Jedna z form wizualizacji danych archeologicznych o charakterze popularnym. Punkty przedstawiają lokalizację (czerwone punkty) zidentyfikowanych stanowisk archeologicznych (dane na rok 2008) na Wysoczyźnie Kościańskiej. Jako podkład użyto rzut 3D cyfrowego modelu wysokościowego oraz sieć rzeczną. Źródło: zbiór danych z publikacji

złożoności zbioru danych w formie wizualnej, w założeniu zredukowanej, bardziej przystępnej dla ludzkiego sposobu przyswajania informacji (Leszkowicz 2020). Ta stosunkowo prosta procedura może ujawniać nowe, nieznane zjawiska i być podstawą do formułowania wstępnych hipotez. Kolejne, sformalizowane kroki analizy mogą taką hipotezę potwierdzić lub doprowadzić do jej odrzucenia. Jeżeli na danym etapie analizy kontekst przestrzenny nie jest istotny, na przykład analiza dotyczy opisu wartości wybranego atrybutu lub relacji pomiędzy atrybutami, do opisu danych stosujemy narzędzia wizualizacji statystycznej (Baxter 2015; Clarson 2018). W przypadku gdy kluczowy jest kontekst przestrzenny, na przykład zróżnicowanie przestrzenne cech, używamy metod wizualizacji kartograficznej. Osobny aspekt wizualizacji informacji archeologicznej stanowią infografika oraz wizualizacja 3D i rzeczywistość wirtualna (Gierszewska-Noszczyńska i Noszczyński 2014). Oba te zagadnienia, które wykraczają poza zakres tego opracowania, łączy relacja do danych, czyli mechanizmy wykorzystania lokalizacji geograficznej do precyzyjnego umieszczenia obiektu w krajobrazie. Zarówno infografika (Llobera 2011), jak i rzeczywistość wirtualna ma na celu raczej efektywny przekaz już istniejącej informacji, niż poszukiwanie nowej wiedzy i tym samym ich zastosowanie ma cel prezentacyjny, często o charakterze popularno-naukowym (ryc. 9 i 10).

Sama wizualizacja kartograficzna ma przede wszystkim na celu prezentowanie zarówno surowych zbiorów danych, jak i wyników analiz (Gupta i Devillers 2017). Tym samym wizualizacja kartograficzna jest narzędziem prezentacji danych, gdzie informacja ilościowa zastąpiona zostaje zmienną wizualną prezentującą zróżnicowanie zgromadzonej informacji. Cechy ilościowe można różnicować przy pomocy wielkości symbolu lub przy pomocy jasności i/lub intensywności barwy (ryc. 11). Na przykład ilość fragmentów ceramiki znalezionych w danym punkcie można różnicować przy pomocy wielkości symbolu reprezentującego lokalizację stanowiska lub intensywności barwy zgodnie z dołączoną legendą. Ponadto różne klasy symboli można używać do jednoczesnej prezentacji więcej niż jednego atrybutu. Kształtem symbolu można różnicować typy obiektów (osady, punkty osadnicze), kolorem jednostkę archeologiczną, a wielkością ilość



Ryc. 11. Przykład eksploracyjnej analizy danych. Wizualizacja obiektów archeologicznych epoki kamienia na obszarze Pojezierza Lubuskiego. Zbiór danych z publikacji: Jasiewicz i Sobkowiak-Tabaka (2015)

znalezionych fragmentów ceramiki. Należy jednak mieć na uwadze, że nadmierna ilość informacji na jednej mapie/rycinie nie zwiększa czytelności przekazu. Wizualizacja kartograficzna uzupełniona o skalę, legendę i koordynaty geograficzne to mapa tematyczna. Tworzenie map tematycznych, pozwalających na wizualizację danych kategoryzowanych oraz klasyfikację danych ilościowych (Kvamme 1996; Capra i in., 2002; Gianni 2012) dostępne jest we wszystkich platformach GIS.

WYBRANE TYPY ANALIZ GEOPRZESTRZENNYCH STOSOWANYCH W ARCHEOLOGII

Eksploracyjna analiza danych geoprzestrzennych

Pomimo że obserwacja jest najprostszą i często bardzo skuteczną metodą zdobywania nowej wiedzy, przeglądanie surowych danych jest z reguły trudne i mało wydajne. Dlatego do przeglądania i szybkich podsumowań stosuje się metody indukcyjne – przeszukiwanie zbiorów danych połączone z wizualizacją określane jako eksploracyjna analiza danych (ang. *exploratory data analysis – EDA*: Tukey 1977; Baxter 2015). Proces eksploracji danych geoprzestrzennych polega na łączeniu kryteriów przestrzennych z nieprzestrzennymi (Wheatley i Gillings 2013: 80). Proces analizy opiera się na selekcji, np. „pokaż tylko osady wczesnośredniowieczne", lub na różnicowaniu obiektów poprzez zastosowanie odpowiedniej symboliki (ryc. 11), na przykład przypisanie osadom symbolu okręgu, natomiast punktom osadniczym kropki.

Poza aspektem przestrzennym obiekty archeologiczne posiadają z reguły również atrybut czasowy. Ze względu na ograniczenia datowania zabytków precyzja czasowa jest zróżnicowana i hierarchiczna. Modele danych stosowane w systemach GIS mają trudności z implementacją niejednoznaczności. Klasyczny przykład: stanowiska archeologiczne mogą być oznaczone jako: "pradzieje", "epoka

kamienia", "neolit", "kultura ceramiki wstęgowej rytej". Każde z kolejnych wymienionych określeń może być zgeneralizowane do poprzedniego. Zapytanie: „pokaż stanowiska neolityczne", uwzględni tylko te, dla których przypisano pozycję „neolit", a stanowiska oznaczone jednostką wyższego i niższego rzędu zostaną pominięte. Dlatego projektując modele danych archeologicznych, należy dokładnie przemyśleć przypisywanie atrybutów chronologicznych. Błędna implementacja może być źródłem nieporozumień, szczególnie dla osób niebędących specjalistami z zakresu archeologii.

Rozszerzenie analizy o aspekt przestrzenny oznacza zwiększenie możliwości eksploracyjnych. Szczególnie przydatne jest wyszukiwanie obiektów znajdujących się w granicach jednostki administracyjnej – „*pokaż wszystkie obiekty wczesnośredniowieczne znajdujące się w powiecie kościańskim*" lub „*znajdujące się w odległości mniejszej niż 500 metrów od najbliższego zbiornika wodnego*" (ryc. 12). Jednakże warunkiem przeprowadzenia takich operacji jest posiadanie dodatkowych źródeł danych geoprzestrzennych, w tym wypadku podziału administracyjnego oraz informacji o lokalizacji cieków wodnych. Takie zapytania są możliwe dzięki występujących w geoprzestrzennych bazach danych relacjach geoprzestrzennych, czyli kojarzeniu obiektów poprzez informację o ich lokalizacji. Dzięki relacjom geoprzestrzennym proces analizy możemy rozszerzyć również o bardziej skomplikowane zapytania, na przykład „pokaż punkty osadnicze posiadające minimum 20 innych punktów osadniczych w odległości nie większej niż 10 km". Powyższe zapytanie jest złożone. W pierwszym kroku wymaga utworzenia dla każdego punktu nowego atrybutu, zawierającego liczbę punktów w zadanym promieniu, a następnie w drugim kroku wybranie tylko tych, dla których liczba jest większa lub równa 20. Realizacja tego typu zapytań wymaga zastosowania odpowiednich narzędzi GIS lub systemów bazodanowych posiadających rozszerzenia geoprzestrzenne. Dużą popularnością cieszy się bezpłatne rozszerzenie systemu PostgreSQL, znane jako PostGIS (Eichert 2013).

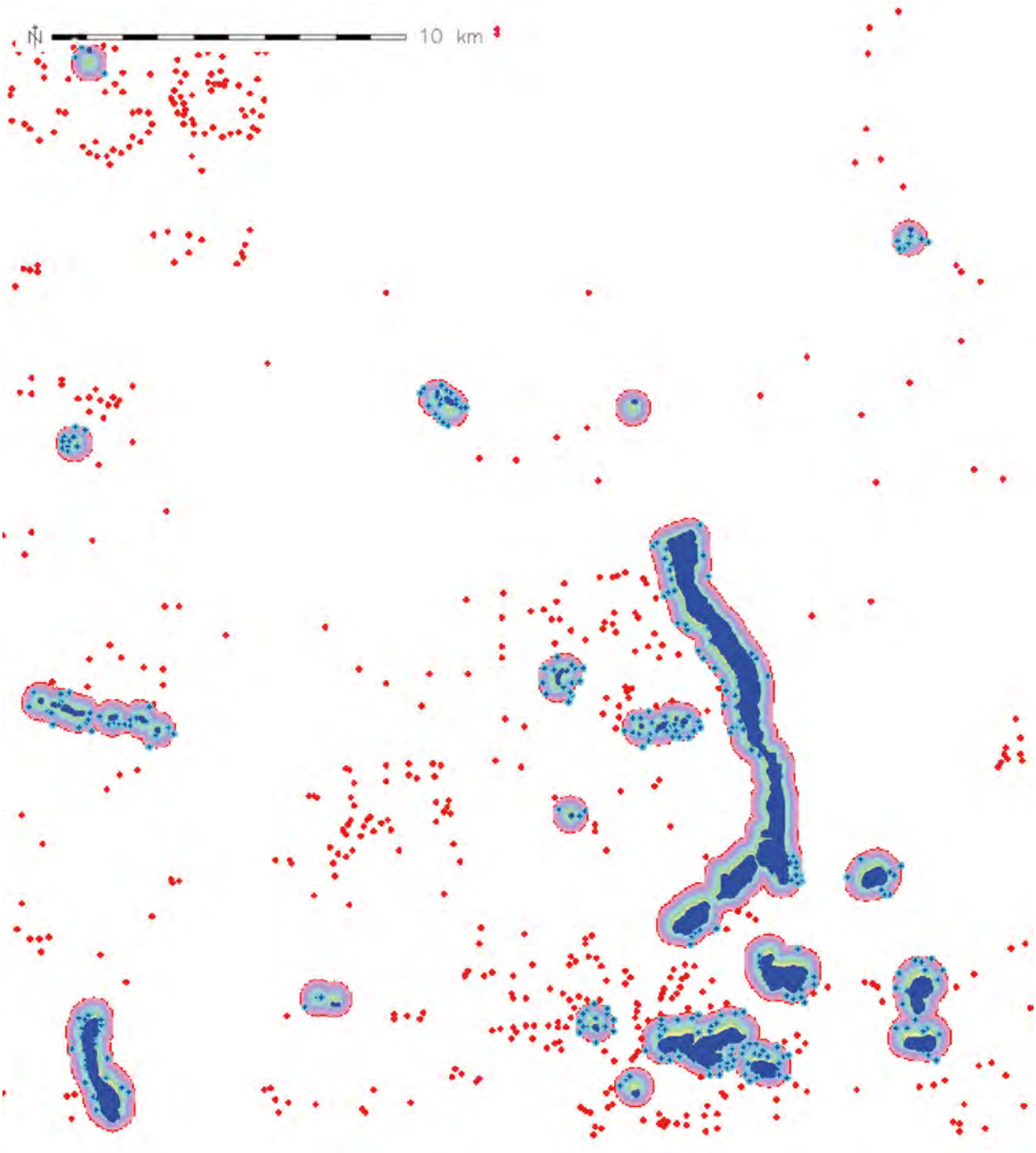
Analizy układów punktowych

Wiele zjawisk, którymi zajmuje się archeologia, jest odnotowywanych w postaci punktów zlokalizowanych w przestrzeni geograficznej. Dotyczy to przede wszystkim pozostałości dawnych procesów osadniczych, ale również rozprzestrzenienia artefaktów, jak określonych typów broni, ozdób czy innych wytworów człowieka. Do badania przestrzennej dystrybucji takich zjawisk służy analiza układów punktowych (ang. *point pattern analysis*). Metoda rozwija się od lat osiemdziesiątych XX w (por. Diggle 1983; Cressie 1992), ale jej pierwsze wdrożenia w badaniach pradziejowych układów osadniczych można znaleźć w pracach De Meo i in. (2000; 2003). Z punktu widzenia przetwarzania zbiorów danych archeologicznych najważniejszą częścią tej grupy metod są analizy gęstościowe, wspomagane przez mniej popularne procedury statystyczne, jak testy typów rozkładów, badanie trendów przestrzennych dystrybucji punktów, analiza autokorelacji przestrzennej czy badania czasowo-przestrzenne (Crema i in., 2017). Osobnym zagadnieniem jest wykrywanie potencjalnych relacji pomiędzy obiektami i tym samym rekonstrukcja dawnych sieci osadniczych i relacji społecznych (Mills 2017).

Analizy gęstościowe (ang. *kernel density estimation*) stosuje się w celu określenia przestrzennej reprezentacji kartograficznej (mapy) intensywności na badanym obszarze występowania określonego zjawiska reprezentowanego punktowo (García-Puchol 2018; Bonnier i in., 2019). Efektem procedury są mapy gęstościowe, które powstają w wyniku zliczenia ilości analizowanych punktów w otoczeniu każdej komórki siatki rastra. Promień przeszukiwania determinowany jest wartością liczbową, dodatkowo waga każdego punktu dla określenia wartości gęstości dla danej komórki jest zależna od odległości i modyfikowana funkcją, najczęściej rozkładu Gaussa (Baddeley i Turner 2005).

Przykładem zastosowania analizy gęstościowej w badaniu zjawisk osadniczych może być badanie intensywności dystrybucji punktów należących do wybranych jednostek chronologicznych (Demján i Dreslerová 2016) w celu wykrywania naturalnych skupień osadniczych. Takie analizy pozwalają rozpoznać skupiska osadnicze oraz określić ich intensywność (Berrey i in., 2015). Dzięki zastosowaniu metody gęstościowej (ryc. 13) wyróżnienie skupiska jest oparte o wartości mierzalne według tych samych kryteriów. Metody analiz gęstościowych pozwalają również na dodanie wag poszczególnym punktom, na przykład duże obiekty osadnicze odgrywają nieporównywalnie większą rolę niż niewielkie osady lub obozowiska (Jasiewicz i Hildebrant-Radke 2011).

Analizy gęstościowe, które niewątpliwie stanowią jądro analiz punktowych, mogą być uzupełnione



Ryc. 12. Przykład wyników złożonego zapytania „pokaż stanowiska archeologiczne z wczesnego średniowiecza na Wysoczyźnie Kościańskiej w odległości 0.5 km od zbiorników wodnych" (niebieskie). Na czerwono zaznaczono stanowiska, które nie spełniły tego kryterium. W tle zaznaczono zasięg zbiorników wodnych i bufor odległości 0.5 km. Źródło danych z publikacji: Jasiewicz, Hildebrandt-Radke (2009)

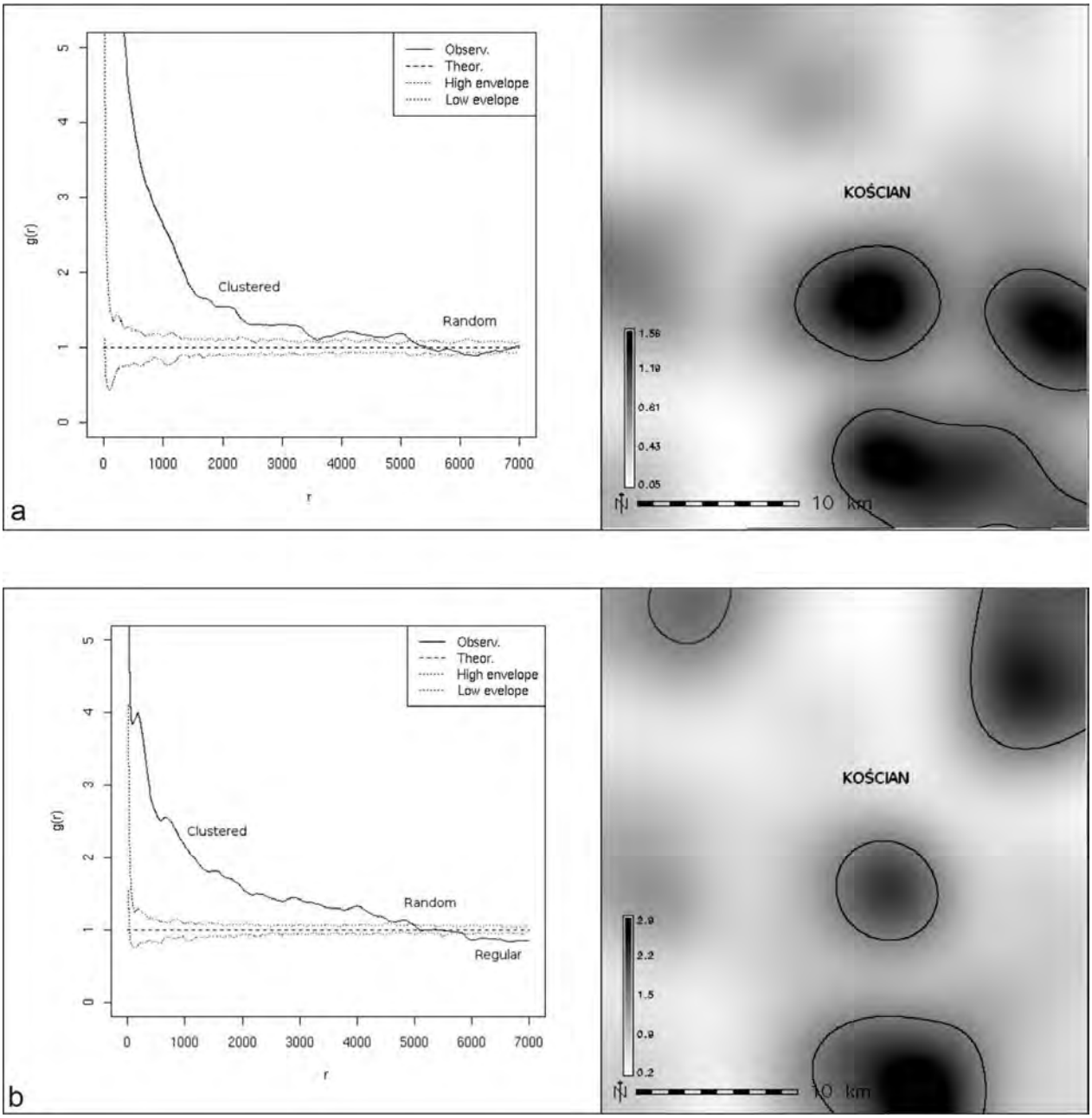
zaawansowanymi narzędziami statystycznymi. Na przykład zjawiska punktowe mogą występować w postaci trzech typów wzorców: rozkładu losowego, regularnego albo w postaci skupień (Baddeley i Turner 2005). Wyróżnianie skupień i interpretowanie ich jako zjawiska osadnicze ma sens jedynie, gdy rozkład punktów ma charakter skupień, to znaczy jest efektem działania w przeszłości naturalnych lub antropogenicznych czynników skupiających (Jasiewicz i Hildebrandt-Radke 2011). Z drugiej strony rozkłady losowe są efektem



Ryc. 13. Grupowanie punktów osadniczych epoki kamienia na obszarze Pojezierza Lubskiego na tle mapy gęstościowej (Jasiewicz 2009). Analiza pokazuje obecność 6 skupień zawierających (oznaczone kolorami) co najmniej 8 stanowisk o wzajemnej odległości min. 1km. Pozostałe obiekty tworzą mniej wyraźne skupienia. Zbiór danych z publikacji: Jasiewicz i Sobkowiak-Tabaka (2015), materiały dydaktyczne autora

procesów naturalnych, które nie są zakłócane żadnym dodatkowym czynnikiem. Tym samym wymuszanie rozpoznawania koncentracji w rozkładzie losowym może prowadzić do nieuzasadnionych wniosków. Rozkłady regularne również nie są efektem naturalnych procesów, a raczej świadomego planowania. Rodzaj rozkładu można określić poprzez testy statystyczne (Cressie 1992; Baddeley i Turner 2005), które nie tylko pozwalają rozpoznać typ rozkładu, ale również umożliwiają określenie zasięgu skupień i wzajemnego oddziaływania punktów na siebie (ryc. 14).

Rozkłady statystyczne punktów mogą być uzupełnione o analizę trendów (Jasiewicz i Hildebrandt-Radke 2011), która pozwala nie tylko na określenie tendencji w zbiorze, czyli trendu do skupiania lub rozpraszania punktów, ale również wskazuje



Ryc. 14. Zaawansowana analiza skupień na obszarze Wysoczyzny Kościańskiej. Analiza obiektów wszesnośredniowiecznych, osad (a) i punktów osadniczych (b). Analiza losowości przestrzennej pokazuje, że osady do 5 km wykazują tendencję do tworzenia skupień, powyżej tej wartości ich rozkład jest losowy. Podobnie punkty osadnicze, wykazują tendencję do tworzenia skupień do 5 km, ale relacje powyżej 6 km wskazują już na układ regularny. Źródło: Jasiewicz i Hildebrandt-Radke 2007, Jasiewicz 2014)

zwrot, czyli kierunek geograficzny natężenia tego trendu. Inną metodą badania skupień jest analiza autokorelacji. Nie dotyczy ona wyłącznie lokalizacji punktów, ale raczej wartości atrybutów tych punktów. Wartości najpopularniejszego wskaźnika Morana (1950) pokazują wysoką korelację przestrzenną, jeżeli są zbliżone do -1 (ujemna) lub +1 (dodatnia). Wartość wskaźnika zbliżona do 0 wskazuje na brak autokorelacji przestrzennej i losowy rozkład wartości cechy.

Przykładami skutecznego zastosowania analiz punktowych są prace Hoddera i Ortona (1976) do badania przestrzennego podobieństwa wskaźnika długości/szerokości ostrz włóczni. Rewolucyjnych wyników dostarczyły badania Kvamme (1990), który przeanalizował rozmieszczenie datowanych

stanowisk ze schyłku okresu klasycznego rozwoju kultury Majów. Ujawnione zmiany użytkowania niektórych typów ceramiki ze scentralizowanego na rozproszony przy przejściu ze schyłkowego okresu klasycznego do okresu postklasycznego pozwoliły na postawienie nowych hipotez dotyczących upadku klasycznej cywilizacji Majów (Aimers 2007).

Podstawowe analizy gęstościowe dostępne są w większości systemów informacji geograficznej, natomiast testy statystyczne i analizy trendów bardziej dostępne są w specjalistycznych pakietach, jak na przykład spatstat dla języka R czy pointpats (część pakietu PySAL) dla języka Python.

Analiza widoczności

Analiza widoczności (ang. *analysis of visiblility*) jest jedną z metod badań percepcji otoczenia. W zastosowaniach archeologicznych koncentruje się na percepcji krajobrazu (Conolly 2016), a jej wyniki mogą stanowić ważne dane do badań społecznej roli i związków pomiędzy obiektami różnego typu (por. Madry i Rakos 1996; Richards 1998; Rączkowski 2008; Marsh i Schreiber 2015; Brughmans i Brandes 2017). Analizę widoczności wykonuje się dla danych rastrowych, a podstawową informacją używaną w badaniach widoczności jest cyfrowy model wysokościowy. Należy jednak zaznaczyć, że cyfrowe modele powierzchni, a więc zawierające współczesną zabudowę i pokrywę roślinną z reguły nie odpowiadają przeszłości. Dlatego modele wysokościowe do takich badań wymagają uwzględnienia rozkładu szaty roślinnej w przeszłości oraz wysokości dawnej zabudowy (Malaperdas 2021).

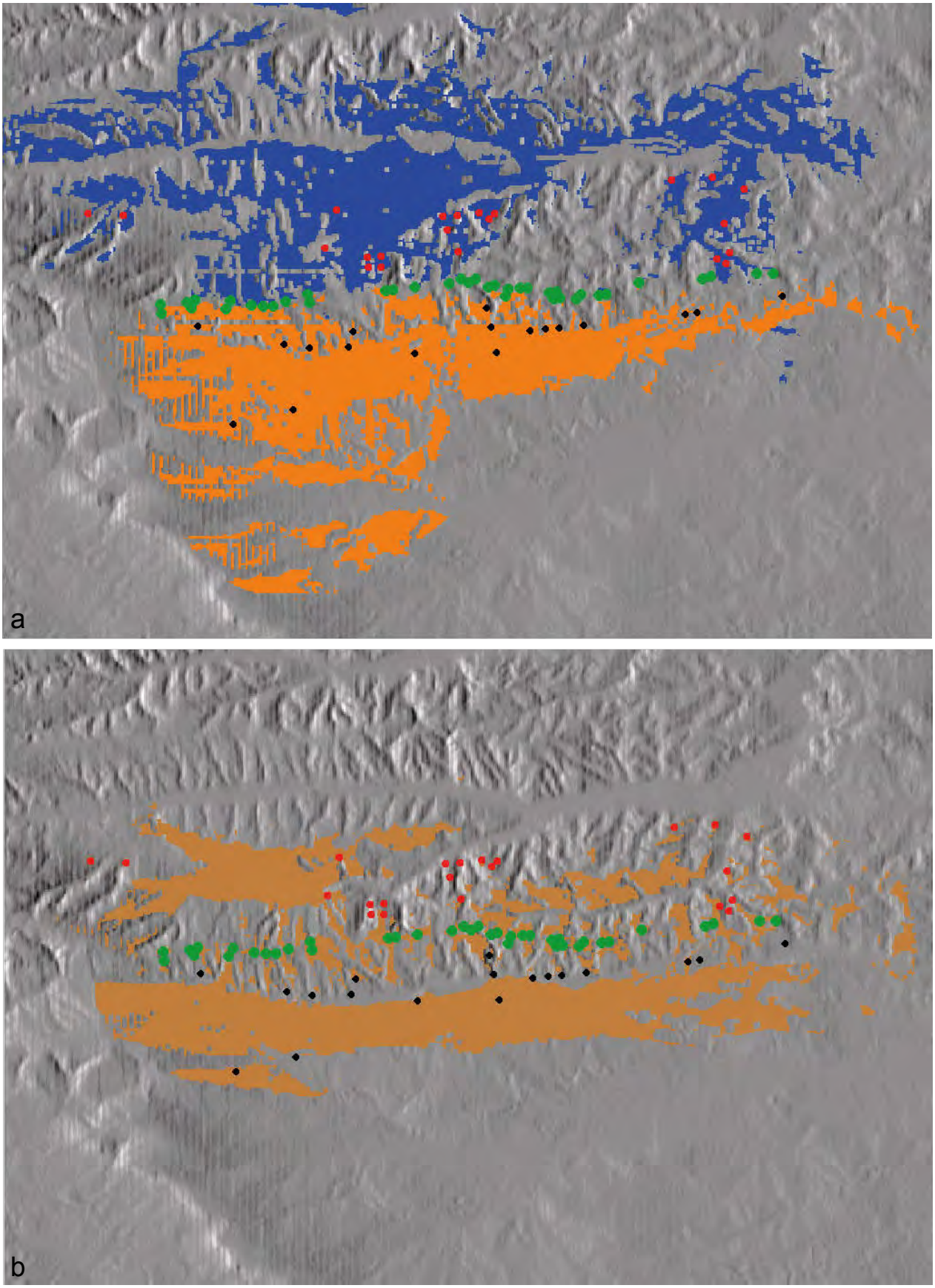
Podstawowa analiza obejmuje linię widoczności (ang. *line of sight*). Z dowolnego punktu położonego na powierzchni terenu lub na dowolnej wysokości ponad tym terenem, określanego jako obserwator, bada się widoczność innego punktu. Jeżeli linia łącząca te dwa punkty w przestrzeni 3D (a więc również z uwzględnieniem wysokości) w żadnym miejscu nie przecina się z powierzchnią terenu, oznacza to, że oba punkty są wzajemnie widoczne. Pomiar widoczności można rozszerzyć do koncepcji pokrycia widoczności (ang. *viewshed*), czyli wskazania komórek rastra (w pewnym zasięgu), które są widoczne z danego punktu i wykluczenia tych, które widoczne nie są, lub odwrotnie, jako obszar, z którego dany punkt jest widoczny (ryc. 15). Bardziej zaawansowaną metodą jest skumulowany obszar widoczności, obejmujący widoczność zarówno z zespołów punków, jak i widoczność tych obszarów w otoczeniu (Ruggles i in., 1993; Gaffeney i in., 1995; Wheatley 1995; 1996; Kuna i in., 2022).

Analiza widoczności dostępna jest w większości popularnych systemów informacji geograficznej, a w badaniach archeologicznych wykorzystywana jest do badania roli lokalizacji wybranych obiektów historycznych. Wyniki analizy widoczności są również stosowane jako zmienne w analizach wielozmiennych i modelowaniu predykcyjnym (Stančič i Kvamme 1999; Conolly 2016; Davies i in., 2019; Verhagen i in., 2019).

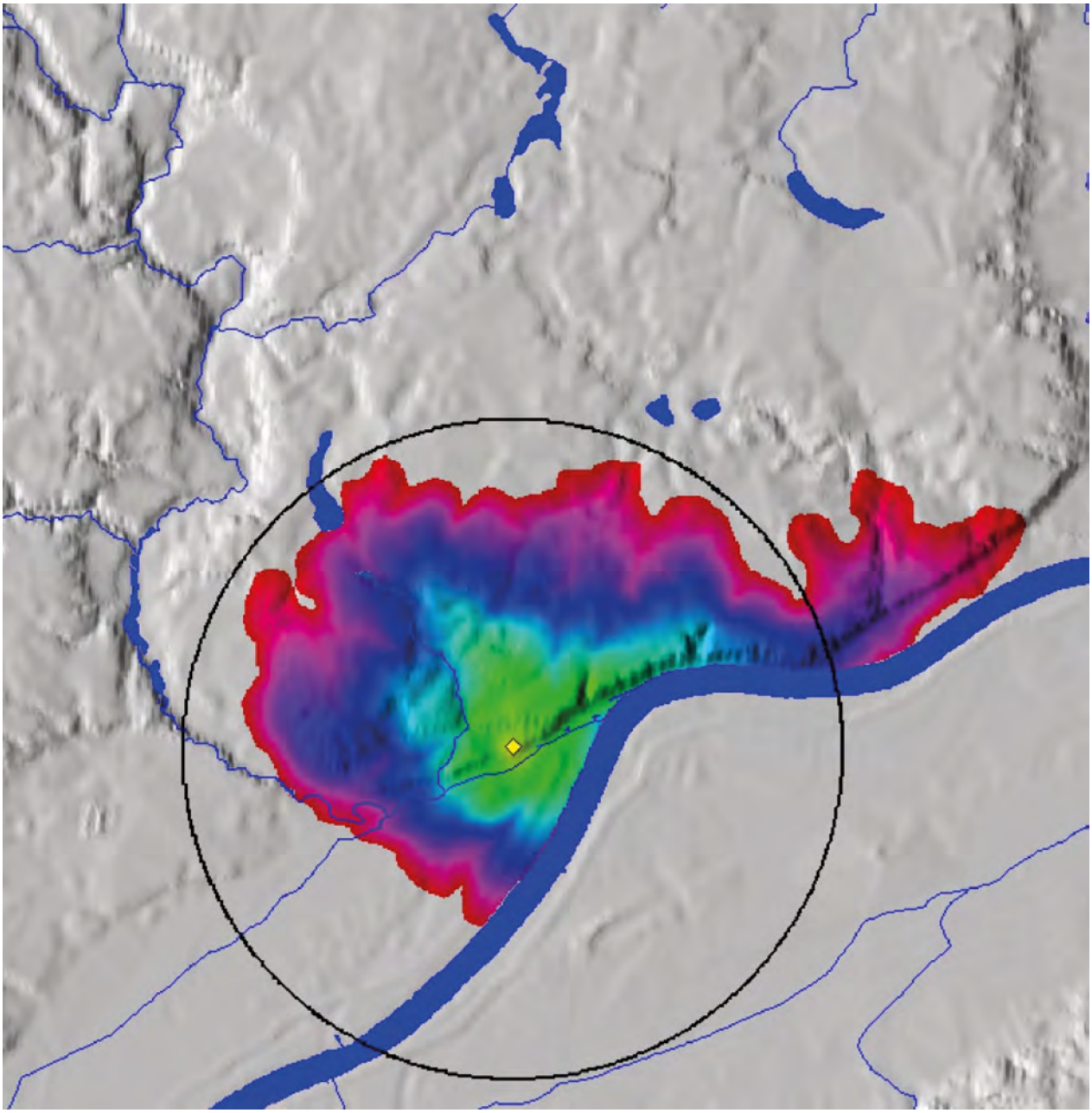
Analizy kosztu przemieszczania się

Analiza kosztu przemieszczania się i powiązana z tym optymalizacja tras jest jedną z bardziej popularnych analiz geoinformacyjnych. Podstawą analizy jest cyfrowy model wysokościowy, uzupełniony parametrem tarcia, które służy do uwzględnienia zwiększonych kosztów przejścia dla różnego pokrycia terenu, eliminowania pewnych obszarów, np. zbiorników wodnych, czy wprowadzania barier, np. rzek lub skarp. Podstawą analizy jest koszt przejścia przez daną komórkę z uwzględnieniem lokalnych różnic wysokości (w skali komórki) modyfikowanej parametrem tarcia (Langmuir 1984). Parametr tarcia jest czynnikiem złożonym. Tarcie, czyli opór terenu stawiany przejściu, może mieć różne przyczyny, co więcej, ten sam czynnik może mieć różne wartości w zależności od środka przemieszczania się. W przypadku transportu środkiem pływającym siła tarcia będzie uzależniona od kierunku nurtu rzeki, bagna będą stawiały umiarkowany opór, natomiast obszar lądowy będzie czynnikiem blokującym (nieskończone tarcie). Odwrotnie, w przypadku transportu lądowego, rolę blokad będą pełniły zbiorniki wodne, a bagna będą stawiały znaczący opór. W badaniach archeologicznych analizę kosztu przemieszczania wykorzystuje się do oceny zasięgu wpływu osad jako alternatywę dla metody ekwidystanty, czyli linii na mapie łączącej punkty znajdujące się w takiej samej odległości od obiektu, oraz do symulowania dawnych szlaków migracji.

Analiza kosztów przemieszczania poprzez zdefiniowanie obszaru wykorzystywanego ekonomicznie Limp (1991) się jest alternatywą dla wyznaczanie zasięgu osady prostą metodą ekwidystanty, zakładającej, że wpływ ośrodka jest taki sam we wszystkich



Ryc. 15. Analiza widoczności pokazująca wzajemną skumulowaną widoczność (a) szczytów kurhanów znajdujących się na Grzędzie Sokalskiej (zielone punkty) z osad znajdujących się poniżej (czerwone i czarne punkty) oraz osad z kurhanów. Analiza pokazuje, że o ile szczyty kurhanów były widoczne z osad (b) to same osady nie były widoczne z podstawy kurhanów. Możliwe implikacje osady tak lokalizowano, aby widzieć kurhany, ale nie być z nich widocznym (Wheatley 1995, 1996, Kuna i in. 2022). Źródło: Jasiewicz i Makohonienko, niepublikowane



Ryc. 16. Wyznaczenie potencjalnego obszaru oddziaływania jednej z możliwych lokalizacji grodu późnośredniowiecznego w Świeciu nad Wisłą, w porównaniu z izometrycznym zasięgiem promienia 5 km (metoda ekwidystanty). Obszar oddziaływania został wyznaczony na podstawie mapy kosztu zbudowanej na podstawie Cyfrowego Modelu wysokościowego i rozkładu zbiorników wodnych (Jasiewicz 2009)

kierunkach. Takie podejście pozwala odrzucić izotropowy model oddziaływania (Van Leusen 1993) i uwzględnić przy wyznaczaniu zakresu oddziaływania koszt poruszania się po terenie (ryc. 16), co zastosowali na przykład Gaffney i in. (1996), wykorzystując metody obliczania czasu przejścia do wyznaczenia zasięgu kontroli otaczających osad rolniczych przez forty epoki żelaza na wyspie Hvar.

Wyznaczanie potencjalnych tras przemieszczania się

Potencjalna trasa przemieszczania to linia wyznaczająca najniższy skumulowany koszt przejścia pomiędzy punktem startowym a docelowym. Wyznaczanie tej linii odbywa się w dwóch etapach. W pierwszym etapie tworzona jest mapa skumulowanego kosztu

przemieszczenia się od punktu startowego we wszystkich kierunkach, podobnie jak w przypadku wyznaczania obszaru oddziaływania osady. W drugim etapie wyznaczany jest punkt docelowy i na tej podstawie wyliczany jest szlak przebiegający drogą o najniższym skumulowanym koszcie przemieszczania się.

W dużej skali, rzędu setek lub tysięcy kilometrów, posługiwanie się modelem wysokościowym, szczególnie o niskiej rozdzielczości, modyfikowanym parametrem tarcia, nie ma większego sensu. W takich zadaniach stosujemy jedynie mapy względnego kosztu przemieszczania się. Względność oznacza, że jest to liczba niemianowana i określa jedynie. ile razy trudniej (lub łatwiej) przemieszcza się po terenie względem obszaru, dla którego koszt przemieszczania wynosi 1. Koszt jest określany na podstawie wielu czynników analizowanych w skali przekraczającej zasięg pojedynczej komórki, na przykład teren płaski, teren monotonnie nachylony, teren pagórkowaty (zróżnicowany). Specyficzną rolę będą pełniły urwiska, skarpy, rozpadliny, dla których koszt będzie znacznie większy niż wynikałoby to z lokalnych różnic wysokości na modelu wysokościowym. Kolejnym czynnikiem jest rodzaj pokrycia terenu, a w przypadku analiz archeologicznych – rekonstrukcja potencjalnego pokrycia terenu. Szczególną rolę odgrywa sieć rzeczna i rozkład zbiorników wodnych. Teren zalesiony będzie wykazywał znacznie większy opór niż teren otwarty. Nie bez znaczenia jest informacja o podłożu geologicznym i rodzaju gleb, jako potencjalnym źródle informacji o twardości szlaków.

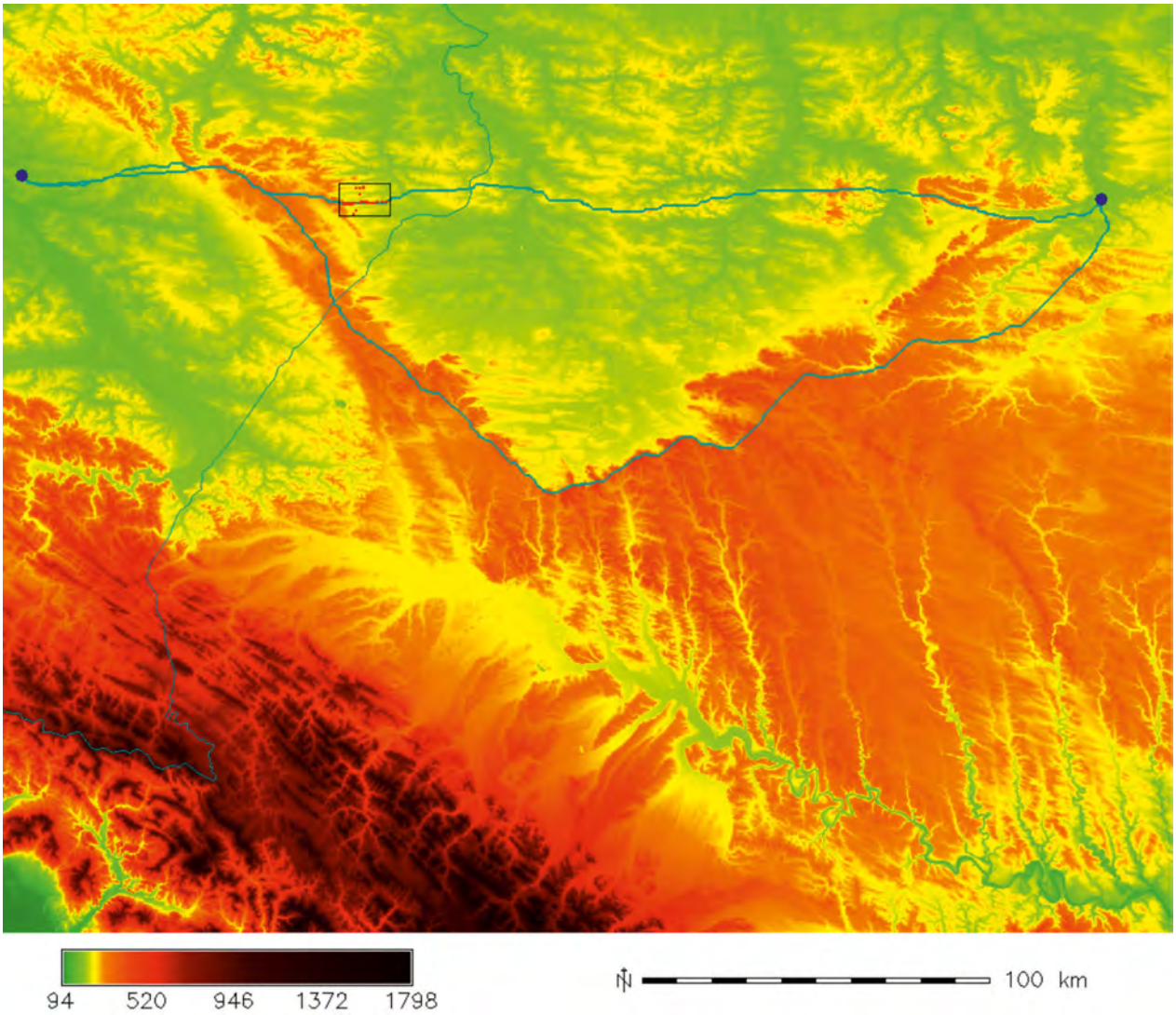
Nie ma uniwersalnej metody wyznaczania składowych kosztów dla poszczególnych obszarów i ich roli, zwłaszcza w kontekście stosowanych środków transportu. Inne ograniczenia będą dotyczyły grupy wojowników poruszających się pieszo, inne grupy konnej, inne migracji plemienia przy pomocy licznych pojazdów ciągnionych. Nie jest dostępna szczegółowa informacja o dawnym pokryciu terenu, a wykonywane rekonstrukcje mają charakter przybliżony (Herzog 2016). Poważnym mankamentem jest brak kompletnej informacji na temat lokalizacji dawnych brodów i przepraw. Obecność niezidentyfikowanego brodu może znacząco zmieniać realia transportowe. Dodatkowo sytuację komplikuje fakt, że proces wielkoobszarowych migracji był modyfikowany różnymi trudno uchwytnymi ograniczeniami, jak poczucie bezpieczeństwa, wierzenia, zwyczaje. Wpływ na koszt przemieszczania ma również pora roku (ryc. 17). Kolejnym kryterium jest obecność trwałych punktów osadniczych lub militarnych oraz czynniki polityczne, relacje pomiędzy ludnością osiadłą a przybyszami. Wszystkie tego typu ograniczenia powodują, że metody wyznaczania dawnych szlaków przemieszczania się mają charakter ułomny i powinny być raczej traktowane jako narzędzie pomocne do stawiania hipotez, a nie do udzielania wiarygodnych odpowiedzi.

Opracowanie mapy kosztu przemieszczenia, która następnie posłuży do wyznaczenia potencjalnych szlaków migracji, wymaga następujących czynności (Jasiewicz 2009; Jasiewicz i Makohonienko 2009):

- identyfikacja czynników mających potencjalny wpływ na proces przemieszczania się grup ludzkich dla badanego modelu kulturowego,
- przedstawienie poszczególnych czynników w postaci map (warstw informacyjnych GIS),
- reklasyfikacja map (zamiana wartości czynnika na określoną liczbę oznaczającą względny koszt przemieszczania się),
- przypisanie wag (określenie roli poszczególnych czynników w globalnym koszcie przemieszczania się),
- wykonanie operacji nakładania z uwzględnieniem wag (roli) poszczególnych składowych, która pozwoli wyznaczyć sumaryczny koszt przemieszczania się po danym terenie,
- znalezienie linii najmniejszego kosztu z punktu A do B.

Modelowanie predykcyjne

Przedstawione do tej pory metody analityczne mogą być stosowane przy pomocy procedur wbudowanych w dedykowane oprogramowanie systemów informacji geograficznej. Ich rozwinięciem są analizy wielozmienne lub modelowanie wielokryterialne. Pod względem sposobu tworzenia takich modeli dzielą się one na dwie grupy: heurystyczne, określane jako dedukcyjne, oraz empiryczne, zwane również indukcyjnymi. Modele dedukcyjne wykorzystują istniejącą teorię na temat mechanizmów kształtujących przestrzenny rozkład badanego zjawiska, na przykład obiektów osadniczych, a następnie wykorzystują modele oparte o procedury analiz geoinformacyjnych do budowania map preferencji osadniczych. Modele indukcyjne, określane też jako modele korelacyjne lub empiryczne, są bardziej złożone, wkraczają poza standardowe systemy GIS i bazują na wiedzy z zakresu zaawansowanej statystyki i metod uczenia maszynowego (Caracausi i in., 2018). Pod względem



Ryc. 17. Porównanie dwóch potencjalnych szlaków komunikacyjnych, wyznaczonych na podstawie odmiennych map kosztów. Szlak północny, został wymodelowany przy założeniu, że rzeki są przekraczalne. Drugi szlak, południowy, zakłada że rzeki stanowią nieprzekraczalną barierę. Nałożenie obu szlaków na przebieg kurhanów na Grzędzie Sokalskiej (por. ryc. 14) pokazuje, że mogła to być część linii migracyjnej, dla której cieki wodne nie stanowiły istotnej przeszkody. Źródło: Jasiewicz i Makohonienko (2009)

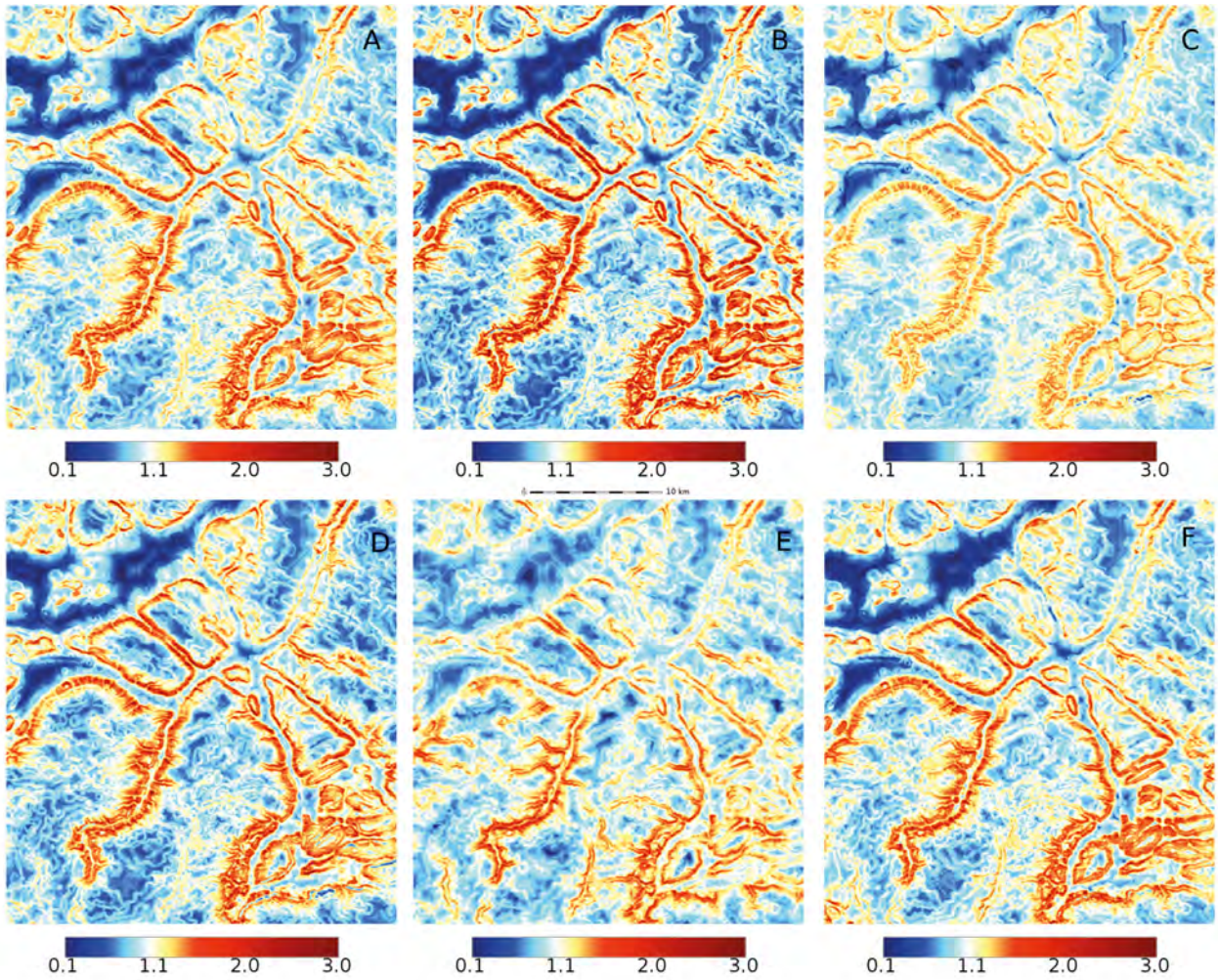
technicznym wymagają użycia zaawansowanych narzędzi analitycznych, jak język R czy numeryczne rozszerzenia języka Python.

Przykładem modeli dedukcyjnych są analizy lub bardziej precyzyjnie modele wielozmienne. Jest to ogólna nazwa obejmująca grupę analiz wywodzących się z klasycznych badań preferencji osadniczych zapoczątkowanych w latach 50. XX wieku (Willey 1953) i polegających na definiowaniu zależności pomiędzy przyrodniczymi i pozaprzyrodniczymi czynnikami wpływającymi na proces osadniczy a rozmieszczeniem obiektów osadniczych w przestrzeni geograficznej (Brodkin 1999; Barcelo 2002). Założeniem takich modeli jest istnienie związków pomiędzy cechami przyrodniczymi a modelem rozwoju osadnictwa (Van Leusen 1995). Budowa modeli dedukcyjnych wynika z wiedzy badacza uzupełnionych o reguły zdroworozsądkowe (tak zwane heurystyki), a wyniki działania modeli są testowane przy pomocy danych archeologicznych pozyskanych w trakcie badań terenowych. Tym samym ocena jakości modelu to funkcja zgodności wyniku z zebranymi danymi.

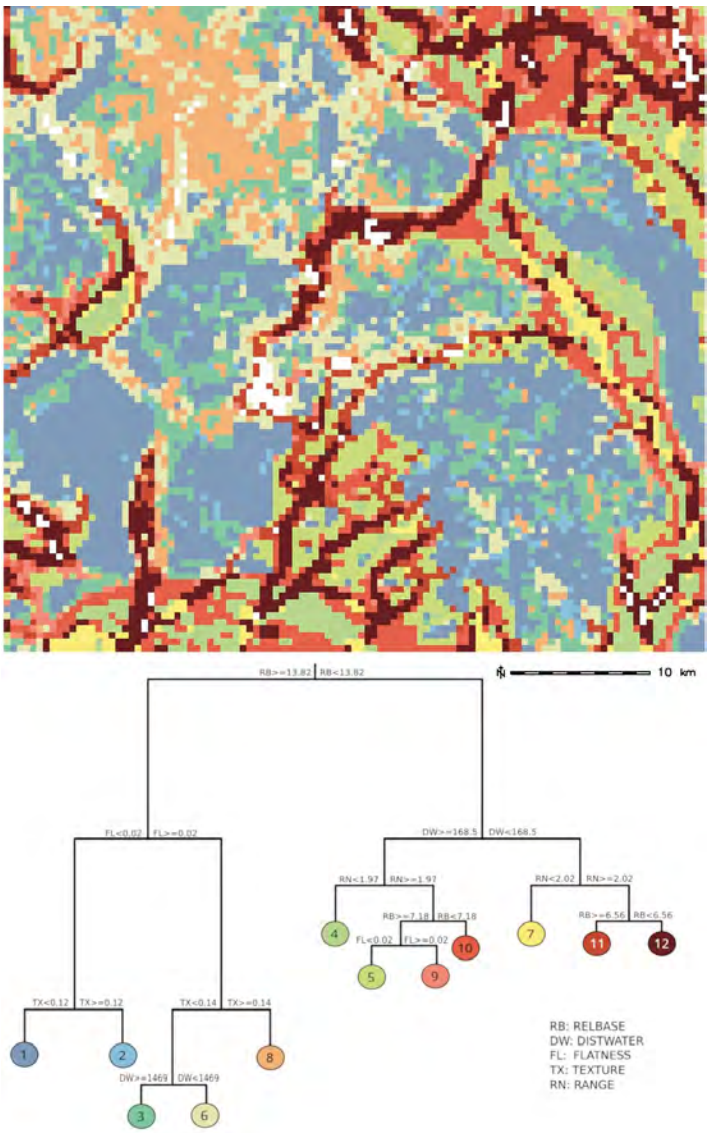
Podstawą budowania modeli indukcyjnych jest określenie relacji pomiędzy zmiennymi geoprzestrzennymi. Ten rodzaj analiz utożsamiany jest z modelowaniem predykcyjnym (ang. *predictive modeling* – Kvamme 2005; Kempf 2019). Proces

modelowania wykorzystuje algorytmy uczenia maszynowego (Yaworsky i in., 2018) i podział informacji (zmiennych) na dwie grupy: zmienne niezależne albo wyjaśniające oraz zmienne zależne albo wyjaśniane. Budowanie modelu to poszukiwanie statystycznych zależności pomiędzy zmiennymi niezależnymi a zmienną zależną. Funkcję zmiennych wyjaśniających mogą pełnić dowolne warstwy geoprzestrzenne, zarówno te traktowane jako „pierwotne", na przykład cyfrowy model wysokościowy czy układ sieci rzecznej, jak i „wtórne", będące efektem zastosowanych analiz na innych danych, na przykład mapa spadków terenu czy wyniki analizy widoczności. Najczęściej są to dane rastrowe, a w przypadku danych wektorowych dokonywana jest konwersja do modelu rastrowego.

Zmienne wyjaśniające powinny pokrywać cały obszar analizy, to znaczy dla każdego punktu powinna być znana jej wartość, chyba że nie ma ona sensu przyrodniczego, na przykład nachylenie terenu na obszarze zajętym przez zbiornik wodny. Zmienne wyjaśniane, jak na przykład informacja o obecności zabytków archeologicznych, nie muszą i z reguły nie mają pełnego pokrycia, a ich wartość jest znana jedynie w miejscach, dla których pozyskano niezbędne dane poprzez badania powierzchniowe czy wykopaliskowe. Natomiast na obszarach, gdzie badań nie prowadzono, informacja o rozmieszczeniu zabytków nie jest



Ryc. 18. Wyniki preferencji osadniczych na obszarze Wysoczyzny Kościańskiej zrealizowanej metodą addytywnego nakładania kolejnych warstw informacji geograficznej: A) Neolit (Głównie KPL), B) Wczesna Epoka Brązu, C) Epoka żelaza (Kultura łużycka), D) Epoka Żelaza (Okres wpływów rzymskich), E) wczesne średniowiecze, F) Późne średniowiecze. Kolory oznaczają potencjalne zainteresowanie osadnictwem: od minimalnego (kolor niebieski) do maksymalnego (czerwony). Widoczna dynamika zmian poprzez wzrost lub spadek zainteresowania osadnictwem na stokach dolin rzecznych. Źródło: Jasiewicz i Hildebrandt-Radke 2009



Ryc. 19. Przykład zastosowania interpretacyjnego uczenia maszynowego. Algorytm drzew decyzyjnych (poniżej) został wytrenowany w taki sposób aby przewidywać preferencje osadnicze jako wartość od bliskich 0 (ciemnoniebieskie) do bliskich 1 (ciemnobrązowe). Następnie struktura modelu, na podstawie zmiennych wyjaśniających została rzutowana na obszar badań. W efekcie obraz kartograficzny jest wyjaśniany strukturą algorytmu uczenia maszynowego, a konkretnie decyzjami podejmowanymi na każdym kroku budowania modelu

znana. Otrzymany model pozwala na przewidywanie, czyli predykcję zjawiska – tu prawdopodobieństwa występowania zabytków archeologicznych określonego typu na obszarach, dla których takich badań nie przeprowadzono. Ten rodzaj podejścia ma jednak ograniczone zastosowanie, głównie w ochronie dziedzictwa kulturowego, poprzez ocenę potencjału występowania zabytków archeologicznych i tym samym stopnia zagrożenia na obszarach, dla których nie przeprowadzono żadnych badań. W przypadku badań obejmujących zabytki z kilku okresów archeologicznych możliwe jest również tworzenie analiz czasowo-przestrzennych, pokazujących zmiany osadnictwa w czasie i interpretację dynamiki procesów osadniczych (ryc. 18).

Podejście predykcyjne ma ograniczoną wartość. Pozwala wprawdzie tworzyć mapy potencjalnej intensywności osadniczej (Kvamme 1989, 1990, 2005; Warren 1990; Westcott i Brandon 2000), ale jeżeli wykorzystane algorytmy prowadzą do budowy tzw. modeli czarnej skrzynki (Kempf 2019), oznacza to, że relacje pomiędzy zmiennymi wyjaśniającymi i wyjaśnianymi nie są znane, a przynajmniej nie są interpretowalne dla człowieka. Dodatkowo w archeologii

modele budowane są z reguły na małych zbiorach danych (Bickler 2021) i w efekcie obciążone dużą niepewnością. Podejście czarnej skrzynki jest jednak regresem w stosunku do modeli dedukcyjnych, gdyż nie dostarczają nam one informacji o procesach stojących za takim, a nie innym wynikiem działania modelu. Dużo ważniejszą rolę w badaniach archeologicznych pełni możliwość budowania modeli pozwalających na interpretację relacji pomiędzy zmiennymi wyjaśniającymi a zmienną wyjaśnianą (Jasiewicz i Hildebrandt-Radke 2009; Jasiewicz i Sobkowiak-Tabaka 2015; Wachtel in., 2018).

Modele interpretowane to takie, których struktura wewnętrzna jest jawna i może być przedstawiona w postaci listy parametrów (na przykład współczynników regresji, wag czy miejsc podziału zbioru) opisujących zachowanie się algorytmu w trakcie procesu predykcji. Lista bezpośrednio interpretowalnych algorytmów uczenia maszynowego jest ograniczona do zaledwie kilku: metod addytywnych, drzew decyzyjno-regresyjnych czy regresji wielorakiej. Sam proces budowy takich modeli wymaga w pierwszej kolejności zbudowania geoprzestrzennej bazy danych integrującej warstwy opisujące wszystkie czynniki przyrodnicze i pozaprzyrodnicze o potencjalnym wpływie na przestrzenną dystrybucję badanego zjawiska (na przykład osadnictwa) oraz warstwy zawierającej modelowane zjawisko, w tym przypadku dystrybucję stanowisk archeologicznych na danym terenie.

W przypadku modeli addytywnych pierwszym krokiem jest zbudowanie cząstkowych relacji pomiędzy wszystkimi zmiennymi wyjaśniającymi, takimi jak nachylenie terenu, widoczność miejsca, odległość od zbiorników wodnych czy szlaków komunikacyjnych modelowaną zmienną zależną. Tak wykonane relacje cząstkowe są następnie dodawane do siebie z wagami odpowiadającymi realnemu wpływowi poszczególnych zmiennych (Jasiewicz i Hildebrandt-Radke 2009). W ten sposób można badać również relacje czasowo-przestrzenne, analizując relacje cząstkowe zmiennych dla każdego okresu w pradziejach, a następnie badając zmienność intensywności osadniczej (ryc. 18) w czasie i przestrzeni (Jasiewicz i Hildebrandt-Radke 2009). Proces wyjaśniania roli poszczególnych czynników jest jawny i odbywa się tu na etapie badania relacji cząstkowych oraz ustalania ich wag, przed procedurą ważonego nakładania.

Modele wyjaśniające stanowią bardziej zaawansowane narzędzia analityczne i charakteryzują się inną strukturą oraz wymagają wiedzy na temat algorytmów uczenia maszynowego. Po zbudowaniu mapy intensywności osadniczej wybraną metodą, na przykład przy pomocy dowolnego algorytmu uczenia maszynowego (Mackenzie 2017; Wachtel 2018; Yaworsky 2020), modelujemy ją przy pomocy algorytmu drzewa regresyjnego aż do uzyskania optymalnej liczby węzłów (Jasiewicz i Sobkowiak-Tabaka 2015), zachowując balans pomiędzy złożonością modelu, a prostotą wyjaśniania. Każdy z liści, czyli końcowych węzłów drzewa, zawiera wszystkie komórki rastra, w których wartość jest podobna i wyjaśniana w podobny sposób (ryc. 19B). Proces wyjaśniania odbywa się poprzez analizę ścieżki prowadzącej od początku drzewa do jego liścia, która na podstawie podziałów opisuje charakterystykę terenu, powiązaną z odpowiadającą jej intensywnością osadnictwa (Jasiewicz i Sobkowiak-Tabaka 2015). Następnie wszystkie węzły są przypisywane do właściwych komórek rastra, tworząc mapę ujawniającą rozkład przestrzenny preferencji osadniczych (ryc. 19A). Szczegółowy opis konstrukcji algorytmów modelowania predykcyjnego i ich interpretacji znajduje się w cytowanych pracach.

PODSUMOWANIE

W niniejszej pracy przedstawiono zagadnienia związane z wykorzystaniem Systemów Informacji Geograficznej w badaniach archeologicznych ze szczególnym uwzględnieniem przygotowania danych i prowadzenia analiz geoprzestrzennych. Z punktu widzenia archeologa istotne są kwestie związane z przygotowaniem zbiorów danych, uwzględniających złożoność a także niejednoznaczność i hierarchiczność chronologii danych archeologicznych. W opracowaniu skoncentrowano się na opisie struktury danych geoprzestrzennych oraz procesie przekształcenia danych w formie analogowej do formatu cyfrowego, umieszczonego we właściwym układzie odniesienia przestrzennego. Złożoność analiz geoprzestrzennych oraz wielokierunkowe możliwości zastosowania w badaniach archeologicznych zostały przedstawione w sposób skrócony, przede wszystkim uwypuklając aspekt praktyczny. W rozdziale pominięto zagadnienia z zakresu teledetekcji, które stanowią osobny nurt badań, wzmocniony coraz powszechniejszym zastosowaniem dronów i skaningu laserowego.

Przestrzenny składnik dokumentacji archeologicznej – od poziomu wykopu do krajowych baz

danych zabytków archeologicznych – powoduje, że Systemy Informacji Geograficznej nie są traktowane już jako zewnętrzna metoda, ale stają się standardowym składnikiem wykształcenia archeologa. Wraz z postępującą cyfryzacją procesu dokumentacyjnego rola Systemów GIS w archeologii będzie wzrastać, a wraz z nią rola analiz numerycznych w procesie wnioskowania o różnych procesach pradziejowych. Precyzyjna lokalizacja w przestrzeni geograficznej jest również ważnym komponentem budowania rekonstrukcji wirtualnych obiektów pradziejowych. Wraz z rozwojem technik 3D i silników czasu rzeczywistego wzrastać będzie rola cyfrowych danych archeologicznych nie tylko w świecie nauki, ale również w sferze popularnej, w tym w grach komputerowych.

LITERATURA

Aimers, J. J. 2007. What Maya collapse? Terminal classic cariation in the Maya Lowlands. *Journal of Archaeological Research* 15: 329–377.

Aldenderfer, M. 1987. Assessing the impact of quantitative thinking on archaeological research: Historical and evolutionary insights, (w:) M. Aldenderfer (red.), *Quantitative Research in Archaeology: Progress and Prospects,* Sage, Newbury Park, CA, 9–29.

Aldenderfer, M., Maschner, H.D. (red.), 1996. *Anthropology, space, and geographic information systems*. Oxford.

Allen, K.M., Green, S.W., Zubrow, E.B. 1990. *Interpreting space: GIS and archaeology*. Taylor & Francis. London and New York.

Arnold, D., Neff, H., Bishop, R. 1991. Compositional analysis and "sources" of pottery: An ethnoarchaeological approach. *American Anthropologist* 93: 70–90.

Averett, E.W., Gordon, J.M., Counts, D.B. 2016. *Mobilizing the past for a digital future: the potential of digital archaeology*. Grand Forks, ND. Banaszek, Ł., 2014. Lotniczy skaning laserowy w polskiej archeologii. Czy w pełni wykorzystywany jest potencjał prospekcyjny metody?. *Folia Praehistorica Posnaniensia* 19: 207–251.

Baxter, M.J. 2015. *Exploratory multivariate analysis in archaeology*. ISD LLC.

Berrey, C.A., Drennan, R.D., Peterson, C.E. 2015. *Regional settlement demography in archaeology*. ISD LLC.

Bickler, S.H. 2021. Machine learning arrives in archaeology. *Advances in Archaeological Practice* 9(2): 186–191.

Bitelli, G. 2012. Remote sensing and integration with other geomatic techniques in archaeology, (w:) R. Lasaponara, N. Masini (red.), *Satellite remote sensing: A new tool for archaeology.* Berlin, 113–127.

Bonnier, A., Finné, M., Weiberg, E. 2019. Examining land-use through GIS-based kernel density estimation: A re-evaluation of legacy data from the berbati-limnes survey. *Journal of Field Archaeology* 44(2): 70–83.

Brughmans, T., Brandes, U. 2017. Visibility network patterns and methods for studying visual relational phenomena in archeology. *Frontiers in Digital Humanities* 4: 17.

Bryk, M., Chyla, J.M. 2014. Zastosowanie technologii GIS w lokalizacji stanowisk archeologicznych podczas prospekcji terenowej. *Roczniki Geomatyki* 12(1): 19–29.

Buckland, P. 1973. An Experiment in the Use of a Computer for On-site Recording of Finds. *Science and Archaeology* 9: 22–24.

Buckland, P.I., Nyqvist, R., Alexander, B., Palsson, G. and Eriksson, S. 2018. The Swedish Transport Administration's Toolbox and its Potential in Archaeological and Cultural Heritage Survey: Including a brief review of remote sensing, prospection and geodata analysis methods for archaeology and cultural heritage. *Raport*. Environmental Archaeology Lab, Umeå. Bujno, H., Pluto-Kossakowska, J., Kopiasz, J. 2018. Baza danych przestrzennych dla potrzeb badań Muzeum Archeologicznego w Biskupinie. *Roczniki Geomatyki* 16(3): 199–217.

Capra, A., Gandolfi, S., Laurencich, L., Mancini, F., Minelli, A., Orsini, C., Rodríguez, A. 2002. Multidisciplinary approach for archeological survey: exploring GPS method in landscape archeology studies. J*ournal of Cultural Heritage* 3(2): 93–99.

Caracausi, S., Berruti, G.L., Daffara, S., Bertè, D., Borel, F.R. 2018. Use of a GIS predictive model for the identification of high altitude prehistoric human frequentations. Results of the Sessera valley project (Piedmont, Italy). *Quaternary International* 490:10–20.

Carlson, D.L. 2018. Statistics in archaeology. *The Encyclopedia of Archaeological Sciences*, 1–5.

Chałka, K., Olszewski, R., Zieliński, J. 2011. Bazy Danych Obiektów Topograficznych i Ogólnogeograficznych-zakres merytoryczny i techniczny opracowywanego projektu rozporządzenia MSWIA. *Roczniki Geomatyki-Annals of Geomatics* 9(6): 98–102.

Conolly, J. 2016. Geographical information systems and landscape archaeology, (w:) David, B., Tomas. J. (red.), H*andbook of landscape archaeology.* Routledgep, 583–595.

Crema, E.R., Bevan, A. and Shennan, S. 2017. Spatio-temporal approaches to archaeological radiocarbon dates. *Journal of Archaeological Science* 87: 1–9

Cressie, N.A.C. 1991. *Statistics for spatial data*. New York, Chichester, Toronto, Brisbane, Singapore.

Daly, P., Evans, T.L. 2004. *Digital archaeology: bridging method and theory*. Routledge.

Davies, B., Romanowska, I., Harris, K., Crabtree, S.A. 2019. Combining geographic information systems and agent-based models in archaeology: Part 2 of 3. *Advances in Archaeological Practice* 7(2): 185–193.

De Boer, A.R. 2005. Using pattern recognition to search LIDAR data for archeological sites, (w:) *The world is in your eyes: Proceedings of the XXXIII computer applications and quantitative methods in archaeology* conference, Tomar, Portugal, 245–254.

De Meo, A., Espa, G., Espa, S., Pifferi, A., Ricci, U. 2000. Study of archaeological areas by means of advanced software technology and statistical methods *Journal of Cultural Heritage* 1(3): 233–245.

De Meo, A., Espa, S., Pifferi, A., Ricci, U. 2003. A GIS for the study of the mid-Tiber valley. Comparisons between archaeological settlements of the Sabine Tiberine area. *Journal of Cultural Heritage* 4 (3):169–173.

De Roo, B., Stal, C., Lonneville, B., De Wulf, A., Bourgeois, J., De Maeyer, P. 2016. Spatiotemporal data as the foundation of an archaeological stratigraphy extraction and management system. *Journal of Cultural Heritage* 19: 522–530.

DeMers, M. 2009. *Fundamentals of Geographic Information Systems (4th ed.).* New York.

Demján, P., Dreslerová, D. 2016. Modelling distribution of archaeological settlement evidence based on heterogeneous spatial and temporal data. J*ournal of Archaeological Science* 69: 100–109.

Diggle, P. J. 1983. *Statistical analysis of spatial point patterns*. London, New York.

Dulinicz M. 1983. Niektóre aspekty zastosowania w archeologii geograficznych metod analizy przestrzennej osadnictwa, *Kwartalnik Historii Kultury Materialnej* 31(3): 299–315.

Dulinicz M., Kobyliński Z. 1990. Archeologiczne mapy osadnicze i ich przydatność do komputerowej analizy przestrzennej. *Archeologia Polski* 35(2): 241–266.

Eichert, S. 2013. An Open Source Database Application for Archaeological, Historical, and Spatial Data. *Proceedings CHNT* 18.

Fisher, E. 2020. Archaeoinformatics (w:) Oxford Research Encyclopedia of Anthropology. https://oxfordre.com/anthropology/display/10.1093/acrefore/9780190854584.001.0001/acrefore-9780190854584-e-43

Fernandez, P.T. 2021. Mobility in ancient times: Combining land and water costs. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage* 22: e00192.

Fiz, J.I., Martín, P.M., Cuesta, R., Subías, E., Codina, D., Cartes, A. 2022. Examples and results of aerial photogrammetry in archeology with UAV: Geometric documentation, high resolution multispectral analysis, models and 3D printing. *Drones* 6(3): 59.

Gaffney, V., Stančič, Z., Watson, H. 1996. Moving from catchments to cognition: tentative steps toward a larger archaeological context for GIS, (w:): M. Aldenderfer, H.D.G. Maschner (red.), *Anthropology, Space, and Geographic Information Systems*. Oxford, 132–154.

García Puchol, O., Diez Castillo, A., Pardo-Gordó, S. 2018. New insights into the neolithisation process in southwest Europe according to spatial density analysis from calibrated radiocarbon dates. *Archaeological and Anthropological Sciences* 10(7): 1807–1820.

Gawrysiak, L., Reder, J., Zapłata, R. 2011. Zastosowanie GIS do opracowania bazy danych archeologicznych i analiz sieci osadniczych na przykładzie dorzecza Wolicy (Wyżyna Lubelska), (w:) R. Zapłata (red.), *Digitalizacja Dziedzictwa Archeologicznego. Wybrane Zagadnienia*. Lublin, 132–142.

GDAL: http://www.gdal.org

geoportal.gov.pl

geoportal2.pl

Gianni, G.B., Marzullo, M., Valtolina, S., Barricelli, B.R., Bortolotto, S., Favino, P., Garzulino, A., Simonelli, R. 2012. An ecosystem of tools and methods for archeological research, (w:) *18th International Conference on Virtual Systems and Multimedia*. *IEEE*, 133–140.

Gierszewska-Noszczyńska, M., Noszczyński, P. 2014. Zastosowanie Systemów Informacji Geograficznej w archeologii. Rekonstrukcja topografii i średniowiecznego zespołu palatialnego w Ingelheim. *Studia Geohistorica* (2): 57–84.

Goodchild, M.F. 1991. Geographic information systems. *Progress in Human Geography* 15(2): 194–200.

Goodchild, M.F. 2010. Twenty years of progress: GIScience in 2010. *Journal of Spatial Information Science* 1: 3–20.

Gupta, N., Devillers, R. 2017. Geographic visualization in archaeology. *Journal of Archaeological Method and Theory* 24: 852–885.

Hanus, K. 2015. Chronić i służyć – zastosowanie dronów w projektach ochrony dziedzictwa archeologicznego. *Biografia Archeologii* 1(1): 92–102.

Harris, T.M., Lock, G. 1995. Toward an evaluation of GIS in European archaeology: The past, present and future of theory and applications, (w:) G.R. Lock, G. Stančič (red.), *Archaeology and geographical information systems: a European perspective*. London, New York, , 349–365.

Herzog, I. 2016. The potential and limits of optimal path analysis, (w:) A. Bevan, M. Lake (red.), *Computational approaches to archaeological spaces*. Routledge, 187–220.

Hodder, I., Orton, C. 1976. *Spatial analysis in archaeology*. London.

Jankowska, M. 2017. *Charakter prawny mapy cyfrowej*. Warszawa.

Jasiewicz, J. 2009. Zastosowanie Analiz Geoinformacyjnych w Badaniu Dawnych Procesów Osadniczych, (w:) Z. Zwoliński (red.), *GIS - Platforma Integracyjna Geografii.* Poznań, 175–195.

Jasiewicz, J., Hildebrandt-Radke, I. 2009. Using multivariate statistics and fuzzy logic System to Analyse Settlement Preferences in Lowland Areas of the Temperate Zone: An example from the Polish Lowlands. *Journal of Archaeological Science* 36(10): 2096–2107.

Jasiewicz, J., Hildebrandt-Radke, I. 2011. Influence of the Morphometrical Features on the Settlement Patterns from the Neolithic to the Middle Ages in the Middle Obra Region, (w:) I. Hildebrandt-Radke, W. Müller, J. Dörfler, J. Czebreszuk (red.), A*nthropogenic pressure in the Neolithic and the Bronze Age on the Central European Lowlands*. Poznań, 3–76.

Jasiewicz, J., Makohonienko, M. 2009. Zastosowanie metod GIS w analizie pradziejowych I średniowiecznych szlaków migracji – uwagi wstępne, (w:) I. Hildebrandt, J. Jasiewicz, M. Lutyńska (red.), *Zapis działalności człowieka w środowisku przyrodniczym, Środowisko i Kultura* 6: 57–59.

Jasiewicz, J., Sobkowiak-Tabaka, I. 2015. Geo-Spatial Modelling with Unbalanced Data: Modelling the Spatial Pattern of Human Activity during the Stone Age. *Open Geoscience* 7: 289–307.

Jażdżewska, I. 2010. Zastosowanie Systemów Informacji Geograficznej (GIS) w zachowaniu dziedzictwa kulturowego, (w:) B. Więcek, J. Perkowski (red.), *Rola nauki w zachowaniu dziedzictwa kulturowego: współpraca między uczelniami wyższymi a muzeami, archiwami i służbami konserwatorskimi na terenie regionu łódzkiego*. Łódź, 67–183.

Kempf, M. 2019. The application of GIS and satellite imagery in archaeological land-use reconstruction: A predictive model?. *Journal of Archaeological Science: Reports* 25: 116–128.

Kempisty A., Kruk J., Kurnatowski S., Mazurowski R., Okulicz J., Rysiewska T., Woyda S. 1981. Projekt założeń metodyczno-organizacyjnych archeologicznego zdjęcia ziem polskich, (w:) M. Konopka (red.), *Zdjęcie Archeologiczne Polski, Biblioteka Muzealnictwa i Ochrony Zabytków* 66, Seria B, Warszawa, 22–27.

Kobyliński, Z., Urbańczyk, P. 1984. Modelowanie symulacyjne pradziejowych procesów osadniczych: stan badań. *Kwartalnik Historii Kultury Materialnej* 32(1): 67–94.

Kołodziej, A. 2012. Rejestr zabytków nieruchomych we wdrażaniu dyrektywy INSPIRE. Podsumowanie stanu prac w latach 2010–2011. *Ochrona Zabytków* (1-2): 159–168.

Kozioł, K., Czerniec, J., Bęgziak, B. and Orlikowski, R. 2012. Archeologiczne Zdjęcie Polski jako element infrastruktury informacji przestrzennej. *Roczniki Geomatyki* 10(4): 133–143.

Kriegel, H.P., Kröger, P., Van Der Meijden, C.H., Obermaier, H., Peters, J., Renz, M. 2010. Towards archaeo-informatics: scientific data management for archaeobiology, (w:) *Scientific and Statistical Database Management: 22nd International Conference, SSDBM 2010, Heidelberg, Germany, June 30–July 2, 2010. Proceedings 22*. Berlin-Heidelberg, 169–177.

Kucukkaya, A.G. 2004. Photogrammetry and remote sensing in archeology. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 88: 83–88.

Kuna, M., Novák, D., Rášová, A.B., Bucha, B., Machová, B., Havlice, J., John, J., Chvojka, O. 2022. Computing and testing extensive total viewsheds: a case of prehistoric burial mounds in Bohemia. *Journal of Archaeological Science* 142: 105596.

Kvamme, K. L. 1989. Geographic Information Systems in Regional Archaeological Research and Data Management– (w:) M.B. Chiffer (red.) *Archaeological Method and Theory.* New York-Heidelberg, 139–203.

Kvamme, K.L. 1990: Spatial autocorrelation and the Classic Maya collapse revisited: refined techniques and new conclusions. *Journal of Archaeological Science* 17: 197–207.

Kvamme K.L. 1992. Geographic Information Systems and Archaeology, (w:) G. Lock, J. Moffett (red.), *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*. Oxford, 77–89.

Kvamme, K. L. 2005. Archaeological Modeling with GIS at Scales Large and Small. *GIS Symposium reading the historical spatial information in the world studies for human cultures and civilizations based on Geographic Information Systems.* Kyoto Japan. 2005.

Langmuir, E. 1984. *Mountaincraft and leadership*. Leicester.

Lasaponara, R., Masini, N. 2013. Remote sensing in archaeology: An overview. *Journal of Aeronautics and Space Technologies*, 6(1): 7–17.

Leszkowicz, M. 2020. Czytanie informacyjne. Infografiki w procesach poznawczych. Poznań.

Limp, W. F. 1991. Continuous cost movement models, (w:) C.A. Behrens, T.L. Sever, (red.), *Applications of Space Age Technology in Anthropology*, 237–250.

Llobera, M. 2011. Archaeological visualization: towards an archaeological information science (AISc). J*ournal of Archaeological Method and Theory* 18:193–223.

Lock, G.R. and Stančič, G. (red.) 1995. *Archaeology and geographic information systems: A European perspective*. London,New York.

Mackenzie, A. 2017. *Machine learners: Archaeology of a data practice*. Cambridge.

Madry, S.L.H., Rakos, L. 1996. Line-of-sight and cost-surface techniques for regional research in the Arroux River Valley, (w:) H.D.G. Maschner (red.), *New Methods, Old Problems: GIS in Modern Archaeological Research*, 1–23.

Malaperdas, G.D. 2021. Practical Methods of GIS for Archaeologists: Viewshed Analysis-The Kingdom of Pylos Example. *Geoplanning: Journal of Geomatics and Planning* 8(1): 1–22.

Maliene V., Grigonis V., Palevičius V., Griffiths S. 2011. Geographic information system: Old principles with new capabilities. *Urban Design International* 16 (1): 1–6.

Marsh, E.J., Schreiber, K. 2015. Eyes of the empire: A viewshed-based exploration of Wari site-placement decisions in the Sondondo Valley, Peru. *Journal of Archaeological Science: Reports* 4: 54–64.

Martyniuk-Drobysz, A. 2019. QGIS w konserwatorstwie archeologicznym. Zarys. *Raport* (14): 151–166.

Marwick, B. 2017. Computational reproducibility in archaeological research: Basic principles and a case study of their implementation. *Journal of Archaeological Method and Theory* 24(2): 424–450.

McCoy, M.D., Ladefoged, T.N. 2009. New developments in the use of spatial technology in archaeology. *Journal of Archaeological Research* 17: 263–295.

Michalski, T., Makohonienko, M., Kara, M., Jasiewicz, J. 2016. Poznań na tle wczesnośredniowiecznego osadnictwa grodowego obszaru Wielkopolski w kontekście uwarunkowań środowiskowych – Studium Geoinformacyjne, (w:) M. Kara, M. Makohonienko, M. J. Kaczmarek, A. Michałowski (red.), *Archeologia i geografia o przemianach osadnictwa i środowiska przyrodniczego w Poznaniu i okolicach od schyłku starożytności do lokacji miasta*. Poznań, 213–246.

Mills, B.J. 2017. Social network analysis in archaeology. *Annual Review of Anthropology* 46: 379–397.

Moran, P.A.P. 1950. Notes on Continuous Stochastic Phenomena. *Biometrika* 37: 17–33.

Morgan, C. 2022. Current digital archaeology. *Annual Review of Anthropology* 51: 213–231.

Niebieszczański, J., Hildebrandt-Radke, I., Vouvalidis, K., Syrides, G., Andreou, S., Czebreszuk, J., Pappa, M., Tsourlos, P., Karpińska-Kołaczek, M., Rzodkiewicz, 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): 600–619.

Prinke, A. 1992. Polish national record of archaeological sites. A computerization, (w:) C.V. Larsen (red.), *Sites and Monuments. National Archaeological Records. National Museum of Denmark*. Copenhagen, 89–94.

Prinke, A. 2002. Introducing information technology to archaeological resource management: towards a GIS-based SMR of Midwestern Poland, (w:) L. Garcia Sanjuan, D. Wheatley (red.), M*apping the Future of the Past. Managing the Spatial Dimension of the European Archaeological Resource*. Sevilla, 85–96.

Rączkowski, W. 2008. Antropogeniczne formy średniowiecznego krajobrazu powstałe w pradziejach i wczesnym średniowieczu w dorzeczu środkowej Wieprzy. *Landform Analysis* 7: 143–153.

Rączkowski, W. 2014. Aerial archaeology, (w:) M. Carver, B. Gaydarska, S. Montón-Subías (red.), *Field archaeology from around the world: Ideas and approaches*. Heidelberg, New York, Dordrecht, London, 19–25.

Reilly P. 1991. Towards a virtual archaeology, (w:) K. Lockyear, S. Rahtz, *Computer Applications in Archaeology*. Oxford, 133–139.

Richards, J. D. 1998. Recent Trends in Computer Applications in Archaeology. *Journal of Archaeological Research* 6(4): 331–382.

Ruggles, C. L. N., Medyckyj-Scott, D. J., Gruffydd, A. 1993: Multiple viewshed analysis using GIS and its archaeological application: a case study in northern Mull (w:) J. Andresen, T. Madsen, I. Scollar (red.), *Computing the Past: computer applications and quantitative methods in archaeology*. Aarhus, 125–132.

Schindling, J. and Gibbes, C. 2014. LiDAR as a tool for archaeological research: a case study. *Archaeological and Anthropological Sciences* 6: 411–423.

Sobkowiak-Tabaka, I., Jasiewicz, J. 2015. Analiza środowiskowych uwarunkowań lokalizacji osadnictwa ze starszej i środkowej epoki kamienia na Pojezierzu Lubuskim. Zastosowanie drzew klasyfikacyjno-regresyjnych. *Folia Praehistorica Posnaniensia* 20: 473–96.

Stančič, Z., Kvamme, K. 1999. Settlement Pattern Modelling through Boolean Overlays of Social and Environmental Variables, (w:) J.A. Barcelo, I. Briz, A. Vila (red.), *New Techniques for Old Times - CAA98. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*. BAR International Series 757. Stafford, 231–237.

Štular, B., Lozić, E. and Eichert, S. 2021. Airborne LiDAR-derived digital elevation model for archaeology. *Remote Sensing* 13(9): 1855.

Szady, B. 2008. Zastosowanie systemów informacji geograficznej w geografii historycznej. *Polski Przegląd Kartograficzny* 40(3): 279–283.

Tobler, W. 1959. Automation and Cartography. *Geographical Review* 49 (4): 526–534.

Trepal, D., Lafreniere, D. and Gilliland, J. 2020. Historical spatial-data infrastructures for archaeology: towards a spatiotemporal big-data approach to studying the postindustrial city. *Historical Archaeology* 54: 424–452.

Tukey, J. W. 1977. *Exploratory Data Analysis. Addison-Wesley.* Massachusetts.

van Leusen, M. 1993; Cartographic modelling in a cell-based GIS, (w:) J. Andresen, T. Madsen, I. Scollar (red.), *Computing the Past: computer applications and quantitative methods in archaeology*. Aarhus, 105–123.

Verhagen, P., Nuninger, L. and Groenhuijzen, M.R. 2019. Modelling of pathways and movement networks in archaeology: an overview of current approaches, (w:) P. Verhagen, J. Joyce, M.R. Groenhuijzen (red.) *Finding the limits of the limes: modelling demography, economy and transport on the edge of the Roman Empire*. Springer Nature. London, New York, 217–249.

Wachtel, I., Zidon, R., Garti, S. and Shelach-Lavi, G. 2018. Predictive modeling for archaeological site locations: Comparing logistic regression and maximal entropy in north Israel and north-east China. *Journal of Archaeological Science* 92: 28–36.

Wagtendonk, A. J., Verhagen, P., Soetens, S., Jeneson, S., de Kleijn. M. 2009. Past in Place: The Role of Geo-ICT in Present-Day Archaeology, (w:) H.J. Scholten, R. Velde, N. Manen (red.), *Geospatial Technology and the Role of Location in Science.* Amsterdam, 59–86.

Warren, R. E. 1990. Predictive modelling of archaeological site location: a case study in the Midwest, (w:) K.M.S. Allen, S.W. Green, E.B.W. Zubrow (red.), *Interpreting Space: GIS and Archaeology*. London, 201–215

Wheatley, D. 1995. Cumulative viewshed analysis: a GIS-based method for investigating intervisibility, and its archaeological application, (w:) G. Lock, Z. Stančič (red.), *Archaeology and GIS: A European Perspective*. London, 171–185.

Westcott, K. L., Brandon, R. J. 2000. *Practical Applications of GIS for Archaeologists: A Predictive Modeling Kit*. London.

Wheatley, D. 1996. The use of GIS to understand regional variation in earlier Neolithic Wessex. (w:) H.D.G. Maschner (red.), *New Methods, Old Problems: GIS in modern archaeological research.* Carbondale, , 75–103.

Wheatley, D., Gillings, M. 2013. *Spatial technology and archaeology: the archaeological applications of GIS*. London.

Widacki, W. 2001. Systemy informacji geograficznej i ich rola w naukach przestrzennych. *Geoinformatica Polonica* 3: 47–55.

Witcher, R.E. 2008. (Re) surveying Mediterranean rural landscapes: GIS and legacy survey data. *Internet Archaeology* 24.

Wroniecki, P., Molewski, P., Uziembło, R. 2019. Pierwotna lokacja Torunia w świetle badań nieinwazyjnych i analiz GIS. *Archaeologia Historica Polona* 27: 73–90.

Yaworsky, P.M., Vernon, K.B., Spangler, J.D., Brewer, S.C. and Codding, B.F. 2020. Advancing predictive modeling in archaeology: An evaluation of regression and machine learning methods on the Grand Staircase-Escalante National Monument. *PloS one*, 15(10): e0239424.

Zapłata, R. 2011, GIS – Systemy Informacji Geograficznej w archeologii – Ogólna charakterystyka wybranych zagadnień

i rys historyczny (etap początkowy), (w:) R. Zapłata (red.), *Digitalizacja dziedzictwa archeologicznego. Wybrane zagadnienia*. Lublin, 280–315.

Zapłata, R. 2012. Dokumentacja w archeologii, (w:) S. Tabaczyński, A. Marciniak, D. Cyngot, A. Zalewska (red.), *Przeszłość społeczna. Próba konceptualizacji*. Poznań, 481–499.

Zapłata, R., Zborowski, M. 2013. GIS w archeologii – przykład prospekcji i inwentaryzacji dziedzictwa archeologiczno-przemysłowego. *Roczniki Geomatyki* 11(4): 103–112.





Vibra-coring: Wiercenia udarowe i pobieranie rdzeni osadów w archeologii

Jakub Niebieszczański, Sebastian Teska, Piotr Majorek, Cezary Bahyrycz, Janusz Czebreszuk

WPROWADZENIE

Wiercenia są jedną z najczęściej używanych metod w geoarcheologii, dziedzinie archeologii, która bada przeszłość za pomocą metod nauk o Ziemi. Stosowane w archeologii od ponad stu lat znajdują szerokie zastosowanie w trakcie badań nieinwazyjnych, sondażowych czy też środowiskowych (Stein 1986). Za ich pomocą w szybki sposób można uzyskać informacje dotyczące natury obiektów, stratygrafii, nierzadko chronologii, a także środowiska, które towarzyszyło społecznościom w przeszłości. Metody wiertnicze w archeologii zapożyczone zostały z praktyki stosowanej przez geologów i geomorfologów, a także – co równie ważne – geotechników. Przystosowane do rozpoznawania naturalnej stratygrafii warstw, struktury i tekstury osadów znalazły swoją aplikację także w badaniach osadów antropogenicznych (Stein 1986).

Większość wykorzystywanych geotechnicznie urządzeń wiertniczych jest szeroko stosowana w badaniach archeologicznych. Są to przede wszystkim wszelkiego rodzaju wiertnice i świdry ręczne, przystosowane do rozpoznawania utworów położonych stosunkowo płytko (w zależności od wytrzymałości sprzętu i możliwości fizycznych zespołu wiertniczego nawet do kilkunastu metrów). W niektórych przypadkach, zwłaszcza przy silnie skonsolidowanych lub gruboziarnistych osadach, wykorzystuje się również mechaniczne wiertnice świdrowe. Wiercenia te, wykonywane często w geotechnice i hydrogeologii, pozwalają osiągać większe głębokości (do kilkudziesięciu metrów), skracając również czas penetracji gruntu. Należy jednak zaznaczyć, że wykorzystanie świdrów gromadzących osad za pomocą ruchu wkręcającego powoduje znaczny ubytek informacji dotyczących na przykład stratygrafii osadów. W trakcie tego procesu wymieszaniu ulegają osady w ramach poszczególnych zejść świdra, co w badaniach archeologicznych może powodować błędy interpretacyjne struktury i tekstury materiałów pierwotnie należących do różnych poziomów stratygraficznych. O ile w przypadku wiertniczych sondowań weryfikacyjnych

DOI: 10.64158/iyo3hg9puy

i rozpoznawczych generalnego obrazu stratygrafii na obszarze np. stanowiska zaburzenia te nie odgrywają większej roli, to w sytuacji odkrywania mikromorfologii osadów, rekonstrukcji środowiskowych opartych o paleoekologię czy rejestrowania drobnych zmian uziarnienia w obrębie warstw, specyfika wierceń okręcanych stanowi istotny problem metodyczny.

W badaniach geoarcheologicznych, ze względu na przytoczone powyżej problemy, wykorzystuje się metody polegające na wiertniczym pobieraniu osadów, nie ingerując w ich porządek stratygraficzny. Zastosowanie takich urządzeń uzależnione jest od pytań badawczych, ale też, co równie ważne, typu osadów, jakie mają zostać pobrane. Podobnie jak w przypadku wierceń konwencjonalnych (świdrowych) rysuje się wyraźny podział na metody wykonywane siłą ludzkich mięśni oraz te wspomagane urządzeniami mechanicznymi. Do pierwszej kategorii zaliczyć można urządzenia pozwalające pobierać nienaruszone rdzenie z obszarów podmokłych (np. torfy i gytie). Są to przede wszystkim wiertnice typu Instorf (lub typu rosyjskiego), których użycie polega na wbiciu kasety zaopatrzonej w skrzydło tnące osad z profilu i umieszczeniu go w półotwartym cylindrze (Shotyk i Noernberg 2020). W przypadku osadów terrestrycznych stosowane są również laski geologiczne lub półotwarte próbniki (sondy szczelinowe) wbijane za pomocą młota, jednakże przeznaczone są głównie do materiału o drobniejszych frakcjach uziarnienia i mniejszej kompakcji (np. pyły eoliczne czy mułki rzeczne). Problemem dla tych metod jest jednak niepewny stopień kompakcji pobieranych profili oraz trudności w pobieraniu osadów skonsolidowanych, przesuszonych i gruboziarnistych (np. żwiry rzeczne lub frakcje kamieniste koluwiów czy osadów antropogenicznych). Do wierceń w nierozpoznanych dotąd osadach lub o spodziewanym braku możliwości wykorzystania ręcznych instrumentów wykorzystuje się mechaniczne sposoby pozyskiwania nienaruszonej stratygrafii. Spośród wielu wiertnic wspomaganych napędem mechanicznym jedną z najbardziej efektywnych na polu geoarcheologii jest metoda wierceń udarowych, znana w języku angielskim jako vibra-coring (Canti i Meddens 1998).

Technika wierceń udarowych została opracowana na potrzeby badań geotechnicznych. W nomenklaturze inżynieryjnej wiertnica ta określana jest na polskim rynku geotechnicznym jako sonda rdzeniowa RKS, to skrót od niemieckiego słowa *Rammkernsondierung* (Siebenborn 2005). Sonda ta służy nominalnie do poboru wysokiej jakości próbek gruntu w ich zachowanym następstwie stratygraficznym nawet do kilkunastu metrów poniżej poziomu terenu. Z tego też powodu jej zastosowanie w geoarcheologii jest podstawą wykonywania specjalistycznych analiz rdzeni pobieranych z osadów antropogenicznych (Canti i Meddens 1998).

W efekcie istnieje możliwość pobierania rdzeni o nienaruszonej strukturze i stratygrafii, co pozwala na przeprowadzenie wysokorozdzielczych analiz. Brak zaburzeń w następstwie warstw pozwala na próbkowanie osadów w obrębie profili w dowolny sposób, tak jak przy pobieraniu ich z naturalnych odsłonięć czy odkrywek (Stein 1986). Metoda ta wymaga jednak wysoko wyspecjalizowanego zespołu oraz odpowiedniego przygotowania merytorycznego i technicznego. Niniejszy rozdział prezentuje więc technikę pobierania rdzeni za pomocą wiercenia udarowego oraz jej przydatność w badaniach geoarcheologicznych w różnych warunkach i kontekstach środowiskowych, zarówno w osadach naturalnych, jak i antropogenicznych.

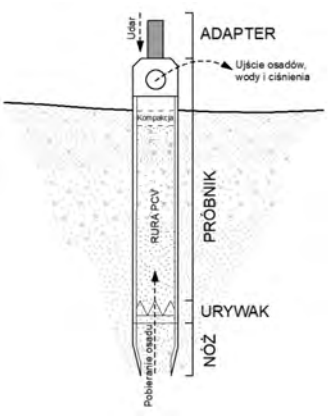
SPRZĘT I PRAKTYKA

Pobieranie rdzeni osadów w wierceniach udarowych odbywa się w ramach procedury uzależnionej od technicznych rozwiązań producenta wiertnicy. Niemniej jednak istnieją ogólne zasady i rozwiązania pomagające w sposób optymalny i przede wszystkim bezpieczny operować sprzętem.

Mechanizm udarowy

W głównych założeniach metoda ta opiera się na wprowadzaniu do gruntu próbnika – pustego w środku cylindra – który pobiera osad (ryc. 1). Kluczowym elementem tej metody jest natomiast sposób zagłębiania się w grunt próbnika przez udar, który pozwala na utrzymanie jednostajności przykładanej siły nacisku. Ta regularność uderzeń jest kluczem to zachowania stratygrafii, ale także do penetracji nawet silnie skonsolidowanych osadów, w tym gruntów kamienistych. Udar generowany jest w większości rozwiązań przez młot pneumatyczny napędzany elektrycznie lub spalinowo. Energia udaru mieści się w przedziale od 20 do nawet 60 J, uwzględniając przy tym częstotliwość uderzeń na minutę w granicach od 1 400 do 2 700. Parametry wydajności sprzętu udarowego powinny być dobierane w zależności od badanego gruntu. Wpływ

na to ma wiele czynników: kompakcja osadów, spoistość, uwodnienie czy uziarnienie.



Ryc. 1. Schematyczny rysunek próbnika i działania metody vibra-coring

Próbniki i elementy towarzyszące

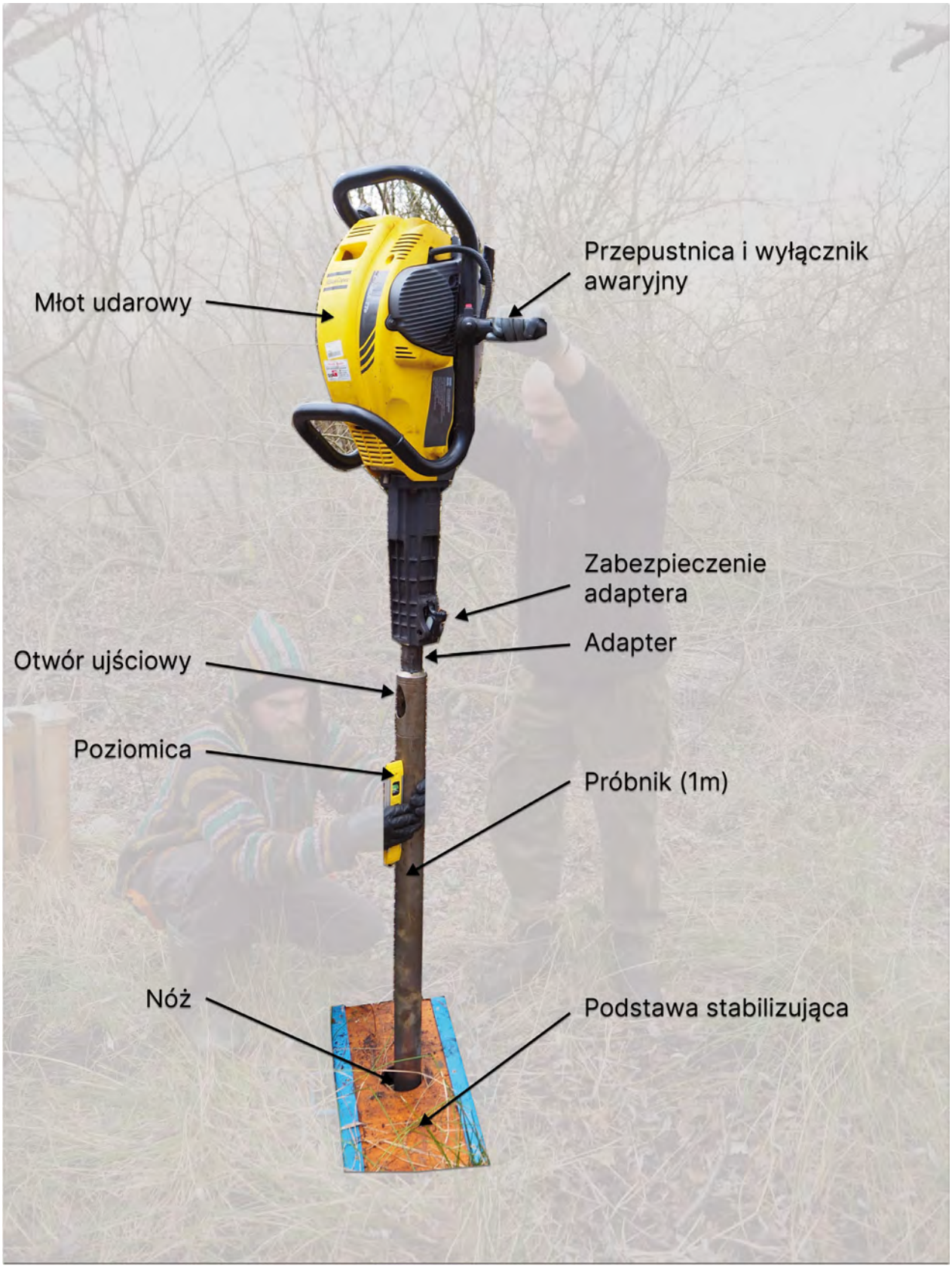
Rdzenie w metodzie udarowej mogą być pobierane podobnie jak w przypadku wiertnic typu Instorf do cylindrycznych, pustych w środku rur o charakterze półotwartym lub zamkniętym. W pierwszym przypadku próbnik ma postać półwalca z żebrowaniem wzmacniającym, do którego wprowadzany jest osad w trakcie penetracji. Zaletą tego typu rozwiązania jest szybkie rozpoznawanie stratygrafii, bezpośrednio po ekstrakcji próbnika z gruntu i wstępnym odczyszczeniu. Metodę tę stosuje się zazwyczaj w przypadkach osadów niezawodnionych oraz takich, które nie będą podlegały niektórym specjalistycznym analizom (np. pomiarom podatności magnetycznej, datowaniu luminescencyjnemu itp.). Próbnik zamknięty jest natomiast pełną rurą stalową, w której środek stanowi przestrzeń do pobrania osadu (ryc. 1 i 2). W tym przypadku, aby nie utracić oryginalnego zapisu stratygraficznego warstw, do próbnika dodatkowo wprowadzana jest przed wierceniem rura plastikowa, którą po ekstrakcji wyciąga się i zabezpiecza. Sposób ten ochrania próbki przed ewentualną kontaminacją, ale niestety opóźnia rozpoznanie osadów w ramach rdzenia, które można wykonać dopiero po rozcięciu rur.

Długość próbników uzależniona jest od spodziewanej struktury pobieranych osadów. W przypadku luźnych lub uwodnionych osadów i drobnych frakcji uziarnienia stosuje się próbniki o długości 0,5 m. Pozwala to uniknąć kompakcji, a także ewentualnych problemów z wyciągnięciem plastikowej rury z próbnika. Kolejnym z popularnych próbników jest ten o długości 1m, który przeznaczony jest dla większości gruntów o grubszych frakcjach (piaski i żwiry). Dobór odpowiedniej długości jest także uzależniony od głębokości wiercenia. W przypadku głębokich wierceń dochodzących do kilkunastu metrów poniżej poziomu terenu wykorzystanie krótszych próbników zmniejsza wagę zespołu, co nie przeciąża mechanizmów ekstrakcyjnych.

Istotnym elementem próbnika jest wkręcany gwintowo od dolnej strony nóż tnący (ryc. 1). Jest to cylindryczny półstożek, pusty w środku, którego dolny koniec posiada zwężone światło oraz zaostrzony profil. Noże tnące wykonywane są z wysokiej jakości stali narzędziowej, aby zapobiec ich stępieniu, pęknięciu i odkształceniu w przypadku wiercenia w skonsolidowanych lub gruboziarnistych osadach. Poprzez zwężone światło powierzchni tnącej siła udaru przenoszona jest na mniejszą powierzchnię, przez co osad łatwiej wprowadzany jest do wyższych części próbnika.

Zalecanym akcesorycznym elementem próbnika w badaniach naukowych jest również tzw. urywak rdzenia. Jest to plastikowa lub stalowa obręcz wyposażona w giętkie (metalowe lub plastikowe) zęby skierowane ku górze. Urywak montuje się pomiędzy właściwym próbnikiem a nożem tnącym, aby zapobiec utracie osadów podczas ekstrakcji rdzenia. Zasada działania tego elementu opiera się na wspomnianych zębach, które pozwalają na wprowadzenie osadu do próbnika, jednocześnie zapobiegając jego utracie podczas wyciągania poprzez zakleszczenie ich pod wpływem nacisku grawitacyjnego pobranego rdzenia. Nie zawsze jednak wymagane jest jego instalowanie, jako że np. grunty spoiste (np. iły czy pyły) ze względu na oddziaływanie międzycząsteczkowe lub zjawisko kohezji z reguły ekstraktowane są w całości bez obawy o ich utratę. Wskazane jest natomiast użytkowanie urywaków przy pobieraniu osadów luźnych, np. żwirów czy uwodnionych piasków i drobniejszych frakcji, które z łatwością mogłyby wypaść w trakcie wyciągania rdzenia.

Kolejną częścią próbnika w przypadku jego wersji zamkniętej jest otwór ujściowy osadu i powietrza, montowany w górnej części jako oddzielny wkręcany gwintowo element. Jest to wzmocniona rura stalowa z wywierconym pod kątem otworem, który ma istotne znaczenie ze względu na dekompresję ciśnienia wewnątrz rdzenia, które powstaje podczas penetracji gruntu. Ponadto element ten służy jako ujście wody w przypadku wiercenia poniżej zwierciadła wód podziemnych, ale także stanowi drogę



Ryc. 2. Zestaw do wierceń udarowych w trakcie pracy wraz z objaśnieniami technicznymi

wyjścia nadmiarowego materiału, który opada do odwiertu podczas wprowadzania próbnika na kolejne głębokości.

Ostatnim elementem próbnika jest adapter przejściowy, który umożliwia przeniesienie udaru z młota na dolne części zestawu. Kształt i charakter adaptera uzależniony jest od modelu młota udarowego, a także producenta zestawu wiertniczego. Jest to również element, który podlega największemu zużyciu, ponieważ stanowi pierwszy etap przeniesienia siły.

Wyciągarki i ekstrakcja rdzenia

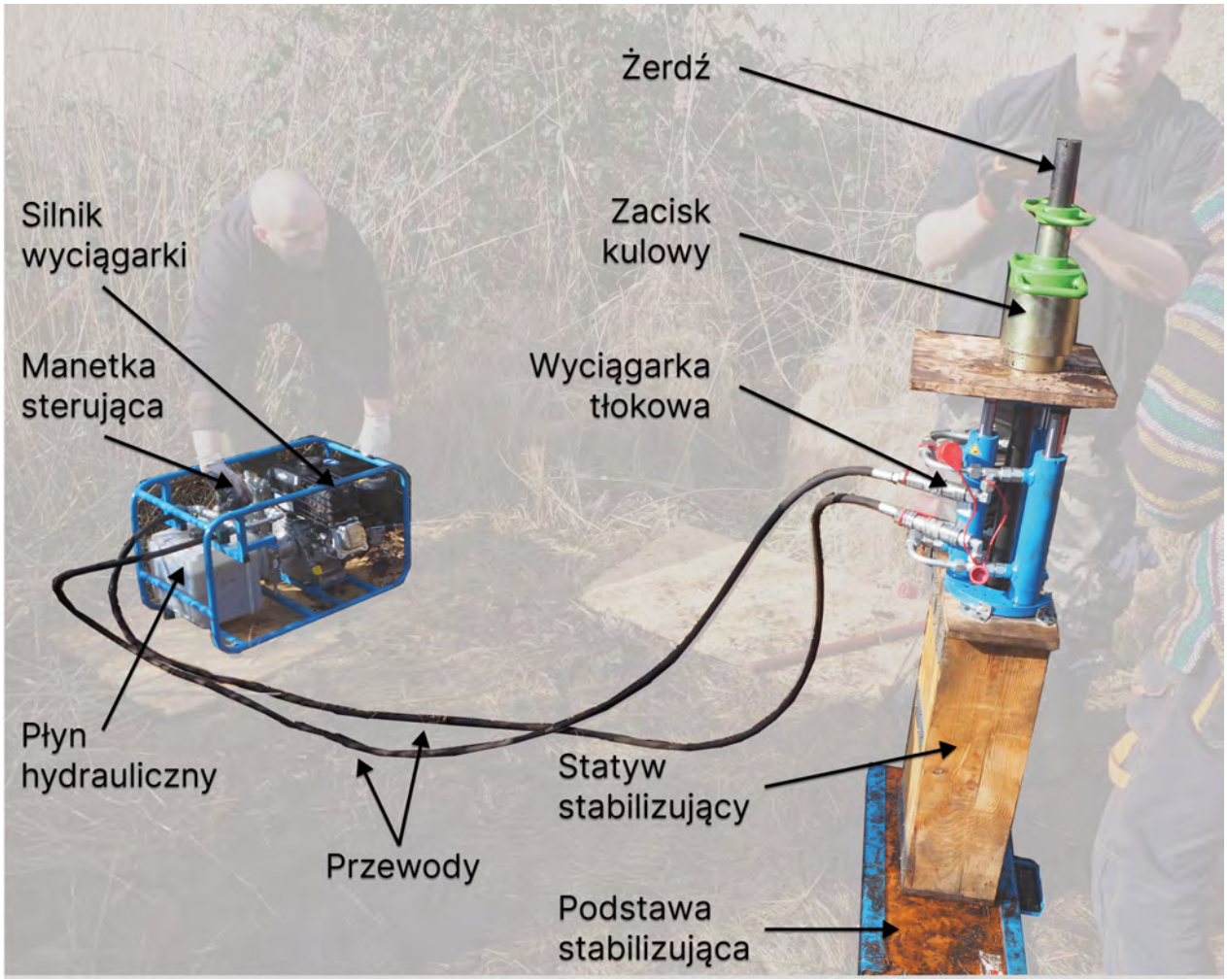
Na rynku geotechnicznym istnieje szereg przyrządów pozwalających na ekstrakcje próbników oraz żerdzi zagłębionych w grunt. Sprzęt ten jest niezbędny ze względu na praktyczny brak możliwości wyciągnięcia zwłaszcza głęboko wwierconego próbnika jedynie siłą ludzkich mięśni. Powodem tego jest ciężar zestawu, ale też i działanie podciśnienia, zwłaszcza w zawodnionych osadach. Wyciągarki stosowane przy wierceniach udarowych można podzielić na dwie kategorie – polegające na systemach operowanych ręcznie oraz mechanicznie (spalinowo lub elektrycznie). Wyciągarki ręczne mają różne formy, od mechanizmów szczękowych po zaciski kulowe, w obu przypadkach działających na zasadzie dźwigni. Ich minusem jest wydłużony czas ekstrakcji oraz zaangażowanie większej siły niż w przypadku zestawu hydraulicznego. Wyciągarki wspomagane silnikiem spalinowym stanowią znaczące wsparcie procesu ekstrakcyjnego w przypadku głębokich wierceń lub zasysania się próbnika w obrębie uwodnionych osadów. Zestaw taki składa się z silnika wytwarzającego ciśnienie w zbiorniku płynu hydraulicznego, które zostaje przeniesione na właściwą wyciągarkę tłokową (ryc. 3). Urządzenie składa się więc z kilku odrębnych elementów: silnika i mechanizmu hydraulicznego, wyciągarki, opcjonalnie statywu wyciągarki, płyty oporowej oraz zacisku kulowego, którego zadaniem jest przeniesienie siły na żerdzie i próbnik. Zastosowanie tego typu zestawu pozwala na wytworzenie udźwigu nawet do 200 kN.

Procedura terenowa

Wykorzystanie metody vibra-coring zostało poniżej opisane na przykładzie sprzętu do wierceń RKS oferowanego przez firmę *GeoLab – Sprzęt Geotechniczny i Pomiarowy*. Zestaw ten wyposażony jest w młot spalinowy Atlas Copco Cobra TT, próbnik długości 1m i świetle 0.063m oraz hydrauliczną wyciągarkę z silnikiem Briggs-Straton. Zastosowane rozwiązania nie różnią się od innych w dostępnych na rynku zestawach , dlatego też opis procedury powinien mieć charakter stosunkowo uniwersalny dla metody i jej zastosowania w geoarcheologii.

W pierwszej kolejności, zaraz po wstępnym rekonesansie terenowym i wybraniu miejsca do wiercenia należy odpowiednio przygotować miejsce pracy. Dokładna lokalizacja pobierania rdzenia powinna być stosunkowo płaska, aby płyta oporowa (obszar ok. 0.5 m^2) nie była przekrzywiona, co może prowadzić nawet do wypadków podczas pracy. Płyta oporowa wyposażona jest w otwór nieznacznie większy od średnicy próbnika. Służy ona jako stabilna podstawa zarówno dla operatora młota, jak i dla działania wyciągarki. Zanim rozpoczną się właściwe wiercenia wymagane jest odpowiednie przygotowanie próbnika i wszystkich jego dodatkowych elementów. Do próbnika wprowadzana jest rura PCV, która będzie gromadziła osad. W niektórych przypadkach taką rurę można z zewnątrz polać czystą wodą lub nałożyć niewielką ilość smaru silikonowego, co ułatwi późniejszą ekstrakcję. W dolnej części rury PCV montuje się urywak rdzenia, skierowany zębami do góry, a następnie zamyka się tę część, nakręcając nóż tnący na próbnik i smarując obficie gwinty smarem maszynowym lub łożyskowym. Procedura ta pozwala na łatwiejsze rozkręcenie noża po wierceniu i wymianę rury PCV. Do górnej części próbnika montowany jest otwór ujściowy, a następnie adapter do młota. W tym przypadku również konieczne jest dokładne nasmarowanie wszystkich gwintów, aby zapobiec zapieczeniu się złączeń.

Przy rozpoczęciu wiercenia pierwszego metra młot należy nasadzić na adapter w pozycji wertykalnej (ryc. 2), a następnie ustawić w otworze płyty oporowej i dokładnie sprawdzić, czy całość zestawu znajduje się odpowiednio w pionie. Brak pionizacji może skutkować krzywym profilem wiercenia oraz trudnościami w ekstrakcji próbnika. Po osiągnięciu odpowiedniej pozycji odpalany jest silnik młota i można przystąpić do procedury udarowej. Próbnik w zależności od napotkanego osadu będzie wbijał się z różną prędkością. W przypadku osadów biogenicznych lub silnie uwodnionych wiercenie długości 1 m może trwać kilka sekund, z kolei w warunkach przesuszonych osadów lub gruntów kamienistych, proces może zająć nawet kilkanaście minut. Po osiągnięciu pożądanej głębokości (np. 1 m poniżej poziomu



Ryc. 3. Mechanizm ekstrakcyjny próbnika wraz z objaśnieniami technicznymi

terenu) młot należy wyłączyć i ściągnąć z próbnika. Od razu potem odkręcany jest adapter i w jego miejsce wkręcona zostaje żerdź o długości 1m, która posłuży do ekstrakcji. Do próbnika i żerdzi dostawiany jest w kolejności od dołu do góry: statyw wyciągarki, wyciągarka tłokowa oraz zacisk kulowy. Po podłączeniu przewodów od silnika i mechanizmu hydraulicznego do wyciągarki, odpalany jest zapłon i następuje proces wyciągania całego zestawu próbnika i żerdzi. W trakcie tej procedury wymagana jest asysta przynajmniej jednej osoby, która w momencie osuwania się tłoków przytrzymuje kluczem nastawnym żerdź, tak aby nie opadła z powrotem do odwiertu. Próbnik wyciąga się do momentu osiągnięcia głębokości ok. 30 cm poniżej poziomu terenu, aby zestaw był odpowiednio ustabilizowany po odłączeniu wyciągarki. W tym momencie kluczami nastawnymi można wyjąć próbnik ze wspomnianej głębokości bez znacznych oporów i ostrożnie przenieść go na przygotowane wcześniej miejsce i umieścić w pozycji horyzontalnej. Następnie odkręca się kluczami nóż tnący od próbnika i wyciąga rurę PCV odpowiednimi cęgami. Często zapieczony gwint noża wymaga podgrzania od zewnątrz np. palnikiem gazowym. Po wyciągnięciu rury PCV i odłożeniu jej do zabezpieczenia i dokumentacji konieczne jest wyczyszczenie wszystkich elementów, takich jak żerdzie, wyciągarka, nóż, urywak itp. (oraz ponowne przesmarowanie wszystkich gwintów).

W czasie czyszczenia sprzętu odbywa się zabezpieczenie i dokumentacja fotograficzna i opisowa rdzenia. Rurę PCV, jeśli jest przezroczysta, czyści się z zewnątrz w celu obserwacji zmian w stratygrafii osadów. Następnie dokonuje się fotografowania i opisywania (np. przy użyciu skali Munsella) makroskopowego osadu wypełniającego dolną część rury (ryc. 4). Po zadokumentowaniu oba końce zamyka



Ryc. 4. Podgląd dołu próbnika (noża tnącego) bezpośrednio po ekstrakcji z odwiertu. Jest to jedyny moment w trakcie praca terenowych, kiedy zobserwować można osiągnięty poziom litologiczny. a: Muszla w osadach gytii, b: nawiercony głaz podłoża skalnego; c: Piaszczyste osady eoliczne; d: Zawodniony torf

się odpowiednimi zaślepkami lub, jeśli ich brak, taśmami izolacyjnymi. Niezwykle ważne jest oznaczenie dołu oraz góry rdzenia, tak aby nie pomylić poziomów i głębokości przy analizie w warunkach laboratoryjnych. Zazwyczaj stosuje się różnokolorowe zaślepki lub taśmy (np. czerwone oznaczające dół, niebieskie oznaczające górę) oraz nanosi się niezmywalnym markerem opis na rurze, zawierający nazwę rdzenia, głębokość oraz strzałkę wskazującą kierunek wiercenia. Opis należy wykonać w dwóch przeciwległych miejscach względem średnicy, aby po przecięciu rdzenia obie jego połówki były opisane. Podczas przygotowywania wiercenia kolejnego metra wykonuje się również opis tej części rdzenia na specjalnie przygotowanej karcie odwiertu (ryc. 5).

Aby pobrać kolejny metr rdzenia, należy ponownie złożyć próbnik wraz z rurą PCV, urywakiem, nożem i otworem ujściowym. Różnica w tym przypadku polega na wcześniejszym zamontowaniu do próbnika żerdzi stalowej, a dopiero później przykręceniu adaptera do tej żerdzi. Tak złożony zestaw umieszcza się w odwiercie i za pomocą nacisku kluczami nastawnymi można go wepchnąć siłą mięśni do głębokości 1m. Nie zawsze jednak jest to możliwe, gdyż w trakcie wyciągania i ponownego wkładania próbnika część osadów ze ścian odwiertu opada do jego dolnych części, co może uniemożliwić dotarcie do uprzednio osiągniętego poziomu. W takim przypadku stosuje się wiercenie przygotowawcze, czyli przewierca się do początku kolejnego interwału rdzeniowego, a następnie wyciąga cały zestaw celem oczyszczenia. Nie zawsze jednak jest to konieczne, gdyż osad ten może zostać usunięty podczas dalszego wiercenia poprzez otwór ujściowy (zwłaszcza w zawodnionych osadach). Po uzyskaniu głębokości kolejnego metra ponownie powtarza się procedurę ekstrakcji rdzenia wyciągarką i zabezpieczenia go oraz odpowiedniego zadokumentowania.

Wielokrotnie w trakcie wierceń napotyka się różne problemy techniczne. Najczęstszymi z nich są zapieczone gwinty, które wymagają użycia palnika

OPIS POLOWY

Rdzeń (cały):	**6B**	**Stanowisko:**	**Mechelinki 6B**		
Rdzeń (składowa):		**Opis geomorf:**			
Data:	**03.03.2020r.**		**X: 54,6280**	**Y: 18,5103**	**Z:**
Autor:	**Sebastian Teska**	**Warunki atm:**	**5°C; pochmurno/deszcz**		

0 m	Ozn.	Rysunek roboczy	Nr próbek	Opis spągu	Uwagi
0,5	1		6B.1	torf; 7.5YR 2.5/1	opis i zdjęcia z 6B.1 i 6A.3; odwiert bez catchera; kompresja ok. 7cm
1					
1,5	2		6B.2	grubo- i drobnoziarnisty piasek z domieszką fragmentów roślin; 2.5Y 3/2	różnica między spągiem 6B.1 a stropem 6B.2 (możliwe osypywanie materiału w odwiercie)
2					
2,5	3		6B.3	muł i ił z domieszką fragmentów roślin; 2.5Y 2.5/1	za każdym razem pierwsze 30-40 cm rdzenia może być materiałem osypanym z góry - wynik kompresji/zmiany gęstości osadów (torf-piasek-torf)
3					
3,5	4		6B.4	piasek drobnoziarnisty; GREY1 5/5GY	zakończono wiercenie na rzędnej 4,50 m
4					
4,5					

Ryc. 5. Przykładowa, wypełniona karta dokumentacyjna wiercenia

lub wielokrotnych prób odkręcenia ich za pomocą kluczy nastawnych. W tym celu narzędzia powinny być odpowiedniej jakości i trwałości. Niejednokrotnie też osad pobierany do rury PCV rozpycha jej światło na tyle, że nie można jej wyciągnąć z próbnika. Należy wtedy odkręcić końcówkę z otworem ujściowym i przy pomocy drugiej rury lub odpowiedniego tłoka wypchać rdzeń za pomocą delikatnych uderzeń młotka. Całość procedury wymaga także odpowiedniego przygotowania manualnego oraz ochronnego. W trakcie wiercenia operator młota pneumatycznego musi stosować się do wytycznych zawartych w podręczniku użytkowania sprzętu (np. stosować nauszniki, okulary i rękawice ochronne). Szczególną uwagę należy poświęcić obserwacji części pracującej młota podczas działania udaru. Dodatkowo niebezpieczna dla operatorów może być procedura wyciągania rdzenia ze względu na powstające naprężenia i możliwość zakleszczenia różnych części ubioru czy ciała w elementy pracujące. Całość działań należy wykonywać w odpowiednim tempie i zachowując czas na odpoczynek. Należy zaznaczyć, że praca tą metodą należy do wymagających stosunkowo dużego wysiłku fizycznego.

Opracowanie rdzeni

Zabezpieczone rury PCV zawierające rdzenie osadów powinny być rozcinane w warunkach laboratoryjnych. Klasyczną metodą rozcięcia rdzeni, aby zbadać ich stratygrafię, jest użycie szlifierki kątowej lub piły mechanicznej. Do tego celu należy używać cienkich tarcz do metalu lub drewna w zależności od twardości plastiku, z którego wykonana jest rura. W przypadku użycia tarcz ściernych, ważne jest ustawienie możliwie najniższych obrotów, aby uniknąć wytworzenia się wysokiej temperatury oraz aby zapobiec przedostawaniu się drobin tarczy do środka rury, co mogłoby zakłócić np. wyniki datowań radiowęglowych. Dlatego też wymagane jest umiejętne operowanie głębokością cięcia wzdłuż rury, tak aby nie przeciąć kompletnie plastiku tylko dokonać połowicznego nacięcia. Do równomiernego rozcinania rdzeni używa się także specjalnych statywów, na których oprzeć można instrument tnący i stabilnie kontrolować głębokość szlifu. W kolejnym kroku, przy pomocy ostrego noża (może to być np. nóż do grubego papieru), przecina się rurę wzdłuż nacięcia pozostawionego przez szlifierkę. Rdzeni o gruboziarnistej strukturze osadów lub silnie przesuszonych nie powinno się otwierać bezpośrednio po rozcięciu ze względu na możliwość rozsypania się osadu. W tym celu używa się płaskich szpachelek, które wkłada się w poprzek osadów i delikatnie rozchyla obie połówki rury.

Po otworzeniu rdzeni dokonuje się oczyszczenia profili nożem lub szpachelką, zawsze oczyszczając osad w poprzek, tak aby nie zaburzyć granic pomiędzy warstwami. Dodatkowo należy oczyścić ściany z pozostałości plastiku i innych zabrudzeń. Ważne na tym etapie jest sporządzenie dokumentacji opisowej i fotograficznej ze względu na wciąż utrzymującą się oryginalną wilgotność osadów. Wraz z upływem czasu barwy te mogą zniknąć. Dokumentację fotograficzną sporządza się w skali makro i mikro. Do pierwszej zalicza się wykonanie fotografii każdego rdzenia w całości wraz ze skalą głębokości. Następnie sfotografowaniu powinny podlegać przedziały pozwalające na ocenę właściwości osadów (występowanie węgli drzewnych, struktura i tekstura osadów itp.). Dokumentacja opisowa odbywa się na specjalnie przygotowanych kartach, pozwalających również na wykonanie schematycznych rysunków. Opisowi podlega następstwo warstw, ich charakterystyka, obecność makroszczątek i artefaktów oraz kolor osadu, np. wg skali Munsella, czyli palety kolorów wzorcowych dla gleb. Dokonuje się również oceny kompakcji osadów w ramach poszczególnych rdzeni. Jeżeli dany zespół badawczy nie decyduje się na próbkowanie od razu po rozcięciu rdzeni, należy je zabezpieczyć owijając odpowiednio folią (np. spożywczą lub tzw. stretch). Warto pamiętać wtedy o ponownym oznaczeniu poszczególnych połówek rur, ponieważ folia może zakryć pierwotny opis i utrudnić łatwą identyfikację poszczególnych części.

Przechowywanie rdzeni, zwłaszcza zawierających dużą ilość materii organicznej (np. służącej do dalszych badań paleoekologicznych) lub o wysokim stopniu wilgotności, powinno odbywać się w warunkach chłodniczych. Brak odpowiednio niskiej temperatury może prowadzić do powstania pleśni i grzybów wewnątrz rdzeni, co znacząco wpłynie na jakość niektórych badań specjalistycznych. Rozcięte rdzenie należy również przechowywać w pozycji poziomej, aby zapobiec przesunięciom w głębokości i wymieszaniu się osadu.

OGRANICZENIA METODY

Kompresja

Wiercenia typu vibra-coring umożliwiają pozyskiwanie nienaruszonego, horyzontalnego warstwowania

osadów. Niemniej jednak nie zawsze miąższość poszczególnych warstw będzie zachowana w skali jeden do jednego. Za zniekształcenia odpowiada tzw. kompresja osadów. Wytwarza się ona podczas działania udaru i skutkuje "sprasowaniem", zwłaszcza górnych części rdzenia. Niejednokrotnie w trakcie pozyskiwania profilu próbnik zagłębia się na głębokość metra poniżej poziomu terenu, a po rozcięciu tuby PCV okazuje się, że osadu jest np. tylko 70 cm. W związku z tym należy każdorazowo ocenić stopień kompresji (dlatego ważne jest prowadzenie dokładnych notatek polowych i zapisywanie osiąganych głębokości – ryc. 1 i 5) i na tej podstawie przeliczać głębokości w przypadku jej wystąpienia. Kompresji ulegać mogą wszystkie typy osadów, jednakże najczęściej są one obserwowane przy dużym zawodnieniu lub wysokim zróżnicowaniu uziarnienia w obrębie pobieranego rdzenia (np. występowanie naprzemiennie mułków i piasków).

Wody podziemne

Kolejnym aspektem wartym uwagi i rozpoznania przed wykonaniem wierceń jest poziom lustra wód podziemnych. O ile metoda vibra-coring doskonale nadaje się do wiercenia w gruntach wysuszonych (np. w krajach śródziemnomorskich), to w przypadku silnego zawodnienia osadów mogą wystąpić problemy z ich pełnym pobraniem (Canti i Meddens 1998). Sytuacja ta szczególnie widoczna jest w drobnoziarnistych utworach, jak np. gytie, kiedy po przekroczeniu 4 metrów poniżej poziomu lustra wód podziemnych, osad jest rozpychany na boki próbnika lub wypada z próbnika przy wyciąganiu pomimo stosowania urywaków (ryc. 6). W takich sytuacjach wiercenia należy kontynuować manualnymi typami wiertnic (np. typ rosyjski).

Transport

Z uwagi na liczne elementy zestawu wiertniczego, ich wagę oraz gabaryty często napotyka się trudności w dotarciu na stanowisko badawcze. Do transportu sprzętu wykorzystuje się przyczepy z samochodem terenowym lub samochód typu pick-up. Szczególnie problematyczne jest prowadzenie wierceń na obszarach podmokłych, gdzie konieczne jest ręczne przenoszenie wszystkich niezbędnych elementów.

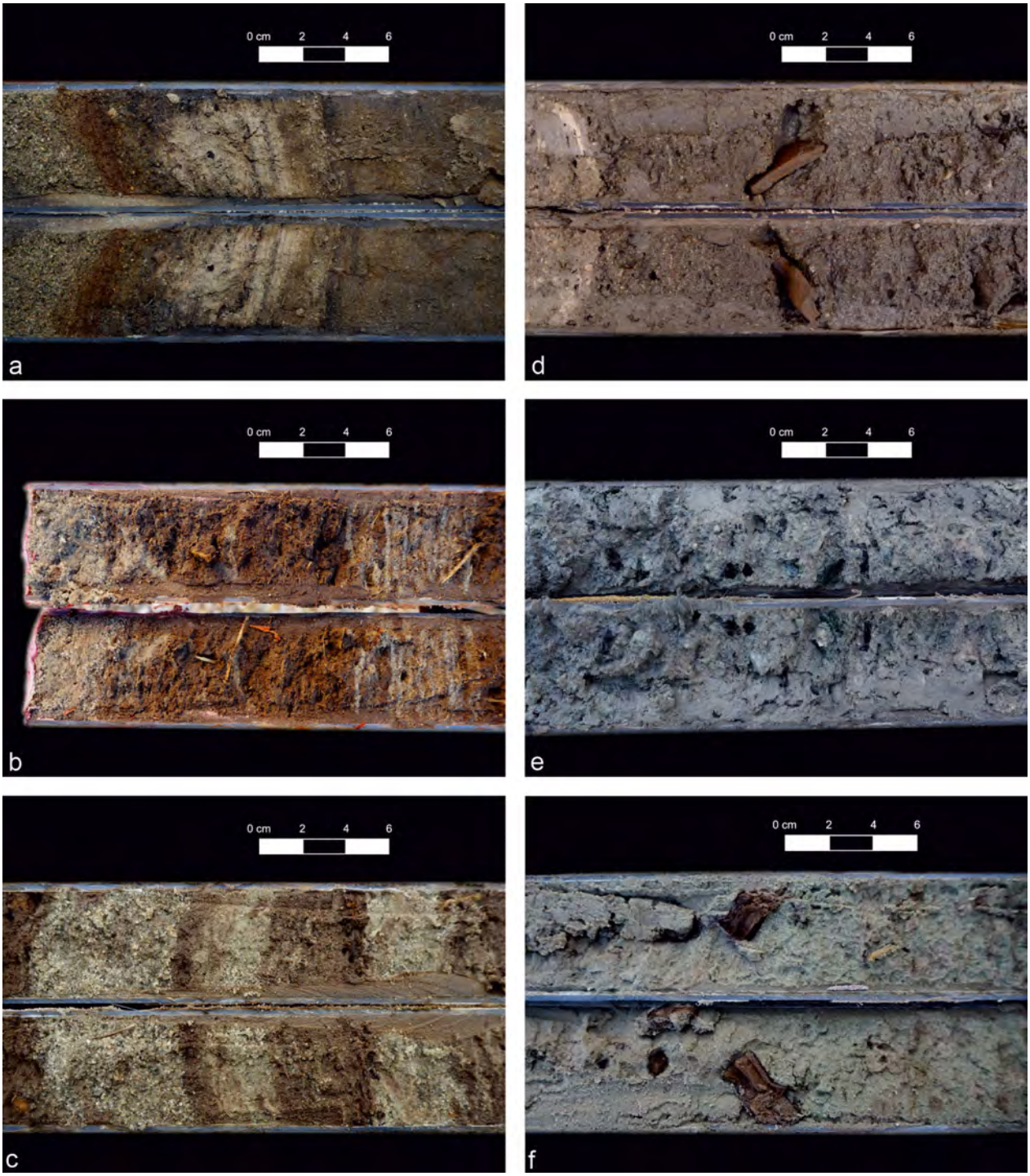
Przykłady zastosowań i możliwości metody

Liczne przykłady badań w Polsce i na świecie dokumentują możliwości i skuteczność metody zarówno w kwestii badań archeologicznych, jak i środowiskowych (np. Ghilardi i in., 2008; Vouvalidis i in., 2010; Masci i in., 2022; Khamnueva-Wendt i in., 2023). Poniżej zostaną przedstawione wybrane przykłady badań w różnych środowiskach sedymentacyjnych, aby ukazać specyfikę wykonywania wierceń oraz możliwości poznawczych wynikających z pozyskanych profili.

Torfowiska, paleojeziora i obszary podmokłe

O ile wspomniane trudności z uwodnionymi gruntami przysparzają pewnych problemów z pobieraniem rdzeni, często jest to jedyna metoda dotarcia do zapisu środowiskowego dawnych krajobrazów. Przykładami tego typu zastosowań mogą być wiercenia w torfowiskach i paleojeziorach, rekonstruujące dynamikę ich rozwoju, przyczyny zaniku, stopień antropopresji itd. Często w takich osadach wymagane jest uzyskanie ciągłego zapisu bez zaburzeń stratygraficznych wynikających z używania okręcanych metod wiertniczych. Jeżeli w danym środowisku sedymentacyjnym, charakteryzującym się występowaniem drobnoziarnistych, biogenicznych osadów, pojawią się przewarstwienia, np. piaszczyste czy żwirowe, niemożliwe staje się też wykorzystanie ręcznie operowanych próbników (np. Leszczyńska i in., 2022; Niebieszczański i in., 2023). W takich sytuacjach jedyną alternatywą stają się wiercenia udarowe, które nie tylko pozwalają na przebicie się przez gruboziarniste warstwy, ale także umożliwiają dotarcie do zapisu mineralnego w spągu osadów paleozbiorników.

Przykładem sytuacji, które wymagają zastosowania wierceń udarowych, są torfowiska przymorskie, gdzie rejestrowane są epizody sztormowe. Te ostatnie charakteryzują się depozycją gruboziarnistego materiału w obrębie osadów organicznych, które uniemożliwiają użycie wierceń ręcznych (ryc. 6: b i c). Wykorzystanie techniki vibra-coring pozwala na uzyskanie pełnych profili naprzemiennie występującego torfu i osadów sztormowych. Zachowane granice warstw litologicznych mogą więc stać się przedmiotem np. datowań radiowęglowych, dzięki którym uzyskuje się informacje o okresach wzmożonej aktywności sztormowej w postaci dostawy materiału piaszczystego do basenu sedymentacyjnego. Przykładem tego typu



Ryc. 6. Przykłady zapisu osadowego w rdzeniach: a: Warstwowanie osadów rzecznych (paleokoryta), b i c: Warstwy sztormowe pomiędzy podkładami torfu; d: Osady antropogeniczne stanowiska z artefaktem (fragment naczynia); e: Węgle drzewne w obrębie utworów gytii jeziornej; f: Fragment pradziejowego drewna w osadach fluwialnych

badań jest poszukiwanie zapisu holoceńskich sztormów w torfowiskach strefy południowych wybrzeży Bałtyku (Leszczyńska i in., 2022) czy poszukiwanie zapisu tsunami w dawnych lagunach na Krecie (Lespez i in., 2021).

Kolejnym typem badań są strefy brzegowe dawnych zbiorników. Jeziora często doświadczały w przeszłości transgresji i zmian swojej powierzchni poprzez podnoszenie się lub opadanie lustra wody. To z kolei mogło powodować wzmożoną erozję strefy brzegowej

poprzez jej migrację. W efekcie do strefy przybrzeżnej zbiornika mogły dostać się większe frakcje, deponowane w obrębie osadów biogenicznych. Kolejny raz jedyną metodą umożliwiającą pobranie pełnego zapisu tych zmian środowiskowych jest technika wierceń udarowych, dzięki której można uzyskać informacje o czasie wystąpienia epizodu transgresyjnego. Zobrazowaniem takiego zapisu jest przykład paleojeziora w Bruszczewie w Wielkopolsce, które około 1900 BC uległo transgresji. Epizod ekspansji jeziora został udokumentowany poprzez wiercenia udarowe właśnie w strefie przybrzeżnej dawnego jeziora i zarejestrowanie piaszczystych osadów w obrębie utworów biogenicznych (Niebieszczański i in., 2024).

Osady rzeczne – paleokoryta, aluwia i zastoiska

Jedną ze szczególnie ważnych gałęzi archeologii środowiskowej jest rekonstruowanie relacji pomiędzy dawnymi społeczeństwami a siecią hydrologiczną. Te relacje mogły znacząco różnić się od dzisiejszego układu przestrzennego pomiędzy stanowiskami a rzekami, ze względu na ewolucję tych drugich w postaci zmiany przebiegu koryta, deponowanie osadów powodziowych czy wysychania starorzeczy. Osady rzeczne, zarówno te o charakterze korytowym, jak i pozakorytowym, charakteryzują się nierzadko wysokim zróżnicowaniem litologicznym poszczególnych stadiów rozwoju w związku ze zmieniającą się siłą prądową środowiska. Dlatego też stosowanie ręcznych wierceń rdzeniowych, należy do niezwykle trudnych. Z kolei wiercenia świdrowe o charakterze okręcanym często powodują przemieszanie drobnych zmian litologicznych i ważnych w czytaniu środowisk fluwialnych struktury i tekstury osadów (gradacja uziarnienia wraz z głębokością, kierunkowość orientacji ziaren itp.). Metoda vibra-coring nie tylko pozwala na pozyskanie głębokich rdzeni w takich zapisach osadowych, ale także umożliwia odczytywanie nawet drobnych zmian stratygraficznych w obrębie rdzenia (ryc. 6 a i f). Niekiedy klarowność informacji stratygraficznych i litologicznych jest porównywalna z dokumentowaniem naturalnych odsłonięć rzecznych. Bywa, że wiercenia w paleokorytach pozwalają na ukazanie całej drogi ewolucji rzeki w danym etapie, od środowisk wysokoprądowych, niskich przepływów aż do momentu powstania paleomeandrów (ryc. 6 a).

Szczególnie istotne znaczenie metody vibra-coring leży w rozpoznawaniu zapisu hydrologicznego pogrzebanego pod osadami powodziowymi, np. w dolinach uchodzących do Morza Śródziemnego. Przykładem takiego rozpoznania jest szereg projektów realizowanych w celu rekonstrukcji obrazu zależności pomiędzy dynamicznie zmieniającą się siecią hydrograficzną a pradziejowym i historycznym osadnictwem (m.in. Ghilardi i in., 2008; Vouvalidis i in., 2010; Niebieszczański i in., 2018; 2019; 2023; Becker i in., 2019; Vott i in., 2020).

Osady antropogeniczne – stanowiska archeologiczne

Pobieranie nienaruszonych stratygraficznie profili na stanowiskach archeologicznych, zwłaszcza o charakterze osadowym, ma wyjątkową wartość poznawczą. Przede wszystkim pozwala na wstępne rozpoznanie chronologiczno-funkcjonalne w stosunkowo krótkim czasie. Ponadto niekiedy może stanowić jedyny sposób na dotarcie do głęboko zalegających poziomów stratygraficznych i tym samym dostarczać bezpośrednie dane o osadnictwie (np. Duffield i in., 2022).

Osady antropogeniczne charakteryzują się często wysokim zróżnicowaniem litologicznym i mogą zawierać silnie przemieszane osady pod kątem uziarnienia. Dodatkowo obecność zabytków, takich jak dachówki, cegły, polepa czy obiekty kamienne, nie zawsze pozwolą na użycie ręcznych metod wiertniczych celem rozpoznania. Wykorzystanie sondy udarowej zwiększa szanse na penetrację tego typu gruntu i rejestrowanie nawet drobnych zmian stratygraficznych lub dokładne określenie głębokości odnajdywanych artefaktów i ekofaktów (fragmenty naczyń, węgle drzewne itp.) (ryc. 6 d i e). W przypadku funkcji wierceń jako wspomagających lub wyprzedzających konwencjonalne badania wykopaliskowe, użycie ich umożliwia łatwą rejestrację np. spągu osadów antropogenicznych. Tym samym w szybki sposób określić można nakład prac ziemnych i zoptymalizować koszty lub terminarz. Czasami uzyskiwane profile mogą wręcz zastępować wykopaliska w rozpoznawaniu dawnych śladów osadnictwa na przykład poprzez określenia chronologiczne w odpowiednich seriach datowań (np. radiowęglowych) (ryc. 6 d i e). W zapisie osadowym profili odczytywane mogą być hiatusy osadnicze, okresy wzmożonej aktywności (np. poprzez badania geochemiczne; por. Borówka i Okupny, w tym

tomie), poziomy spalenizny czy nawet kolejne poziomy podłóg domostw.

Dodatkowo na niektórych stanowiskach możliwe jest wykonywanie rekonstrukcji paleośrodowiskowych i oceny wpływu działalności człowieka na otaczający go krajobraz. W szczególności okazje takie zdarzają się w przypadku fos czy studni w dawnych osadach (np. grodziska, osady ufortyfikowane itp.). Przy odpowiednich warunkach środowiskowych w rdzeniach pobieranych z warstw tych obiektów stosuje się próbkowanie zbliżone do osadów pozyskanych z jezior czy torfowisk. Metoda vibra-coringu ma tu szczególne zastosowanie ze względu na możliwość penetracji przez warstwy zasypiskowe, złożone np. z rumoszu skalnego, oraz wiarygodne określenie głębokości zalegania poszczególnych poziomów i tym samym próbek w przeciwieństwie do technik polegających na okręcanych świdrach.

Istnieje szereg badań, w których wiercenia udarowe przyniosły istotne dane dotyczące osadnictwa na stanowiskach archeologicznych (Khamnoueva i in., 2023). Można do nich zaliczyć np. badania na obiektach tellowych, które charakteryzują się miąższymi pokładami antropogenicznymi, dochodzącymi nawet do kilkunastu metrów (Lespez i in., 2013). Pobrane rdzenie są często w tym przypadku jedyną drogą dotarcia do zapisu osadniczego bez organizowania kosztochłonnych i często trwających dziesięciolecia wykopalisk. Kolejnym przykładem może być odkrywanie poziomów archeologicznych pokrytych kilkumetrowymi warstwami osadów powodziowych, np. w dolinach wschodniego basenu Morza Śródziemnego (Lespez i in., 2013; Niebieszczański i in., 2019).

PODSUMOWANIE

Nowoczesna archeologia dociera do wiedzy o przeszłości za pomocą szerokiego spektrum metod pochodzących z rozmaitych nauk. W szczególności archeologia terenowa korzysta z coraz to nowych, zaawansowanych techniki dokumentacji i pozyskiwania danych, takich jak LIDAR, wykorzystanie dronów, multispektrometrów itd. Podobnie wykorzystywane już od dawna wiercenia geologiczne na stanowiskach i poza nimi ulegają postępowi technologicznemu i opracowywane są coraz to nowe metody pozwalające na usprawnienie prac i zwiększenie ich wydajności, ale przede wszystkim poprawienie jakości otrzymywanych rezultatów. Do tego typu metod z pewnością zaliczyć można udarowe pobieranie rdzeni o nienaruszonej strukturze osadów.

Wiercenia typu vibra-coring spośród wszystkich metod wiertniczych oferują najszersze spektrum zastosowań w praktycznie wszystkich rodzajach gruntu – zarówno na stanowisku archeologicznym, jak i poza nim. Pozyskiwane profile najwierniej zachowują strukturę i teksturę osadów oraz głębokości zalegania poszczególnych warstw, ich granic czy też samych zabytków. Jedyną porównywalną metodą w kwestii rozdzielczości, ale możliwą do zastosowania tylko w gruntach zawodnionych, są wiertnice do pobierania rdzeni, np. typu Instorf. Metoda udarowa pozwala z kolei na jej zastosowanie nawet w trudno dostępnych osadach antropogenicznych.

Najważniejszym aspektem wykonywania wierceń jest odpowiedni dobór sprzętu i założeń metodycznych do zadawanych pytań badawczych (co jest celem rozpoznania, jakie są spodziewane osady, do czego służyć mają rdzenie itd.). Pozyskane profile mogą być poświęcone wielorakim zamierzeniom naukowym, takim jak rekonstrukcja paleośrodowiskowa, badania wyprzedzające i sondażowe, analizy mikromorfologiczne, określenia chronologiczne i wiele innych. W tym świetle metoda wierceń udarowych jest spośród wszystkich typów wierceń najbardziej uniwersalnym i pewnym sposobem docierania do wiedzy o przeszłości w badaniach archeologicznych.

Niniejszy tekst powstał w oparciu o doświadczenia szeregu projektów naukowych, w których wykorzystana została metoda vibra-coring. Każdy z nich przynosił nowe obserwacje związane z różnymi środowiskami sedymentacyjnymi, problemami technicznymi czy metodami optymalizacji procedury wiercenia. Badania zostały sfinansowane z następujących źródeł:

- NCN 2019/33/B/HS3/00193 – „Życie przy jeziorze: historia relacji człowieka ze środowiskiem na przykładzie geoarcheologicznego studium mikroregionu osadniczego w Bruszczewie (Wielkopolska)" – Wykorzystanie szeregu wierceń typu vibra-coring w osadach jeziornych i torfowiskowych celem rekonstrukcji paleojeziora, dynamiki jego zmian oraz poszukiwaniu śladu człowieka we wskaźnikach paleoprzyrodniczych (Niebieszczański i in. 2021; 2023).
- NCN 2016/21/B/HS3/00923 - „Buried archaeology" – badania nad osadnictwem pradziejowym (neolit – epoka brązu – początki epoki żelaza) w dolinach aluwialnych strefy egejskiej na przykładzie doliny rzeki Anthemous w północnej Grecji." – Wykorzystanie vibra-coring w osadach powodziowych strefy śródziemnomorskiej celem poznania

ewolucji krajobrazu i poszukiwania zapisu ludzkiej działalności pod aluwiami (Niebieszczański i in. 2019; 2023).

- NCN 2018/29/B/ST10/00042 – „Katastrofalne powodzie morskie na wybrzeżach południowego Bałtyku w późnym holocenie" – Wykorzystanie vibra-coring na torfowiskach przymorskich w celu uchwycenia piaszczystych warstw sztormowych (Leszczyńska i in. 2022).
- NCN 2020/37/B/HS3/02561 – „Społeczności za fortyfikacjami. Ekonomia polityczna mikroregionu Kakucs (Węgry) w środkowej epoce brązu" – Wykorzystanie vibra-coring w osadach antropogenicznych stanowisk osadowych i w obrębie fortyfikacji (wypełniska fos i studni).
- NCN 2020/38/E/HS3/00512 – „Od pierwszych do ostatnich Mykeńczyków w rejonie zatoki Wolos (Tesalia)" – Wykorzystanie vibra-coring na wielowarstwowym stanowisku archeologicznym celem ustaleń chronologicznych i rekonstrukcji krajobrazowej.

LITERATURA

Canti, M., Meddens, F. 1998. Mechanical coring as an aid to archaeological Projects. *Journal of Field Archaeology*25: 97 – 105. https://doi.org/ 10.1179/jfa.1998.25.1.97.

Becker, F., Eser, R., Hoelzmann P., Schutt, B. 2019. Reconstructing human-landscape interactions in the context of ancient iron smelting on Elba Island, Italy, using sedimentological evidence. *Geoarchaeology* 34 (3): 336–359.

Duffield, S., Walkus, J., White, E., McKehnie, I., Mackie, Q., McLaren, D. 2022. Documenting 6,000 Years of Indigenous Fisheries and Settlement as Seen through Vibracore Sampling on the Central Coast of British Columbia, Canada. *American Antiquity* 87(1): 168–183.

Ghilardi, M., Kunesch, S., Styllas, S., Fouache, E., 2008. Reconstruction of Mid-Holocene Sedimentary environments in the central part of the Thessaloniki Plain (Greece), based on microfaunal identification, magnetic susceptibility and grain-size analyses. *Geomorphology* 97: 617–630. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.09.007.

Khamnoueva-Wendt, S., Wendt J., Mitusov, A., Kessler M., Siem H., von Carnap-Bornheim, C., Bork H. 2023. Local landscape transformation at the Hedeby-brook valley in the Viking proto-town Hedeby. *Journal of Archaeological Science: Reports* 49, 104006.

Lespez, L., Tsirtsoni, Z., Darcque, P., Koukouli – Chryssantaki, H., 2013. The lowest levels at Dikili Tash, Northern Greece: a missing link in the Early Neolithic of Europe. *Antiquity* 87: 30–45.

Lespez, L., Lescure, S., Saulnier-Copard, S., Glais, A., Berger, J., Lavigne, F., Pearson, C., Virmoux, C., Muller-Celka, S., Pomadere, M. 2021. Discovery of a tsunami deposit from the Bronze Age Santorini eruption at Malia (Crete): impact, chronology, extension. *Scientific Reports* 11(1), 15487.

Leszczyńska, K., Stattegger, K., Moskalewicz, D., Jagodziński, R., Kokociński, M., Niedzielski, P., Szczuciński, W. 2022. Controls on coastal flooding in the southern Baltic Sea revealed from the late Holocene sedimentary records. *Scientific Reports* 12 (1), 9710.

Masci, L., Vignola, C., Liakopoulos, G., Kouli, K., Koukousioura, O., Aidona, E., Moros, M., Vouvalidis, K., Izdebski, A., Mas,i A., 2022. Landscape Response to Dynamic Human Pressure in thePaliouras Lagoon, Halkidiki Peninsula, Macedonia, Greece. MDPI, *Quaternary* 5 (4): 1–24.

Niebieszczański, J., Hildebrandt-Radke, I., Vouvalidis, K., Syrides, G., Andreou, S., Czebreszuk, J., Pappa, M., Tsourlos, P., Karpińska-Kołaczek, M., Rzodkiewicz, M., Kołaczek, P. 2018. 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): 600–619.

Niebieszczański, J., Czebreszuk, J., Hildebrandt-Radke, I., Vouvalidis, K., Syrides, G., Tsourlos, P., Spychalski, W. 2019. Uncovering tell formation processes in the Anthemous Valley (Northern Greece): Geoarchaeological studies of Nea Raedestos Toumba. *Journal of Archaeological Science: Reports* 27, 101987.

Niebieszczański, J., Bahyrycz, C., Żurkiewicz, D., Szambelan, W. 2022. In search for an island: Non-invasive, geoarchaeological investigations in Bruszczewo microregion (Central-western Poland). *Journal of Archaeological Science: Reports* 45, 103584.

Niebieszczański, J., Kołaczek, P., Karpińska-Kołaczek, M., Hildebrandt-Radke, I., Gałka, M., Kneisel, J. 2024. Consequences of Lake Expansion and Disappearance for the Complex of Bronze and Iron Age Settlements at Bruszczewo (Western Poland, Central Europe). *Environmental Archaeology* 29(4): 543-561

Niebieszczański, J., Hildebrandt-Radke, I., Czebreszuk, J., Bahyrycz, C., Vouvalidis, K., Syrides, G., Tsourlos, P., Pappa, M., Andreou, S. 2023. Coastal changes and human occupation in the eastern part of Thessaloniki Bay: Geoarchaeological investigations of Toumba Gona. *Geoarchaeology*, *Early View*.

Siebenborn, G., 2005. Kleinbohrungen DIN4021 – eine (Ge-)Wissensfrage?, *Hydraulic Engineering Repository* 5 (05): 37–41.

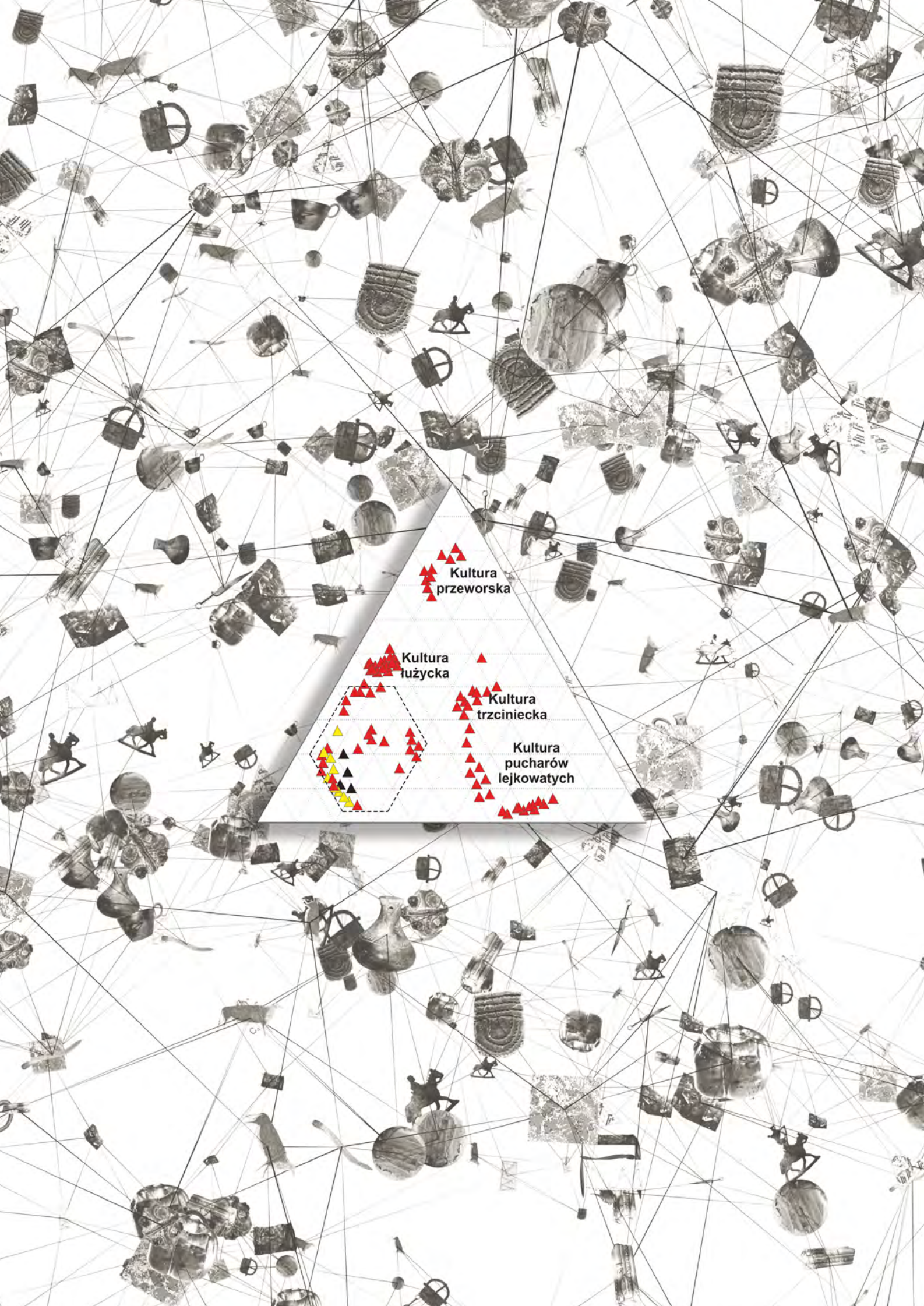
Shotyk, W., Noernberg, T. 2020. Sampling, handling, and preparation of peat cores from bogs: review of recent progress and perspectives for trace element research. *Canadian Journal of Soil Science*, 100: 363 – 380. https://doi.org10.1139/cjss-2019-0160.

Stein, J. 1986. Coring archaeological sites. *American Antiquity* 51 (3): 505–527.

Vouvalidis, K., Syrides, G., Pavlopoulos, K., PEchlivanidou, S., Tsourlos, P., Fotini-Papakonstantinou, M. 2010. Palaeogeographical reconstruction of the battle terrain in Ancient Thermopylae, Greece. *Geodynamica Acta* 23: 241–253.

Vott, A., Willerhauser, T., Hadler, H., Obrocki, L., Fisher, P., Heinzelmann, M. 2020. Geoarchaeological evidence of Ostia's river harbour operating until the fourth century AD. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 12 (4): 88.




Kultura
przeworska
Kultura
łużycka
Kultura
trzciniecka
Kultura
pucharów
lejkowatych

Geochemiczne badania osadów biogenicznych

Ryszard Krzysztof Borówka, Daniel Okupny

WPROWADZENIE

Wśród szeregu gałęzi nauk przyrodniczych oraz archeologii środowiskowej istotną rolę pełni geochemia, której celem oprócz określenia ilościowego poszczególnych pierwiastków składających się na budowę Ziemi jako całości, jest także ustalenie zależności dotyczących rozmieszczenia i migracji pierwiastków pomiędzy atmosferą, hydrosferą, biosferą i litosferą (Wąchalewski 1994). Zdaniem Migaszewskiego (1998) integralną częścią badań geochemicznych powinny być także zagadnienia z zakresu biogeochemii, gdyż pozwalają one na rejestrację pierwiastków śladowych w bioindykatorach roślinnych o różnym stopniu skażenia. Badania geochemiczne oraz biogeochemiczne dostarczają szeregu danych ilościowych pozwalających poznać obieg każdego pierwiastka w przyrodzie oraz ustalenie warunków, w których pierwiastki ulegają koncentracji lub rozproszeniu (Grobelny i Mikulski 1981; Zgłobicki i Ziółek 2006; Hildebrandt-Radke 2007; Migaszewski i Gałuszka 2008; Plak i in., 2013).

Wśród czynników odpowiedzialnych za obieg pierwiastków oraz związków na Ziemi wymienia się najczęściej procesy geochemiczne wewnątrz Ziemi, procesy wietrzenia oraz dynamiczną aktywność organizmów żywych (Migaszewski i Gałuszka 2000). Ze względu na złożoność procesów geochemicznych w środowisku przyrodniczym przy interpretacji wyników badań konieczna jest znajomość wiedzy z zakresu geologii, geofizyki, mineralogii, petrografii, hydrologii, gleboznawstwa czy fizjologii roślin. Warto podkreślić, że to właśnie umiejętności wytopu poszczególnych stopów metali pozwoliły na podział najmłodszych dziejów ziemi na epokę kamienia, miedzi, brązu i żelaza (Skoczylas i Gunia 2016). Poszczególnym fazom udoskonalania technologii produkcji metali towarzyszyły oczywiście zmiany krajobrazu, wśród których najczęściej wymienia się zmiany użytkowania gruntu, wylesienia, rozwój ośrodków miejskich, wzrost stopnia zróżnicowania sztuki rzemieślniczej oraz wzrost ilości wprowadzanych do środowiska metali (Hong i in., 1996; Görres i Frenzela 1997; Mannion 2001; Kleeberg i in., 2016).

W związku z narastającą antropopresją szereg elementów zewnętrznych sfer Ziemi (np. gleby, osady wodne, szata roślinna) stało się przedmiotem badań

DOI: 10.64158/ra97grdj0g

geochemicznych, gdyż ich skład pierwiastkowy pozwala na rekonstrukcję intensywności procesów erozji, trofii siedliska oraz obrazuje stopień obciążenia środowiska substancjami toksycznymi (Kosiński i in., 1994; Helios-Rybicka 1996; Gonet i Cieślewicz 1997; Zolitschka i in., 2003; Migaszewski i in., 2004; Podlasińska i Podlasiński 2004; Lis i in., 2007; Pasieczna 2008; Prosowicz 2008; Kozieł, Zgłobicki 2010; Zgłobicki 2010; Fiałkiewicz-Kozieł i in., 2018; Szarłowicz i in., 2018; Juśkiewicz i Gierszewski 2022; Sojka i in., 2022; Waters i in., 2022). Szczególne pod tym względem są jednak nawarstwienia stanowisk archeologicznych w granicach grodzisk, fos czy historycznych miast (Hildebrandt-Radke 2011; Kittel i in., 2014; Wardas-Lasoń i Garbacz-Klempka 2015; Święta-Musznicka i Latałowa 2016; Antczak-Orlewska i in., 2022; Okupny i in., 2022; Rybicka i in., 2023), aluwia w dolinach różnej wielkości rzek (Klimek i Zawilińska 1985; Szwarczewski 2003; Falkowska 2005; Szmańda 2008; Zgłobicki i in., 2008; Szmańda i in., 2018; Ciszewski 2001; Ciszewski i in., 2018), osady stokowe (Zgłobicki i Rodzik 2007; Zgłobicki 2008; Szwarczewski i Smolska 2013; Piech i in., 2024) oraz osady biogeniczne, czyli torfy i gytie (Latałowa 1999; Koinig i in., 2003; Szwarczewski i Korabiewski 2003; Pleskot i in., 2018; Bertrand i in., 2024), gdyż wyniki analizy ich składu chemicznego mogą pełnić rolę dodatkowego wskaźnika geochronologicznego. Dla przykładu to właśnie dane geochemiczne, w powiązaniu z wynikami innych metod paleoekologicznych, stanowią kluczowe kryterium wydzielania w profilach osadów biogenicznych granicy holocen-antropocen (Fiałkiewicz-Kozieł i in., 2020; McCarthy i in., 2023).

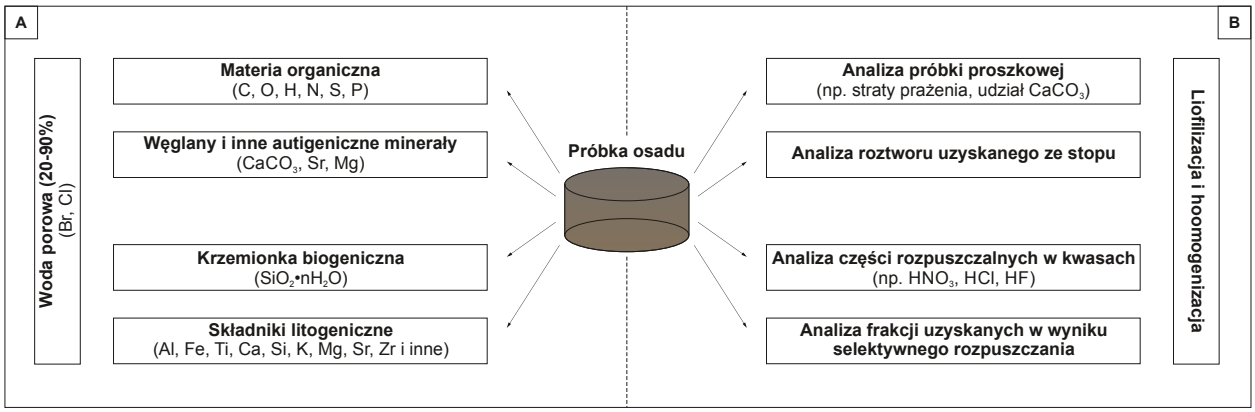
Wśród szeregu obszarów podmokłych torfowiska zajmują wyjątkowe miejsce, gdyż o ich egzystencji decyduje trwałe nawodnienie warunkujące występowanie warunków beztlenowych oraz obecność roślin torfotwórczych (Łachacz 2004; Bajkiewicz-Grabowska 2005). W rezultacie biochemiczne procesy torfienia, przebiegające w warunkach nadmiernej wilgotności i przy słabym dostępie powietrza, odpowiadają za sedentację (narastanie) autochtonicznej materii organicznej w postaci torfu (Tobolski 2004). Z kolei na dnie jezior trwa proces sedymentacji materii pochodzenia autogenicznego (powstałej w zbiorniku) oraz alogenicznej, powstałej poza zbiornikiem (Rutkowski 2007). Zdaniem Tobolskiego (2008) paleobotaniczne rozgraniczenie różnic w biogenicznych procesach sedymentacji i sedentacji zapewnia poprawną interpretację rezultatów badań osadów biogenicznych. Mniejsze znaczenie przypisywane jest właściwościom fizycznym i chemicznym osadów biogenicznych. Mimo tego wielokrotnie podejmowano próby ich klasyfikacji w oparciu o wyniki podstawowych składników litogeochemicznych (np. Horawski 1971; Markowski 1980; Rzepecki 1983; Myślińska 2003; Schnurrenberger i in., 2003). Nie jest to łatwe zadanie, gdyż osady biogeniczne zbudowane są z czterech głównych składników litogenicznych, przy czym ich wzajemne proporcje oraz warunki dostawy determinują możliwości wiązania poszczególnych pierwiastków lub związków (ryc. 1A).

Ze względu na wyjątkowe właściwości skutecznego i długotrwałego archiwizowania dziejów środowiska przyrodniczego przez osady biogeniczne główne aspekty badań geochemicznych na stanowiskach archeologicznych lub w ich pobliżu dotyczą rekonstrukcji warunków paleośrodowiskowych (hydroklimatycznych, geologicznych, geomorfologicznych) panujących w przeszłości oraz określenia charakteru i skali wpływu gospodarowania danych społeczności na środowisko. Ponadto utwory geologiczne w obu opisanych wyżej środowiskach akumulacyjnych cechuje bardzo duże zróżnicowanie zawartości składników biogenicznych oraz koncentracji pierwiastków, spowodowanych przede wszystkim zmianami: zespołów roślinnych w danym siedlisku, warunków tlenowych, zasilania oraz typu i natężenia procesów denudacyjnych w zlewni (Borówka, 2007; Bojakowska i Lech 2008; Rydelek 2011; Kittel i in., 2025).

ZARYS HISTORII BADAŃ

Jedne z pierwszych prac z zakresu rekonstrukcji warunków środowiskowych w oparciu o skład chemiczny osadów biogenicznych w granicach Polski dotyczyły zbiorników Żuchowo k. Karnkowa na Pojezierzu Kujawskim, Świtaź na Polesiu Wołyńskim oraz Woryty na Pojezierzu Mazurskim. W przypadku pierwszego zbiornika analizowano zmiany stratygraficzne udziału materii organicznej, materii mineralnej, azotu (N), wapnia (Ca), żelaza (Fe) i fosforu (P) w aż sześciu profilach (Stangenberg i in., 1957). Interpretację wyników uzupełniają liczne wykresy, tabele oraz zależności między wybranymi składnikami, wszystko z zachowaniem podziału wg litologii osadów. Z działalnością człowieka autorzy badań wiążą zmiany w intensywności wytrącania wapnia w zbiorniku, zmiany poziomu wody, wzrost dostawy ze zlewni nierozpuszczalnych części mineralnych oraz rozwój gleby piaszczysto-torfowej.

Osady jeziora Świtaź, położonego na wschód od Włodawy, cechuje silne zróżnicowanie przestrzenne składu chemicznego (Rühle 1961). Przejawia się ono



Ryc. 1. A. Najczęściej identyfikowane składniki osadów jeziornych z uwzględnieniem głównych składników geochemicznych wg Bertranda i in. (2024) – uproszczone; B – schemat ukazujący najczęściej stosowane metody badań geochemicznych osadów jeziornych (wg Borówki 2007 – uzupełnione)

nie tylko w wartościach bezwzględnych udziału wybranych pierwiastków, ale także w wzajemnej relacji części nierozpuszczalnych do związków organicznych oraz sumy Ca, Fe i P. Wśród przyczyn takiego stanu rzeczy autor opracowania wymienia głównie batymetrię zbiornika, budowę geologiczną zlewni oraz rodzaj zasilania.

W przypadku kopalnych zbiorników jeziornych w Worytach koło Olsztyna badania geochemiczne przeprowadzono dla blisko siedmiometrowej serii osadów jeziornych i torfowych (Cieśla i Stupnicka 1980). Oznaczone koncentracje takich metali śladowych jak ołów (Pb), nikiel (Ni) i miedź (Cu) pozwoliły autorkom wyróżnić kilka faz zwiększonego dopływu do zbiorników materiału allochtonicznego wskutek erozji gleby z terenów okresowo odlesionych. W dyskusji wyników podkreślono także konieczność kontynuowania badań w kontekście oszacowania wielkości zaludnienia oraz intensywności działalności osadniczej. Kolejne badania geochemiczne obejmujące oznaczenie udziału głównych składników litogeochemicznych, odczynu osadów oraz koncentracji żelaza (Fe), manganu (Mn), magnezu (Mg) oraz pierwiastków biofilnych uzupełniono wynikami analiz paleobotanicznych, paleozoologicznych oraz mineralogicznych (Pawlikowski i in., 1982).

Z przeglądu literatury wynika, że dotychczasowe badania geochemiczne osadów biogenicznych z uwzględnieniem zapisu działalności człowieka obejmowały na terenie Polski głównie oznaczenie udziału podstawowych składników, tj. materii organicznej, materii mineralnej oraz węglanu wapnia ($CaCO_3$) (tab. 1). Ponadto szereg prac dotyczący tematyki wzbogacenia gytii i torfów w metale śladowe, w tym głównie w miedź (Cu), cynk (Zn) oraz ołów (Pb) i zdecydowanie rzadziej w rtęć (Hg), nikiel (Ni), chrom (Cr) czy kadm (Cd). Prawdopodobnie ze względu na czasochłonność ekstrakcji kwasowej i zasadowej prac wykorzystujących paleogeograficzną interpretację krzemionki biogenicznej (SiO_{2biog}) jest jeszcze niewiele. W oparciu o koncentrację pierwiastków litofilnych (np. krzem – Si, glin – Al, potas – K, magnez – Mg) wielokrotnie dokonywano oceny względnych zmian rozmiarów denudacji mechanicznej i chemicznej na obszarze zlewni zbiorników. Interesujące rezultaty badań na temat zapisu eksploatacji złóż kopalin użytecznych dostarczają także analizy składu izotopowego, stąd wyraźny w ostatnich latach jest przyrost opracowań tego typu (tab. 1).

Na szczególną uwagę zasługują także badania geochemiczne współczesnych osadów dennych, których typ zależy od zmiennych w przestrzeni warunków akumulacji, takich jak głębokość, typ zasilania, budowa geologiczna zlewni czy użytkowanie terenu. Do najlepiej rozpoznanych pod tym względem należą m.in. jeziora: Mikołajskie (Więckowski 1966; Rybak 1969), Wigry (m.in. Prosowicz i Helios-Rybicka 2002; Kostka i Leśniak 2020), Sarbsko (m.in. Woszczyk i in., 2009), Gopło (Juśkiewicz i in., 2015; Juśkiewicz i Gierszewski 2022) oraz Morzycko (Adamek i in., 2021). Ze względu na charakter niniejszego opracowania pominięto szersze omówienie wyników dla wymienionych wyżej zbiorników, należy jednak pamiętać, że analizy tego typu są bardzo cennym źródłem informacji o współczesnych uwarunkowaniach obiegu metali w środowisku wodnym i powinny być częściej wykorzystywane przy interpretacjach paleogeograficznych, często wykonywanych przecież tylko dla pojedynczych rdzeni o największej miąższości.

Tabela 1. Multidyscyplinarne badania profili osadów biogenicznych w Polsce z wynikami analiz geochemicznych nawiązujących do antropopresji (stan na 2023 rok)

Nazwa stanowiska Źródło	Lokalizacja		Rodzaj analiz geochemicznych		
	φ N	λ E	$CaCO_3$	Straty prażenia	Składniki litogeochemiczne, pierwiastki, izotopy, inne
Antonin Dobrowolski i in. (2010)	51°08'23"	23°34'00"	x	x	Ca, Mg, K, Na, Al, Fe, Mn, Pb, Zn, Cu, Ni, Cd, pH
Bagno Bory Smieja-Król i in. (2015)	50°16'34"	19°16'20"	x	x	TC, TS, Fe, Pb, Zn, Cd, Tl, As, Cu, metoda SEM/EDS
Bagno Bruch Smieja-Król i in. (2010; 2019)	50°31'00"	19°20'00"		x	Fe, Mn, Mg, Sn, Hg, Pb, Cu, Cd, Zn, mulit
Bagno Mikołeska Smieja-Król i in. (2019)	50°33'38"	18°49'20"		x	Hg, Pb, Cu, mulit
Bartochów Forysiak, Twardy (2012)	51°40'31"	18°38'22"	x		TOC, pH
Bechcice Kolonia Płóciennik i in. (2016)	51°45'12"	19°14'26"		x	Na, Mg, K, Fe, Mn
Berezewo Gałka i in. (2022)	52°38'44"	23°41'37"	x	x	TC, TN, P, Al, Ba, Br, Ca, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Pb, Rb, S, Si, Sr, Ti, Zn, $\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$
Bezedna Dobrowolski i in. (2015)	51°06'08"	23°30'22"	x	x	-
Bęczkowice Borówka i in. (2015); Płóciennik i in. (2021)	51°11'05"	19°42'44"	x	x	Ca, Mg, K, Na, Fe, Mn, Pb, Zn, Cu, pH
Bielawy Gołuskie Niska i in. (2017)	52°93'72"	19°96'62"	x	x	TOC, TN, P, Al, Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, pH
Jezioro Charzykowskie Mirosław-Grabowska i in. (2023)	53°50'02"	17°30'36"	x	x	Al, Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, P, $\delta^{13}C$, $\delta^{18}O$
Jezioro Drużno Zachowicz, Kępińska (1987)	54°06'10"	19°28'33"	x	x	$SiO_{2\ ter}$, $SiO_{2\ biog}$, TOC, TN, P, Na, K, Fe, Mn, Cu, Zn, Co, Ni, Cr, Li
Jezioro Dubie Poraj-Górska i in. (2021)	53°30'31"	15°40'39"			TC, TN, TS, TOC, Ca, Fe, K, Mn, Si, Ti
Durne Bagno Bałaga (2007)	51°27'02"	23°13'17"	x	x	Ca, Sr, Mg, K, Na, Al, Fe, Mn, Mo, B, Ba, Ti, V, P, Pb, Zn, Cu, Ni, Cd, Co, Cr
Gostyń Korzeniowski i in. (2020)	53°00'13"	15°09'00"		x	Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, Pb
Jezioro Gościąż Wicik, Więckowski (1991); Goslar i in. (1998); Walanus (2000); Bonk i in. (2021)	52°35'00"	19°21'00"	x	x	Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, Ni, Cr, Cd, Li, Sr
Janiki Wielkie Chodyka i in. (2016)	53°49'28"	19°43'28"	x	x	TOC, podatność magnetyczna, metoda SEM/EDS
Jezioro Jaczno Poraj-Górska i in. (2017)	53°51'18"	21°57'07"		x	$SiO_{2\ ter}$, $SiO_{2\ biog}$, TC, TN, TS, TOC, TIC, Ca, Si, Ti, Fe, Mn
Jurki Karasiewicz i in. (2017)	53°58'00"	19°58'00"	x	x	$SiO_{2\ ter}$, Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, pH
Karaśne (Bałaga 2007)	51°25'56"	23°06'25"	x	x	Ca, Sr, Mg, K, Na, Al, Fe, Mn, B, Ba, Ti, V, P, Pb, Zn, Cu, Ni, Cd, Co, Cr
Jezioro Kazuńskie Dolne Galbarczyk-Gąsiorowska i in. (2009)	52°24'41"	20°40'56"		x	Na, K, Ca, Mg, Al, Ti, Fe, Mn, Cu, Pb, S, P
Kluki Tobolski (1997)	54°40'33"	17°19'06"		x	Cu, Co, Na, K
Komarów Dobrowolski i in. (2016)	50°38'30"	23°30'02"	x	x	Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, Ni $\delta^{13}C$, $\delta^{18}O$

Nazwa stanowiska Źródło	Lokalizacja		Rodzaj analiz geochemicznych		
	φ N	λ E	$CaCO_3$	Straty prażenia	Składniki litogeochemiczne, pierwiastki, izotopy, inne
Kopanica Sobkowiak-Tabaka i in. (2020)	52°06'20"	15°54'34"	x	x	$SiO_{2\ ter}$, $SiO_{2\ biog}$, Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn
Kopanicha Domińczak, Okupny (2010); Forysiak, Twardy (2012)	52°00'30"	20°11'21"	x	x	TOC, pH
Krzyżanowo Szwarczewski, Smolska (2013)	52°39'29"	19°32'43"		x	Zn, Pb, Cu, Cd
Kusowskie Bagno Lamentowicz i in. (2015)	53°45'28"	16°35'14"			$\delta^{13}C_{org}$ PDB
Kuźniczek Owsianny i in. (2011)	53°11'50"	16°44'18"		x	Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, Ni
Kwiatków Piotrowska i in. (2019)	52°05'52"	18°41'00"		x	Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Pb
Jezioro Lisowskie Galbarczyk-Gąsiorowska i in. (2009)	52°07'43"	21°07'26"		x	Na, K, Ca, Mg, Al, Ti, Fe, Mn, Cu, Pb, TS, P
Jezioro Lubińskie Bonk i in. (2023)	52°18'50"	14°54'5"			Ti, Fe, Mn, ^{137}Cs, ^{210}Pb
Lubrza Sobkowiak-Tabaka i in. (2022)	52°19'13"	15°26'47"	x	x	$SiO_{2\ ter}$, $SiO_{2\ biog}$, Na, K, Mg, Fe, Mn
Lutomiersk-Koziówki Kittel i in. (2014); Muzolf i in. (2015)	51°49'19"	19°13'18"	x	x	$SiO_{2\ ter}$, Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, pH
Jezioro Maliszewskie Żurek (1975)	53°10'18"	22°31'16"	x	x	K, Ca, Mg, Fe, Mn, pH
Mianów Borówka i in. (2014)	51°49'16"	19°00'33"		x	Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, Pb
Miasteczko Śląskie Foltyn i in. (2018)	50°29'49"	18°57'00"		x	Pb, Cd, Zn, Cu
Jezioro Młynek Welc i in. (2021)	53°49'28"	19°43'28"		x	Na, TS, Fe, K, Ti, Al, Mg, Ca, TOC, P, TN, podatność magnetyczna
Młyny Cybul, Okupny (2021)	50°35'47"	19°33'17"	x	x	$SiO_{2\ ter}$, Fe, Cu, Zn, Pb
Niwka Borówka (1992)	53°33'21"	16°11'51"		x	$SiO_{2\ ter}$, Na, K, Ca, Mg, Al, Fe, Mn, Cu, Zn, Ni, Pb
Jezioro Nowe Objezierze Czerniak i in. (2023)	52°52'06"	14°20'15"		x	Fe, Mn, K, Ca, Si, Ti
Osieczna Borówka (1990, 1992)	51°55'16"	16°41'12"	x	x	$SiO_{2\ ter}$, $SiO_{2\ biog}$
Jezioro Ostrowite Kowalewski i in. (2006)	53°47'09"	17°36'01"	x	x	$SiO_{2\ ter}$, $SiO_{2\ biog}$
Otrębowskie Brzegi Pawełczyk i in. (2018b, 2019)	51°55'16"	16°41'12"		x	Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, Cr, Ni, ^{206}Pb, ^{207}Pb, ^{208}Pb
Pawłowa Pawłowski i in. (2016)	51°30'20"	19°20'00"	x	x	$SiO_{2\ biog}$, Na, K, Ca, Mg, Al, Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, Ti
Jezioro Pniówno Suchora (2019)	51°14'47"	23°20'32"	x	x	$SiO_{2\ ter}$, $SiO_{2\ biog}$, TOC
Poganowo Szal i in. (2015)	54°36'00"	21°23'05"	x	x	Cu, Zn, Ni, Pb, Cd, Cr, Co, Mo, Sr, Ca, P
Popówka Karasiewicz (2019)	53°56'25"	17°48'04"		x	$SiO_{2\ ter}$, TOC, Na, K, Ca, Mg, Al, Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, Ni, Cd, Co, Ba, pH

Nazwa stanowiska Źródło	**Lokalizacja**		**Rodzaj analiz geochemicznych**		
	φ N	λ E	$CaCO_3$	Straty prażenia	Składniki litogeochemiczne, pierwiastki, izotopy, inne
Poręby Wojsławskie Plak i in. (2015)	50°16'33"	21°30'18"		x	Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, Cd, Cr, pH
Pusty Staw Tylmann (2005)	54°43'25"	18°21'51"		x	$SiO_{2\ ter}$, Na, K, Ca, Mg, Al, Fe, Mn, Cu, Zn, Cd, Pb
Jezioro Racze Bloom (2015 niepublikowane)	53°18'30"	14°51'29"		x	TC, TN, TS, Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, Pb
Jezioro Racze Latałowa (1999)	53°57'28"	14°37'25"		x	$SiO_{2\ ter}$, Ca, Mg, Fe, Mn, Al
Radzików Dobrowolski i in. (2012)	52°09'50"	22°30'06"	x	x	Ca, Sr, Mg, Na, K, Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, Co, Ni, pH
Rąbień Forysiak i in. 2012; Płaza i in. (2015); Słowiński i in. (2016)	51°48'20"	19°18'05"		x	Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, Ni, Cr
Jezioro Retno Karasiewicz i in. (2014)	53°20'40"	19°27'13"	x		$SiO_{2\ ter}$, Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, pH
Rozprza Antczak-Orlewska i in. (2022)	51°18'07"	19°40'04"	x	x	TC, TN, TS, Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, pH
Jezioro Salęt Szal i in. (2014)	53°56'22"	21°19'20"		x	K, Ti, Ca, Fe, Mn
Jezioro Salno Poraj-Górska i in. (2021)	53°29'17"	18°57'29"			TC, TN, TS, TOC, Ca, Fe, K, Mn, Si, Ti
Rynna Samicy Hildebrandt-Radke (2013)	52°01'01"	16°35'15"	x	x	K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, Ni, Cr, Cd, P
Jezioro Sarbsko Woszczyk (2007, 2011)	54°45'49"	17°37'57"	x	x	$SiO_{2\ ter}$, $SiO_{2\ biog}$, TS, TOC, Cu, Zn, Cr, Ni, Fe, Cd, Ca, Al, Co, Pb, Mn, K
Słowińskie Błota Vleeschouwer (2009)	54°21'52"	16°29'25"			TS, Cu, Zn, Pb, Ni, Ti
Stążki Lamentowicz i in. (2008)	54°25'28"	19°05'02"			$\delta^{13}C$ VPDB
Jezioro Spore Pleskot i in. (2022)	53°47'54"	16°42'54"	x	x	TOC, TN, Fe, $\delta^{13}C_{org}$, $\delta^{18}O_{carb}$, $\delta^{13}O_{carb}$, $\delta^{15}N$
Jezioro Strzeszyńskie Pleskot i in. (2017)	52°27'39"	16°49'27"			XRF - Si, K, Ti, Ca, Fe, Cr
Jeziora: Suchar III, IV i Wielki Suchar Zawiska i in. (2013)	54°01'41"	23°07'00"			$SiO_{2\ ter}$, $SiO_{2\ biog}$, TOC, TN, TS, P, Fe, Mn, K, Cu, Zn Al
Jezioro Suminko Pędziszewska i in. (2015); Tylmann i in. (2024)	54°11'20"	17°49'54"			$SiO_{2\ biog}$, TC, TOC, TN, TS, Ca, Fe, Mn, Ti
Jezioro Sumowskie Gamrat i in. (2016)	53°20'20"	18°17'11"	x	x	TOC, TN, Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, Ni, Cr, Cd, pH
Jezioro Szurpiły Kinder i in. (2008, 2019)	54°13'40"	22°53'3"	x	x	$SiO_{2\ biog}$, TOC, TIC, ^{15}N, ^{13}C, Al, Si, K, Ca, Fe, Mn, Ti, Zn, Pb
Szczecin-Rybaki Okupny i in. (2022)	53°25'31"	14°33'46"	x	x	TC, TN, TS, Ca, K, Mg, Na, Fe, Mn, Hg, Cu, Zn, P
Śnieżka Fiałkiewicz-Kozieł i in. (2023)	50°44'00"	15°42'00"		x	TC, TN, TS, Pb, Zn, Cu, Ni, Cr, Sr, Ti, Al, U, Sc, Hg, ^{204}Pb, ^{206}Pb, ^{207}Pb, ^{208}Pb, ^{234}U, ^{137}Cs, $^{239+240}Pu$, mulit
Świerczyna Pawłowski i in. (2015)	51°28'02"	18°59'09"		x	$SiO_{2\ ter}$, TC, TOC, TN, TS, K, Al, Fe, Mn, Cu, Zn

Nazwa stanowiska Źródło	Lokalizacja		Rodzaj analiz geochemicznych		
	φ N	λ E	$CaCO_3$	Straty prażenia	Składniki litogeochemiczne, pierwiastki, izotopy, inne
Targowisko Forysiak i in. (2021); Kadrow i in. (2022)	49°59'18"	20°17'55"	x	x	Ca, K, Mg, Na, Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, pH
Warblewo Borówka (1992)	54°25'46"	17°09'34"		x	$SiO_{2\ ter}$, Na, K, Ca, Mg, Al, Fe, Mn, Cu, Zn, Ni, Pb
Wardzyń 2 Dobrowolski i in. (2017)	51°38'20"	19°38'21"	x	x	Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, Ni, Cr, $\delta^{13}C$, $\delta^{18}O$
Warka Szwarczewski, Korabiewski (2003)	51°47'33"	21°14'53"		x	Fe, Cd, Cu, Zn, Pb, pH
Wąwelnica Okupny i in. (2020)	53°27'14"	14°23'59"		x	TC, TN, TS, Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, Hg
Wilkostowo Okupny i in. (2016)	52°48'27"	18°36'09"	x	x	$SiO_{2\ ter}$, $SiO_{2\ biog}$, Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, Ni, Cr, pH
Wolbrom Pawełczyk i in. (2018b); Vanêk i in. (2021)	50°22'32"	19°46'58"		x	Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, Cr, Ni, ^{206}Pb, ^{207}Pb, ^{208}Pb
Wołcza Wielka Borówka (1992)	53°59'50"	16°56'02"		x	$SiO_{2\ ter}$, Na, K, Ca, Mg, Al, Fe, Mn, Cu, Zn, Ni, Pb
Jezioro Wonieść Hildebrandt-Radke (2013); Dörfler i in. (2023)	51°59'49"	18°36'09"	x	x	Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, Ni, Cr, Cd, Co, P
Woryty Cieśla i in. (1978); Pawlikowski i in. (1982)	53°45'16"	16°42'20"		x	TOC, N_{org}, P, Fe, Mn, Mg, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Pb, Cu, Ni, pH
Jezioro Wąsoskie Poraj-Górska i in. (2021)	52°56'48"	17°44'23"			TC, TN, TS, TOC, Ca, Fe, K, Mn, Si, Ti
Września Gadziszewska, Latałowa (2015)	54°24'46"	16°44'21"		x	-
Wyspa Spichrzów Święta-Musznicka, Latałowa (2016)	54°20'45"	18°39'28"		x	Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, P, TC, TN, TS
Zawada Szeliga i in. (2018)	50°51'39"	21°40'33"	x		C_{org}
Jezioro Zawada Noryśkiewicz (2004)	53°37'00"	18°38'00"	x	x	Materia mineralna
Żabieniec Balwierz i in. (2009); Borówka, Tomkowiak (2010); Okupny i in. (2021)	51°51'01"	19°46'39"	x	x	Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, Pb
Jezioro Żabińskie Wacnik i in. (2016); Zander i in. (2021)	54°07'54"	21°59'01"	x	x	$SiO_{2\ biog}$, TOC, TIC, TN, TS, Cu, Zr, Ca, P, Fe, Mn, K, Si, Ti
Żuchowo Stangenberg i in. (1957)	52°51'06"	19°16'41"	x	x	TN, Fe, P
Żyglin Cabała i in. (2013); Tudyka i in. (2017); Szymczyk, Nita (2021)	50°28'56"	18°59'12"	x	x	Al, Ca, Cu, Fe, Mg, Na, P, S, Sr, Zn, Pb, Fe, Mn, Cd, Ti, ^{206}Pb, ^{207}Pb, ^{208}Pb, metoda SEM/EDS

PRZEGLĄD METOD ORAZ PODSTAWOWYCH SKŁADNIKÓW LITOGEOCHEMICZNYCH W INTERPRETACJI WARUNKÓW ŚRODOWISKOWYCH I DZIAŁALNOŚCI CZŁOWIEKA

Pobór oraz opis osadów w terenie

W przypadku badań paleogeograficznych czy geoarcheologicznych rdzenie/próbki osadów muszą mieć dokładnie określone położenie stratygraficzne niezależnie od stopnia skomplikowania układu warstw oraz muszą być pobrane w taki sposób, by nie uległy wtórnemu zanieczyszczeniu (Tobolski 2008; Żurek 2010). Najczęściej osady biogeniczne pozyskuje się z wierceń (ryc. 2) przy pomocy specjalistycznego sprzętu wiertniczego do bocznego (np. próbnik torfowy Instorf) lub dolnego napełniania (np. sonda Więckowskiego). Najbardziej korzystny jest jednak pobór próbek z odkrywek oraz odsłonięć archeologicznych (ryc. 3). Niezależnie od sposobu poboru rdzeni/próbek należy dążyć do jak najmniejszej utraty ich wilgotności poprzez szczelne opakowanie utworów geologicznych w terenie przy pomocy folii igielitowej i szybki ich transport do chłodni, w której jest stała temperatura rzędu kilku stopni powyżej zera.

Na uwagę zasługuje, możliwy do przeprowadzenia w terenie, opis osadów torfowych i limnicznych przy użyciu systemu opracowanego przez Troels-Smitha (w skrócie metoda/system T-S), którego celem jest określenie własności fizycznych, stopnia rozkładu (zhumifikowania) materii organicznej oraz wydzielenie składników utworów geologicznych i elementów dodatkowych. Wśród zalet wspomnianego wyżej systemu należy wymienić wysoką dokładność i wiarygodność przy zastosowaniu prostych środków, możliwość porównywalności wyników oraz ich zwięzły i czytelny charakter. Dla przykładu obecność bezpostaciowej (amorficznej) materii organicznej stwierdza się przy pomocy 10% roztworu wodorotlenku potasu (KOH), a limus (tzw. drobnofrakcyjny składnik jeziorny) wapienny intensywnie reaguje z 10% kwasem solnym (HCl). Szczegółowy opis toku postępowania wraz z objaśnieniem poszczególnych symboli cyfrowo-literowych w metodzie T-S przedstawiono m.in. w pracach Wasylikowej (1973) oraz Tobolskiego (2005).

Podstawowe właściwości fizykochemiczne osadów

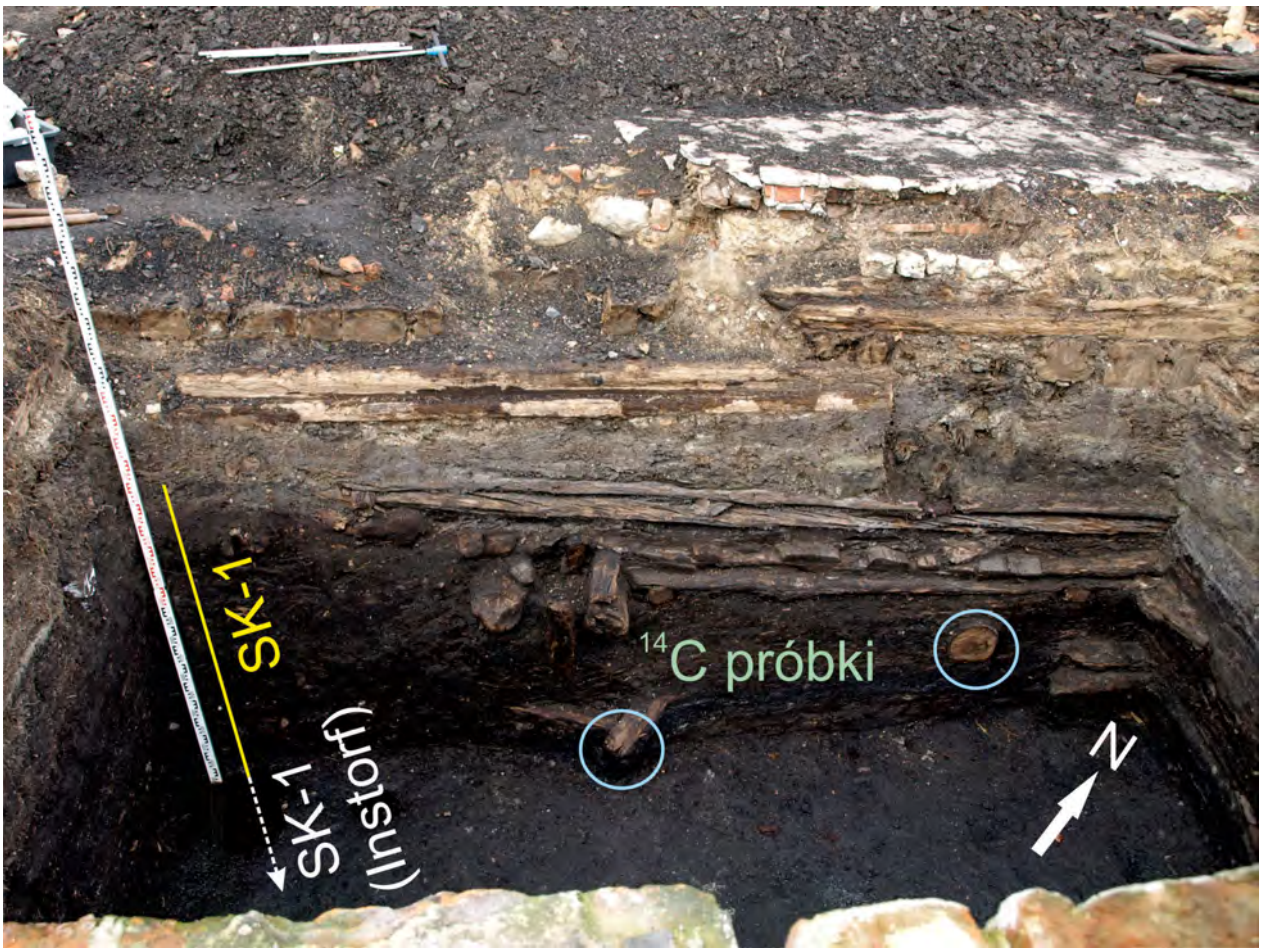
Dopiero z przetransportowanych do laboratorium monolitów lub z rdzeni pobiera się próbki do dalszych analiz geochemicznych. Podziału próbek dokonuje się przy pomocy specjalnych próbników o określonej objętości, nożyczek ceramicznych lub ostrego noża. Dokładny spis wyposażenia laboratorium chemicznego wymieniają m.in. Grobelny i Mikulski (1981). Po zakończonych pracach analitycznych szkło laboratoryjne należy dokładnie umyć, w niektórych przypadkach ponownie wyprażyć w wysokiej temperaturze i na koniec opłukać wodą dejonizowaną. Pozostawienie próbek osadów biogenicznych w laboratorium w warunkach temperatury pokojowej może spowodować nie tylko utratę z nich wody, ale także niekorzystne zmiany mikrobiologiczne.

Przed przystąpieniem do dalszych analiz, w zależności od celu badań, możliwy jest podział świeżego materiału (próbki) na kilka części (ryc. 1B). Dla pierwszej z nich czasami dokonuje się oznaczeń wilgotności czy gęstości objętościowej, za pomocą suszarek, aparatu Schläpfera oraz piknometru (Turski 1986; Maciak i Liwski 1996). Wówczas pozostałą jej część należy zamrozić w specjalnych naczyniach pod przykryciem przepuszczającym powietrze. Zamrożone próbki należy poddać procesowi liofilizacji, czyli usunąć wodę w warunkach próżni i obniżonej temperatury (ryc. 4). W zależności od ilości materiału oraz jego wilgotności procedura ta czasami musi być powtórzona kilkukrotnie. Próbki po liofilizacji należy zhomogenizować w celu uzyskania jednorodnej mieszaniny ze składników litogeochemicznych budujących dany utwór geologiczny. Najczęściej używa się do tego moździerzy z tłuczkiem lub młynków. Tak przygotowaną próbkę należy wysuszyć w temperaturze 105°C do stałej masy.

W przypadku osadów biogenicznych diagnostyczne znaczenie często ma popielność (Myślińska 1999), czyli procentowy udział domieszki mineralnej, który oblicza się w praktyce jako odwrotność strat prażenia (z ang. *loss-on-ignition*). Mimo że jest to jedna z pierwszych oraz prostszych metod badawczych w całym toku postępowania laboratoryjnego, to właśnie otrzymywane wyniki udziału części popielnych oraz materii organicznej wykazują wyraźny związek z poszczególnymi typami osadów torfowych czy jeziornych. Ponadto precyzyjność pomiarów tej metody ma kluczowe znaczenie dla interpretacji wyników, chociażby z powodu, że obecność materii organicznej



Ryc. 2. Przykładowy pobór rdzenia osadów biogenicznych o nienaruszonej strukturze przy pomocy próbnika torfowego Instorf (fot. R.K. Borówka 2023, Pyrzyce)



Ryc. 3. Pobór próbek nawarstwień kulturowych oraz osadów biogenicznych ze stanowiska Szczecin-Rybaki (fot. J. Sławińska 2020, Szczecin)



Ryc. 4. Liofilizator służący do suszenia zamrożonych próbek osadów (fot. R.K. Borówka 2023, Instytut Nauk o Morzu i Środowisku Uniwersytetu Szczecińskiego, Szczecin)

w środowisku wodnym powoduje, że metale śladowe tworzą połączenia kompleksowe z fulwokwasami, a same warunki redukcyjne powodują wytrącanie się metali w postaci siarczków (np. FeS_2). W zależności od stosowanej metodyki badań prażenie wcześniej wysuszonej próbki przeprowadza się w piecu muflowym (ryc. 5) w temperaturze 450–800°C. Zdaniem Wicika i Więckowskiego (1991) przy interpretacji wielkości strat prażenia należy pamiętać o rozkładzie w wysokiej temperaturze siarki oraz wód siarczkowych, węglanowych i fosforanowych połączeń żelaza. Z powodu większej czasochłonności rzadziej stosuje się utlenianie próbki perhydrolem (30% H_2O_2) oraz metodę Tiurina, polegającą na utlenianiu węgla organicznego do CO_2 przy użyciu dichromianu potasu ($K_2Cr_2O_7$) (Maciak i Liwski 1996; Myślińska 1999). Różnice w otrzymanych wynikach dla poszczególnych metod opisuje m.in. Lądkiewicz i in. (2017). Dwie ostatnie metody nie powinny być jednak wykorzystywane (z powodu zawyżania wyników) w badaniach próbek zawierających powyżej kilkunastu procent materii organicznej czy węglanu wapnia oraz znaczącej domieszki koncentracji żelaza, manganu czy chlorków (Boratyński 1958).

Niezależnie od stosowanej metody udział domieszki mineralnej w torfach nie przekracza 35% (Tobolski 2008), przy czym najniższe wartości dotyczą torfów wysokich (rzędu kilku %), a najwyższe torfów niskich (nawet powyżej 20%). Ponadto udział materii mineralnej stanowił podstawę podziału przez Okruszkę (1994) torfów na: niezamulone (inaczej zwane właściwe, udział popiołu <25%), słabo zamulone (z domieszką popiołu rzędu 25–50%) oraz silnie zamulone (udział domieszki mineralnej powyżej 50%). Podwyższony udział materii mineralnej w torfach tłumaczony jest wzmożoną aktywnością



Ryc. 5. Piece muflowe do wyprażania próbek (mineralizacji na sucho) w zakresie temperatury 400–925°C (fot. R.K. Borówka 2023, Instytut Nauk o Morzu i Środowisku Uniwersytetu Szczecińskiego, Szczecin)

powodziową w dolinach rzecznych (Wójcicki 2010; Pawłowski i in., 2014; Okupny 2023) lub odlesieniem otoczenia zbiorników akumulacji biogenicznej (Wójcicki 2007). Należy jednak podkreślić, że uzyskany po prażeniu próbek popiół utożsamiany jest przez niektórych badaczy z sumą pierwotnej (pochodzącej ze spalenia szczątków roślin) i wtórnej (pochodzenia allochtonicznego) materii mineralnej (Kwiatkowski 1971; Myślińska 1999; Rydelek 2011) lub popiołem surowym (Tobolski 2000). Tak rozumiana domieszka mineralna w osadach biogenicznych zawiera bardzo często rozpuszczalny w 10% kwasie solnym węglan wapnia ($CaCO_3$), krzemionkę biogeniczną (opal, SiO_{2biog}) oraz krzemionkę terygeniczną (SiO_{2ter}).

W przypadku pierwszego związku kluczowy jest pomiar wydzielającego się CO_2. Metody pomiaru $CaCO_3$ ze względu na sposób oznaczenia ilości CO_2 podzielono na dwie grupy: wagowe i objętościowe. Turski (1986) podkreśla zalety stosowania drugiej grupy metod, wśród których najczęściej stosuje się aparat Scheiblera (ryc. 6). Budowa tego aparatu oraz zasada działania pozwalają na odczyt z rury pomiarowej objętość CO_2 w cm^3. Wynik ten należy pomnożyć o gotową wartość współczynnika przeliczeniowego. Wynika to z konieczności określenia, ile miligram $CaCO_3$ równoważone jest 1 cm CO_2 wydzielonego w danych warunkach ciśnienia i temperatury.

W przypadku krzemionki biogenicznej ($SiO_{2\,biog}$) paleogeograficzna interpretacja jej udziału w osadach biogenicznych dotyczy bujnej produkcji populacji okrzemek. Z dyskusji czynników warunkujących udział tego składnika przeprowadzonej przez Woszczyka (2012) wynika, że istnieją różnice między osadami jezior Niżu Polskiego. Po pierwsze niska zawartość $SiO_{2\,biog}$ w gytii węglanowej lub kredzie jeziornej wynika z rozcieńczania składników biogenicznych przez $CaCO_3$ oraz przewagi warunków niesprzyjających rozwojowi fitoplanktonu (Okupny i in.,



Ryc. 6. Aparat Scheiblera do pomiaru metodą objętościową udziału $CaCO_3$ (fot. R.K. Borówka 2023, Instytut Nauk o Morzu i Środowisku Uniwersytetu Szczecińskiego, Szczecin)

2016). Po drugie maksymalny udział krzemionki biogenicznej może stanowić wskaźnik zmian natężenia denudacji w zlewni, gdyż rozwój okrzemek limitowany jest dostępnością kwasu ortokrzemowego (H_4SiO_4) lub biogenów (Kowalewski i in., 2006). Wyniki tych badań mogą być interesujące właśnie dla archeologów, gdyż zwiększona dostawa składników mineralnych pochodzenia terygenicznego do zbiorników akumulacyjnych, wynika nie tylko ze zmian klimatu, ale także działalności człowieka, np. fazy odlesienia zlewni i towarzyszącego mu wymywania substancji biogennych z gleb oraz uruchomienia procesów spłukiwania powierzchniowego (Kittel i in., 2016; Pawlik i in., 2022; Makohonienko i in., 2023). Warto jednak podkreślić, że istnieją znaczące różnice dotyczące metodyki oznaczania tego składnika (por. Mortlock i Froelich 1989; Conley i Schelske 2002; Woszczyk i in., 2009), podyktowane m.in. stopniem dokładności oznaczeń w zależności od tego, ile w badanych próbkach jest opalu. Najczęściej krzemionkę biogeniczną oblicza się na podstawie różnicy masy residuum pozostałego po ekstrakcji kwasowej i zasadowej. Próbki należy homogenizować w moździerzu korundowym, a sama procedura oznaczenia udziału $SiO_{2\,biog}$ jest czasochłonna, gdyż wymaga: sonifikacji w myjce ultradźwiękowej, odwirowania roztworzonej próbki w wirówce,

dekantacji płynu i jego wysuszeniu w suszarce oraz wytrząsania próbek na łaźni wodnej. Dopiero wówczas możliwe jest oznaczenie udziału krzemionki biogenicznej przy pomocy specjalistycznych spektrofotometrów (np. Hach Lange-3900).

Pozostałość materii mineralnej po ługowaniu w wymienionych wyżej odczynnikach utożsamia się z krzemionką terygeniczną, którą w przypadku strefy klimatu umiarkowanego tworzy głównie kwarc. Depozycja tego składnika w zbiornikach akumulacji biogenicznej związana jest z wodnym transportem detrytycznym ze zlewni (Pawłowski i in., 2015), erozją brzegów (Rühle 1961) oraz transportem eolicznym (Forysiak i Twardy 2012). Bardziej precyzyjna identyfikacja składników mineralnych budujących osady jeziorne i torfowe możliwa jest dzięki zastosowaniu metody skaningowego mikroskopu elektronowego (ang. *scanning electron microscope*, SEM) sprzężonego z detektorem spektroskopii dyspersji energii (ang. *energy dispersive spectroscopy*, EDS). Analiza ta może być stosowana zarówno dla próbek surowych (czyli zawierających materię organiczną), jak i próbek preparowanych z usuniętą domieszką organiczną za pomocą 30% wody utlenionej (perhydrolu). W rezultacie możliwe jest wyróżnienie składników mineralnych nie tylko pochodzenia detrytycznego, ale także form autogenicznych takich jak: FeS_2, czyli piryt oraz $CaSO_4$, czyli gips (Rydelek 2011). To właśnie krzemionka terygeniczna bardzo często jest analizowana dalej pod kątem rozkładu wielkości ziaren (np. metodą sitową, pipetową lub dyfrakcji laserowej), przy czym konieczne jest wcześniejsze usunięcie z próbki materii organicznej, węglanów i tlenków żelaza (Bartkowiak 2011; Clift i in., 2019; Tsvirko i in., 2024).

W badaniach paleośrodowiskowych konieczna jest także ocena pochodzenia materii organicznej budującej dany typ osadu (Borówka 2007). Zmiany dotyczące ilości autochtonicznej i allochtonicznej materii organicznej są oceniane w oparciu o wyniki stosunku węgla do azotu, tj. C/N (Meyers 1994). W wielu przypadkach wskaźnik ten przyjmuje postać stosunku atomowego (C/N atom), przez co konieczne jest zastosowanie konwencjonalnie przyjętego współczynnika przeliczeniowego. Dla materii organicznej pochodzenia wodnego charakterystyczne są niższe wartości C/N, gdyż szczątki słodkowodnych glonów zawierają znaczący udział azotu. Dla materii organicznej pochodzenia lądowego charakterystyczne są wyższe wartości C/N, przy czym wskaźnik ten wykazuje w tym przypadku także znacznie większy rozstęp wartości. Uzależniony on jest od ilości celulozy i ligniny w szczątkach detrytusu roślinnego z bardzo niskim



Ryc. 7. Analizator Vario Max do pomiaru koncentracji pierwiastków biofilnych, tj. węgla, azotu i siarki (fot. R.K. Borówka 2023, Instytut Nauk o Morzu i Środowisku Uniwersytetu Szczecińskiego, Szczecin)

udziałem azotu oraz składu gatunkowego zbiorowisk roślinnych (Kowalkowski i Swałdek 1994; Meyers 2003). Przy interpretacji opisanego wyżej wskaźnika należy jednak pamiętać o możliwych procesach postsedymentacyjnych (diagenetycznych), mineralizacji zdeponowanych wcześniej osadów oraz silnego wiązania nieorganicznych form azotu przez minerały ilaste (Kowalkowski i Swałdek 1994; Carman i in., 1996; Woszczyk i Bechtel 2008). Udział węgla i azotu można oznaczyć razem z siarką przy użyciu automatycznego analizatora Vario Max (ryc. 7). Podstawowa zasada ilościowego oznaczenia węgla, azotu i siarki polega na wysokotemperaturowym spalaniu próbek, gdzie gazowe produkty są oczyszczane, rozdzielane na poszczególne składniki i mierzone w celi pomiarowej detektora. W przypadku osadów węglanowych (np. gytie węglanowe, kreda jeziorna) powinno się mierzyć procentowy udział organicznej formy węgla (ryc. 8), wówczas interpretacji podlega wskaźnik TOC/N.

Wśród innych składników biogenicznych, rejestrujących m.in. rolnicze użytkowanie zlewni i wzmożoną eutrofizację, należy wymienić fosfor. Zawartość tego pierwiastka zależy od typu osadu biogenicznego i stopnia ich wzbogacenia w wiwianit [$Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$]. Największe jego ilości (nawet rzędu powyżej 3%) spotyka się w torfach niskich, gytiach organicznych oraz nawarstwieniach archeologicznych (Maciak i Liwski 1996; Konecka-Betley i Okołowicz 1998; Święta-Musznicka i Latałowa 2016; Okupny i in., 2022). Fosfor najczęściej oznacza się kolorymetrycznie, wykorzystując roztworzony wcześniej popiół ze spalania na mokro (w H_2SO_4) lub na sucho w piecu muflowym. W przypadku badań geochemicznych próbek różnych środowisk akumulacyjnych najczęściej stosuje się technikę przepływowej analizy wstrzykowej (z ang. *Flow Injection Analysis – FIA*). Wstrzykiwanie roztworu badanej próbki do nośnika płynącego w układzie w sposób ciągły umożliwia oznaczenie kilkudziesięciu próbek w krótkim czasie (ryc. 9).

Metody pomiaru koncentracji wybranych pierwiastków

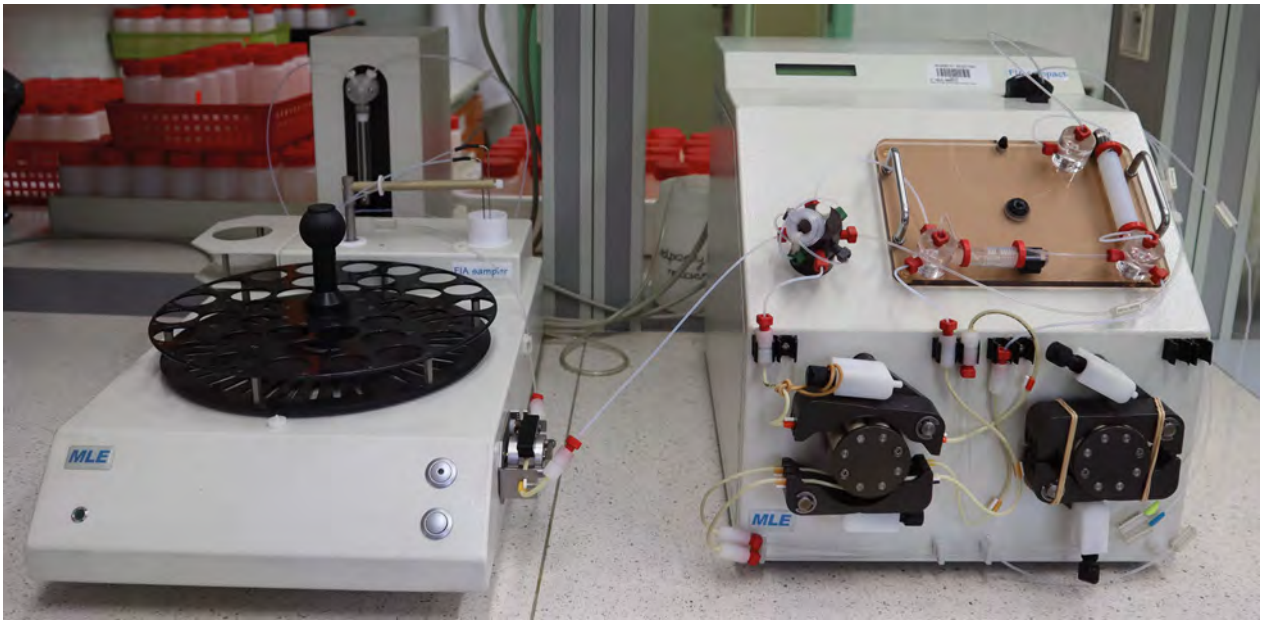
Przed przystąpieniem do pomiaru koncentracji makro- i mikroelementów należy przeprowadzić w odpowiedni sposób mineralizację, czyli doprowadzenie próbek stałych do roztworu wraz z utrzymaniem w nich pierwiastków bez strat. Proces ten dzieli się na mineralizację na sucho (opisany wyżej rozkład materii organicznej w piecu muflowym) oraz mineralizację na mokro, czyli przy wykorzystaniu różnego rodzaju substancji mineralizujących, najlepiej w układzie zamkniętym przy użyciu energii mikrofalowej w specjalnie do tego przeznaczonych tzw. bombach teflonowych (ryc. 10). Wśród wielu metod mineralizacji największe różnice, wpływające na ostateczny wynik, dotyczą właśnie wyboru substancji mineralizujących (Sapek i Sapek 1997; Janda i in., 2011). Wybór ten zależy m.in. od typu i dostępnej masy analizowanych próbek, celu badań, wyposażenia laboratorium oraz możliwości finansowych (Ślęzak i in., 2016). Do najczęściej używanych mieszanin reakcyjnych używa się w odpowiednich proporcjach kwasu azotowego (HNO_3), kwasu solnego (HCl), kwasu fluorowodorowego (HF), kwasu nadchlorowego ($HClO_4$) oraz perhydrolu (H_2O_2).

Wśród wielu metod oznaczania koncentracji składników chemicznych w osadach biogenicznych najczęściej stosuje się: emisyjną lub masową spektrometrię atomową z indukcyjnie sprzężoną plazmą (z ang. *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* – ICP-MS), atomową spektrometrię absorpcyjną (z ang. *Atomic Absorption Spectroscopy* – AAS), fluorescencję rentgenowską (z ang. *X-Ray Fluorescence spectroscopy* – XRF) oraz chromatografię cieczową (z ang. *Liquid Chromatography* - LC). Szczegółowy przegląd wymienionych wyżej technik analitycznych można znaleźć m.in. w pracach Minczewskiego i Marczenki (1976), Migaszewskiego (1998) oraz Migaszewskiego i Gałuszki (2003). Każda z nich ma oczywiście wiele zalet, ale i także różny stopień wykrywalności pierwiastków lub związków chemicznych. Przykładowo w przypadku techniki AAS (ryc. 11) dla większości oznaczeń wymagane jest przeprowadzenie mineralizacji próbek, z wyjątkiem pomiarów koncentracji rtęci przy użyciu atomowej spektrometrii absorpcyjnej z generowaniem zimnych par (ryc. 12). Ponadto otrzymujemy tutaj bardzo wysoką czułość analiz oraz powtarzalność oznaczeń. Najważniejsze ograniczenia tej metody dotyczą jednak konieczności używania lantanu ze względu na liczne interferencje między pierwiastkami oraz konieczność posiadania wielu lamp do oznaczeń. Z kolei analiza techniką XRF zaliczana jest do nieinwazyjnych, gdyż żadne dodatkowe procedury roztwarzania materiału nie są potrzebne i próbka nie ulega zniszczeniu, ponadto sam proces analizy jest bardzo szybki. W tym przypadku istnieje jednak niska czułość dla pierwiastków o małej masie atomowej przy stosunkowo wysokich kosztach zakupu aparatury.



Ryc. 8. Analizator do pomiaru udziału węgla organicznego (z ang. *Total Organic Carbon* – TOC) (fot. R.K. Borówka 2023, Instytut Nauk o Morzu i Środowisku Uniwersytetu Szczecińskiego, Szczecin)

W celu oceny stopnia mobilności metali w danym środowisku akumulacyjnym konieczne jest jednak zastosowanie analizy specjacyjnej, czyli rozróżnienia form wiązania metali i ich ilościowego oznaczenia (Tessier i in., 1979; Bulska i Wojciechowski 2015; Klink i in., 2019). Użycie tej metody wiąże się jednak z wypracowaniem i stosowaniem ujednoliconej metodyki ekstrakcji sekwencyjnej poszczególnych frakcji (rezydualnej, związanej z materią organiczną, związanej z tlenkami, węglanowej oraz wymiennej), wydłużając ostatecznie czas oczekiwania na wyniki oraz zwiększając koszty analiz. Zapewne z tych powodów analiza specjacji metali w osadach biogenicznych nie jest zbyt często stosowana, mimo iż dotychczasowe wyniki z jezior w okolicach Poznania (Sobczyński i Siepak 1998) oraz jeziora Sarbsko (Woszczyk 2007) okazały się istotne w rekonstrukcji czynników stratygraficznej zmienności składu chemicznego osadów.



Ryc. 9. Aparat wstrzykowo-przepływowy do pomiaru udziału fosforu (fot. R.K. Borówka 2023, Instytut Nauk o Morzu i Środowisku Uniwersytetu Szczecińskiego, Szczecin)



Ryc. 10. Dwunastokolumnowy mineralizator do roztwarzania próbek w mieszaninie kwasów w warunkach wysokiej temperatury i ciśnienia (fot. R.K. Borówka 2023, Instytut Nauk o Morzu i Środowisku Uniwersytetu Szczecińskiego, Szczecin)



Ryc. 11. Spektrometr absorpcji atomowej (Solaar 9696 Unicam) do pomiaru koncentracji Al, Ba, Be, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Li, K, Mg, Mn, Na, Ni, Rb, Si, Sr, Ti, V i Zn w roztworzonych próbkach (fot. R.K. Borówka 2023, Instytut Nauk o Morzu i Środowisku Uniwersytetu Szczecińskiego, Szczecin)

Niezależnie od przyjętej metodyki badawczej zaleca się przeprowadzenie powtórnych pomiarów dla kilkunastu procent losowo wybranych próbek w celu oszacowania precyzji pomiarów. Ze względu na specyficzne właściwości fizykochemiczne osadów biogenicznych (np. porowatość, gęstość objętościowa, lepkość, wilgotność) błędy mogą pojawić się zarówno w czasie samej analizy, jak i przy obliczaniu wyników. Zdaniem Kubiaka i in. (1999) błędy analiz chemicznych mogą mieć charakter systematyczny (np. stosowanie niewłaściwej metody, używanie nieodpowiednich roztworów wzorcowych lub złe wyskalowanie aparatury pomiarowej). Z kolei błędy przypadkowe wynikają głównie z niewłaściwego sposobu przeprowadzania analiz. Wszystkie wyniki analiz geochemicznych należy ponadto gromadzić w postaci specjalnie do tego przeznaczonych kart dokumentacyjnych, których zasady wypełniania opisano m.in. w pracach Kowalkowskiego i Swałdka (1994).

WYBRANE METODY PREZENTACJI WYNIKÓW BADAŃ GEOCHEMICZNYCH

Wybór odpowiedniej formy prezentacji wyników składu chemicznego osadów biogenicznych uzależniony jest od celu prowadzonych badań, rozdzielczości analiz oraz zakresu zmienności wyników. Zmiany składu chemicznego osadów biogenicznych w czasie, w tym pod wpływem działalności człowieka, mogą być przedstawiane w formie tabel, wykresów, diagramów oraz równań funkcji. Ze względu na mnogość oznaczanych składników geochemicznych konieczna jest odpowiednia selekcja wyników oraz ich wstępna interpretacja. Niezależnie od formy prezentowania wyników należy pamiętać o prawidłowym używaniu jednostek, gdyż część składników wyrażamy w % (np. udział materii: mineralnej i organicznej, węglanu wapnia oraz krzemionki bio- i terygernicznej), w mg/g s.m. (np. koncentrację Na, K, Ca), w µg/g s.m.



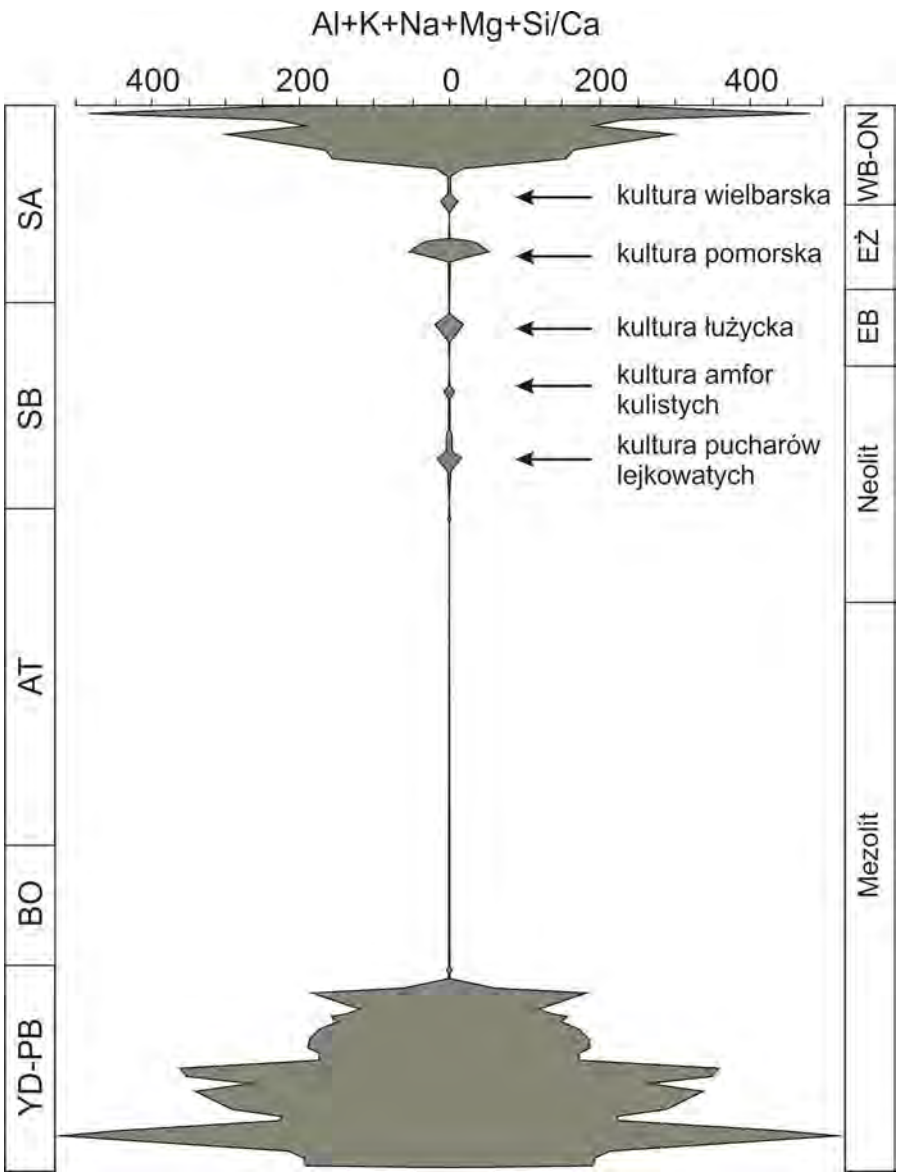
Ryc. 12. Spektrometr absorpcji atomowej do pomiaru koncentracji Hg w próbkach niewymagających roztworzenia (fot. R.K. Borówka 2023, Instytut Nauk o Morzu i Środowisku Uniwersytetu Szczecińskiego, Szczecin)

(np. koncentrację Cu, Zn, Pb) oraz w ppb (np. koncentrację Hg).

Zupełnie osobne zagadnienie dotyczy możliwości konstrukcji przestrzennej interpretacji składu chemicznego osadów wodnych w postaci map. W zależności od przyjętej skali opracowania kartograficzne wyników geochemicznych mogą mieć charakter przeglądowy, szczegółowy lub specjalny. Warto podkreślić, że opracowania kartograficzne oprócz skali, powinny zawierać także informacje na temat daty pobrania próbek do analiz oraz ich opracowania. Ciekawy przegląd najczęstszych błędów prezentacji graficznej wyników geochemicznych wraz z podaniem wytycznych niezbędnych dla poprawy wizualnej jakości statystycznych opracowań można znaleźć m.in. w pracy Howartha i Turnera (1987). W związku ze znacznym przyrostem w ostatnich latach nowych profili osadów jeziornych opracowanych geochemicznie również Bertrand i in. (2024) dokonali przeglądu najczęściej stosowanych metod prezentacji wyników wraz ze wskazaniem wytycznych dotyczących ich interpretacji.

Wyniki analiz geochemicznych dla osadów biogenicznych najczęściej przedstawia się w formie stabelaryzowanej z podaniem wartości minimalnych, maksymalnych, średnich, współczynnika zmienności w podziale na poziomy geochemiczne lub według wydzieleń litologicznych. W przypadku badań geoarcheologicznych tabele tego typu powinny zawierać także wartości normatywne (inaczej poziom odniesienia/referencyjny), co ułatwia ocenę stopnia wzbogacenia osadu w dany metal, limit detekcji (inaczej granica wykrywalności) zastosowanej metody oraz wartości możliwych błędów analitycznych. W formie tabelarycznej często przedstawia się także wyniki obliczeń statystycznych składu chemicznego osadów biogenicznych, w tym m.in. analizę składowych głównych (z ang. *Principal Component Analysis* – PCA), hierarchiczną analizę skupień w postaci poziomów geochemicznych (z ang. *Geochemical Zones* – GZ) oraz szeregu indeksów i wskaźników wzbogacenia (Tylmann i in., 2007; Bojakowska i Gliwicz 2012; Borówka i in., 2022; Bertrand i in., 2024).

W przypadku badań geochemicznych najlepszą formą prezentowania wyników są profile udziału i koncentracji poszczególnych składników budujących osady, gdzie na osi rzędnych są miary głębokości/miąższości, a na osi odciętych miary zawartości danego elementu chemicznego. W nawiązaniu do przeglądu form konstrukcji diagramów stratygraficznych wybranych analiz paleoekologicznych, dokonanego przez Nalepkę i Walanusa (2003), również dla danych geochemicznych możemy zastosować diagramy: z zsumowanymi krzywymi wyników, liniowym przebiegiem zmian, słupkowe, z wygładzeniem gaussowskim krzywych lub z symetrycznym odbiciem osi Y (ryc. 13). Niezależnie od przyjętego typu diagramu geochemicznego istotne jest, by prezentacja uzyskanych wyników była uzupełniona litologią, wiekiem osadów oraz przebiegiem wyróżnionych granic poziomów geochemicznych lub litofacji geochemicznych. W przypadku analizy czynnikowej



Ryc. 13. Stratygraficzne zróżnicowanie wartości wskaźnika erozji zlewni w osadach zbiornika Wołcza Wielka I na Pomorzu na tle podziału holocenu, stratygrafii archeologicznej oraz faz rozwoju osadnictwa prehistorycznego (wg Borówki 1992)

czytelny obraz można uzyskać także na diagramach rozrzutu wyników próbek z podziałem na poszczególne typy lub wiek osadów (por. Pleskot i in., 2018; Poraj-Górska i in., 2021; Rapuc i in., 2022).

Dużą popularnością wśród metod przedstawiających porównanie większej liczby wyników cieszy się trójkątny układ współrzędnych, czyli tzw. trójkąt Fereta. W przedstawionym na rycinie 14 układzie widać różnice w zależności między koncentracjami wybranych metali śladowych próbek osadów jeziornych oraz torfowych w kontekście pradziejowej działalności człowieka oraz zaproponowanego przez Wenga i in. (2003) wskaźnika pozwalającego określić naturalny lub antropogeniczny charakter osadu. Warto, by na trójkątach Fereta naniesione były w celach porównawczych wyniki dla próbek reprezentujących lokalne/regionalne tło geochemiczne. Zaletą tej metody jest możliwość interpretacji paleośrodowiskowej niezależnie od wielkości bezwzględnych wartości oraz porównywanie wielu profili, numerując je lub oznaczając odpowiednio dobraną sygnaturą. Ponadto istnieje wiele modyfikacji opisywanej metody prezentowania wyników z zakresu geochemii (np. relacja udziału węgla organicznego, siarki i żelaza; materii organicznej, materii mineralnej bezwęglanowej i węglanu wapnia czy pierwiastków litofilnych i wapnia),

ale także mineralogicznych (np. relacja udziału minerałów węglanowych, ilastych i krzemionkowych) czy sedymentologicznych (np. relacja udziału frakcji piaszczystej, mułowej i ilastej). Szczegółowy opis konstrukcji trójkątów Fereta znaleźć można w opracowaniach Burcharda i in. (1990) oraz Racinowskiego i in. (2001).

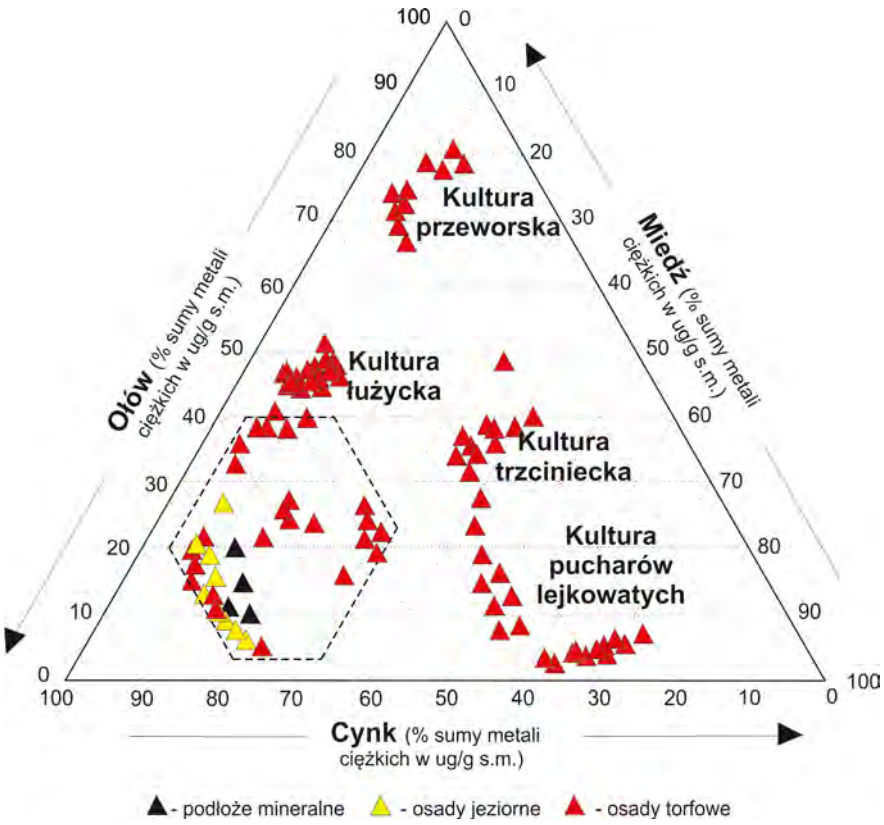
GEOCHEMICZNE WSKAŹNIKI ANTROPOPRESJI

Wpływ człowieka na pradziejowe środowisko przyrodnicze jest często „zapisany" w litologii i geochemii gleb oraz osadów jeziornych i bagiennych środowisk sedymentacyjnych. Zapis ten może wyrażać zarówno wpływ bezpośredni, polegający na wprowadzeniu do środowiska jezior i bagien substancji związanych z działalnością gospodarczą człowieka, jak i wpływ pośredni, wynikający z reakcji przyrody ożywionej i nieożywionej na antropopresję.

Bezpośredni wpływ człowieka na geochemię gleb i osadów jeziorno-bagiennych wystąpił od czasu, gdy ludzie zaczęli pozyskiwać i wprowadzać do środowiska różnego rodzaju substancje, w tym zwłaszcza metale i ich rudy, które wcześniej występowały w znikomej ilości, w postaci tzw. tła geochemicznego. W skali globalnej człowiek wraz z upływem czasu wprowadzał do środowiska dodatkowe ilości takich pierwiastków, jak złoto, srebro, miedź, cyna, cynk, ołów, żelazo oraz rtęć. Złoto i srebro, będące metalami szlachetnymi a tym samym nieruchliwe w środowisku epigenetycznym, nie są wykorzystywane jako wskaźniki antropopresji. Natomiast pozostałe metale, pozyskiwane najczęściej z rud, były od dawna w różnej formie wprowadzane do środowiska. Jeśli ich koncentracja w glebach i osadach jeziorno-bagiennych przewyższa wartości tła geochemicznego danego regionu, to mogą one stanowić ważne źródło informacji o rozmiarach antropopresji. Wyjątkiem jest w tym wypadku żelazo, które jest pierwiastkiem bardzo powszechnie występującym w litosferze. Jego koncentracja w glebach i osadach jeziorno-bagiennych jest zwykle dość wysoka, a zarazem silnie uzależniona od warunków środowiskowych, a zwłaszcza od pH oraz potencjału oksydacyjno-redukcyjnego, co powoduje, że jego dodatkowe wprowadzenie do środowiska nie daje wyraźnego sygnału w zapisie geochemicznym.

Miedź jest metalem, który poza złotem i srebrem był w Europie najwcześniej wykorzystywany przez człowieka (Eichstaedt 1970; Elbaz-Poulichet i in., 2020). Początkowo, podczas eneolitu, użytkowano i przerabiano przede wszystkim miedź rodzimą, jednakże już około 5400–4700 lat BC w okolicach Belgradu rozwinęła się metalurgia miedzi, o czym świadczą znaleziska najstarszych pieców hutniczych na świecie (stanowisko Pločnik), związanych z kulturą Vinča. Już we wczesnym eneolicie wyroby z miedzi musiały być dość powszechne w południowej Europie, o czym może świadczyć fakt, że wśród artefaktów znalezionych przy ciele „człowieka z lodu" (Ötzi), żyjącego około 5200 lat temu (Kutschera i Müller 2003), znajdowało się także dobrze obrobione miedziane ostrze (Spindler 1995).

Z czasem, gdy miedź zaczęto wytapiać z różnorakich rud, wytworzono przypadkowo stopy miedzi z innymi metalami, a zwłaszcza z cyną i ołowiem, dzięki czemu uzyskiwano brąz. W regionach, gdzie prażono rudy miedzi lub miedź rodzimą z galmanem, uzyskiwano stop miedzi i cynku, czyli mosiądz, często z większym lub mniejszym dodatkiem ołowiu. Ten ostatni metal uzyskiwano również jako odpad przy pozyskiwaniu szczególnie cennego w starożytności srebra, otrzymywanego z prażenia dość powszechnie występującej w różnych regionach srebronośnej galeny. Początkowo ołów był niemal bezwartościowym balastem, ale z czasem był wykorzystywany na różne sposoby. Na niektórych stanowiskach archeologicznych starożytnego Egiptu, a także Grecji i Rzymu znajdowano najróżniejsze przedmioty wykonane z ołowiu (np. ciężarki do obciążania sieci rybackich, ołowiane cegły znalezione w świątyni Ramzesa II w Egipcie, kule do katapult, a nawet ołowiane trumny w Rzymie). Ponadto w starożytnym Rzymie zastosowano rurociągi ołowiane w całej sieci wodociągowej o łącznej długości około 400 km. Na uwagę zasługują także wyniki badań obecności zabytków metalowych powiązane z oceną stopnia zanieczyszczenia środowiska na terenie Krakowa. Szczególnie ważne okazało się odkrycie w rejonie Wielkiej Wagi oraz Sukiennic bloku ołowiu z XIV w. (Garbacz-Klempka i in., 2012). Z opisu wymienionych wyżej autorów wynika, że zwany historycznie bochen o wadze 693 kg jest najlepiej zachowanym zabytkiem hutnictwa ołowiu w rejonie Olkusza. Geochemiczny zapis obiegu ołowiu w środowisku wodno-lądowym został udokumentowany m.in. w osadach torfowisk Kotliny Orawsko-Nowotarskiej (Fiałkiewicz-Kozieł i in., 2018; Borówka i in., 2022), Jury Krakowsko-Częstochowskiej (Pawełczyk i in., 2017; Vanêk i in., 2021), Gór Świętokrzyskich (Malkiewicz i in., 2018), Wzniesień Łódzkich (Forysiak i in., 2012; Płaza i in.,

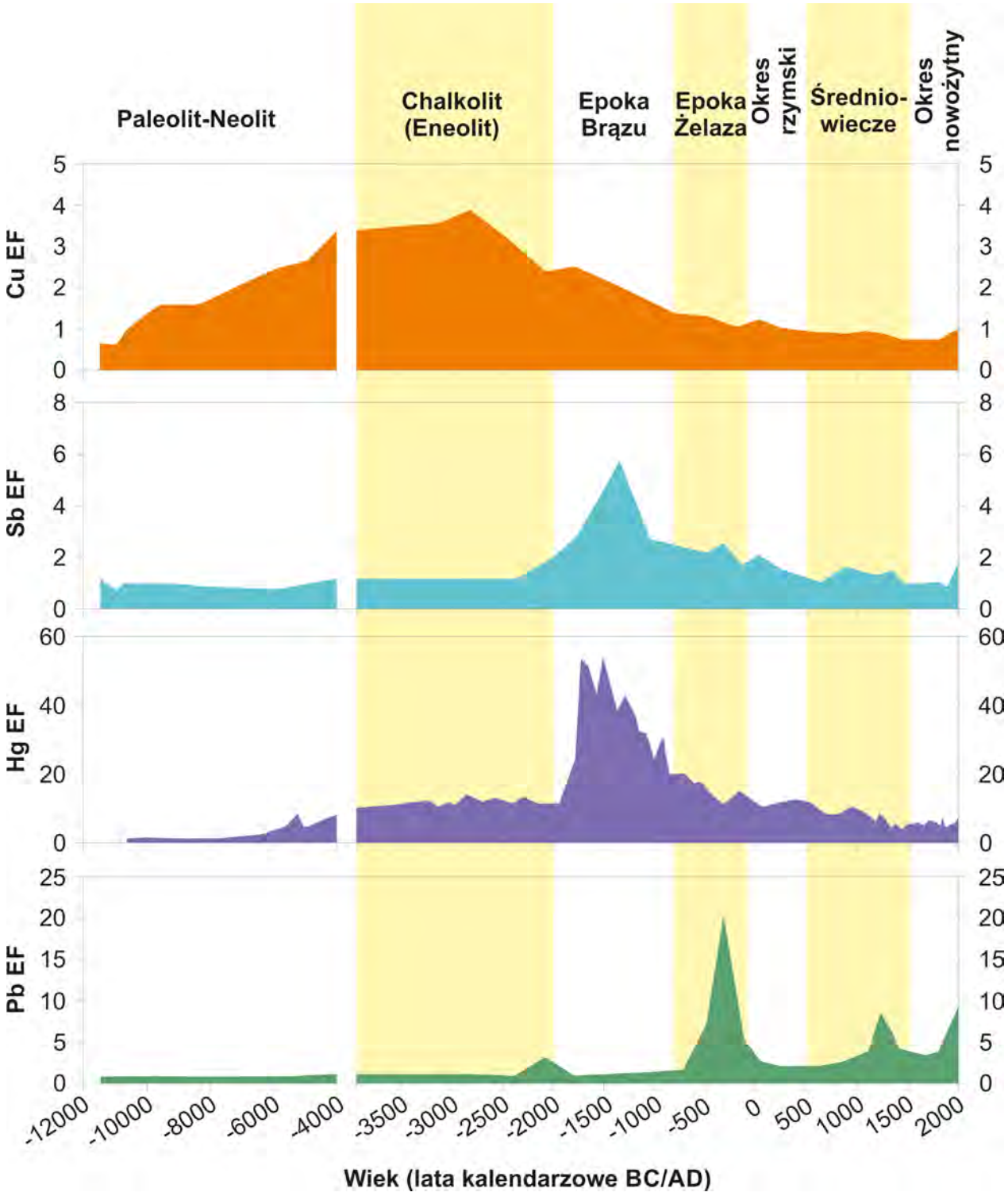


Ryc. 14. Relacje między koncentracją wybranych metali śladowych w osadach biogenicznych torfowiska Rąbień (wartości wewnątrz obszaru otoczonego linią przerywaną uznawane są przez Wenga'a i in., 2003 za naturalne) na tle chronologii archeologicznej (wg Okupnego 2013 oraz Płazy i in., 2015 – uzupełnione)

2015) oraz Pobrzeża Gdańskiego (Święta-Musznicka i Latałowa 2016).

Metalurgiczna działalność człowieka prowadzona już od eneolitu (zwanego także chalkolitem) doprowadziła do dość wczesnego wprowadzenia do środowiska wielu regionów kilku metali ciężkich, które poza miedzią, srebrem, cyną, cynkiem i ołowiem, stanowiły domieszkę w wykorzystywanych rudach. Istotnym obciążeniem dla środowiska były także dość powszechnie stosowane kosmetyki, medykamenty i barwniki zawierające ołów lub cynk (np. biel ołowiana – $(PbCO_3)_2 Pb(OH)_2$, biel cynkowa – ZnO, minia – Pb_3O_4), które użytkowano już od starożytności do czasów współczesnych. Jednak największe zanieczyszczenie środowiska ołowiem było spowodowane powszechnym użytkowaniem etyliny (benzyny z dodatkiem tetraetyloołowiu) w transporcie samochodowym XX wieku. Spowodowało to, że lotne związki ołowiu przenikały do różnych środowisk sedymentacyjnych i są identyfikowane nawet w lodowcach Grenlandii i Antarktydy (Murozumi i in., 1969; Wensman i in., 2022).

Pierwiastkiem będącym często istotnym wskaźnikiem antropopresji jest rtęć. Metal ten występuje najczęściej w złożach cynobru (HgS), którym niekiedy towarzyszy w postaci rodzimej – jako krople rtęci, zwłaszcza w strefach wietrzenia tych złóż. Złoża cynobru nie są zbyt powszechne. Największe na świecie, a zarazem najbardziej znane od czasów starożytnych są hiszpańskie złoża w Almadén. Wiele mniejszych złóż występuje jednak również w kilku innych miejscach na świecie, między innymi we Włoszech (Ripa, Góra Amiata), Słowenii (Idrija), Serbii (Góra Avala), Austrii (Erzberg, Steiermark), Słowacji (Malachow), Niemczech (Moschel Landsberg), Polsce (Kletno, Boguszów), Peru (Huancavelica), Stanach Zjednoczonych (Nowy Almadén, Kopalnie Hastings i St. John's – Kalifornia, Murfreesboro – Arkansas, Terlingua – Texas), Chinach (Kweichow i Huanan – prowincja Guizhou) oraz na Filipinach (Puerto Princesa). Jak wskazują dane archeologiczne, część z nich była eksploatowana od bardzo dawna, przede wszystkim w celu pozyskania czerwonego barwnika (czerwień chińska). Barwnik ten był



Ryc. 15. Zmiany współczynników wzbogacenia (z ang. *Enrichment Factor* – EF) osadów Jeziora Roberta (Alpy Zachodnie, Francja) w wybrane metale ciężkie (Cu, Sb, Hg, Pb) podczas ostatnich 10 000 lat (wg Elbaz-Poulichet i in., 2020 – uproszczone)

wykorzystywany jako pigment, a także środek konserwujący w praktykach pogrzebowych ludów żyjących w środkowym neolicie (5100–3950 BC) na stanowisku Çatalhöyük w Azji Mniejszej (Schotsmans i in., 2022), na Półwyspie Iberyjskim w okresie od późnego neolitu po epokę brązu, tj. od 4 do 2 tysiąclecia BC (Emslie i in., 2019), a także ~1600–1050BC, podczas panowania dynastii Shang w Chinach (Liu i in.,

2022) oraz przypuszczalnie od 1400 BC aż do podboju hiszpańskiego na obszarze Peru (Burger i Leikin 2018).

Cynober był również używany jako barwnik w środkowo-neolitycznych malowidłach ściennych znalezionych w Çatalhöyük (Schotsmans i in., 2022), w budowli ceremonialnej związanej z kulturą Yangshao (ok. 4000–3500 BC) w Chinach (Liu 2004), a także w rzymskich malowidłach ściennych w hiszpańskiej Badalonie (Tsantini i in., 2018). Stosowano go również do zdobienia neolitycznej ceramiki, znanej między innymi ze stanowiska Vinča (Gajić-Kvaščev i in., 2012), a także marmurowych figurek znajdowanych w Grecji na Cykladach, a pochodzących z lat 2400–2300 BC (Hendrix 1998). Minerał ten był także od dawna wykorzystywany w produktach kosmetycznych oraz w tradycyjnej medycynie chińskiej (Jaina i in., 2019; Li i in., 2020).

Oprócz cynobru już od czasów starożytnych wykorzystywano również metaliczną rtęć. Rzymianie zaczęli ją stosować w procesie pozyskiwania złota i srebra z piasków rzecznych. Od dawna znano zarówno właściwości toksyczne, jak i lecznicze rtęci (Kłys 2010). Już w XI wieku opary rtęci stosowano w medycynie chińskiej (Szumowski 1935), a znacznie wcześniej połączenia rtęci z różnymi substancjami stosowano w kosmetyce. Dzięki Paracelsusowi zaczęto ten metal wykorzystywać przy leczeniu trudno gojących ran, owrzodzeń oraz kiły (Szumowski 1935; Eichstaedt 1970; Kłys 2010). Maść rtęciową stosuje się w medycynie do czasów współczesnych.

Ostatnio stwierdzono bardzo silne zanieczyszczenie gleb rtęcią na wielu stanowiskach archeologicznych związanych z rozwojem pre-kolumbijskiej kultury Majów, szczególnie w okresie 250–1100 AD (Turner i in., 2017; Cook i in., 2022). Ponadto z kilku stanowisk (między innymi Quirigua i jezioro Amatitlan w Gwatemali, El Paraiso w Hondurasie, Teotihuacan w środkowym Meksyku) znane są między innymi zamknięte naczynia wypełnione częściowo płynną rtęcią, które były wykorzystywane w celach ceremonialnych, w kontekstach religijnym i pogrzebowym (Cook i in., 2022).

Należy podkreślić, że znajomość historii wykorzystywania metali i surowców metalicznych (z danych historycznych i archeologicznych) przez różne społeczności znacznie ułatwia interpretację wyników badań dotyczących koncentracji metali ciężkich w „archiwach naturalnych", czyli najczęściej w osadach bagiennych i jeziornych. W warunkach polskich podwyższoną zawartość metali ciężkich w tego typu osadach, w tym zwłaszcza Zn i Pb, a rzadziej Cu i Hg, stwierdzano najczęściej w ich stropowych warstwach związanych z okresem przemysłowym (Borówka 1992; Borówka i Tomkowiak 2010; Borówka i in., 2022; Cieśla 1981; Cieśla i in., 1978; De Vleeschouwer i in., 2009; Dobrowolski i in., 2016, 2017; Goslar 1998; Hildebrandt-Radke 2013; Karasiewicz 2019; Karasiewicz i in., 2017; Korzeniowski i in., 2020; Miszczak i in., 2020; Okupny i in., 2013, 2016, 2020, 2021; Owsianny i in., 2011; Pawełczyk i in., 2017, 2018a, b; Pawłowski i in., 2016; Płóciennik i in., 2021; Słowiński i in., 2016; Tylmann 2005; Wojciechowski 2000). Jedynie w niektórych profilach: Woryty koło Olsztyna (Cieśla 1981; Cieśla i in., 1978), Niwka koło Czaplinka (Borówka 1992), Jezioro Bnińskie koło Poznania (Wojciechowski 2000), Słowińskie Błoto koło Darłowa (De Vleeschouwer i in., 2009), jezioro Wonieść koło Kościana (Hildebrandt-Radke 2013), Komarów koło Hrubieszowa (Dobrowolski i in., 2016), Jurki koło Morąga (Karasiewicz i in., 2017), Wolbrom koło Olkusza (Pawełczyk i in., 2017, 2018), jezioro Gostyń koło Barlinka (Korzeniowski i in., 2020), Wąwelnica koło Szczecina (Okupny i in., 2020), podwyższoną koncentrację Zn, Pb oraz czasami Cu wiązano z gospodarczą działalnością człowieka, począwszy od epoki brązu.

W Europie południowej i zachodniej, gdzie rozwój metalurgii był zaawansowany już od epoki brązu, a na Bałkanach jeszcze wcześniej, zapis historii rozwoju pozyskiwania i przeróbki metali ciężkich jest znacznie lepiej utrwalony w osadach jeziornych niż bagiennych (Jones 1984; Martinez-Cortizas 1999; Shotyk i in., 2002; Le Roux i in., 2004; De Vleeschouwer i in., 2007; Mighall i in., 2009; Allan i in., 2013a; Gallego i in., 2013; Küttner i in., 2014; Servera-Vives i in., 2014; Turner S. i in., 2014; Turner T.E. i in., 2014; Elbaz-Poulichet i in., 2020). Interesującym przykładem wyników badań geochemicznych skupionych nad problemem użytkowania metali w Zachodnich Alpach podczas ostatnich 10 000 lat są rezultaty uzyskane z analizy rdzenia osadów z Jeziora Roberta we Francji (Elbaz-Poulichet i in., 2020). Pozwoliły one na rekonstrukcję historii lokalnego i regionalnego zanieczyszczenia osadów jeziornych wybranymi metalami ciężkimi – Cu, Sb, Hg i Pb (ryc. 15). Jednocześnie analizy składu izotopowego ołowiu pozwoliły w tym wypadku na stwierdzenie, że w epoce żelaza zanieczyszczenie ołowiem było związane ze złożami sycylijskimi, w okresie rzymskim ze złożami hiszpańskimi, a w średniowieczu z lokalnymi alpejskimi złożami srebra (Elbaz-Poulichet i in., 2020). Z obszaru Polski analiza składu izotopowego ołowiu występującego

w osadach torfowiska Wolbrom pozwoliła na stwierdzenie, że wykorzystanie miejscowych złóż ołowiu z okolic Olkusza zostało tutaj zapoczątkowane dość wcześnie, bo w okresie 370 BC-30 AD (Pawełczyk i in., 2018).

Zwiększona koncentracja metali ciężkich w osadach bagiennych nie zawsze jest związana z antropopresją. Już wcześniej udokumentowano (Fortescue 1980; Adriano 1986; Borówka 1992; Reimann i in., 2007), że zwłaszcza podwyższona zawartość Zn w tego typu osadach może wynikać z bioakumulacyjnej zdolności niektórych taksonów roślin rosnących na torfowiskach, np. brzozy i wierzby. Wyraźnie podwyższone koncentracje Zn stwierdzano np. w późnoglacjalnych i wczesnoholoceńskich osadach bagiennych, wiążąc je z bioakumulacyjną zdolnością roślinności tundrowej (Borówka 1992; Borówka i Tomkowiak 2010; Karasiewicz i in., 2014; Karasiewicz 2019; Okupny i in., 2020). W literaturze wskazuje się również, że na wzrost koncentracji makro- i mikroelementów w profilach torfowisk, w tym również metali ciężkich, wpływa stopień rozkładu utworów bagiennych, a zwłaszcza obecność poziomów granicznych (rekurencyjnych), często uwarunkowanych zmianami hydro-klimatycznymi (Biester i in., 2003, 2006, 2012). Niekiedy wyraźne skokowe wzrosty zawartości rtęci w osadach bagiennych wiąże się z erupcjami wulkanicznymi (Ross-Barraclough i in., 2002). Zwraca się ponadto uwagę na możliwość wzrostu koncentracji Hg w okresach ochłodzenia klimatycznego (Martinez-Cortizas i in., 1999; Ross-Barraclough i in., 2002), co może być związane ze zwiększoną bioakumulacją rtęci przez niektóre torfowiskowe rośliny nienaczyniowe w warunkach zimnego klimatu (Obrist i in., 2017; Olson i in., 2018; 2019).

O ile antropopresja zapisana w osadach jeziorno-bagiennych, a związana z rozwojem metalurgii w pradziejach, może odzwierciedlać zarówno lokalną, jak i regionalną oraz ponad regionalną działalność człowieka (De Vleeschouwer 2007), o tyle zapis zmian natężenia procesów erozyjno-denudacyjnych uwarunkowanych klimatycznie lub związanych z działalnością człowieka odnosi się przede wszystkim do zlewni analizowanych basenów sedymentacji organicznej. Z tego też względu sedymentologiczne i geochemiczne przejawy wzmożonej aktywności denudacji mechanicznej oraz erozji występujące w małych basenach sedymentacji jeziorno-bagiennej udaje się często powiązać z archeologicznymi śladami działalności człowieka (Borówka 1990, 1992, 1994; Korzeniowski i in., 2020 Okupny i in., 2020) (ryc. 13).

W osadach jeziorno-bagiennych umiarkowanej strefy klimatycznej, zmiany natężenia procesów erozji i denudacji mechanicznej najlepiej opisuje tzw. wskaźnik erozji (Ławacz i in., 1978), będący ilorazem sumy zawartości pierwiastków litofilnych, takich jak: krzem, glin, potas, sód, tytan oraz magnez, podzielonej przez zawartość wapnia. Stosowane są również uproszczone formy tego wskaźnika: Na+K+Mg+Si/Ca (Wojciechowski 1987) lub Na+K+Mg/Ca (Płaza i in., 2015; Pawlik i in., 2022; Mirosław-Grabowska i in., 2023). Dobrymi wskaźnikami zmian natężenia procesów denudacyjno-erozyjnych są również wahania zawartości K, a zwłaszcza Ti (Shotyk i in., 2002; Słowiński i in., 2017; Bonk i in., 2023; McCarthy i in., 2023). Są to bowiem metale występujące dość powszechnie w litosferze, a jednocześnie migrujące przede wszystkim w sposób bierny (Kabata-Pendias i Pendias 1993).

W celu oceny intensywności procesów denudacji chemicznej i mechanicznej można również wykorzystać fakt, że w warunkach hipergenicznych niektóre makroelementy, takie jak potas i magnez,, są intensywnie sorbowane przez minerały ilaste oraz wietrzeniowe koloidy glinokrzemianowe natomiast inne, np. sód i wapń, w analogicznych warunkach znacznie łatwiej migrują w roztworach wodnych (Polański i Smulikowski 1969; Perelman 1971; Fortescue 1980; Migaszewski i Gałuszka 2003). Z tego też względu wartości liczbowe stosunków Na/K oraz Ca/Mg wskazują albo na dominację procesów denudacji chemicznej, gdy w analizowanych osadach zaznacza się przewaga Na i Ca, albo na dominację denudacji mechanicznej, gdy przeważają K oraz Mg. Stosunki Na/K i Ca/Mg były wielokrotnie wykorzystywane do oceny natężenia procesów denudacyjnych w trakcie akumulacji osadów biogenicznych, często w kontekście antropopresji (Borówka 1990, 1992, 1994; Dobrowolski in., 2017; Karasiewicz 2019; Karasiewicz i in., 2017; Korzeniowski i in., 2020; Mendyk i in., 2016; Okupny i in., 2016, 2020, 2022; Płóciennik i in., 2021; Słowiński i in., 2016; Forysiak i in., 2021; Mirosław-Grabowska i in., 2023).

Zapis historii denudacji mechanicznej związanej z antropopresją umożliwia w wielu przypadkach określenie zmian zasięgu pradziejowego osadnictwa. Do analizy takich zmian najbardziej przydatne są stosunkowo niewielkie baseny sedymentacyjne, o niezbyt dużych zlewniach. Dzięki takim badaniom udało się stwierdzić, że na obszarach młodoglacjalnych Polski Zachodniej intensywniejsza antropopresja prowadząca do znaczącego wylesienia obszarów wysoczyznowych

rozpoczęła się z początkiem naszej ery, lecz wyraźnie nasiliła się dopiero w średniowieczu (Borówka 1990; Bloom 2016; Wojciechowski i Jonczak 2023). Ponadto w badaniach geochemicznych tego typu zbiorników wielokrotnie wykorzystywano tzw. współczynnik koncentracji pierwiastków (w skrócie ΣK), którego sposób obliczania jako pierwszy szeroko omówił Borówka (1992). Miara ta stanowi sumę wartości uzyskanych relacji pomiędzy poszczególnymi pierwiastkami a lokalnym tłem geochemicznym. W oparciu o wyniki tego wskaźnika możliwe jest także ustalenie szeregu migracyjnego pierwiastków, który z kolei jest niezbędny do rekonstrukcji zmian zasilania zbiorników akumulacji biogenicznej czy struktury wzbogacenia w metale śladowe pierwiastki ziem rzadkich (Borówka 2007; Płaza i in., 2015; Kwecko 2016; Płóciennik i in., 2021; Lewandowska i in., 2023). Zagadnienie to wymaga jednak dalszych badań interdyscyplinarnych, szczególnie w odniesieniu do poszczególnych stref akumulacji w zbiornikach oraz litologii mis jeziornych (Bojakowska i Sokołowska 1997).

Zdecydowanie rzadziej interpretację możliwego wpływu na środowisko opierano na tzw. wskaźniku dynamiki warunków sedymentacji (w skrócie [r]). Wskaźnik ten po raz pierwszy obliczony został przez Walanusa (2000) dla danych z osadów biogenicznych jeziora Gościąż. Parametr ten ilustruje korelację pomiędzy wartościami oznaczanych składników (cech geochemicznych), przy czym sam sposób obliczania opiera się na zasadzie średniej ruchomej. Z przeglądu literatury (Płaza i in., 2015; Okupny i in., 2020; Płóciennik i in., 2021) wynika, że wyraźny wzrost wartości tego wskaźnika, będący zapisem dużej dynamiki warunków sedymentacji, np. wskutek wypalania szaty roślinnej w otoczeniu zbiorników, datowany jest w przypadku środkowej Polski na okres wpływów społeczności późnoneolitycznych oraz związanych z wczesną epoką brązu.

Należy jednak podkreślić, że obszary bagien i jezior, są także miejscem akumulacji pyłów wulkanicznych, eolicznych, przemysłowych, a nawet kosmicznych. Stąd też niewielkie przewarstwienia materii mineralnej w torfowiskach oraz wśród osadów jeziornych niekoniecznie świadczą o uruchomieniu lokalnych procesów denudacyjnych. Przydatnym narzędziem do odróżnienia napływu różnorodnych pyłów pochodzących z dalszego transportu, od lokalnej materii mineralnej może być analiza składu izotopowego neodymu ($^{143}Nd/^{144}Nd$). Badania nad tym problemem w odniesieniu do torfowisk wysokich Europy Zachodniej zapoczątkowali Le Roux i in. (2012), Allan i in. (2013b) oraz Fagel i in. (2014). W Polsce badaniami takimi objęto ostatnio dwa torfowiska kotłowe w Borach Tucholskich (Marcisz i in., 2013). Aby badania składu izotopowego neodymu dały jednoznaczne wyniki dotyczące pochodzenia materii mineralnej w torfowiskach, muszą spełniać warunek poboru próbek oraz oznaczenia ich wieku z wysoką rozdzielczością, a także obejmować analizy składu izotopowego próbek materii mineralnej z otoczenia torfowiska oraz uwzględniać możliwe pochodzenie materii mineralnej w wyniku wypalenia torfu (Marcisz i in., 2023).

PODSUMOWANIE

Analizy geochemiczne stanowią jedną z podstawowych grup metod badań paleogeograficznych. Intensywnie rozwijające się od lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku metody geochemiczne udowodniły swą przydatność do badań przebiegu współczesnych i dawnych procesów oraz warunków sedymentacji biogenicznej. Z kolei wśród związków geochemii z archeologią należy podkreślić możliwości oceny wpływu działalności człowieka na obieg poszczególnych pierwiastków, łącznie z interpretacją warunków środowiskowych, w jakich funkcjonowały i gospodarowały kolejne społeczności. Wskutek różnorodnej działalności człowieka naturalne procesy osadotwórcze w jeziorach, torfowiskach czy stanowiskach podmokłych ulegają nasileniu, przy czym wskaźniki geochemiczne najczęściej rozpatruje się w kontekście zmian eutrofizacji siedliska, tempa sedymentacji materii terygenicznej oraz stopnia obciążenia środowiska substancjami toksycznymi. Zatem analiza pionowej koncentracji składników litogeochemicznych oraz pierwiastków z grupy syderofilnych, chalkofilnych, litofilnych, atmofilnych lub biofilnych umożliwia odtwarzanie i datowanie faz antropopresji. Dokładność uzyskiwanych wyników badań geochemicznych zależy jednak od prędkości sedymentacji utworów geologicznych, a na możliwości interpretacji wpływają: precyzyjność wyznaczonego tła geochemicznego, mnogość warunków środowiskowych odpowiedzialnych za krążenie pierwiastków w środowisku oraz trudności w znalezieniu profili osadów o określonym wieku. W przyszłych badaniach paleolimnologicznych oraz geoarcheologicznych analizy geochemiczne powinny dotyczyć m.in. mało mobilnych markerów/znaczników, które podlegają wiązaniu przez kompleks sorpcyjny. Z kolei interpretacja wyników powinna uwzględniać kompleksową wiedzę z zakresu

czynników odpowiedzialnych za tworzenie się pokrywy osadowej w specyficznych barierach geochemicznych, jakimi są jeziora i torfowiska. Interesujące w tym zakresie nadal będą rekonstrukcje intensywności niszczenia pokrywy glebowej oraz relacji dwóch wzajemnie związanych procesów odpowiedzialnych za migrację biogeniczną pierwiastków (powstawanie żywej substancji → rozkład substancji organicznych). Należy również podkreślić, że dalszy rozwój technik pomiarowych będzie sprzyjał coraz bardziej dokładnym analizom geochemicznym, co z kolei jest niezbędne do uzyskania bardziej ilościowych rekonstrukcji procesów zachodzących w samych zbiornikach akumulacji biogenicznej oraz w ich zlewniach. Konieczne zatem będzie podjęcie prób w zakresie regionalnego przetwarzania danych geochemicznych ze wskazaniem tych profili osadów biogenicznych, w których wspólne prawidłowości obiegu w poszczególnych okresach aktywności gospodarczej człowieka dotyczyć będą kilku pierwiastków wskaźnikowych.

LITERATURA

Adamek, A., Mareczka, P., Jucha, W., Musielak, S., Okupny, D. 2021. Geochemical analyses of recent sediments from Lake Morzycko against selected physiographic parameters of the Słubia River catchment (Western Poland). *Acta Geographica Lodziensia* 111: 71-87.

Allan, M., Le Roux, G., Sonke, J.E., Piotrowska, N., Streel, M., Fagel, N. 2013a. Reconstructing historical atmospheric mercury deposition in Western Europe using: Misten peat bog cores, Belgium. *Science of the Total Environment* 442: 290-301.

Allan, M., Le Roux, G., Piotrowska, N., Beghin, J., Javaux, E., Court-Picon, M., Mattielli, N., Verheyden, S., Fagel, N. 2013b. Mid- and late Holocene dust deposition in western Europe: the Misten peat bog (Hautes Fagnes - Belgium). *Climate of the Past* 9: 2285-2298.

Antczak-Orlewska, O., Okupny, D., Kruk, A., Bailey, R.I., Płóciennik, M., Sikora, J., Krąpiec, M., Kittel, P. 2022. The spatial and temporal reconstruction of a medieval moat ecosystem. *Scientific Reports* 12: 20679.

Bajkiewicz-Grabowska, E. 2005. Terminologia dotycząca definiowania obszarów zabagnionych - propozycja jej uporządkowania. *Przegląd Geofizyczny* 1-2: 91-102.

Balwierz, Z., Forysiak, J., Kittel, P., Kloss, M., Lamentowicz, M., Pawłowski, D., Twardy, J., Żurek, S. 2009. Zapis wpływów antropogenicznych w osadach torfowiska Żabieniec na tle jego rozwoju w holocenie. [w:] L. Domańska, P. Kittel, J. Forysiak (red.) *Środowisko-Człowiek-Cywilizacja, tom II. Środowiskowe uwarunkowania lokalizacji osadnictwa*. Seria wydawnicza Stowarzyszenia Archeologii Środowiskowej. Bogucki Wyd. Naukowe, Poznań: 329-345.

Bałaga, K. 2007. Changes in the natural environmental recorded in the sediments of the Karaśne lake-mire complex (Lublin Polesie, E Poland). *Geochronometria* 29: 1-22.

Bałaga, K. 2007. Transformation of lake ecosystem into peat bog and vegetation history based on Durne Bagno mire (Lublin Polesie, E Poland). *Geochronometria* 29: 23-43.

Bartkowiak, A. 2011. Uziarnienie części mineralnej niejednorodnych osadów węglanowych oraz ich skład chemiczny na przykładzie gleb Basenu Unisławskiego. *Roczniki Gleboznawcze* 62 (4): 199-210.

Biester, H., Bindler R., Martinez-Cortizas, A. 2006. Mercury in mires. [w:] I.P. Martini, A. Martinez-Cortizas, W. Chesworth (red.) *Peatlands: evolution and records of environmental and climate changes*. Elsevier B.V., Amsterdam: 465-478.

Biester, H., Hermanns Y-M., Martinez-Cortizas A. 2012. The influence of organic matter decay on the distribution of major and trace elements in ombrotrophic mires - a case study from Harz Mountains. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 84: 126-136.

Biester, H., Martinez-Cortizas, A., Birkenstock, S., Kilian, R. 2003. Effect of peat decomposition and mass loss on historic mercury records in peat bogs from Patagonia. *Environmental Science & Technology* 37: 23-39.

Bloom, K. 2016. Wpływ czynników naturalnych i gospodarki pradziejowej na sukcesję roślinności w rejonie Jeziora Raczego na Ziemi Pyrzyckiej w holocenie. Studium paleoekologiczne. Maszynopis rozprawy doktorskiej. Uniwersytet Gdański.

Bojakowska, I., Sokołowska, G. 1997. Akumulacja pierwiastków śladowych w osadach jeziornych w zależności od ich sedymentacji. *Przegląd Geologiczny* 45 (5): 505-508.

Bojakowska, I., Lech, D. 2008. Zróżnicowanie zawartości pierwiastków śladowych w torfach występujących na obszarze Polski. *Zeszyty Nauk Politechniki Śląskiej, Górnictwo* 285: 31-41.

Bojakowska, I., Gliwicz, T. 2012. Pierwiastki śladowe w osadach jezior Suwalszczyzny. *Prace i Studia Geograficzne* 60: 11-18.

Bonk, A., Müller, D., Ramisch, A., Kramkowski M.A., Noryśkiewicz, A.M., Sekudewicz, I., Gąsiorowski, M., Luberda-Durnaś, K., Słowiński, M., Schwab, M., Tjallingii, R., Brauer, A., Błaszkiewicz, M. 2023. Varve microfacies and chronology from a new sediment record of Lake Gościąż (Poland). *Quaternary Science Reviews* 251: 106715.

Bonk, A., Piotrowska, N., Żarczyński, M., Enters, D., Makohonienko, M., Rzodkiewicz, M., Tylmann, W. 2023. Limnological responses to environmental changes during last 3,000 years revealed from a varved sequence of Lake Lubińskie (western Poland). *Catena* 226: 107053.

Boratyński, K. 1958. O metodach oznaczania węgla organicznego w glebie. *Roczniki Gleboznawcze* 7: 3-12.

Borówka, R.K. 1990. Denudation processes intensity on Vistulian till plains in relation to prehistoric settlement and human activity, Leszno Region, Middle Great Poland. *Quaestiones Geographicae* 13/14: 5-18.

Borówka, R.K. 1992. *Przebieg i rozmiary denudacji w obrębie śródwysoczyznowych basenów sedymentacyjnych podczas późnego vistulianu i holocenu*. Poznań.

Borówka, R.K. 1994. Naturalne i antropogeniczne uwarunkowania zmian denudacji podczas holocenu. *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu* 266: 27-37.

Borówka, R.K. 2007. Geochemiczne badania osadów jeziornych strefy umiarkowanej. *Studia Limnologica et Telmatologica* 1 (1): 33-42.

Borówka, R.K., Sławińska, J., Okupny, D., Osóch, P., Tomkowiak, J. 2022. Mercury in the sediments of selected peatlands in Małopolska Region. *Acta Geographica Lodziensia* 112: 61-76.

Borówka, R.K., Tomkowiak, J. 2010. Skład chemiczny osadów z profilu torfowiska Żabieniec. [w:] J. Twardy, S. Żurek, J. Forysiak (red.) *Torfowisko Żabieniec: warunki naturalne, rozwój i zapis zmian paleoekologicznych w jego osadach*. Bogucki Wyd. Naukowe. Poznań, 163-172.

Borówka, R.K., Tomkowiak, J., Okupny, D., Forysiak, J. 2015. Chemical composition of biogenic sediments from the river valley Luciąża (Bęczkowice peatland in the Piotrków Plain). *Folia Quaternaria* 83: 5-23.

Bulska, E., Wojciechowski, W. 2015. Zastosowanie spektrometrii atomowej i spektrometrii mas w badaniu specjacji chemicznej. *Wiadomości Chemiczne* 69 (9-10): 701-718.

Burchard, J., Hereźniak-Ciotowa, U., Kaca, W. 1990. *Metody badań i ocena jakości wód powierzchniowych i podziemnych*. Wyd. Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź: 273 s.

Burger, R.L., Leikin, J.B. 2018. Cinnabar use in Prehispanic Peru and its possible health consequences. *Journal of Archaeological Science Reports* 17: 730-734.

Cabała, J., Smieja-Król, B., Jabłońska, M., Chróst, L. 2013. Mineral components in a peat deposit: looking for signs of early mining and smelting activities in Silesia-Cracow region (Southern Poland). *Environmental Earth Sciences* 69: 2559-2568.

Carman, R., Aigars, J., Larsen, B. 1996. Carbon and nutrient geochemistry of the surface sediments of the Gulf of Riga, Baltic Sea. *Marine Geology* 134: 57-76.

Chodyka, M., Nitychoruk, J., Welc, F., Rogóż, A., Lubańska, Z., Grudniewski, T. 2016. Wpływ zmian klimatu na osadnictwo prehistoryczne Mazur w kontekście badań osadów jeziornych. *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury* XXXIII, 63 (3/16): 43-50.

Cieśla, A. 1981. Wpływ osadnictwa na chemizm osadów jeziornych w Worytach. [w:] J. Dąbrowski (red.) *Woryty - studium archeologiczno-przyrodnicze zespołu osadniczego kultury łużyckiej*. Zakład Narodowy im. Ossolińskich. Wrocław, 25-32.

Cieśla, A., Stupnicka, E. 1980. Wpływ osadnictwa na skład chemiczny osadów jeziornych. *Archeologia Polski* 24 (1): 7-17.

Cieśla, A., Ralska-Jasiewiczowa, M., Stupnicka, E. 1978. Paleobotanical and geochemical investigations of the lacustrine deposits at Woryty near Olsztyn (NE Poland). *Polskie Archiwum Hydrobiologii* 25 (1/2): 61-73.

Ciszewski, D. 2001. Możliwości i problemy zastosowań metali ciężkich do datowania osadów aluwiów na przykładzie środkowej Odry. *Czasopismo Geograficzne* 72: 53-69.

Ciszewski, D., Cichoń, S., Wojtal, A. 2018. Zapis zakończenia eksploatacji rud Zn-Pb w osadach rzeki i małych zbiorników wodnych. *Prace i Studia Geograficzne* 63 (3): 119-132.

Clift, P.D., Olson, E.D., Lechnowskyj, A., Moran, M.G., Barbato, A., Lorenzo, J.M. 2019. Grain-size variability within a mega-scale point-bar system, False River, Louisiana. *Sedimentology* 66 (2): 408-434.

Conley, D.J., Schelske, C. 2002. Biogenic silica. [w:] J.P. Smol, H.J.B. Birks, W.M. Last i inni (red.) Tracking Environmental Change Using Lake Sediments, vol 3. Springer. Dordrecht, 281-293.

Cook, D.E., Beach, T.P., Luzzadder-Beach, S., Dunning, N.P., Turner, S.D. 2022. Environmental legacy of pre-Columbian Maya mercury. *Frontiers in Environmental Science* 10: 986119.

Cybul, P., Okupny, D. 2021. Lithology and chemical composition of a Neoholocene palaeochannel infill within the Białka River valley, Kraków-Częstochowa Upland. *Acta Geographica Lodziensia* 111: 109-122.

Czerniak, L., Pędziszewska, A., Święta-Musznicka, J., Goslar, T. Matuszewska, A., Niska, M., Podlasiński, M., Tylmann, W. 2023. The Neolithic ceremonial centre at Nowe Objezierze (NW Poland) and its biography from the perspective of the palynological record. *Journal of Anthropological Archaeology* 72: 101551.

De Vleeschouwer, F., Fagel, N., Cheburkin, A., Pazdur, A., Sikorski, J., Mattielli, N., Renson, V., Fiałkiewicz, N., Piotrowska, N., Le Roux, G. 2009. Anthropogenic impacts in North Poland over the last 1300 years - A record of Pb, Zn, Cu, Ni and S in an ombrothrophic peat bog. *Science of the Total Environment* 407: 5674-5684.

De Vleeschouwer, F., Gérard, L., Goormaghtigh, C., Mattielli, N., Le Roux, G., Fagel, N. 2007. Atmospheric lead and heavy metal pollution records from a Belgian peat bog spanning the last two millennia: Human impact on a regional to global scale. *Science of the Total Environment* 377: 282-295.

Dobrowolski, R., Ziółek, M., Bałaga, K., Melke, J., Bogucki, A. 2010. Radiocarbon age and geochemistry of the infillings of small closed depressions from western Polesie (Poland SE, Ukraine NW). *Geochronometria* 36: 39-46.

Dobrowolski, R., Pidek, I.A., Alexandrowicz, W.P., Hałas, S., Pazdur, A., Piotrowska, N., Buczek, A., Urban, D., Melke, J. 2012. Interdisciplinary studies of spring mire deposits from Radzików (South Podlasie Lowland, East Poland) and their significance for palaeoenvironmental reconstructions. *Geochronometria* 39: 10-29.

Dobrowolski, R., Kulesza, P., Łojek, J., Pidek, A.I. 2015. Origin and evolution of the Bezedna lake-mire complex in the Lublin area (East Poland): a case study for permafrost lakes in karstic regions. *Journal of Palaeolimnology* 53: 191-213.

Dobrowolski, R., Bałaga, K., Buczek, A., Alexandrowicz, W.P., Mazurek, M., Hałas, S., Piotrowska, N. 2016. Multi-proxy evidence of Holocene climate variability in Volhynia Upland (SE Poland) recorded in spring-fed fen deposits from the Komarów site. *The Holocene* 26 (9): 1406-1425.

Dobrowolski, R., Ziułkiewicz, M., Okupny, D., Forysiak, J., Bałaga, K., Alexandrowicz, W.P., Buczek, A., Hałas, S. 2017. Origin and Neoholocene evolution of spring-fed in Wardzyń,

Łódź Upland, central Poland. *Geological Quarterly* 61 (2): 413-434.

Domińczak, P., Okupny, D. 2010. Przestrzenne zróżnicowanie wybranych właściwości fizykochemicznych osadów biogenicznych torfowiska Kopanicha koło Skierniewic. *Prace Geograficzne IGiGP UJ* 123: 99-110.

Dörfler, W., Feeser, I., Hildebrandt-Radke, I., Rzodkiewicz, M. 2023. Environment and settlement – A multiproxy record of holocene palaeoenvironmental developmant from Lake Wonieść, Greater Poland. *Vegetation History and Archaeobotany* 32: 187-204.

Eichstaedt, I. 1970. *Księga pierwiastków.* Wiedza Powszechna, Warszawa.

Elbaz-Poulichet, F., Guédron, S., Develle, A-L., Freydier R., Perrot V., Rossi M., Piot Ch., Delpoux S., Sabatier P. 2020. A 10,000-year record of trace metal and metalloid (Cu, Hg, Sb, Pb) deposition in a western Alpine lake (Lake Robert, France): Deciphering local and regional mining contamination. *Quaternary Science Reviews* 228: 106076.

Emslie, S.D., Alderman, A., McKenzie, A., Brasso, R., Taylor, A.R., Moreno, M.M., Cambra-Moo, O., Martin, A.G., Silva, A.M., Valera, A., Sanjuán, L.G., Vila, E.V. 2019. Mercury in archaeological human bone: biogenic or diagenetic? *Journal of Archaeological Science* 108: 104969.

Fagel, N., Allan, M., Le Roux, G., Mattielli, N., Piotrowska, N., Sikorski, J. 2014. Deciphering human–climate interactions in an ombrotrophic peat record: REE, Nd and Pb isotope signatures of dust supplies over the last 2500 years (Misten bog, Belgium). *Geochimica Cosmochimica Acta* 135: 288-306.

Falkowska, E. 2005. Związek akumulacji metali ciężkich w osadach facji powodziowej z morfologią doliny Wisły na odcinku od Annopola do Gołębia. *Przegląd Geologiczny* 53: 681-686.

Fiałkiewicz-Kozieł, B., Smieja-Król, B., Palowski, B. 2011. Heavy metals accumulation in two peat bogs from southern Poland. *Studia Quaternaria* 28: 17-24.

Fiałkiewicz-Kozieł, B., De Vleeschouwer, F., Mattielli, N., Fagel, N., Palowski, B., Pazdur, A., Smieja-Król, B. 2018. Record of Anthropocene pollution sources of lead in disturbed peatlands from Southern Poland. *Atmospheric Environment* 179: 61-68.

Fiałkiewicz-Kozieł, B., Łokas, E., Gałka, M., Kołaczek, P., De Vleeschouwer, F., Le Roux, G., Smieja-Król, B. 2020. Influence of transboundary transport of trace elements on mountain peat geochemistry (Sudetes, Central Europe). *Quaternary Science Reviews* 230: 106162.

Fiałkiewicz-Kozieł, B., Łokas, E., Smieja-Król, B., i in. 2023. The Śnieżka peatland as a candidate Global boundary Stratotype Section and Point for the Anthropocene series. *The Anthropocene Review* 10 (1): 288-315.

Foltyn, E., Waga, J.W., Fajer, M., Magiera, T., Michczyński, A., Chróst, L. 2018. Starsze fazy osadnictwa na wielokulturowym, wydmowym stanowisku Miasteczko Śląskie 2 na tle uwarunkowań środowiska i kierunków rozwoju lokalnej gospodarki (Obniżenie Małej Panwi). *Acta Geographica Lodziensia* 107: 137-153.

Forysiak, J., Twardy, J. 2012. Development of human-induced geomorphological processes in the vicinity of peatlands of Central Poland. [w:] J. Forysiak, L. Kucharski, M. Ziułkiewicz (red.) *Peatlands in semi-natural landscape - their transformation and the possibility of protection*. Bogucki Wyd. Naukowe. Poznań, 85-99.

Forysiak, J., Borówka, R.K., Kloss, M., Obremska, M., Okupny, D., Żurek, S. 2012. Geologiczna i geomorfologiczna charakterystyka torfowiska Rąbień oraz wstępne wyniki badań osadów biogenicznych. *Acta Geographica Lodziensia* 100: 65-76.

Forysiak, J., Kadrow, S., Noryśkiewicz, A.M., Okupny, D., Saile, T., Twardy, J., Zawiska, I. 2021. The environmental context of early neolithic cultural transformation in the Targowisko settlement region (Southern Poland). *Sprawozdania Archeologiczne* 73 (1): 177-201.

Gadziszewska, J., Latałowa, M. 2015. Osady starorzeczy jako podstawa rekonstrukcji paleoekologicznych w kontekście stanowisk archeologicznych – badania we Wrześnicy (dolina Wieprzy). *Prace i Materiały Muzeum Archeologicznego i Etnograficznego w Łodzi, Seria Archeologiczna* 46: 105-125.

Galbarczyk-Gąsiorowska, L., Gąsiorowski, M., Szeroczyńska, K. 2003. Reconstruction of human influence during the last two centuries on two small oxbow lakes near Warsaw (Poland). *Hydrobiologia* 631 (1): 173-183.

Gallego, J.L.R., Ortiz, J.E., Sierra, C., Torres, T., Llamas, J.F. 2013. Multivariate study of trace element distribution in the geological record of Roñanzas Peat Bog (Asturias, N. Spain). Paleoenvironmental evolution and human activities over the last 8000 cal yr BP. *Science of the Total Environment* 454-455: 16-29.

Gałka, M., Knorr, K-H., Tobolski, K., Gallego-Sala, A., Kołaczek, P., Lamentowicz, M., Kajukało-Drygalska, K., Marcisz, K. 2022. How far from a pristine state are the peatlands in the Białowieża Primeval Forest (CE Europe) - Palaeoecological insights in peatland and forest development from multi-roxy studies. *Ecological Indicators* 143: 109421.

Garbacz-Klempka, A., Wardas-Lasoń, M., Rzadkosz, S. 2012. Miedź i ołów - zanieczyszczenie historyczne na Rynku Głównym w Krakowie. *Archives of Foundry Engineering* 12 (1): 33-38.

Gonet, S.S., Cieślewicz, J. 1997. Metale ciężkie w osadach dennych wybranych jezior województwa pilskiego. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 448: 125-129.

Goslar, T. 1998. Anthropogenic changes in the chemical composition of the Lake Gościąż sediments. [w:] W. Ralska-Jasiewiczowa, T. Goslar, T. Madeyska, L. Starkel (red.) *Lake Gościąż, Central Poland, A Monographic Study*. Kraków: 310-318.

Görres, M., Frenzel, B. 1997. Ash and metal concentrations in peat bogs as indicators of anthropogenic activity. *Water, Air, and Soil Pollution* 100: 355-365.

Grobelny, R., Mikulski, T. 1981. *Chemia analityczna dla geologów. Cz. I. Analiza jakościowa*. Wyd. Uniwersytetu Wrocławskiego. Wrocław.

Hendrix, E. 1998. Painted ladies of the Early Bronze Age. *The Metropolitan Museum of Art Bulletin, New Series* 55 (3): 4-15.

Hildebrandt-Radke, I. 2007. Geoarcheologiczne aspekty badań pradziejowych i historycznych zespołów osadniczych. [w]: M. Makohonienko, D. Makowiecki, Z. Kurnatowska

(red.) *Środowisko-Człowiek-Cywilizacja, tom I. Studia interdyscyplinarne nad środowiskiem i kulturą w Polsce. Seria wydawnicza Stowarzyszenia Archeologii Środowiskowej.* Bogucki Wyd. Naukowe, Poznań: 57-70.

Hildebrandt-Radke, I. 2011. Główne etapy zasiedlania i rozbudowy grodziska w Bonikowie (Wielkopolska) w świetle badań litologicznych i geochemicznych. *Landform Analysis* 16: 77-80.

Hildebrandt-Radke, I. 2013. *Pradziejowa i wczesnohistoryczna antropopresja i jej zapis w środowisku przyrodniczym na przykładzie regionu środkowej Obry (Wielkopolska).* Bogucki Wyd. Naukowe, Studia i Prace z Geografii i Geologii 30, Poznań.

Helios-Rybicka, E. 1996. Impact of mining and metallurgical industries on the environment in Poland. *Applied Geochemistry* 11: 3-9.

Hong S., Candelone J.P., Patterson C.C., Boutron C.F. 1996. History of Ancient Copper Smelting Pollution During Roman and Medieval Times Recorded in Greenland Ice. *Science* 272: 246-249.

Horawski, M. 1971. Studia nad osadami dennymi torfowisk. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 107: 167-178.

Howarth, R.J., Turner, M.St.J. 1987. Statistical graphics in geochemical journals. *Mathematical Geology* 19: 1-24.

Jaina, A., Sarsaiya, S., Wua, Q., Shi, J., Lua, Y. 2019. New insights and rethinking of cinnabar for chemical and its pharmacological dynamics. *Bioengineered* 10 (1): 353-364.

Janda, J., Sladek, P., Sas, D. 2011. Microwave digestion of hardly dissoluble samples. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 290 (3): 637-642.

Jones, R. 1984. Heavy metals in the sediments of Llangorse Lake, Wales, since Celtic-Roman times. *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie* 22: 1377-1382.

Juśkiewicz, W., Gierszewski, P. 2022. Toxic metal pollution of aquatic ecosystems of European Union nature protection areas in a region of intensive agriculture (Lake Gopło, Poland). *Aquatic Sciences* 84: 52.

Juśkiewicz, W., Marszelewski, W., Tylmann, W. 2015. Differentiation of the concentration of heavy metals and persistent organic pollutants in lake sediments depending on the catchment management (Lake Gopło case study). *Bulletin of Geography. Physical Geography Series* 8: 71-80.

Kabata-Pendias A., Pendias H. 1993. Biogeochemia pierwiastków śladowych. Wyd. Naukowe PWN, Warszawa: 364 s.

Kadrow, S., Forysiak, J., Okupny, D., Saile, T., Posselt, M., Rauba-Bukowska, A., Wąs, M., Twardy, J., Golański, A., Abramów, J. 2022. The Early Neolithic cultural transformation in the Targowisko settlement region SE Poland. *Praehistorische Zeitschrift* 97 (2): 409-446.

Karasiewicz, T.M. 2019. The kettle-hole mire as archives of postglacial changes in biogenic sedimentation (Tuchola Forest, north-Central Poland). *Catena* 176: 26-44.

Karasiewicz, T.M., Hulisz, P., Noryśkiewicz A.M., Stachowicz-Rybka R., Michalski A., Dąbrowski, M., Gamrat, W.W. 2017. The impact of postglacial palaeoenvironmental changes on the properties of sediments in the kettle hole at Jurki (NE Poland). *Geological Quarterly* 61 (2): 305-319.

Karasiewicz, M.T., Noryśkiewicz, A.M., Hulisz, P., Krześlak, I., Świtoniak, M. 2014. The record of hydroclimatic changes in the sediments of a kettle-hole in a young glacial landscape (north-central Poland). *Quaternary International* 328-329: 264-276.

Kinder, M., Tylmann, W., Ohlendorf, C., Zolitschka, B. 2008. Laminowane osady denne jeziora Szurpiły jako podstawa rekonstrukcji zmian środowiska przyrodniczego w północno-wschodniej Polsce. *Landform Analysis* 9: 241-246.

Kinder, M., Tylmann, W., Bubak, I., Fiłoc, M., Gąsiorowski, M., Kupryjanowicz, M., Mayr, C., Sauer, L., Voellering, U., Zolitschka, B. 2019. Holocene history of human impacts inferred from annually laminated sediments in Lake Szurpiły, northeast Poland. *Journal of Palaeolimnology* 61: 419-435.

Kittel, P., Antczak-Orlewska, O., Apolinarska, K., Okupny, D., Makohonienko, M., Rudna, M., Rennwanz, J., Sobczyk, R., Leszczyk, A., Płóciennik, M., Tsvirko, D., Kotrys, B., Goslar, T., Sikora, J. 2025. Living in a hardwater lake – The Late Weichselian and Holocene history of the small kettle hole on the moraine plateau in Ostrowite (N Poland). *Catena* 258: 109293.

Kittel, P., Muzolf, B., Płóciennik, M., Elias, S., Brooks, S., 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.

Kittel, P., Płóciennik, M., Borówka, R.K., Okupny, D., Pawłowski, D., Peyron, O., Stachowicz-Rybka, R., Obremska, M., Cywa, K. 2016. Early Holocene hydrology and environments of the Ner River (Poland). *Quaternary Research* 85: 187-203.

Kleeberg, A., Neyen, M., Schkade, U.K., Kalettka, T., Lischeid, G. 2016. Sediment cores from kettle holes in NE Germany reveal recent impacts of agriculture. *Environmental Science and Pollution Research* 23: 7409-7424.

Klimek, K., Zawilińska, L. 1985. Trace elements in alluvia of the Upper Vistula as indicators of palaeohydrology. *Earth Surface Processes and Landforms* 10: 273-280.

Klink, A., Dambiec, M., Polechońska, L. 2019. Trace metal speciation in sediments and bioaccumulation in Phragmites australis as tools in environmental pollution monitoring. *International Journal of Environmental Science and Technology* 16: 7611-7622.

Kłys, M. 2010. Z rtęcią (i...) przez stulecia. *Archiwum Medycyny Sądowej i Kryminologii* 60: 298-307.

Kutschera, W., Müller W. 2003. „Isotope language" of the Alpine Iceman investigated with AMS and MS. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 204: 705-719.

Koinig, K.A., Shotyk, W., Lotter, A.F., Ohlendorf, C., Sturm, M. 2003. 9000 years of geochemical evolution of lithogenic major and trace elements in the sediment of an alpine lake - the role of climate, vegetation, and land use history. *Journal of Palaeolimnology* 30: 307-320.

Konecka-Betley, K., Okołowicz, M. 1998. Phosphorus – an indicator of the man activity in Pleistocene. *Roczniki Gleboznawcze* 49 (1-2): 87-94.

Korzeniowski, A., Okupny, D., Michczyński, A., Sławińska, J., Borówka, R.K. 2020. Lithology and geochemistry of the Late Glacial and Holocene Sediments from Gostyń Lake (Western Pomerania, Myślibórz Lakeland). *Acta Geographica Lodziensia* 110: 149-168.

Kosiński, K., Lipka, K., Możdżeń, M. 1994. Zawartość metali ciężkich w torfach. *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej w Krakowie* 291: 115-125.

Kostka, A., Leśniak, A. 2020. Spatial and geochemical aspects of heavy metal distribution in lacustrine sediments, using the example of Lake Wigry (Poland). *Chemosphere* 240: 124879.

Kowalewski, G., Woszczyk, M., Milecka, K., Bubak, I. 2006. Osady denne jeziora Ostrowite. [w:] G. Kowalewski, K. Milecka (red.) *Jeziora i torfowiska Parku Narodowego Bory Tucholskie. Przewodnik terenowy*. Wyd. Park Narodowy Bory Tucholskie, Charzykowy, 87-100.

Kowalkowski, A., Swałdek, M. 1994. *Analiza podstawowych chemicznych właściwości gleb z elementami analityki*. Wyd. Wyższej Szkoły Pedagogicznej im. Jana Kochanowskiego. Kielce.

Kozieł, M., Zgłobicki, W. 2010. Metale ciężkie w aluwiach Wieprza na obszarze Nadwieprzańskiego Parku Krajobrazowego. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych* 43: 26-37.

Kubiak, J., Tórz, A., Nędzarek, A. 1999. *Analityczne podstawy hydrochemii*. Wyd. Akademii Rolniczej w Szczecinie. Szczecin.

Küttner, A., Mighall, T.M., De Vleeschouwer, F., Mauquoy, D., Martinez-Cortizas, A. 2014. A 3300-year atmospheric metal contamination record from Raeburn Flow raised bog, south west Scotland. *Journal of Archaeological Science* 44: 1-11.

Kwecko, P. 2016. Pierwiastki ziem rzadkich (REE) w środowiskach powierzchniowych litosfery. *Przegląd Geologiczny* 64 (11): 902-917.

Kwiatkowski, A. 1971. Nieorganiczne składniki torfu. *Biuletyn Informacyjny Torf* 4: 31-43.

Latałowa, M. 1999. Zmiany hydrologiczne wywołane przez czynnik klimatyczny i działalność człowieka zapisane w torfowisku Kołczewo i osadach dennych jeziora Raczego. [w]: R.K. Borówka, Z. Młynarczyk, A. Wojciechowski (red.) *Ewolucja geosystemów nadmorskich południowego Bałtyku*. Bogucki Wyd. Naukowe. Poznań-Szczecin, 99-103.

Lądkiewicz, K., Wszędyrówny-Nast., M., Jaśkiewicz, K. 2017. Porównanie różnych metod oznaczania zawartości substancji organicznej. *Scientific Review - Engineering and Environmental Sciences* 26 (1): 99-107.

Le Roux, G., Fagel, N., De Vleeschouwer, F., Krachler, M., Debaille, V., Stille, P., Mattielli, N., van der Knaap, W.O., van Leeuwen J.F.N., Shotyk, W. 2012. Volcano- and climate-driven changes in atmospheric dust sources and fluxes since the Late Glacial in Central Europe. *Geology* 40 (4): 335-338.

Le Roux, G., Weiss, D., Grattan, J., Givelet, J.P., Krachler, M., Cheburkin, A., Rausch, N., Kober, B., Shotyk, W. 2004. Identifying the sources and timing of ancient and medieval atmospheric lead pollution in England using a peat profile from Lindow bog, Manchester. *Journal of Environmental Monitoring* 6: 502-510.

Lewandowska, A., Milecka, K., Niedzielski, P., Czerwiński, S., Gałka, M. 2023. Late Glacial development of lakes and wetland vegetation in a dune area in Central Poland. *Acta Palaeobotanica* 63 (1): 1-20.

Li, F., Ma, C., Zhang, P. 2020. Mercury deposition, climate change and Anthropogenic activities: a review. *Frontiers in Earth Science* 8: 316.

Lis, J., Parafiniuk, J., Pasieczna, A., Rajchel, M. 2007. Antropogeniczne przeobrażenia środowiska geochemicznego aluwiów Zagożdżonki (Puszcza Kozienicka). *Przegląd Geologiczny* 55 (1): 79-86.

Liu, J.H., He, Y., Ke, W., Hwang, M., Chen, K.Y. 2022. Cinnabar use in Anyang of bronze age China: Study with micro-raman spectroscopy and X-ray fluorescence. *Journal of Archaeological Science: Reports* 43: 103460.

Liu, L. 2004. The *Chinese Neolithic: trajectories to early states*. Cambridge University Press, Cambridge.

Łachacz, A. 2004. Mokradła w krajobrazie - wybrane pojęcia. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie* 4 (2a): 295-301.

Ławacz, W., Planter, M., Stasiak, K., Tatur, A., Więckowski, K. 1978. The past, present and future of three Masurian lakes. *Polskie Archiwum Hydrobiologii* 25 (1/2): 233-238.

Maciak, F., Liwski, S. 1996. *Ćwiczenia z torfoznawstwa.* Wyd. SGGW. Warszawa.

Makohonienko, M., Płóciennik, M., Papiernik, P., Kittel, P., Gałka, M., Mroczkowska, A., Apolinarska, K., Okupny, D., Panfil, M., Kotrys, B., Luoto, T.P., Krąpiec, M., Tyszkowski, S. 2023. Environmental changes during Mesolithic-Neolithic transition in Kuyavia Lakeland, Central Poland. *Quaternary International* 644-645: 196-221.

Malkiewicz, M., Okupny, D., Borówka, R.K., Forysiak, J., Michczyński, A., Pawłowski, D., Żurek, S. 2018. Wiek oraz warunki sedymentacji biogenicznych torfowiska Białe Ługi. [w:] M. Ludwikowska-Kędzia, M. Wiatrak (red.) *Materiały XXV Konferencji Stratygrafia Plejstocenu Polski, Huta Szklana, 3-7 września 2018*. Wyd. Politechnika Świętokrzyska, Uniwersytet Jana Kochanowskiego. Kielce, 250-257.

Mannion, A.M. 2001. *Zmiany środowiska Ziemi. Historia środowiska przyrodniczego i kulturowego*. Wyd. Naukowe PWN. Warszawa.

Marcisz, K., Bełka, Z., Dopieralska, J., Jakubowicz, M., Karpińska-Kołaczek, M., Kołaczek, P., Mauquoy, D., Słowiński, M., Zieliński, M., Lamentowicz, M. 2023. Neodymium isotopes in peat reveal past local environmental disturbances. *Science of Total Environment* 871: 161859.

Markowski, S. 1980. *Struktura i właściwości podtorfowych osadów jeziornych rozprzestrzenionych na Pomorzu Zachodnim jako podstawa ich rozpoznania i klasyfikacji. Kreda jeziorna i gytie,* vol. 2. Poznańskie Towarzystwo Przyjaciół Nauk o Ziemi. Gorzów-Zielona Góra, 44-55.

Martinez-Cortizas, A., Ponteverda-Pombal, X., García-Rodeja, E., Nóvoa-Muñoz, J.C., Shotyk, W. 1999. Mercury in a Spanish peat bog: archive of climate change and atmospheric metal deposition. *Science* 284: 939-942.

McCarthy, F.M.G., Patterson, R.T., Head, M.J., i in. 2023. The varved succession of Crawford Lake, Milton, Ontario, Canada as a candidate Global boundary Stratotype Section and Point for the Anthropocene series. *The Anthropocene Review* 10 (1): 146-176.

Mendyk, Ł., Markiewicz, M., Bednarek, R., Świtoniak, M., Gamrat, W.W., Krześlak, I., Sykuła, M., Gersztyn, W., Kupniewska A. 2016. Environmental changes of a shallow kettle lake catchment in a young glacial landscape (Sumowskie Lake catchment), North-Central Poland. *Quaternary International* 418: 116-131.

Meyers, P.A. 1994. Preservation of source identification of sedimentary organic matter during after deposition. *Chemical Geology* 144: 289-302.

Meyers, P.A. 2003. Application of organic geochemistry to paleolimnological reconstructions: a summary of example from the Laurentian Great Lakes. *Organic Geochemistry* 34: 261-289.

Migaszewski, Z. 1998. Metodyka badań geochemicznych gleb i biowskaźników roślinnych. *Przegląd Geologiczny* 46 (2): 159-163.

Migaszewski, Z., Gałuszka, A. 2000. Geochemia na tle nauk o środowisku przyrodniczym. *Prace Instytutu Geografii Wyższej Szkoły Pedagogicznej im. Jana Kochanowskiego w Kielcach* 4: 223-235.

Migaszewski, Z., Gałuszka, A. 2003. *Zarys geochemii środowiska.* Wyd. Akademii Świętokrzyskiej. Kielce.

Migaszewski, Z., Gałuszka, A. 2008. Biogeochemical studies – the present state of knowledge. Przegląd Geologiczny 46 (9): 932-937.

Migaszewski, Z., Gałuszka, A., Świercz, A., Pasławski, P., Starnawska, E., Styrcz, K., Cwener, A., Pawelec, J., Podlaski, R., Romański, M. 2004. Badania geochemiczne i biogeochemiczne na obszarze trzech parków narodowych: Magurskiego, Świętokrzyskiego i Wigierskiego z zastosowaniem analizy wariancji (ANOVA). *Przegląd Geologiczny* 52 (6): 507-515.

Mighall, T.M., Timberlake, S., Foster, I.D.L., Krupp, E., Singh, S. 2009. Ancient copper and lead pollution records from a raised bog complex in Central Wales, UK. *Journal of Archeological Science* 36: 1504-1515.

Minczewski, J., Marczenko, Z. 1978. *Chemia analityczna. T. III. Analiza instrumentalna*. Wyd. Naukowe PWN. Warszawa.

Mirosław-Grabowska, J., Zawisza, E., Obremska, M., Kowalczyk, J., Zbucki, Ł., Tobolski, K. 2023. Human impact recorded in lake environment (Charzykowskie Lake, N Poland) during the last 6,200 years. *Acta Geologica Polonica* 73: 467-478.

Miszczak, E., Stefaniak, S., Michczyński, A., Steinnes, E., Twardowska, I. 2020. A novel approach to peatlands as archives of total cumulative spatial pollution loads from atmospheric deposition of airborne elements complementary to EMEP data: priority pollutants (Pb, Cd, Hg). *Science of Total Environment* 705: 135776.

Mortlock, R.A., Froelich, P.N. 1989. A simple method for the rapid determination of biogenic opal in pelagic marine sediments. Deep Sea Research Part A. *Oceanographic Research Papers* 36 (9): 1415-1426.

Murozumi, M., Chow, T.J., Patterson, C. 1969. Chemical concentrations of pollutant lead aerosols, terrestrial dusts and sea salts in Greenland and Antarctic snow strata. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 33: 1247-1294.

Muzolf, B., Kittel, P., Płóciennik, M., Głąb, Z., Okupny, D. 2015. Wczesnośredniowieczne płóciennictwo w świetle badań reliktów moczydła na stanowisku Lutomiersk-Koziówki. *Prace i Materiały Muzeum Archeologicznego i Etnograficznego w Łodzi. Seria Archeologiczna* 46: 187-210.

Myślińska, E. 1999. Parametry fizyczne torfów i ocena metod ich oznaczania. *Przegląd Geologiczny* 47: 676-682.

Myślińska, E. 2003. Classification of organic soils for engineering geology. *Geology Quarterly* 47 (1): 39-42.

Nalepka, D., Walanus, A. 2003. Data processing in pollen analysis. *Acta Palaeobotanica* 43 (1): 125-134.

Niska, M., Jonczak, J., Gadziszewska, J. 2017. Late Pleistocene and Holocene environmental evolution of the Wkra River Valley near Bielawy Gołuskie (central Poland) recorded in palaeo-oxbow lake deposits. *Geological Quarterly* 61 (2): 305-318.

Noryśkiewicz, B. 2004. Vegetation and settlement history in the area of Lake Zawada in the north-eastern part of the Świecie District (northern Poland). *Acta Palaeobotanica* 44 (2): 195-215.

Obrist, D., Agnan, Y., Jiskra, M., Olson, C.L., Colegrove, D.P., Hueber, J., Moore, C.W., Sonke J.E., Helmig, D. 2017. Tundra uptake of atmospheric elemental mercury drives Arctic mercury pollution. *Nature* 547: 201-204.

Okruszko, H. 1994. System of hydrogenic soil classification used in Poland. [w:] H. Okruszko (red.) Taxonomy of hydrogenic soils and sites used in Poland. *Biblioteczka Wiadomości Instytutu Melioracji i Użytków Zielonych* 84: 5-27.

Okupny, D., Fortuniak A., Tomkowiak J. 2013. Pionowa zmienność składu chemicznego osadów biogenicznych torfowiska Podwódka (Kotlina Szczercowska). [w:] R.K. Borówka, A. Cedro, I. Kavetskyy (red.) *Współczesne problemy badań geograficznych*. Uniwersytet Szczeciński, Wydział Nauk o Ziemi. Szczecin, 83-91.

Okupny, D., Rzepecki, S., Borówka, R.K., Forysiak J., Twardy J., Fortuniak, A., Tomkowiak, J. 2016. Factors influencing temporal changes in chemical composition of biogenic deposits in the middle Tążyna River Valley (Kuyavian Lakeland, central Poland). *Geologos* 22 (2): 121-136.

Okupny, D., Borówka, R.K., Cedro, B., Sławińska, J., Tomkowiak, J., Michczyński, A., Kozłowska, D., Kowalski, K., Siedlik, K. 2020. Geochemistry of a sedimentary section at the Wąwelnica Archaeological Site, Szczecin Hills (Western Pomerania). *Acta Geographica Lodziensia* 110: 169-186.

Okupny, D., Borówka, R.K., Forysiak, J., Twardy, J., Kloss, M., Żurek, S. 2021: The relationship between the chemical composition and lithology of Late Glacial and Holocene biogenic deposits at the Żabieniec mire (Central Poland). *Geological Quarterly* 65 (1): 11.

Okupny, D., Orlewska-Antczak, O., Pawłowski, D., Borówka, R.K., Sławińska, J., Tomkowiak, J., Osóch, P., Bartczak, A., Nierychlewska, A., Osóch, B., Krąpiec, M., Jucha, W., Kittel, P., Sady-Bugajska, A., Spławski, S. 2022. How well multi-indicator palaeoenvironmental studies meet the needs of research on settlements, on the example of the early medieval settlement complex in Szczecin: methodological problems and evaluating interpretation value. *Acta Geographica Lodziensia* 112: 97-121.

Olson, C., Jiskra, M., Biester, H., Chow, J., Obrist, D. 2018. Mercury in active-layer tundra soil of Alaska: concentrations,

pools, origin, and spatial distribution. *Global Biogeochemical Cycles* 32: 1058-1073.

Olson, C.L., Jiskra, M., Sonke, J.E., Obrist, D. 2019. Mercury in tundra vegetation of Alaska: Spatial and temporal dynamics and stable isotope patterns. *Science of the Total Environment* 660: 1502-1512.

Owsianny, P.M., Nowaczyk, B., Sobczyński, T. 2011. Stratygraficzne zróżnicowanie wybranych cech geochemicznych osadów równin akumulacji biogenicznej przylegających do jezior Kuźniczek, Kuźnik Mały i Kuźnik Duży w Rezerwacie Przyrody Kuźnik. *Landform Analysis* 16: 139-147.

Pasieczna, A. 2008. Wpływ przemysłu na środowisko przyrodnicze regionu śląsko-krakowskiego. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi* 24 (2): 67-82.

Pawełczyk, F., Chróst, L., Magiera, T., Michczyński, A., Sikorski, J., Tudyka, K., Zajac, E. 2017. Radiocarbon and lead-210 age-depth model and trace elements concentration in the Wolbrom fen (S Poland). *Geochronometria* 44: 40-48.

Pawełczyk, F., Michczyński, A., Tomkowiak, J., Tudyka, K., Fagel, N. 2018a. Mid- to Late Holocene elemental record and isotopic composition of lead in a peat core from Wolbrom (S Poland). *Mires and Peat* 21: 1-13.

Pawełczyk, F., Okupny, D., Michczyński, A. 2018b. Zróżnicowanie zawartości pierwiastków śladowych w osadach torfowisk Wolbrom i Otrębowskie Brzegi odzwierciedleniem wpływu antropopresji. *Acta Geographica Lodziensia* 107: 175–190.

Pawełczyk, F., Bloom, K., Jucha, W., Michczyński, W., Okupny, D., Sikorski, J., Tomkowiak, J., Zając, E., Fagel, N. 2019. Reconstruction of atmospheric lead and heavy metal pollution in the Otrębowskie Brzegi peatland (S Poland). *Geological Quarterly* 63 (3): 568-585.

Pawlik, Ł., Okupny, D., Kroh, P., Cybul, P., Stachowicz-Rybka, R., Sady-Bugajska, A. 2022. Changin natural conditions and their impact on the Mt. Śnieżnica landscape, Outer Western Carpathians - Reconstruction of the Holocene environment based on geochemical indices and radiocarbon dating. *Science of the Total Environment* 850: 158066.

Pawlikowski, M., Ralska-Jasiewiczowa, M., Schonborn, W., Stupnicka, E., Szeroczyńska, K. 1982. Woryty near Gietrzwałd, Olsztyn Lake District, NE Poland - vegetational history and lake development during the las 12 000 years. *Acta Palaeobotanica* 22 (1): 85-116.

Pawłowski, D., Milecka, K., Kittel, P., Woszczyk, M., Spychalski, W. 2015. Palaeoecological record of natural changes and human impact in a small river valley in Central Poland. *Quaternary International* 370: 12-28.

Pawłowski, D., Borówka, R.K., Kowalewski, G., Luoto, T.P., Milecka, K., Nevalainen, L., Okupny, D., Tomkowiak, J., Zieliński, T. 2016. Late Weichselian and Holocene record of the paleoenvironmental changes in small River Valley in Central Poland. *Quaternary Science Reviews* 135: 24-40.

Pędziszewska, A., Tylmann, Witak, M., Piotrowska, N., Maciejewska, E., Latałowa, M. 2015. Holocene environmental changes reflected by pollen, diatoms, and geochemistry of annually laminated sediments of Lake Suminko in the Kashubian Lake District (N Poland). *Review of Palaeobotany and Palynology* 216: 55-75.

Piech, W., Hrynowiecka, A., Stachowicz-Rybka, R., Cywa, K., Mroczkowska, A., Słowiński, M., Okupny D., Krąpiec, M., Ginter, A., Mazurkevich, A., Kittel, P. 2024. Natural and anthropogenic factors affecting intense slope processes in Eastern Europe during the Modern Period: Serteyka river valley, Russia. *The Holocene* 34 (7): 806-827.

Piotrowska, M., Okupny, D., Twardy, J., Forysiak, J. 2019. Roman period well fills resulting from using and abandonment in environment of a river valley (Kwiatków site, Central Poland). *Studia Quaternaria* 36 (1): 55-69.

Plak, A., Zgłobicki, W., Lata, L., Telecka, M. 2013. Formy biodostępne Cd, Cu, Pb, Zn w osadach den dolin zachodniej części Wyżyny Lubelskiej. *Landform Analysis* 24: 65-71.

Plak, A., Chodorowski, J., Pidek, I.A., Dobrowolski, R. 2015. Selected geochemical criteria in mire profiles of Poręby Wojsławskie (Sandomierz Basin, Poland SE). *Polish Journal of Soil Science* 48 (1): 91-99.

Pleskot, K., Tjallingii, R., Makohonienko, M., Nowaczyk, B., Szczuciński, W. 2018. Holocene palaeohydrolopgical reconstruction of Lake Strzeszyńskie (western Poland) and its implications for the European climatic transition zone. *Journal of Palaeolimnology* 59: 443-459.

Pleskot, K., Suchora, M., Apolinarska, K., Kołaczek, P. 2022. Responses of a shallow temperate lake ecosystem to major late-Holocene terrestrial vegetation shifts. *The Holocene* 32 (7): 703-715.

Płaza, D.K., Forysiak, J., Borówka, R.K., Okupny, D., Marosik, P., Obremska, M., Michczyńska, D. 2015. Aktywność osadnicza grup mezolitycznych na obszarze wydm w Aleksandrowie i jej zapis w osadach przyległego torfowiska Rąbień. *Prace i Materiały Muzeum Archeologicznego i Etnograficznego w Łodzi, Seria Archeologiczna* 46: 229-250.

Płóciennik, M., Kittel, P., Borówka, R.K., Cywa, K., Okupny, D., Obremska, M., Pawłowski, D., Stachowicz-Rybka, R., Szperna, R., Witkowski, A. 2016. Palaeoecological and palaeohydrological patterns of the Kolonia Bechcice subfossil oxbow in the mid-Ner River valley. *Acta Geographica Lodziensia* 105: 107-124.

Płóciennik, M., Jakiel, A., Forysiak, J., Kittel, P., Płaza, D.K., Okupny, D., Pawłowski, D., Obremska, M., Brooks, S.J., Kotrys, B., Luoto, T.P. 2021. Multi-proxy inferred hydroclimatic conditions at Bęczkowice fen (central Poland); the influence of fluvial processes and human activity in the stone age. *Acta Geographica Lodziensia* 111: 135-157.

Podlasińska, J., Podlasiński, M. 2005. Zawartość wybranych metali ciężkich w osadach oczek śródpolnych na Równinie Wełtyńskiej. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 501: 389-396.

Poraj-Górska, A.I., Bonk, A., Żarczyński, M., Kinder, M., Tylmann, W. 2021. Varved lake sediments as indicator of recent cultural eutrophication and hypolimnetic hypoxia in lakes. *Antropocene* 36: 100311.

Prosowicz, D. 2008. Metale w osadach dennych jeziora Wigry. *Geologia, Zeszyty Naukowe Akademii Górniczo-Hutniczej* 34 (1): 85-108.

Prosowicz, D., Helios-Rybicka E. 2002. Trace metals in recent bottom sediments of Lake Wigry (Bryzgiel Basin). *Limnological Review* 2: 323-332.

Racinowski, R., Szczypek, T., Wach, T. 2001. *Prezentacja i interpretacja wyników badań uziarnienia.* Wyd. Uniwersytetu Śląskiego. Katowice.

Rapuc, W., Arnaud, F., Sabatier, P., Anselmetti, F., Piccin, A. Peruzz, L., Bastien, A., Augustin, L., Réginier, E., Gaillardet, J., Von Grafenstein, U. 2022. Instant sedimentation in a deep Alpine lake (Iseo, Italy) controlled by climate, human and geodynamic forcing. *Sedimentology* 69, 4: 1816-1840.

Ross-Barraclough, F., Martinez-Cortizas, A., García-Rodeja, E., Shotyk W. 2002. A 14 500 year record of the accumulation of atmospheric mercury in peat: volcanic signals, anthropogenic influences and a correlation to bromine accumulation. *Earth and Planetary Science Letters* 202: 435-451.

Rutkowski, J. 2007. Osady jezior w Polsce. Charakterystyka i stan rozpoznania, metodyka badań, propozycje. *Studia Limnologica et Telmatologica* 1 (1): 17-24.

Rühle, E. 1961. Procesy dynamiczne w zbiornikach jeziornych i charakter ich osadów na przykładzie Jeziora Świtaź. [w:] E. Rühle (red.) *Z badań czwartorzędu w Polsce,* t. 10. Wyd. Geologiczne. Warszawa, 255-298.

Rybak, J.I. 1969. Bottom sediments of the lakes of various trophic type. *Ekologia Polska, Seria A* 35: 611-662.

Rybicka, M., Wacnik, A., Pokutta, D., Kittel, P., Okupny, D., Król, D., Sady-Bugajska, A., Pankowski, W., Sîrbu, G., Makohonienko, M., Słowiński, M. 2023. Was Gordinesti II-Stînca Goala abandoned due to cultural changes or environmental impacts? The case of the Late Trypillia settlement in northern Moldova. *Sprawozdania Archeologiczne* 75 (1): 51-75.

Rydelek, P. 2011. Geneza i skład części mineralnych wybranych złóż torfów niskich Wysoczyzny Lubartowskiej. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie* 11 (2): 135-149.

Rzepecki, P. 1983. Klasyfikacja i główne typy litologiczne osadów jeziornych. Zeszyty Naukowe Akademii Górniczo-Hutniczej 913, *Geologia* 9 (1): 73-94.

Sapek, A., Sapek, B. 1997. Metody analizy chemicznej gleb organicznych. Wyd. Instytutu Melioracji i Użytków Zielonych Falenty.

Schnurrenberger, D., Russell, J., Kelts, K. 2003. Classification of lacustrine sediments based in sedimentary components. *Journal of Palaeolimnology* 29: 141-154.

Schotsmans, E.M.J., Busacca, G., Lin, S. C., Vasić, M., Lingle, A. M., Veropoulidou, R., Mazzucato, C., Tibbetts, B., Haddow, S. D., Somel, M., Toksoy-Köksal, F., Knüsel1, C. J., Milella M. 2022. New insights on commemoration of the dead through mortuary and architectural use pigments at Neolithic Çatalhöyük Turkey. *Scientific Reports* 12: 4955.

Shotyk, W. 1996. Peat bog archives of atmospheric metal deposition: geochemical assessment of peat profiles, natural variations in metal concentrations, and metal enrichment factors. *Environmental Reviews* 4 (2): 149-183.

Shotyk, W., Krachler, M., Martinez-Cortizas A., Cheburkin, A.K., Emons, H. 2002. A peat bog records of natural, pre-anthropogenic enrichments of trace elements in atmospheric aerosols since 12 370 ^{14}C yr BP, and their variations with Holocene climate change. *Earth and Planetary Letters* 199: 21-37.

Skoczylas, J., Gunia, P. 2016. Zastosowanie wiedzy geologicznej w archeologii. *Przegląd Geologiczny* 64 (9): 734-738.

Słowiński, M., Marcisz, K., Płóciennik, M., Obremska, M., Pawłowski, D., Okupny, D., Słowińska, S., Borówka, R.K., Kittel, P., Forysiak, J., Michczyńska, D.J., Lamentowicz, M. 2016. Drought as a stress driver of ecological changes in peatland - a palaeological study of peatland development between 3500 BCE and 200 BCE in central Poland. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 461: 272-291.

Słowiński, M., Zawiska, I., Ott, F., Noryśkiewicz, A., Plessen, B., Apolinarska, K., Rzodkiewicz, M., Michczyńska, D.J., Wulf, S., Skubała, P., Kordowski, J., Błaszkiewicz, M., Brauer, A. 2017. Differential proxy responses to late Allerod and early Younger Dryas climatic change recorded in varved sediments of the Trzechowskie palaeolake in Northern Poland. *Quaternary Science Reviews* 158: 94-106.

Smieja-Król, B., Fiałkiewicz-Kozieł, B., Sikorski, J., Palowski, B. 2010. Heavy metal behavior in peat - A mineralogical perspective. *Science of The Total Environment* 408, 23: 5924-5931.

Smieja-Król, B., Janeczek, J., Bauerek, A., Thorseth, I.H. 2015. The role of authigenic sulfides in immobilization of potentially toxic metals in the Bagno Bory wetland, southern Poland. *Environment Science and Pollution Research* 22: 15495-15505.

Smieja-Król, B., Fiałkiewicz-Kozieł, B., Michalska, A., Krzykawski, T., Smołka-Danielowska, D. 2019. Deposition of mullite in peatlands of southern Poland: Implications for recording large-scale industrial processes. *Environmental Pollution* 250: 717-727.

Sobczyński, T., Siepak, J. 1998. Specjacja metali ciężkich w osadach dennych jezior. [w:] J. Siepak (red.) *Analiza specjacyjna metali w próbkach wód i osadów dennych*. Wyd. UAM. Poznań, 67-78.

Sobkowiak-Tabaka, I., Pawłowski, D., Milecka, K., Kubiak-Martens, L., Kostecki, R., Janczak-Kostecka, B., Goslar, T., Ratajczak-Szczerba, M. 2020. Multi-proxy records of Mesolithic activity in the Lubuskie Lakeland (western Poland). *Vegetation History and Archaeobotany* 29: 153-171.

Sobkowiak-Tabaka, I., Milecka, K., Kubiak-Martens, L., Pawłowski, D., Kurzawska, A., Janczak-Kostecka, B., Kostecki, R., Hildebrandt-Radke, I., Apolinarska, K., Goslar, T. 2022. The persistent place at Lubrza: a small paradise for hunter-gatherers? Multi-disciplinary studies of Late Palaeolithic environment and human activity in the Łagów lake district (western Poland). *Vegetation History and Archaeobotany* 31: 447-465.

Sojka, M., Jaskuła, J., Barabach, J., Ptak, M., Zhu, S. 2022. Heavy metals in lake surface sediments in protected areas in Poland: concentration, pollution, ecological risk, sources and spatial distribution. *Scientific Reports* 12: 15006.

Spindler, K. 1995. *Der Mann im Eis.* Goldmann Verlag, München.

Stangenberg, M., Żemoytel-Kolanko, K., Solski, A., Stangenberg, K. 1957. Osady jeziorne w Żuchowie koło Karnkowa. [w:] E. Rühle (red.) *Z badań czwartorzędu w Polsce*. Wyd. Geologiczne. Warszawa, 267-316.

Suchora, M. 2019. An over 200-year environmental change record from the highly impacted small, hardwater Lake Pniówno (Chełm Hills). *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska Lublin Polonia, Sectio B* 74: 231-255.

Szal, M., Kupryjanowicz, M., Smolska, E., Szwarczewski, P., Wyczółkowski, M. 2015. Przekształcenia środowiska przyrodniczego w otoczeniu wczesnośredniowiecznego kompleksu osadniczego w Poganowie (Pojezierze Mrągowskie). *Prace i Materiały Muzeum Archeologicznego i Etnograficznego w Łodzi, Seria Archeologiczna* 46: 295-310.

Szal, M., Kupryjanowicz, M., Wyczółkowski, M., Tylmann, W. 2014. The Iron Age in the Mrągowo Lake District, Masuria, NE Poland: the Salęt settlement microregion as an example of long-lasting human impact on vegetation. *Vegetation History and Archaeobotany* 23: 419-437.

Szarłowicz, K., Reczyński, W., Czajka, A., Spyt, B., Szaciłowski, G. 2018. Comprehensive study of the mountainous lake sediments in relation to natural and anthropogenic processes and tim (Mały Staw Lake, Poland). *Environmental Science and Pollution Research* 25: 3335-3347.

Szeliga, M., Dobrowolski, R., Chodorowski, J., Pidek, I.A., Mroczek, P. 2018. Zapis geoarcheologiczny działalności człowieka w neoholocenie w południowo-wschodniej części Przedgórza Iłżeckiego (Centralna Polska). *Acta Geographica Lodziensia* 107: 155-173.

Szmańda, J.B. 2008. Interpretacja intensywności zdarzeń powodziowych w aluwiach wałów przykorytowych Drwęcy i Tążyny na podstawie zapisu sedymentologicznego i badań skażenia pierwiastkami śladowymi. *Landform Analysis* 8: 78-82.

Szmańda, J., Łokas, E., Wachniewicz, P., Michno, A., Kalicki, T., Szwarczewski, P., Przegiętka, K.R., Radwanek-Bąk, B. 2018. Sedymentacja mad wiślanych w Tyńcu. *Prace Geograficzne* 155: 157-172.

Szumowski, W. 1935. *Historja medycyny filozoficznie ujęta.* Gebethner i Wolf. Kraków.

Szwarczewski, P. 2003. Wybrane geochemiczne i teksturalne cechy osadów w dolinie Utraty jako efekt działalności człowieka - współczesnej i w przeszłości. *Prace i Studia Geograficzne* 33: 83-92.

Szwarczewski, P., Korabiewski, B. 2003. Wybrane geochemiczne cechy osadów wypełniających starorzecza w dolinie dolnej Pilicy w okolicach Warki. *Prace i Studia Geograficzne* 33: 71-82.

Szwarczewski, P., Smolska, E. 2013. Cechy geochemiczne osadów stokowych i fluwialnych na północno-zachodnim Mazowszu. *Prace i Studia Geograficzne* 51: 105-23.

Szymczyk, A., Nita, M. 2021. Holocene environmental changes in a prehistoric mining and metallurgical region in the light of paleobotanical studies of the bogs of the Brynica river drainage basin (southern Poland). *Science of The Total Environment* 788: 147755.

Ślęzak, E., Poluszyńska, J., Wieczorek, P.P., Sławińska, I. 2016. Mineralizacja mikrofalowa jako efektywna metoda roztwarzania stałych próbek środowiskowych. *Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych* 9 (26): 151-159.

Święta-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 Archaeology* 25: 583-599.

Tessier, A., Campbell, P.G.C., Bisson, M. 1979. Sequential extraction procedurę for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry* 51: 844-851.

Tobolski, K. 1997. Historia podłoża glebowego. [w:] K. Tobolski, A. Mocek, W. Dzięciołowski (red.) *Gleby Słowińskiego Parku Narodowego w świetle historii roślinności i podłoża*. Wyd. Homini. Bydgoszcz-Poznań, 50-70.

Tobolski, K. 2000. *Przewodnik do oznaczania torfów i osadów jeziornych. Vademecum Geobotanicum*. Wyd. Naukowe PWN.

Tobolski, K. 2004. Kryterium geologiczne w badania zbiorników akumulacji biogenicznej. *Regionalny Monitoring Środowiska Przyrodniczego* 5: 119-126.

Tobolski, K. 2005. Identyfikacja torfów i osadów limnicznych na podstawie genetycznej i niegenetycznej klasyfikacji. [w:] G. Miotk-Szpiganowicz, Tobolski K., Zachowicz J. (red.) *Osady zbiorników akumulacji biogenicznej. Przewodnik do prac laboratoryjnych i terenowych*. Państwowy Instytut Geologiczny. Gdańsk, 43-61.

Tobolski, K. 2008. Osady biogeniczne. Wiarygodne archiwa i najpewniejsi depozytariusze artefaktów. [w:] W. Chudziak (red.) Człowiek i środowisko przyrodnicze we wczesnym średniowieczu w świetle badań interdyscyplinarnych. Wyd. Uniwersytetu Mikołaja Kopernika. Toruń, 9-38.

Tsantini, E., Minami, T., Takahashi, K., Ontiveros, M.A.C. 2018. Analysis of sulphur isotopes to identify the origin of cinnabar in the Roman wall paintings from Badalona (Spain). *Journal of Archaeological Science: Reports* 18: 300-307.

Tsvirko, D., Tołoczko, W., Kittel, P. 2024. Ash admixtures formed during the loss on ignition (LOI) procedure and their impact on laser textural analysis results. *Geology, Geophysics&Environment* 50 (2): 155-174.

Tudyka, K., Pazdur, A., De Vleeschouwer, F., Lityńska-Zając, M., Chróst, L., Fagel, N. 2017. Holocene elemental, lead isotope and charcoal record from peat in southern Poland. *Mires and Peat* 19: 1-18.

Turner, S., Graham, E., Macphail, R., Dunkan, L., Rose, N.L., Yang, H., Whittet, R., Rosique-Esplugas, C. 2021. Mercury enrichment in anthrosol and adjacent coastal sediments at a Classic Maya site, Marco Gonzales, Belize. *Geoarchaeology* 36 (6): 875-896.

Turner, T.E., Swindles, G.T., Roucoux, K.H. 2014. Late Holocene ecohydrological and carbon dynamics of a UK raised bog: impact of human activity and climate change. *Quaternary Science Reviews* 84: 65-85.

Turski, R. 1986. Gleboznawstwo. Ćwiczenia dla studentów wydziałów rolniczych. Wyd. Naukowe PWN, Warszawa.

Tylmann, W. 2005. Lithological and geochemical record of anthropogenic changes in recent sediments of a small and shallow lake (Lake Pusty Staw, northern Poland. *Journal of Paleolimnology* 33: 313-325.

Tylmann, W., Gołębiewski, R., Woźniak, P.P., Czarnecka, K. 2007. Heavy metals in sediments as evidence for recent pollution and quasi-estuarine processes: an example from Lake Druzno, Poland. *Environmental Geology* 53: 35-46.

Tylmann, W., Pędziszewska, A., Żarczyński, M., Latałowa, M., Zolitschka, B. 2024. Lake level fluctuations and varve preservation - The sediment record from Lake Suminko (Poland) reflects European palaeoclimatic changes. *Quaternary Science Reviews* 339: 108854.

Vives, G.S., Miras, Y., Riera, S., Julià, R., Allée P., Orengo, H., Paradis-Grenouillet, S., Palet J.M. 2014. Tracing and land

use history and vegetation dynamics in the Mont Lozère (Massif Central, France) during the last 2000 years: The interdisciplinary study case of Countrast peat bog. *Quaternary International* 353: 123-131.

Wacnik, A., Tylmann, W., Bonk, A., Goslar, T., Enters, D., Meyer-Jacob, C., Grosjean, M. 2016. Determining the responses of vegetation to natural processes and human impacts in north-eastern Poland during the last millennium: Combined pollen, geochemical and historical data. *Vegetation History and Archaeobotany* 25: 479-498.

Walanus, A. 2000. Istotność statystyczna wniosków z analiz ilościowych na przykładzie badań górnego czwartorzędu. Geologia, *Kwartalnik Akademii Górniczo-Hutniczej* 26 (4): 1-59.

Wardas-Lasoń, M., Garbacz-Klempka, A. 2015. Geochemiczny zapis w środowisku Krakowa działalności średniowiecznej metalurgii i handlu ołowiem. *Prace i Materiały Muzeum Archeologicznego i Etnograficznego w Łodzi, Seria Archeologiczna* 46: 397-423.

Wasylikowa, K. 1973. Badanie kopalnych szczątków roślin wyższych. [w:] E. Rühle (red.) *Metodyka badań osadów czwartorzędowych*. Wyd. Geologiczne. Warszawa, 161-209.

Waters, C.N., Wiliams, M., Zalasiewicz, J., Turner, S.D., Barnosky, A.D., Head, M.J., Wing, S.L., Wagreich, M., Steffen, W., Summerhayes, C.P., Cundy, A.B., Zinke, J., Fiałkiewicz-Kozieł, B., Leinfelder, R., Haff, P.K., McNeill, J.R., Rose, N.L., Hajdas, I., McCarthy F.M.G., Cearreta A., Gałuszka A., Syvitski J., Han Y., An Z., Fairchild I.J., Ivar do Sul J.A., Jeandel C. 2022. Epochs, events and episodes: Margin the geological impact of humans. *Earth-Science Reviews* 234: 104171.

Wąchalewski, T. 1994. *Wybrane zagadnienia z chemii. Skrypty Uczelniane*. Wyd. Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie 1390.

Welc, F., Nitychoruk, J., Marks, L., Bińka, K., Rogóż-Matyszczak, A., Obremska, M., Zalat, A. 2021. 2400 years of climate and human-induced environmental change recorded in sediments of Lake Młynek in northern Poland. *Climate of the Past* 17 (3): 1181-1198.

Weng, H.X., Zhang, X.M., Chen, X.H., Wu, N.H. 2003. The stability of the relative content ratios of Cu, Pb and Zn in soils and sediments. *Environmental Geology* 45: 79-85.

Wensman, SM., Shiel, A.E., McConnell, J.R. 2022. Lead isotopic fingerprinting of 250-years of industrial era pollution in Greenland ice. *Anthropocene* 38: 100340.

Wicik, B., Więckowski, K. 1991. Osady jezior „Na Jazach" - warunki ich akumulacji oraz rola w rekonstruowaniu i *prognozowaniu przekształceń środowiska naturalnego. Przegląd Geograficzny* 43 (1-2): 58-75.

Więckowski, K. 1966. Osady denne Jeziora Mikołajskiego. *Prace Geograficzne IGiPZ PAN, Warszawa* 57.

Wojciechowski, A. 1987. Profil geochemiczny osadów jeziora Gardno. *Badania Fizjograficzne nad Polską Zachodnią, Seria A: Geografia Fizyczna* 37: 191-211.

Wojciechowski, A. 2000. Zmiany paleohydrologiczne w środkowej Wielkopolsce w ciągu ostatnich 12 000 lat w świetle badań osadów jeziornych rynny kórnicko-zaniemyskiej. Wyd. Naukowe UAM, Poznań.

Wojciechowski, A., Jonczak, J. 2023. The record of geochemical changes in the biogenic-calcareous sediments of a kettle-hole in a young glacial landscape (Western Kashubian Lakeland, North Poland). *Studia Quaternaria* 40 (2): 41-56.

Woszczyk, M. 2007. Czynniki czasowej zmienności zawartości wybranych metali ciężkich w osadach jeziora Sarbsko (Nizina Gardzieńsko-Łebska) na tle genezy zbiornika. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych* 31: 485-497.

Woszczyk, M. 2012. Paleolimnologiczna interpretacja krzemionki biogenicznej; dyskusja na przykładzie wybranych jezior Niżu Polskiego. *Badania Fizjograficzne, Seria A: Geografia Fizyczna* 62: 165-179.

Woszczyk, M., Bechtel, A. 2008. Skład materii organicznej jako wskaźnik genezy osadów jeziora Sarbsko. *Przegląd Geologiczny* 56 (2): 140-143.

Woszczyk, M., Cieśliński, R., Spychalski, W. 2009. Geochemistry of surface sediments of a coastal Lake Sarbsko (northern Poland). *Studia Quaternaria* 26: 41-53.

Wójcicki, K.J. 2007. Zawartość materii organicznej w osadach zbiornikowych jako wskaźnik dynamiki procesów geomorfologicznych – przykłady z dorzecza górnej Odry. [w:] E. Smolska, E. Giriat (red.) Rekonstrukcja dynamiki i procesów geomorfologicznych – formy rzeźby i osady. Wyd. Naukowe Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa, 445-455.

Wójcicki, K.J. 2010. The valley-fill deposits of the Kłodnica river (southern Poland): environmental drives of facies changes from the Late Vistulian through the Holocene. *Geochronometria* 35: 49-66.

Vanêk, A., Vejdová, K., Mihaljevič, M., Ettler, V., Trubač, J., Vaňkowa, M., Goliáš, V., Teper, L., Sutkowska, K., Vokurková, P., Panižek, V., Zadarová, T., Drábek, O. 2021. Thallium isotopic fractionation in soil: the key controls. https://www.sciencedirect.com/journal/environmental-pollution. *Environmental Pollution* 265A: 114822.

Zachowicz, J., Kępińska, U. 1987. The paleoecological development of Lake Drużno (Vistula deltic area). *Acta Palaeobotanica* 27 (1): 227-249.

Zander, P.D., Żarczyński, M., Vogel, H., Tylmann, W., Wacnik, A., Sanchini, A., Grosjean, M. 2021. A high-resolution record of Holocene primary productivity and water-column mixing from the varved sediments of Lake Żabińskie, Poland. *Science of The Total Environment* 755: 143713.

Zawiska, I., Zawisza, E., Woszczyk, M., Szeroczyńska, K., Spychalski, K., Correa-Metrio, A. 2013. Cladocera and geochemical evidence from sediment cores show trophic changes in Polish dystrophic lakes. *Hydrobiologia* 715: 181-193.

Zgłobicki, W. 2008. Geochemiczny zapis działalności człowieka w osadach stokowych i rzecznych. Wyd. UMCS, Lublin.

Zgłobicki, W. 2010. Metody geochemiczne i radiochemiczne w badaniach dynamiki procesów stokowych. *Prace i Studia Geograficzne* 45: 105-124.

Zgłobicki, W., Ziółek, M. 2006. Wybrane metody geochemiczne w badaniach środowiska. Regionalne Studia Ekologiczno-Krajobrazowe. *Problemy Ekologii Krajobrazu* XVI: 519-528.

Zgłobicki, W., Kozieł, M. Lata, L. Plak, A., Reszka, M. 2008. Próba wykorzystania wskaźników geochemicznych do oceny natężenia współczesnej sedymentacji deluwialnej i

aluwialnej. *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska Lublin Polonia, Sectio B* 62: 87-103.

Zgłobicki W., Rodzik J., 2007. Heavy metals in slope deposits of loess areas of the Lublin Upland (E Poland). *Catena* 71: 84-95.

Zolitschka, B., Behre, K.E., Schneider, J. 2003. Human and climatic impact on the environment as derived from colluvial, fluvial and lacustrine archives - examples from the Bronze Age to the Migration period, Germany. *Quaternary Science Reviews* 22: 81-100.

Żurek, S. 1975. Geneza zabagnienia Pradoliny Biebrzy. *Prace Geograficzne IGiPZ PAN, Warszawa* 110: 107 s.

Żurek, S. 2010. Metody badań osadów bagiennych. *Landform Analysis* 12: 137-148.





Lotnicze skanowanie laserowe (LIDAR)

Łukasz Banaszek

WPROWADZENIE

W ciągu ostatnich dwóch dekad lotnicze skanowanie laserowe (ang. *Airborne Laser Scanning*, ALS), wykorzystujące lidar (ang. *Light Detection and Ranging*), stało się kluczową metodą w warsztacie badawczym archeologów przestrzeni i krajobrazu. Duża gęstość próbkowania, a także możliwości penetracji pokrywy roślinnej powodują, że metoda ta znajduje szerokie zastosowanie w pomiarach terenów zalesionych, a także jest wykorzystywana w studiach obszarów otwartych i zurbanizowanych. ALS dostarcza bowiem wysokorozdzielczych modeli terenu i innych produktów skanowania pozwalających na detekcję i monitoring elementów dziedzictwa archeologicznego, głównie o zachowanej formie krajobrazowej. W niniejszym rozdziale prezentuję historię i podstawy działania metody, a także omawiam metodologię poboru, analizy oraz interpretacji danych pozyskanych za pomocą ALS. Przedstawiam również istotność właściwej archiwizacji danych i produktów opracowania oraz prezentuję przykłady wykorzystania skanowania lotniczego w badaniach archeologicznych w Polsce. Rozdział kończy się dyskusją omawiającą konieczność podnoszenia umiejętności z zakresu opracowania i interpretacji danych lidarowych.

ZARYS HISTORII BADAŃ

Krótka historia metody

Historię lidarów omawiają między innymi U. Wandinger (2005: 2–3) oraz M.P. McCormick (2005: 355–360), którzy wskazują, że kluczowym momentem w rozwoju metody były pierwsze próby użycia światła w celu pomiaru atmosfery w latach 30. ubiegłego wieku przy wykorzystaniu naziemnych reflektorów. Kamieniem milowym było wynalezienie laserów w latach 60. zeszłego stulecia prowadzące do pierwszych pomiarów atmosfery z wykorzystaniem wczesnych lidarów naziemnych. Lasery charakteryzują się bowiem dużą intensywnością sygnału przy małym stopniu rozproszenia, dobrą monochromatycznością i możliwością emisji krótkich impulsów (Fiorani 2007: 120).

DOI: 10.64158/k1cm9g84hj

Pierwsze wykorzystanie lidaru operującego z pokładu samolotu miało miejsce w 1967 roku. Podobnie jak wcześniejsze pomiary doświadczenie to skoncentrowane było na badaniach atmosferycznych i umożliwiało rejestrację jednego echa (McCormick 2005). Rok później wykonano pierwsze lotnicze skanowanie batymetryczne (ang. *Airborne Laser Bathymetry*, ALB) (Hickman i Hogg 1969). W przypadku pomiarów batymetrycznych głębokość płytkich akwenów i wód przybrzeżnych określa się dzięki obliczeniu różnicy odległości pomiędzy powierzchnią wody, która odbija część wyemitowanego promieniowania elektromagnetycznego, następnie rejestrowanego jako pierwsze echo, a dnem zbiornika, od którego odbija się dalsza część tego samego impulsu laserowego (ostatnie echo). W 1979 roku ta zasada została wykorzystana do przeprowadzenia pierwszych pomiarów topograficznych obszarów zalesionych przy użyciu opracowanego przez NASA systemu batymetrycznego AOL (ang. *Airborne Oceanographic Lidar*) (Bressel i in., 1977). W tym przypadku pierwsze echa powracały do odbiornika po odbiciu od koron drzew, zaś ostatnie reprezentowały powierzchnię ziemi, co pozwoliło określić wysokość drzewostanu (Krabill i in., 1980). W międzyczasie lidary wykorzystywane były jako laserowe wysokościomierze zamontowane na różnych platformach nośnych. W latach 1971–72 wykonano tą metodą pomiary powierzchni Księżyca w ramach programu Apollo (Sun 2012).

Historia wykorzystania ALS-u w badaniach archeologicznych

Pierwsze archeologiczne zastosowanie ALS-u miało miejsce w latach 80. ubiegłego wieku, gdy do profilowania terenu w Kostaryce użyto systemu AOL (Sheets i Sever 1988). Jednakże popularność metody wzrosła drastycznie dopiero wraz z rozwojem systemów nawigacji satelitarnej ułatwiających rejestrację współrzędnych odbitych ech. W 1993 roku GPS (ang. *Global Positioning System*) osiągnął pełną funkcjonalność, zaś w 2000 roku zostały zniesione ograniczenia jakości przesyłanego sygnału GPS dla użytkowników cywilnych, co spowodowało gwałtowny wzrost dokładności i precyzji lokalizacji w wielu dziedzinach, w tym zwiększenie jakość produktów lotniczego skanowania laserowego. W konsekwencji początek XXI wieku przyniósł kolejne przykłady wykorzystania ALS-u w badaniach nad przeszłością. Archeolodzy uzyskali dostęp do danych ALS pozyskiwanych między innymi przez agencje środowiskowe i wojskowe (Motkin 2001; Holden i in., 2002; Barnes 2003), w tym do zasobów obejmujących cały kraj, na przykład zupełne pokrycie danymi lidarowymi Niderlandów osiągnięto już w 2004 roku (de Boer i in., 2008). W przeciągu kilku lat do archeologów korzystających z danych lidarowych pozyskanych pierwotnie dla celów niezwiązanych z badaniami nad przeszłością dołączyli badacze, którzy zlecili naloty na potrzeby badań nad dziedzictwem i przeszłością (np. Doneus i Briese 2006a; Harmon i in., 2006; Powlesland i in., 2006; Risbøl i in., 2006). Wskutek coraz większego dostępu do produktów pochodnych ALS-u obejmujących duże obszary archeolodzy zaczęli wykorzystywać dane zarówno w wielkopowierzchniowych programach rozpoznania archeologicznego (np. Hesse 2013; Banaszek i in., 2018), jak i w celu szczegółowych badań nad lokalnymi krajobrazami (np. Davis i in., 2013). Rozwój skanerów batymetrycznych doprowadził do wykorzystania tych urządzeń w badaniach archeologicznych obszarów przybrzeżnych (np. Doneus i in., 2013), a lidary operujące z pokładu bezzałogowych statków powietrznych (UAV/UAS) zaczęły być używane w studiach nad przeszłością i dziedzictwem od drugiej połowy drugiej dekady XXI wieku (Risbøl i Gustavsen 2018).

ZASADY DZIAŁANIA

ALS jest aktywną metodą teledetekcji, która opiera się na technice lidarowej, a więc detekcji oraz pomiarze odległości przy użyciu światła. Lidar to urządzenie skanujące wykorzystujące laser w celu emisji promieniowania elektromagnetycznego z zakresu podczerwieni, światła widzialnego lub ultrafioletu, a następnie rejestrujące wiązkę promieniowania odbitą od napotkanej przeszkody. Skaner jest zintegrowany z odbiornikiem GNSS (ang. *Global Navigation Satellite System*) pozwalającym określić współrzędne systemu w momencie pozyskania danych, a także z jednostką nawigacji inercyjnej IMU/INS (ang. *Inertial Measurement Unit*, *Inertial Navigation System*) obliczającą i rejestrującą wychylenia oraz wektory przyspieszeń podczas lotu (Wehr i Lohr 1999). Dzięki opracowaniu rejestrowanych prędkości i kątów czasu podróży wiązki lasera (mierzonego od momentu emisji fali promieniowania elektromagnetycznego do rejestracji jej echa po odbiciu od przeszkody), ilości energii odbitej i pozycji urządzenia w momencie pomiaru możliwe jest

określenie współrzędnych zarejestrowanej przeszkody, a także wybranych cech fizycznych tejże.

Lidary lotnicze montowane są na platformach nośnych – głównie samolotach i helikopterach oraz coraz częściej, na bezzałogowych statkach powietrznych. To właśnie pomiar z powietrza odróżnia ALS od naziemnego skanowania laserowego (ang. *Terrestrial Laser Scanning*, TLS) oraz mobilnego skanowania laserowego (ang. *Mobile Laser Scanning*, MLS), przy czym satelitarne skanowanie laserowe (ang. *Spaceborne Laser Scanning*, SLS), metodycznie zbliżone do ALS-u, prowadzone jest zarówno z pokładu sztucznych satelitów, jak i wahadłowców kosmicznych. W zależności od aplikacji urządzenie skanujące może być wycelowane zarówno w górę, jak i w dół względem platformy nośnej, umożliwiając między innymi detekcję cząsteczek w atmosferze, pomiary topograficzne oraz batymetryczne. W wykorzystywanych w archeologii lidarach topograficznych i batymetrycznych podwieszony pod platformę lotniczą skaner emituje promieniowanie elektromagnetyczne w kierunku ziemi (ryc. 1). Najczęściej w tym pierwszym przypadku wykorzystywane są długości fali z zakresu podczerwieni, 1064 nm lub 1550 nm, choć coraz więcej zastosowań znajdują również skanery wielospektralne.

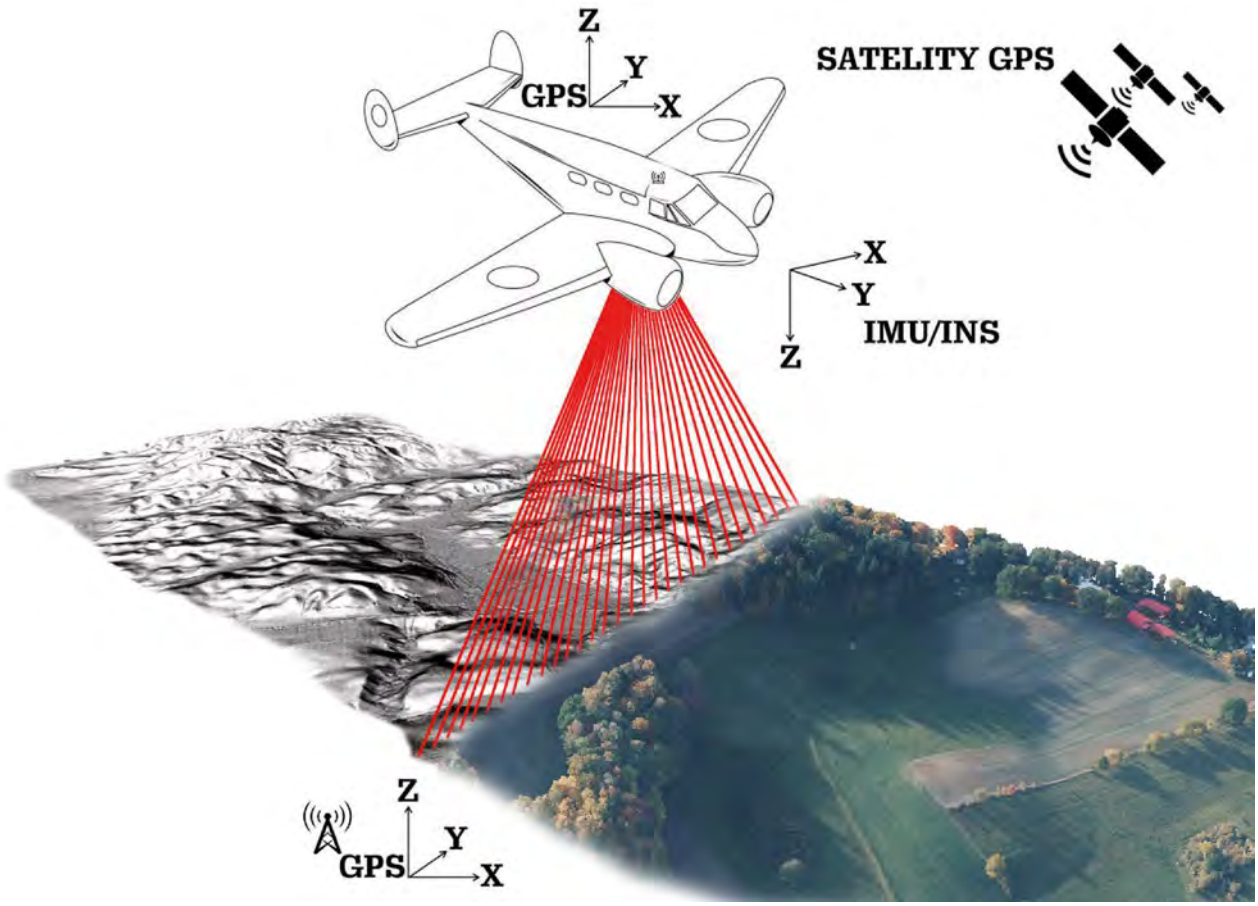
Wysłany sygnał ulega rozproszeniu w atmosferze i na swej drodze napotyka rozmaite obiekty, pochłaniające i odbijające część wyemitowanej energii, aż osiągnięta zostanie płaszczyzna, która odbija i/lub pochłania resztę wiązki lasera. Oznacza to, iż z jednego impulsu lasera uzyskuje się jedno odbicie, jeżeli wyemitowana energia dociera na swej drodze wyłącznie do jednego obiektu (echo pierwsze i ostatnie), np. powierzchni ziemi lub dachu budynku, lub wiele odbić, jeżeli na swej drodze sygnał napotyka np. przelatującego ptaka (pierwsze echo), koronę drzewa (echo drugie, pośrednie), huśtawkę stojącą pod drzewem (echo trzecie, pośrednie), aż wreszcie powierzchnię ziemi (echo czwarte, ostatnie). W rezultacie penetracja impulsem laserowym niejednorodnych środowisk, np. lasu, pozwala na pozyskanie danych dla terenu pod drzewami, umożliwiając wielkopowierzchniowy i szczegółowy pomiar topograficzny obszarów leśnych, o ile gęstość pokrywy leśnej umożliwia jej penetrację przez wiązki laserowe. Taka zasada działania opisuje pomiar lidarowy z wykorzystaniem klasycznych skanerów, pozwalających na rejestrację nawet pięciu odbić (Opitz 2013). Na początku XXI wieku dołączyły do nich skanery rejestrujące pełen przebieg fali emitowanego sygnału laserowego (ang. *Full-waveform*). Pozwalają one na rejestrację dużo większej liczby odbić wiązki lasera, gdyż rejestrują pełny profil powracającej energii, który następnie podczas obróbki może zostać rozłożony na liczne odbicia, rozdzielone zazwyczaj o 1 ns różnicy w czasie rejestracji odbitego sygnału (Doneus i Briese 2006b).

Współczesne systemy skanerów batymetrycznych działają na podobnej zasadzie, lecz polegają na emisji promieniowania elektromagnetycznego o dwóch długościach fali. Pierwsza wiązka emitowana jest w zakresie bliskiej podczerwieni (zazwyczaj o długości fali wynoszącej 1064 nm), druga zaś w zakresie światła widzialnego o barwie zielonej (o długości fali 532 nm) (Dudzińska-Nowak 2007). Energia w pierwszym zakresie długości fali odbija się od powierzchni wody, zaś laser zielony penetruje ciecz i w płytkich zbiornikach lub wodach przybrzeżnych dociera do dna lub do obiektów zalegających na dnie, pozwalając na szczegółowe modelowanie batymetryczne.

Dane archiwalne i wykonanie nowego nalotu

Wysoka jakość i szczegółowość produktów pochodnych lotniczego skanowania laserowego, a także możliwość ich wykorzystania dla rozmaitych celów, między innymi dla zarządzania powodziowego, planowania przestrzennego i leśnictwa, sprawiła, że wiele państw w Europie i poza nią podjęło się realizacji ogólnokrajowych programów pozyskania danych lidarowych. Takie zasoby danych, najczęściej udostępnione na portalach internetowych, stanowią cenne źródło informacji dla instytucji badawczych i zarządzających dziedzictwem kulturowym. Otwarty i często darmowy dostęp do danych sprawia, że są one niezwykle popularne w badaniach nad przeszłością i dziedzictwem, gdyż pozwalają ograniczyć koszty, które w przypadku zlecenia nowego nalotu ALS są niemałe.

Wtórne użycie danych archiwalnych pozwala często na przeprowadzenie podstawowych studiów krajobrazowych i identyfikację obiektów archeologicznych na szeroką skalę. Ponadto wykorzystanie danych pozyskanych dla danego obszaru w różnym czasie pozwala na monitoring dziedzictwa i rozpoznanie zmian zachodzących w zagospodarowaniu terenu wokół obiektów zabytkowych. Jednakże dane archiwalne wymagają refleksji nad ich parametrami i właściwościami, które mogą być nieadekwatne dla celów archeologicznych. Możliwości obróbki danych archiwalnych są bowiem ograniczone i w zależności od typu oraz formatu udostępnionych danych, pozwalają jedynie



Ryc. 1. Wizualizacja poboru danych przestrzennych za pomocą lotniczego skanowania laserowego

na częściowe przetworzenie chmury punktów lub produktów pochodnych skanowania. W związku z tym kluczowe jest zrozumienie, kiedy opracowywane archiwalne dane lidarowe zostały pozyskane, jaka była zakładana i osiągnięta gęstość skanowania, jakie produkty zostały udostępnione dla obszaru interesującego badaczy i jakiej obróbce zostały te produkty cyfrowe poddane. Ważna jest również wiedza na temat wykorzystanego rodzaju skanera i platformy nośnej, a także celu dla jakiego dane zostały pobrane. Istotnym aspektem są również prawa autorskie określające sposób, w jaki zasoby mogą być wykorzystane i prezentowane.

Brak danych dla wybranego obszaru, ich niepełność lub niesatysfakcjonujące parametry mogą zachęcić badaczy do zlecenia nowego nalotu lidarowego. Miniaturyzacja systemów ALS, a także wzrost popularności bezzałogowych statków powietrznych powodują, że relatywnie tanim kosztem coraz więcej instytucji badawczych i zarządzających dziedzictwem kulturowym prowadzi własne naloty UAV. Prace takie, prowadzone na razie na niewielką skalę przestrzenną, dają najpełniejszą z możliwych kontrolę nad parametrami nalotu oraz pozyskiwanych danych lidarowych (Fernandez-Diaz i in., 2014; Risbøl i Gustavsen 2018). Natomiast naloty obejmujące większe obszary wciąż zlecane są zewnętrznym przedsiębiorstwom. W obu przypadkach kluczowe jest ustalenie poziomu szczegółowości i poprawności pozyskiwanych danych, terminu ich pobrania, gęstości próbkowania, a także rodzaju użytego sprzętu. Elementy te będą wypadkową oczekiwań badaczy i instytucji zamawiających nalot, zależnych od specyfiki i celów projektu naukowego, posiadanego budżetu i czasu potrzebnego na opracowanie danych, umiejętności ich obróbki, zagospodarowania terenu i topografii obszaru badań, wymogów i regulacji wynikających z prawa lotniczego i innych czynników. Istotne jest także określenie rodzaju oczekiwanych produktów skanowania, a szczegółowe przygotowanie specyfikacji pozwala uniknąć nieporozumień z dostawcą danych. Kontrola jakości jest kluczowym etapem sprawdzenia dostarczonych danych ALS i w razie niezgodności może być

podstawą do żądania poprawy jakości lub w ekstremalnych przypadkach ponowienia nalotu. Efektywna i klarowna komunikacja pomiędzy badaczami zamawiającymi nalot a dostawcą danych jest przy tym niezwykle ważna.

Wykonanie nowego nalotu, w przeciwieństwie do korzystania z danych archiwalnych, pozwala na jak najpełniejsze wykorzystanie potencjału poznawczego metody i przeprowadzenie szczegółowych badań. Charakter projektu badawczego może bowiem wymagać zastosowania lidaru o specyficznej długości fali dla badań multi- i hiperspektralnych, poboru danych w określonym terminie w związku z prowadzeniem równoległych pomiarów innymi metodami lub wymogu posiadania zapisu pełnego przebiegu fali. Ponadto podczas zlecania nalotu instytucje badawcze i zarządzające dziedzictwem kulturowym mogą zdefiniować prawa autorskie i sposób udostępniania produktów ALS. Jednakże dzięki łatwej dostępności często wysokojakościowych archiwalnych danych lidarowych to właśnie te produkty cyfrowe są obecnie najpopularniejsze wśród badaczy przeszłości, choć specyficzne cele badawcze osiągnąć można wyłącznie poprzez pozyskanie nowych danych o określonych parametrach.

DANE ALS I ETAPY ICH OPRACOWANIA

Zapis pełnego przebiegu fali

W przypadku korzystania ze skanerów mierzących pełen przebieg fali podstawowym produktem skanowania są dane zapisane w formatach właściwych producentom lidarów, np. kanadyjskiego Optech czy austriackiego Riegl, lub w otwartym formacie *PulseWave* opracowanym przez M. Isenburga (van Rees 2013). W praktyce archeolodzy wykorzystujący lotnicze skanowanie laserowe mają dostęp do danych tego typu niezwykle rzadko – głównie w rezultacie przeprowadzenia sprecyzowanego nalotu ALS z wykorzystaniem skanerów typu *Full-waveform* (Doneus i Briese 2006b).

Chmura punktów

Podstawowym i najpowszechniejszym produktem lotniczego skanowania laserowego jest chmura punktów, najczęściej dostępna w jednej z wersji formatu .las, zaproponowanym przez Amerykańskie Stowarzyszenie Fotogrametrii i Teledetekcji (ASPRS), bądź w jego skompresowanej wersji .laz lub .zlas. Istotnym formatem zapisu danych jest również e57, który jest jednak bardziej powszechny w metodach TLS i MLS. Format ten oferuje większą elastyczność wyboru rodzaju rejestrowanej informacji i integracji pozyskiwanych danych ze zdjęciami wykonanymi cyfrowymi aparatami fotograficznymi podczas skanowania. Niezależnie od formatu zapisu podstawowy produkt ALS zawiera zbiór dyskretnych punktów pomiarowych (ryc. 2) wraz z atrybutami opisującymi je, między innymi współrzędnymi długości i szerokości geograficznej, wartością wysokości bezwzględnej, wartością intensywności odbicia, kątem skanowania, typem odbicia (pierwsze, pośrednie lub ostatnie echo), źródłem danych (numerem szeregu nalotu) i czasem pobrania punktu (czas GPS).

W ramach wykonywania pojedynczego przelotu ALS lidar jest w stanie pobrać dane wzdłuż linii poruszania się platformy nośnej, a zasięg pasa danych jest ograniczony wypadkową typu skanera oraz wysokości przelotu. Z tego powodu skanowanie dużych obszarów polega na wykonywaniu sukcesywnych pasów nalotu w taki sposób, że kolejny przelot pokrywa się częściowo z poprzednim, umożliwiając dopasowanie poszczególnych szeregów w jeden zbiór danych. Choć rozmiar szeregu będzie większy w przypadku wykorzystania lidarów podwieszonych pod samolotem niż w przypadku wykorzystania UAV, to zasada pozyskiwania danych jest podobna. W rezultacie gotowa chmura punktów może zawierać dane pochodzące z jednego lub, po wyrównaniu, z wielu szeregów nalotu. Duże chmury punktów są najczęściej dzielone w cięciu arkuszowym mapy, np. 500x500 m lub 1000x1000 m, niezależnie od tego czy są to dane pozyskiwane w ramach dedykowanego nalotu czy archiwalne.

Głównym parametrem charakteryzującym chmurę punktów jest jej gęstość, najczęściej mierzona jako średnia liczba ostatnich odbić na metr kwadratowy skanowanej powierzchni. O ile pierwsze pokrycie obszaru Niderlandów dostarczyło danych o gęstości jednego punktu (ostatniego echa) na 16 m^2 (de Boer i in., 2008), to dane pozyskiwane współcześnie charakteryzują się dużo większą gęstością. Polscy badacze korzystają najczęściej z dostępnych dla całego kraju chmur punktów o gęstości 4 pkt/m^2 lub 8 pkt/m^2 (Wroniecki i in., 2015), jednakże w wielu krajach udostępniane są dane wyższej jakości, np. 25 pkt/m^2 (Cowley i in., 2020). O ile dane archiwalne mają określoną gęstość, którą można jedynie zmniejszyć wskutek obróbki, to podczas zamawiania lub wykonywania nowego



Ryc. 2. Chmura punktów dla zamku i kościoła w Starym Drawsku (widok z NE). Każdy punkt w chmurze otrzymał atrybut koloru na podstawie zdjęć lotniczych. Choć pozyskiwanie zdjęć lotniczych równolegle lub około skanowania jest coraz częstszą praktyką, to wiele zasobów danych lidarowych nie posiada przypisanej barwy. Rozległe białe obszary reprezentują jeziora Drawskie i Żerdno flankujące zamek, a także teren pod budynkami oraz obszary dla których gęstość punktów jest obniżona np. wskutek gęstej korony drzew. Dane ALS z zasobów Głównego Urzędu Geodezji i Kartografii

nalotu ALS możliwe jest określenie zakładanej gęstości pomiaru (np. Banaszek 2019). Wykorzystanie UAV jako platformy nośnej pozwala na pobór niezwykle gęstych chmur punktów jednakże dla obszarów zdecydowanie mniejszych niż w przypadku skanowania z pokładu samolotu. Większa gęstość skanowania oznacza przy tym większą ilość pobieranych danych, dłuższy czas ich opracowania i nalotu, a także wyższą cenę za usługę.

Wśród innych metadanych charakteryzujących chmurę punktów należy wyróżnić informacje o dacie skanowania, która informuje zarówno o aktualności danych, jak i o warunkach, w jakich nalot został wykonany. Penetracja korony drzew na obszarach zalesionych, a tym samym możliwość rejestracji punktów reprezentujących powierzchnię ziemi, spada wraz z pojawieniem się liści i wzrostem wegetacji. Tym samym obniżone są możliwości obrazowania między innymi obiektów archeologicznych w lesie (Doneus i in., 2022). Pozostałymi istotnymi metadanymi są między innymi informacje o rodzaju zastosowanego skanera i trajektorii nalotu, które mogą posłużyć między innymi do radiometrycznej kalibracji danych intensywności odbicia (Sevara i in., 2019). Wstępnie opracowana chmura punktów podlega następnie klasyfikacji, podczas której każdy punkt w zbiorze przypisywany jest do jednej z kategorii obiektów, które ów punkt reprezentuje. Najczęściej wykorzystywana jest w tym celu klasyfikacja ASPRS (ASPRS 2019), w której zaproponowano między innymi następujące klasy: punkty

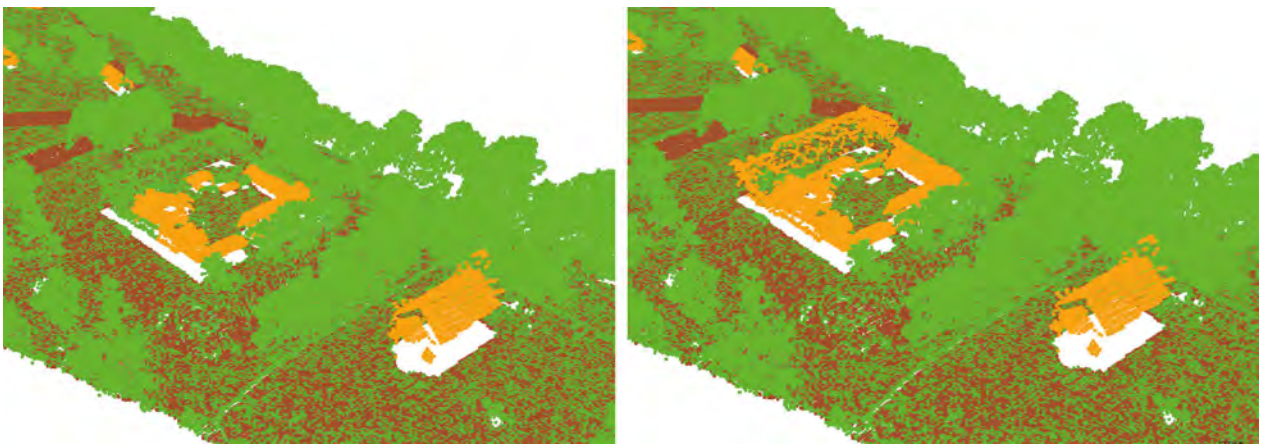
nigdy nieklasyfikowane; punkty bez przypisanej klasy; grunt; niska, średnia i wysoka roślinność; woda; budynek. Na pierwszym etapie klasyfikację wykonuje się zazwyczaj za pomocą zautomatyzowanych algorytmów dostępnych w rozmaitych programach do obróbki chmury punktów (np. Kiarszys i Szalast 2014; Štular i Lozić 2020; Doneus i in., 2022b), zaś wielość dostępnych metod powoduje, że jakość uzyskiwanych w ten sposób wyników jest różna i wymaga ewaluacji. W tym celu tworzone są najczęściej tymczasowe rastrowe produkty pochodne skanowania (patrz poniżej), które są ocenianie wizualnie. W zależności od potrzeb i oczekiwań chmura punktów może następnie ulec manualnej reklasyfikacji (ryc. 3), w ramach której punkty pomiarowe przechodzą pomiędzy kategoriami lub zostają usunięte ze zbioru.

O ile w przypadku pozyskiwania nowych danych badacze zlecający nalot mają duży wpływ na ich jakość poprzez określenie parametrów nalotu, to klasyfikacja chmury punktów jest najważniejszym etapem obróbki danych, który w głównej mierze określa jakość produktów pochodnych skanowania. Z punktu widzenia archeologii dotyczy to zwłaszcza prac wykorzystujących dane archiwalne, niepozyskane w celach archeologicznych, lecz np. topograficznych, jakie są głównie dostępne w Polsce (Wroniecki i in., 2015). Reklasyfikacja chmury punktów pozwala bowiem wydobyć informacje o zeskanowanych obiektach archeologicznych, które mogły zostać ukryte wskutek „niewłaściwej" klasyfikacji. Podczas niearcheologicznego opracowywania danych nie uwzględnia się często specyfiki obiektów archeologicznych (Kiarszys i Szalast 2014), które zwizualizowane są najlepiej poprzez rastrowe modele obiektowe (ang. *Digital Feature Model*, DFM), przy tworzeniu których nie polega się jedynie na agresywnej filtracji punktów przypisanych do kategorii „grunt".

Produkty rastrowe

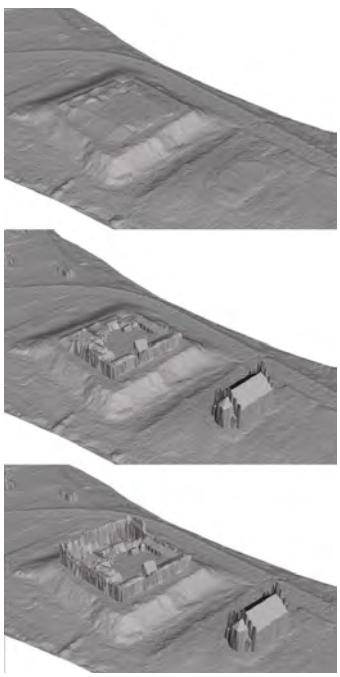
Chmura punktów znajduje coraz większe zastosowanie w rozmaitych studiach (Moyano i in., 2021; Richards-Rissetto i in., 2021), jednakże w badaniach nad przeszłością i dziedzictwem wciąż wykorzystuje się przede wszystkim rastrowe pochodne ALS-u. Modele numeryczne, w tym model terenu, pokrycia terenu oraz intensywności odbicia, generowane są najczęściej poprzez triangulację wybranych punktów pomiarowych, a następnie ich interpolację. Różne metody przetworzenia dostarczają rozbieżne wyniki (Štular i in., 2023). W konsekwencji nieuporządkowana chmura punktów zostaje przetworzona do regularnego, zuniformizowanego i ciągłego rastra. Produkt ten posiada określoną rozdzielczość przestrzenną, tj. model terenu o rozdzielczości 50 cm oznacza, że odległość pomiędzy środkami sąsiadujących pikseli odpowiada 50 cm odległości na powierzchni ziemi.

W celu uzyskania określonego modelu numerycznego wykonuje się filtrację chmury punktów, która polega na wyborze punktów pomiarowych o odpowiedniej charakterystyce, w tym przynależności



Ryc. 3. Chmura punktów dla zamku i kościoła w Starym Drawsku (widok z NE). Kolor punktów reprezentuje kategorię, do której zostało przypisane każde odbicie (brąz – grunt; pomarańcz – budynki; odcienie zieleni – różne piętra roślinności). Według źródłowej klasyfikacji (z lewej) fragmenty wschodniego oraz południowego muru zamku zostały nieprawidłowo sklasyfikowane jako roślinność wysoka. Skorygowana klasyfikacja (z prawej) ukazuje pełen przebieg obwałowań. Dane ALS z zasobów Głównego Urzędu Geodezji i Kartografii

do kategorii lub rodzaju echa, a następnie ich interpolacji (ryc. 4). Do powstania numerycznego modelu terenu (NMT) wykorzystywane są wyłącznie punkty sklasyfikowane jako „grunt", zaś numeryczny model pokrycia terenu (NMPT) może zostać opracowany poprzez wykorzystanie punktów pochodzących z pierwszego odbicia, a tym samym być niezależnym od metody klasyfikacji. Numeryczne modele obiektowe (NMO), w tym archeologiczne DFM (Pingel i in., 2015; Lozić i Štular 2021), mogą zostać opracowane na dwa sposoby. Pierwsza metoda polega na sklasyfikowaniu jako „grunt" punktów pomiarowych, które w rzeczywistości reprezentują dany obiekt, np. fundamenty zrujnowanego zamku lub elementy bunkra z czasów II wojny światowej. W rezultacie w celu stworzenia NMO wykorzystywana jest wyłącznie jedna kategoria punktów. Druga metoda polega na przypisaniu punktów reprezentujących obiekty archeologiczne niezwiązane z gruntem do jednej z pozostałych kategorii klasyfikacyjnych, a następnie wykorzystaniu dwóch lub odpowiednio większej liczby kategorii punktów w celu wytworzenia archeologicznego NMO.



Ryc. 4. Widok pseudo-3d na zamek i kościół w Starym Drawsku (widok z NE). U góry: model terenu według klasyfikacji źródłowej. W środku: model obiektowy (punkty reprezentujące grunt i budynki) według klasyfikacji źródłowej. Na dole: model obiektowy (punkty reprezentujące grunt i budynki) po reklasyfikacji (por. Ryc. 2). Dane ALS z zasobów Głównego Urzędu Geodezji i Kartografii

Intensywność odbicia

Obróbka informacji o powracającej do odbiornika odbitej wiązce energii pozwala zarówno określić współrzędne napotkanych przeszkód, jak i niektóre właściwości fizyczne zeskanowanych obiektów. Jest to możliwe dzięki rejestracji intensywności odbitej wiązki laserowej dla każdego echa z osobna. Moc, z jaką wiązka lasera odbija się od przeszkody, zależy od wielu czynników. Oprócz właściwości odbiciowych napotkanego obiektu, do których należą między innymi tekstura, kształt, materiał, wilgotność i kolor, na wielkość zarejestrowanej wartości intensywności odbicia mają wpływ również inne czynniki, niezależne od skanowanej przeszkody. Należą do nich między innymi odległość pomiędzy lidarem a przeszkodą, kąt padania wiązki lasera oraz kąt skanowania, właściwości atmosfery i parametry systemu skanującego. Ponadto wielokrotne odbicia dla jednej wiązki lasera (wielokrotne echa) oznaczają, że jedynie część energii podróżowała dalej zanim całość sygnału została odbita, co jeszcze bardziej komplikuje obróbkę danych intensywności odbicia (Pilarska-Mazurek 2018).

Procesy korekcji, kalibracji i normalizacji pozwalają na wyrównanie różnic pomiędzy poszczególnymi echami oraz szeregami nalotu i uzyskanie skalibrowanej informacji radiometrycznej o zeskanowanym obiekcie w odpowiednim dla wykorzystanego systemu skanującego zakresie fali. Są to zaawansowane procesy obróbki danych, które wymagają pozyskania dodatkowych danych naziemnych podczas nalotu ALS (Briese i in., 2021; Pilarska-Mazurek 2021). Brak tych drugich nie musi jednak przekreślać przydatności informacji o intensywności odbicia dla rozmaitych celów, w tym archeologicznych (np. Sevara i in., 2019). Skalibrowana informacja radiometryczna jest wykorzystywana między innymi w celu ulepszenia klasyfikacji chmury punktów, a także może służyć do opracowania map pokrycia terenu czy klasyfikacji gatunkowej drzew. Pozyskiwana w ramach skanowania informacja radiometryczna ze względu na stopień skomplikowania procesów obróbki jest często pomijaną, lecz ważną z punktu widzenia badań archeologicznych warstwą informacyjną. Pozwala ona bowiem uzyskać informacje na temat obiektów archeologicznych nieposiadających własnej formy terenowej, lecz manifestujących się jedynie poprzez obecność wyróżników roślinnych, glebowych lub wilgotnościowych (Challis i in., 2006; Stott i in., 2015).

Skalibrowana informacja radiometryczna oraz mniej cenne nieskalibrowane wartości intensywności

odbicia mogą być analizowane zarówno na poziomie chmury punktów, jak i przetworzone do postaci modelu numerycznego, w którym intensywność zastępuje wartość wysokości (ryc. 5). Studia takie są jednak niezwykle rzadkie, gdyż wymagają kosztownych, precyzyjnych nalotów w czasie sprzyjającym dla pojawienia się archeologicznych wyróżników roślinnych (późną wiosną i wczesnym latem). Jest to zarazem czas nieodpowiedni dla detekcji obiektów archeologicznych zlokalizowanych w lasach, albowiem stan wegetacji nie sprzyja penetracji pokrywy drzew przez wiązki lasera.

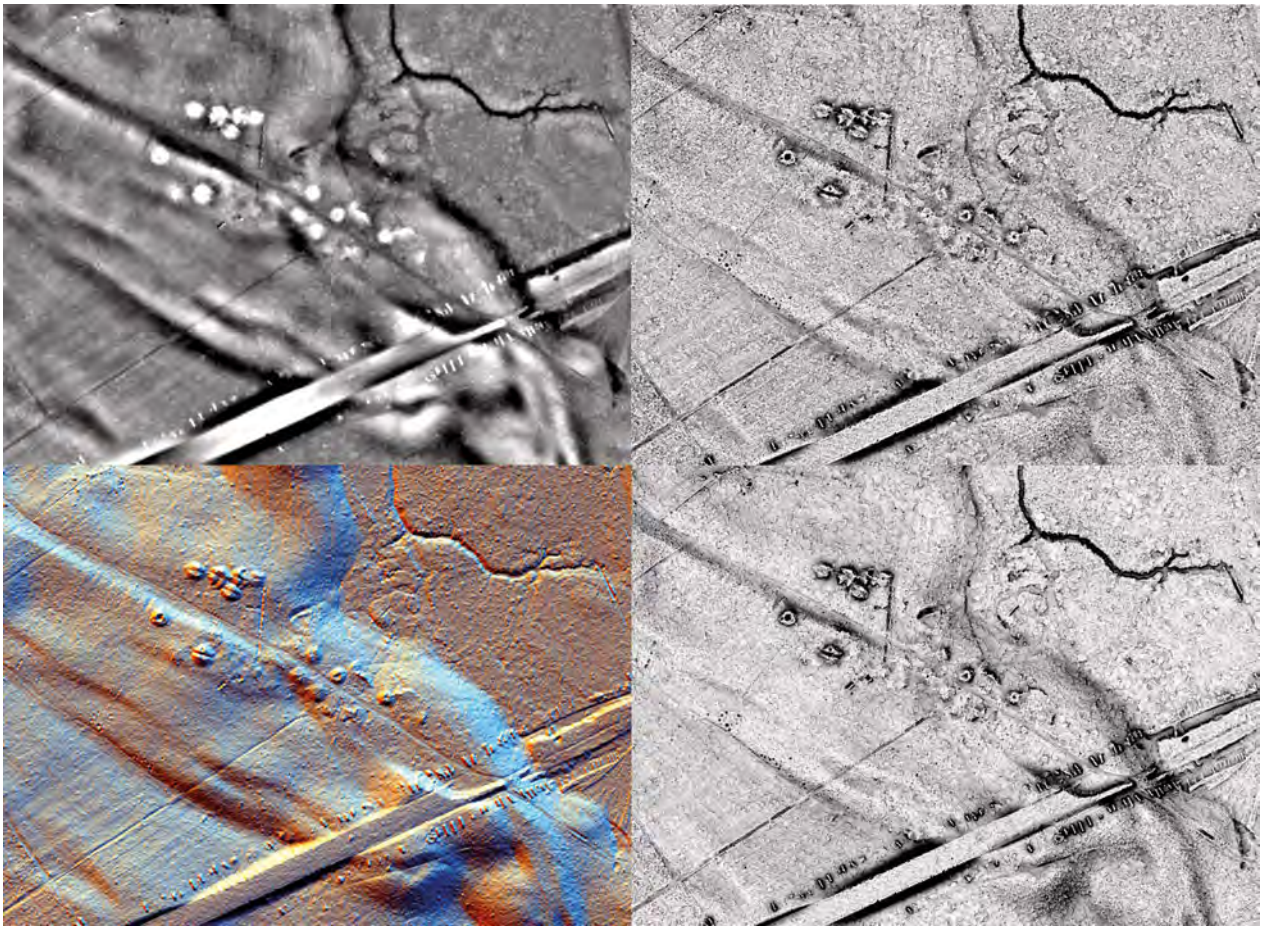
Wizualizacje danych rastrowych

Modele numeryczne są dużo łatwiejsze do wizualnej ewaluacji niż chmura punktów, zwłaszcza o niskiej gęstości, jednakże sama informacja o wartościach wysokości bezwzględnej, która zapisana jest dla każdego piksela w tychże produktach rastrowych, jest wciąż trudna do interpretacji archeologicznej. W celu zwiększenia widoczności obiektów archeologicznych w produktach pochodnych ALS badacze korzystają z rozmaitych metod wizualizacji danych rastrowych (np. Kokalj i Hesse 2017). Aby uwypuklić formy terenowe zazwyczaj stosunkowo niewielkich obiektów zainteresowania archeologów (ryc. 6), metody wizualizacji wykorzystują zewnętrzne źródło światła, np. cieniowanie z jednego lub wielu kierunków, obliczają stopień widoczności hemisfery w danym miejscu bądź niwelują duże formy topograficzne, np. rozległe stoki wzgórz, aby obliczyć pozycję topograficzną małych obiektów (Lindsay i in., 2015; Orengo i Petrie 2018; Toumazet i in., 2021). W celu wizualizacji produktów pochodnych ALS wykorzystywane jest odpowiednie oprogramowanie lub algorytmy dostępne w programach Systemów Informacji Przestrzennej (GIS) (np. Kokalj i in., 2019).

Wybór sposobu i parametrów wizualizacji ma istotne znaczenie, gdyż z uwagi na charakterystykę poszczególnych metod podkreślone lub zniwelowane zostają pewne cechy terenu. Oznacza to, że nie ma jednego, doskonałego sposobu wizualnego przedstawienia produktów rastrowych, pomimo iż istnieją rozwiązania pozwalające na integrację i scalenie kilku wizualizacji (Kokalj i Somrak 2019). Tym samym rezultaty interpretacji archeologicznej będą zależne od wybranej metody (np. Kiarszys i Banaszek 2017) i kategorycznie należy unikać stosowania wyłącznie jednej wizualizacji podczas opracowywania danych. Zrozumienie sposobu działania poszczególnych metod przedstawienia produktów



Ryc. 5. Nieskorygowane zobrazowanie intensywności odbicia (pierwsze echa) dla zamku i kościoła w Starym Drawsku (z lewej). Pomimo braku obróbki analiza zobrazowania pozwala odróżnić niektóre elementy zagospodarowania terenu, a także umożliwia identyfikację obszaru o podwyższonej wilgotności na północny-wschód od zamku. Porównanie obrazu intensywności odbicia z zobrazowaniem kolorów rzeczywistych przypisanych dla zinterpolowanych pierwszych ech (na środku) wskazuje, że dane lidarowe oraz RGB zostały pobrane w różnym czasie (brak aut na zobrazowaniu), choć zapewne w krótkim interwale. Aktualna ortofotomapa (z prawej) ilustruje zmianę w zabudowie wewnątrz zamku. Dane ALS i zdjęcia lotnicze z zasobów Głównego Urzędu Geodezji i Kartografii



Ryc. 6. Przykład wizualizacji modelu terenu dla zalesionego cmentarzyska kultury wielbarskiej w Gronowie, gm. Złocieniec, wielokrotnie badanego wykopaliskowo (Machajewski 2013), w tym podczas przerwanej konstrukcji drogi z Berlina do Królewca, pozostałości po której widoczne są na południe od kurhanów. Od lewej u góry, zgodnie z ruchem wskazówek zegara: wizualizacja uproszczonej Local Relief Model, Positive Openness, VAT oraz cieniowanie z wielu kierunków (Kokalj i Somrak 2019). Wykorzystanie kilku wizualizacji pozwala lepiej zrozumieć specyfikę analizowanego obszaru i dostrzec więcej szczegółów odnośnie do badanych obiektów archeologicznych. Dane ALS z zasobów Głównego Urzędu Geodezji i Kartografii

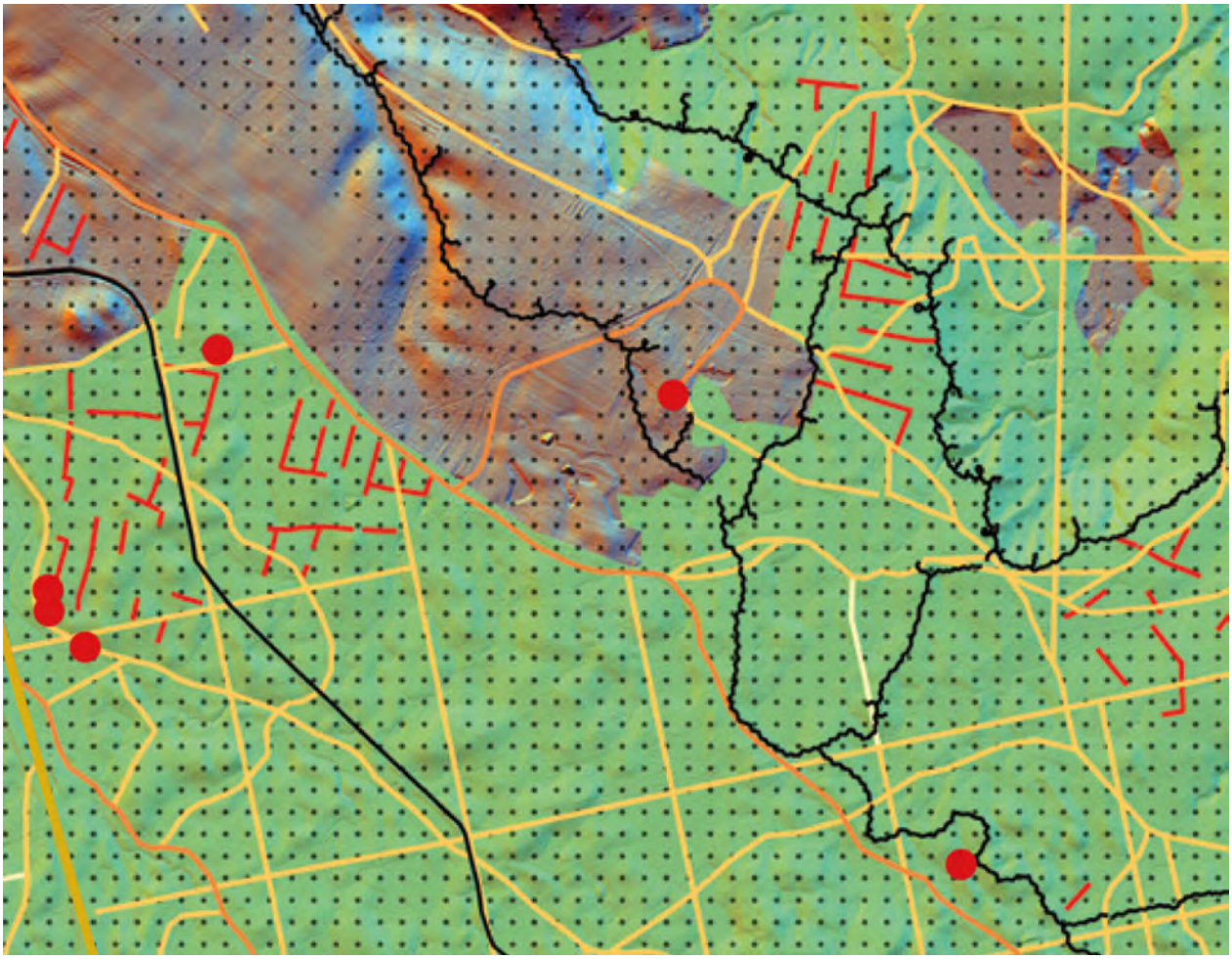
pochodnych skanowania jest kluczowe dla uzyskania jak najlepszych wyników interpretacji.

Interpretacja archeologiczna

Interpretacji archeologicznej najczęściej polega na interakcji w środowisku GIS ze zwizualizowanymi produktami rastrowymi i kartowaniu zaobserwowanych obiektów archeologicznych i ich cech lub wyróżników pośrednich. Interpretacja ta jest prowadzona w odniesieniu do innych dostępnych rodzajów danych, w tym dotychczasowej ewidencji archeologicznej, historycznych map topograficznych i zagospodarowania terenu, zdjęć lotniczych czy archiwalnych modeli terenu i danych ALS (ryc. 7). Ponadto informacje archeologiczne wykreowane wskutek interpretacji danych lidarowych mogą być zintegrowane z rezultatami innych metod prospekcji, w tym pomiarów terenowych, badań geofizycznych czy prac wykopaliskowych.

Rozpoznane obiekty, skartowane w postaci wektorowej, dodawane są do właściwych baz danych wraz z atrybutami opisującymi te obiekty. Zakres i specyfika kategorii informacji rejestrowanych dla poszczególnych obiektów archeologicznych zidentyfikowanych w produktach pochodnych ALS może uwzględniać między innymi klasyfikację kulturowo-historyczną, funkcję i chronologię obiektu, oraz stan zachowania.

Integracja różnych źródeł danych i metod prospekcji archeologicznej dostarcza często dodatkowych warstw informacyjnych o obiektach zainteresowania badaczy interpretujących produkty skanowania. Jednocześnie praca z innymi danymi przestrzennymi pozwala na określenie jakości przygotowanych



Ryc. 7. Przykład interpretacji archeologicznej przeprowadzonej w średniej skali przestrzennej. Układ nowożytnego systemu pól (czerwone linie) oraz budynków (czerwone kropki) wraz z historycznymi drogami i szlakami leśnymi (żółte i pomarańczowe linie) w okolicach Polanowa został przecięty umocnieniami Wału Pomorskiego (czarne linie). Współczesny zasięg lasu zaznaczony czarnymi kropkami, zaś zasięg lasu z początku XX wieku oznaczony jest kolorem zielonym (por. Banaszek 2019). Wizualizacja cieniowania z wielu kierunków modelu terenu na podstawie danych ALS z zasobów Głównego Urzędu Geodezji i Kartografii

produktów pochodnych skanowania. Interpretacja zdjęć lotniczych i zobrazowań satelitarnych czy pomiary terenowe mogą wskazać na obszary danych ALS, w których klasyfikacja punktów nie została przeprowadzona poprawnie i wymaga dodatkowej pracy. Na tym etapie możliwa jest również identyfikacja obszarów, w których rozkład punktów pomiarowych ALS oraz właściwości modelowanego terenu (np. struktura przestrzenna niskiej roślinności) uniemożliwiają ujawnienie się wybranych obiektów archeologicznych w wizualizacjach danych ALS. Wiedza na ten temat jest kluczowa dla interpretacji archeologicznej i pozwala na pełniejsze rozpoznanie archeologiczne poprzez poprawę produktów skanowania oraz wykorzystanie dodatkowych metod rozpoznania archeologicznego dla wymagających tego obszarów.

Należy podkreślić, że wiedza i doświadczenie w zakresie pozyskiwania, obróbki, analizy i interpretacji danych ALS dla celów archeologicznych w istotny sposób definiują jakość produktów końcowych z badań wykorzystujących dane lidarowe. Dzięki wysokim kompetencjom personelu zaangażowanego w badania z wykorzystaniem danych lidarowych możliwe jest uniknięcie takich błędów, jak niepoprawna detekcja i błędne skartowanie obiektów dziedzictwa, a także niepoprawna klasyfikacja lub błędne określenie typu, chronologii i innych wymaganych atrybutów. Jednocześnie wizualizacje danych lidarowych, często udostępniane dla szerokiego odbiorcy na krajowych geoportalach są relatywnie łatwo dostępne i większość użytkowników nie ma problemów w ich powierzchownym odczytaniu. Może to sprawiać wrażenie,

że dane lidarowe są nieskomplikowane w interpretacji, gdyż duże liczby czytelnych obiektów archeologicznych nie przysparzają żadnych problemów (Banaszek i in., 2018). Jednakże detale tychże obiektów, a także szczegółowe informacje dotyczące ich stanu zachowania oraz relacji względem innych obiektów terenowych i fizycznych mogą być odczytane wyłącznie przez osoby doświadczone, które rozumieją wpływ sposobu pozyskania danych oraz jak bardzo procesy ich filtracji i wizualizacji zmieniają produkty opracowania, a jednocześnie są ekspertami w interpretacji obiektów o własnej formie terenowej.

W związku z tym należy zwrócić uwagę na rolę szkoleń w zakresie analizy i interpretacji produktów pochodnych skanowania. Niespełnienie tego warunku może spowodować, że opracowanie danych ALS będzie niskiej jakości za sprawą braku szczegółowej informacji archeologicznej lub licznych przykładów wyników fałszywie ujemnych (brak rozpoznania obiektu w miejscu jego występowania) i fałszywie dodatnich (błędna identyfikacja obiektów na obszarach ich pozbawionych).

W tym kontekście należy podkreślić istotność projektów realizowanych w ramach nauki obywatelskieej, które pomimo iż mogą być trudne do zaplanowania, to potrafią przynieść znakomite rezultaty. Projekty archeologiczne wykorzystujące dane lidarowe i oparte na współudziale obywateli w tworzeniu treści najczęściej stosują podejście polegające na crowdsourcingu (np. Bonacchi i in., 2015). Badacze oferują pewien poziom szkolenia, np. w zakresie interpretacji wizualizacji danych lidarowych lub w zakresie identyfikacji obiektów archeologicznych w terenie, a następnie otwierają zasób danych dla zaproszonych współtwórców treści w celu jego analizy. Grupy uczestniczące w takich badaniach, często reprezentujące społeczności lokalne, oferują w zamian swój czas, umiejętności i znajomość miejscowych uwarunkowań oraz historii regionalnej. Tym samym udział setek lub tysięcy osób w badaniach prowadzonych w nurcie nauki obywatelskiej może doprowadzić do identyfikacji nieznanych wcześniej obiektów archeologicznych na dużą skalę (np. Lambers i in., 2019). Jednocześnie nieodpowiednio zaplanowana forma projektu lub zbyt duże oczekiwania względem jakości wyników mogą przysporzyć organizatorom problemów, które byłyby do uniknięcia wraz z zapewnieniem odpowiedniego szkolenia jego uczestnikom i dopasowaniem zakresu projektu do umiejętności grupy (Casana 2020). Zanim wyniki opracowania powstałe w ramach projektów nauki obywatelskiej mogą trafić na łamy publikacji naukowych lub zasilić zbiory ewidencji archeologicznej, wymagany jest udział badaczy na późniejszych etapach projektu, w których dochodzi do walidacji osiągniętych rezultatów i ich krytycznej analizy.

W podobny sposób należy traktować rezultaty zautomatyzowanej detekcji obiektów archeologicznych przez systemy sztucznej inteligencji. Wykorzystanie uczenia maszynowego w celu analizy produktów pochodnych skanowania laserowego przynosi bardzo dobre rezultaty i pozwala na analizę coraz bardziej skomplikowanych form terenowych. Automatyzacja umożliwia szybką analizę dużych obszarów w jednostajny sposób (np. Traviglia i in., 2012), tym samym mając oczywistą przewagę nad grupą użytkowników o różnych umiejętnościach, powoli studiujących dany obszar (np. Quintus i in., 2017). Zastosowanie sztucznej inteligencji jest rozwiązaniem konsekwentnym, lecz to nie oznacza, że pozostaje wolne od błędów i wypaczeń wynikających z charakteru i właściwości użytych algorytmów. Ponadto wielość i rozmaitość form i typów obiektów archeologicznych powoduje, że niektóre obiekty są łatwiejsze do identyfikacji np. przez sieci neuronowe niż inne, co może doprowadzić do niezbilansowanego rozpoznania archeologicznego. Kolejnym czynnikiem istotnie kształtującym wyniki zautomatyzowanego opracowania danych lidarowych jest jakość zbioru danych wykorzystanego do nauki systemu uczenia maszynowego, która rośnie wraz z poziomem skomplikowania zbioru, liczby obiektów w zbiorze oraz poprawnością etykietowania. Pomimo to zastosowanie uczenia maszynowego przynosi zarówno wyniki fałszywie ujemne, jak i fałszywie dodatnie, a razem z innymi elementami wpływającymi na jakość produktów zastosowania sztucznej inteligencji sprawia, że niezbędna jest kontrola wyników, prowadzona przez doświadczonego interpretatora, która pozwala określić poziom jakości otrzymanych rezultatów.

Udostępnienie i archiwizacja danych

Ostatnim etapem pracy z danymi lidarowymi jest udostępnienie produktów analizy i interpretacji, a także ich archiwizacja wraz z pierwotnymi danymi ALS (Lozić i Štular 2021). Rezultaty studiów nad przeszłością i dziedzictwem z wykorzystaniem danych lidarowych często prowadzą do powstania map obrazujących na różnych poziomach szczegółowości między innymi lokalizację, kształt i zasięg obiektów archeologicznych. Mapy te zazwyczaj służą jako ilustracje

w raportach z badań lub publikacjach naukowych. Zawierają one warstwę interpretacyjną, na którą składają się na przykład obszary zinterpretowane jako istotne archeologicznie i sklasyfikowane jako fosy czy umocnienia grodzisk, pozostałości dawnych systemów pól lub linie umocnień z XX-wiecznych konfliktów zbrojnych. Na niższym poziomie szczegółowości mapy takie mogą zaś wskazywać na lokalizację punktów zainteresowania archeologicznego. W zależności od celu badawczego oraz dostępnych danych informacja archeologiczna będąca rezultatem interpretacji jest prezentowana na tle map topograficznych lub zagospodarowania terenu, zwizualizowanych produktów rastrowych ALS lub innych źródeł danych przestrzennych. Mapy prezentujące wyniki interpretacji archeologicznej, a także wytworzone bazy danych mogą również funkcjonować niezależnie, pod postacią usług sieciowych, w tym być udostępnione przez serwery WMS czy WFS (Scharl i Tochtermann 2007).

W licznych opracowaniach archeologicznych pojawiają się jedynie wybrane wizualizacje produktów ALS bez wskazania na ilustracji obiektów omawianych w tekście. Ma to zazwyczaj na celu zaprezentowanie, w jaki sposób dany obiekt archeologiczny ujawnia się w danych lidarowych, niestety nazbyt często przy jednoczesnym zamaskowaniu braków umiejętności archeologicznej interpretacji tychże danych. W tym kontekście ilustracje ALS służą podkreśleniu obiektywności i naukowości stawianych tez bez wskazania na warstwę interpretacyjną budowanej narracji w sposób podobny do powszechnego wykorzystania i nadużywania zdjęć lotniczych w archeologii (por. Rączkowski 2002). Wizualnie atrakcyjne przedstawienia danych lidarowych mają wówczas na celu „mówić za siebie", zostawiając pole interpretacyjne czytelnikowi, a tym samym często przesuwając odpowiedzialność i wymóg posiadania umiejętności czytania wizualizacji danych lidarowych na odbiorcę treści. Ponadto w wielu przypadkach nieznane bądź nieomówione są parametry wizualizacji użytej dla prezentacji danego obiektu archeologicznego, a w konsekwencji czytelnicy pozbawieni są klucza do interpretacji produktu pochodnego ALS.

W związku z tym należy podkreślić istotność przedstawienia metadanych i paradanych określających rezultaty i produkty badań lidarowych dla odbiorców budowanej narracji, a także dla późniejszych wtórnych użytkowników opracowanych danych. W przypadku prezentacji map i ilustracji w raportach oraz publikacjach naukowych odnosi się to przede wszystkim do omówienia charakteru i typu wykorzystanych danych oraz rodzaju i parametrów przedstawionych wizualizacji ALS.

Podobne zasady obowiązują podczas archiwizacji danych wytworzonych lub wykorzystanych w czasie realizacji projektów ALS, czyli zarówno danych pierwotnych, którymi najczęściej jest (sklasyfikowana) chmura punktów, jak i produktów pochodnych (modeli numerycznych, wizualizacji i wyników interpretacji). Archiwizacja w zaufanych repozytoriach danych ALS i ich pochodnych opisanych przez metadane i paradane jest zalecana dla wszystkich projektów badawczych. Gwarantuje ona możliwość ponownego użycia rezultatów badań dla walidacji osiągniętych wyników lub dla innych celów badawczych, w tym monitoringu dziedzictwa. Należy zatem zapewnić długofalową ochronę i zarządzanie danymi cyfrowymi, a w swej formie archiwizowane dane powinny spełniać wymogi FAIR (Wilkinson i in., 2016). Wśród metadanych i paradanych opisujących poszczególne produkty ALS, oprócz wspomnianego charakteru i typu wykorzystanych danych oraz rodzaju i parametrów prezentowanych wizualizacji, należy wymienić informacje o sposobie i terminie pobrania danych, gęstości próbkowania i metodzie interpolacji użytej do wytworzenia rastrowych produktów pochodnych oraz przedstawione powyżej, inne elementy opisujące dane na różnym poziomie opracowania.

PRZYKŁADY ZASTOSOWANIA ALS W POLSKIEJ ARCHEOLOGII

J. Nowakowski w referacie zaprezentowanym w 2008 roku przedstawił pierwsze w polskiej archeologii wyniki pomiarów lidarowych przeprowadzonych w okolicach Piły. Kolejne przykłady zastosowania opierały się na danych pobranych specjalnie dla celów archeologicznych (np. Sławik i Zapłata 2010; Budziszewski i Wysocki 2012; Kobyliński i in., 2012; Czebreszuk i in., 2013; Rączkowski i Banaszek 2013). Wraz ze wzrostem pokrycia kraju danymi pozyskiwanymi między innymi przez służby geodezyjne badacze zaczęli wykorzystywać ogólnodostępne produkty skanowania (Zapłata i in., 2018; Bugaj i in., 2020; Kostyrko i Zamelska-Mączak 2020; Affek i in., 2022), zaś liczba nalotów zlecanych przez archeologów drastycznie spadła. Wzrost popularności metody wśród krajowych badaczy zaowocował całościowym omówieniem ALS-u dla polskiego czytelnika (Banaszek 2015), a także pracami mającymi na celu zintegrowanie lotniczego skanowania z innymi metodami

archeologicznymi w systemie rozpoznania i monitorowania zabytków (Bakuła i in., 2016; Kiarszys i Banaszek 2023).

Większość przykładów zastosowania lotniczego skanowania laserowego w polskiej archeologii prezentuje wyniki interpretacji produktów pochodnych skanowania przeprowadzonej w celu identyfikacji dotąd nierozpoznanych obiektów archeologicznych lub dla lepszego zrozumienia znanych elementów dziedzictwa (np. Stereńczak i in., 2020; Jakubczak i in., 2022; Czerniec i in., 2023; Sobala 2023). Eksploatowane są głównie obszary leśne, gdzie prospekcja archeologiczna była z różnych powodów ograniczona (Banaszek i Rączkowski 2010). Opracowanie danych lidarowych często stanowi część szerokich studiów nad przeszłością danego obszaru, wykorzystujących rozmaite metody rozpoznania (np. Krasnodębski i Małkowski 2018; Piotrowski i in., 2022; Różycki i in., 2020). Przedmiot badań stanowią zarówno obiekty pochodzące z najdawniejszych epok, jak i te świadczące o dziejach późniejszych (np. Szubski i in., 2022; Legut-Pintal i Rajski 2019) oraz całkiem niedawnych (np. Kobiałka 2019; Waga i in., 2023).

Poza interpretacją danych w celu identyfikacji obiektów o zachowanej formie krajobrazowej oraz ich wybranych cech polscy badacze prowadzą prace rozwojowe mające na celu udoskonalenie sposobów wykorzystania metody i interpretacji produktów skanowania (Kiarszys i Banaszek 2017; Doneus i in., 2022) oraz zrozumienia jej wpływu na wielu poziomach na archeologię, badania krajobrazowe oraz sposoby zarządzania dziedzictwem kulturowym (Banaszek 2014; Kobyliński 2019; Wroniecki 2020). W dorobku krajowych badaczy znajdują się również udane zastosowania sztucznej inteligencji w detekcji obiektów archeologicznych w produktach pochodnych skanowania (np. Banasiak i in., 2022; Łabuz i in., 2023), a także projekty z zakresu nauki obywatelskiej (np. Bałazy i in., 2014). Polscy badacze nabierają także doświadczenia w zastosowaniu lidarów zamontowanych na platformie UAV (np. Ćmielewski i in., 2021; Sieczkowska i in., 2022) i choć wciąż brak przykładów zastosowania skanerów batymetrycznych i multispektralnych w rodzimych studiach nad przeszłością i dziedzictwem to należy oczekiwać rychłego włączenia takich aplikacji do szybko zmieniającego się krajobrazu wykorzystania ALS w Polsce.

Produkty lotniczego skanowania laserowego są również analizowane w celu budowania narracji o przeszłości między innymi poprzez modelowanie zjawisk zachodzących na danym obszarze. Szczegółowe modele numeryczne znajdują zastosowanie w analizach widoczności czy dostępności terenu (np. Chorowska i in., 2016; Matuszewska i Schiller 2022). Archeolodzy wykorzystują także produkty pochodne skanowania w rozważaniach nad pamięcią krajobrazu oraz społecznym funkcjonowaniem dziedzictwa (Majewska 2020; Zalewska i in., 2015).

PODSUMOWANIE

Wzrost zainteresowania archeologów lotniczym skanowaniem laserowym należy przypisać zarówno wysokiej jakości produktów ALS, zwłaszcza dla obszarów leśnych, jak i dostępności danych pozyskanych na szeroką skalę przez rozmaite agencje rządowe. W konsekwencji ALS z „nowej" metody prospekcji archeologicznej w bardzo krótkim czasie stał się podstawowym źródłem danych dla badaczy w Polsce i za granicą. Dotyczy to instytucji badawczych i zarządzających dziedzictwem kulturowym, prowadzących szczegółowe badania w obrębie niewielkiego stanowiska archeologicznego, jak i analizujących rozległe obszary.

Popularność metody oraz danych lidarowych jest zjawiskiem bardzo pozytywnym, lecz należy podkreślić, że ALS nie jest złotym rozwiązaniem przynoszącym łatwe odpowiedzi. Z tego powodu istotne jest rozumienie sposobu działania metody, jak i odpowiedzialne podejście do analizy i interpretacji produktów skanowania. Pozorna łatwość interpretacji zwizualizowanych modeli numerycznych bez refleksji krytycznej nad pochodzeniem danych oraz metodami ich przetwarzania i interpretacji może prowadzić do błędów interpretacyjnych. Nieopracowane archeologicznie produkty skanowania mogą dostarczyć rezultatów niezgodnych ze stanem faktycznym i wynikających na przykład z niskiego próbkowania danych, przyjęcia agresywnych algorytmów filtracji i klasyfikacji chmury punktów oraz nieodpowiedniej metody interpolacji danych do postaci rastrowej i ich dalszej wizualizacji. Ponadto kluczowe jest posiadanie umiejętności interpretacji produktów pochodnych skanowania, gdyż obiekty o zachowanej formie krajobrazowej mogą pozostać niezarejestrowane przez niedoświadczonego interpretatora lub pomylone z naturalnymi formami terenowymi bądź współczesnymi elementami zagospodarowania terenu. W tym kontekście cieszy coraz większa liczba kursów, zajęć uniwersyteckich, publikacji oraz zasobów dostępnych dla obecnych i przyszłych użytkowników danych lidarowych. Do takich opracowań

zaliczyć należy materiały szkoleniowe przygotowane przez Narodowy Instytut Dziedzictwa w ramach programu AZP+ (NID 2022; Makowska i Rączkowski 2023) czy opracowane na zlecenie Europejskiej Rady Archeologicznej (*European Archaeological Council,* EAC) wytyczne dotyczące wykorzystania ALS w archeologii (Bennett i Cowley 2025). Podnoszenie umiejętności z zakresu obróbki, analizy i interpretacji danych lidarowych z pewnością przyniesie jeszcze lepsze przykłady zastosowania ALS w studiach nad przeszłością i dziedzictwem. To właśnie zaawansowane umiejętności pracy z danymi pozwalają na pełniejsze wykorzystanie potencjału metody, a także prowadzą do wytyczenia nowych dróg zastosowania.

LITERATURA

Affek, A.N., Wolski, J., Latocha, A., Zachwatowicz, M., Wieczorek, M. 2022. The use oLiDAR in reconstructing the pre-World War II landscapes of abandoned mountain villages in southern Poland. *Archaeological Prospection* 29(1): 157–173.

ASPRS 2019. *LAS Specification 1.4 – R15*. Bethesda.

Bakuła, K., Ostrowski, W., Zapłata, R., Kurczyński, Z., Kraszewski, B., Stereńczak, K. 2016. *Zalecenia w zakresie pozyskiwania, przetwarzania, analizy i zastosowania danych LIDAR w celu rozpoznania zasobów dziedzictwa archeologicznego w ramach programu AZP*. Warszawa.

Bałazy, R., Zapłata, R., Szady, B., Stereńczak, K. 2014. *Laserowi Odkrywcy – nieinwazyjne badanie i dokumentowanie obiektów archeologicznych i historycznych województwa świętokrzyskiego*. Stare Babice.

Banasiak, P.Z., Berezowski, P.L., Zapłata, R., Mielcarek, M., Duraj, K., Stereńczak, K. 2022. Semantic segmentation (U-Net) of archaeological features in airborne laser scanning — example of the Białowieża forest. *Remote Sensing* 14(4): 995.

Banaszek, Ł. 2014. Lotniczy skaning laserowy w polskiej archeologii. Czy w pełni wykorzystywany jest potencjał prospekcyjny metody? *Folia Praehistorica Posnaniensia*, 19: 207–251.

Banaszek, Ł. 2015. *Przeszłe krajobrazy w chmurze punktów*. Poznań.

Banaszek, Ł. 2019. *The past amidst the woods. The post-medieval landscape of Polanów*. Poznań.

Banaszek, Ł., Cowley, D.C., Middleton, M. 2018. Towards National Archaeological Mapping. Assessing Source Data and Methodology – A Case Study from Scotland. *Geosciences*, 8(8): 272.

Banaszek, Ł., Bartkowiak, R., Błażejewska, M., Skrzeczyńska M. 2018. Lotnicze skanowanie laserowe: wyzwanie konserwatorskie, (w:) M. Gojda, Z. Kobyliński (red.), *Archaeologica Hereditas. Lotnicze skanowanie laserowe jako narzędzie archeologii.* Warszawa, 189–203.

Banaszek, Ł., Rączkowski, W. 2010. Archeologia w lesie. O identyfikacji stanowisk archeologicznych w gminie Polanów (i nie tylko), (w:) W. Rączkowski, J. Sroka (red.), *Historia i kultura ziemi Sławieńskiej, 10*. Sławno, Polanów, 117–131.

Barnes, I. 2003. Aerial remote-sensing techniques used in the management of archaeological monuments on the British army's Salisbury Plain training area, Wiltshire, UK. *Archaeological Prospection* 10(2): 83–90.

Bennett, R., Cowley, D. (red.) 2025. *Guidelines for the use of Airborne Laser Scanning (Lidar) in Archaeology (EAC Guidelines 10)*. European Archaeological Council.

de Boer, A.G., Laan, W.N., Waldus, W., Van Zijverden, W.K. 2008. LiDAR-based surface height measurements: Applications in archaeology, (w:) B. Frischer, A. Dakouri-Hild (red.), *Beyond Illustration: 2D and 3D Digital Technologies as Tools for Discovery in Archaeology*. Oxford, 76–84.

Bonacchi, C., Bevan, A., Pett, D., Keinan-Schoonbaert, A. 2015. Crowd-and community-fuelled archaeological research. Early results from the MicroPasts project, (w:) *Proceedings of the Conference Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*. Oxford, 279–288.

Bressel, C., Itzkan, I., Nunes, J.E., Hoge, F. 1977. Airborne oceanographic lidar system, (w:) *ERIM Proc. of the 11th Intern. Symp. on Remote Sensing of Environment, Vol. 2*.

Briese, C., Pfennigbauer, M., Lehner, H., Ullrich, A., Wagner, W., Pfeifer, N., 2012. Radiometric calibration of multi-wavelength airborne laser scanning data. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* I–7: 335–340.

Budziszewski, J., Wysocki, J. 2012. Nowe możliwości detekcji materialnych śladów historii terenów leśnych – lotnicze skanowanie laserowe (LiDAR), (w:) Z. Kobyliński, J. Wysocki (red.), *Archaeologica Hereditas, t. 1: Konserwacja zapobiegawcza środowiska*. Warszawa, Zielona Góra, 117–126.

Bugaj, M., Kiarszys, G., Przybyła, M.M. 2020. Nieinwazyjne rozpoznanie wczesnośredniowiecznego grodziska w Lubomi, w powiecie wodzisławskim, woj. śląskie. *Raport* 15: 191–218.

Casana, J. 2020. Global-scale archaeological prospection using CORONA satellite imagery: automated, crowd-sourced, and expert-led approaches. *Journal of Field Archaeology* 45(1): 89–100.

Challis, K., Howard, A., Moscrop, D., Gearey, B., Smith, D., Carey, C., Thompson, A. 2006. Using airborne LiDAR intensity to predict the organic preservation of waterlogged deposits. *BAR International Series* 1568: 93.

Chorowska, M., Duma, P., Furmanek, M., Legut-Pintal, M., Łuczak, A., Piekalski, J. 2016. Wleń jako miejsce centralne. *Archaeologia Historica Polona* 24: 155–193.

Cowley, D.C., Banaszek, Ł., Geddes, G., Gannon, A., Middleton, M.E., Millican, K. 2020. Making LiGHT Work of Large Area Survey? Developing Approaches to Rapid Archaeological Mapping and the Creation of Systematic National-scaled Heritage Data. *Journal of Computer Applications in Archaeology* 3(1): 109–121.

Czebreszuk, J., Jaeger, M., Pospieszny, Ł., Cwaliński, M., Niebieszczański, J., Stróżyk, M. 2013. Modelowe badania nad przemianami krajobrazu kulturowego w pradziejach Wielkopolski, *Fontes Archaeologici Posnanienses* 49: 157–175.

Czerniec, J., Kozioł, K., Jankowski, M., Lewińska, P., Santos, C.A., Maciuk, K. 2023. How to find the undiscovered?

Anthropogenic objects in forest areas: a critical assessment of current methods. *International Journal of Conservation Science* 14(1): 115–130.

Ćmielewski, B., Sieczkowska, D., Kościuk, J., Bastante, J.M., Wilczyńska, I. 2021. UAV LiDAR Mapping in the Historic Sanctuary of Machupicchu: Challenges and Preliminary Results: Part 1. *Wiadomości Konserwatorskie* 67: 159–170

Davis, S., Brady, C., Megarry, W., Barton, K. 2013. Lidar survey in the Brú na Bóinne world heritage site, (w:) R.S. Opitz, D.C. Cowley (red.), *Interpreting Archaeological Topography. 3D Data, Visualisation and Observation*. Oxford, Oakville, 223–237.

Doneus, M., Banaszek, Ł., Verhoeven, G.J. 2022. The impact of vegetation on the visibility of archaeological features in airborne laser scanning datasets from different acquisition dates. *Remote Sensing* 14(4): 858.

Doneus, M., Briese, C. 2006a. Digital terrain modelling for archaeological interpretation within forested areas using full-waveform laserscanning, (w:) M. Ioannides, D. Arnold, F. Niccolucci, K. Mania (red.), *The 7th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST*. Aire-La-Ville, 155–162.

Doneus, M., Briese, C. 2006b. Full-waveform airborne laser scanning as a tool for archaeological reconnaissance. *BAR International Series* 1568. Oxford, 99- 106.

Doneus, M., Doneus, N., Briese, C., Pregesbauer, M., Mandlburger, G., Verhoeven, G. 2013. Airborne laser bathymetry – detecting and recording submerged archaeological sites from the air. *Journal of Archaeological Science* 40(4): 2136–2151.

Doneus, M., Höfle, B., Kempf, D., Daskalakis, G., Shinoto, M. 2022. Human-in-the-loop development of spatially adaptive ground point filtering pipelines—An archaeological case study. *Archaeological Prospection* 29(4): 503–524.

Dudzińska-Nowak, J. 2007. Przydatność skanowania laserowego do badań strefy brzegowej południowego Bałtyku. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* 17(A): 179–187.

Fernandez-Diaz, J.C., Carter, W.E., Shrestha, R.L., Glennie, C.L. 2014. Now you see it… now you don't: Understanding airborne mapping LiDAR collection and data product generation for archaeological research in Mesoamerica. *Remote Sensing* 6(10): 9951–10001.

Fiorani, L. 2007. Environmental Monitoring by Laser Radar, (w:) S.B. Larkin (red.), *Lasers and Electro-Optics Research at the Cutting Edge*. New York, 119–171.

Harmon, J. M., Leone, M. P., Prince, S. D., Snyder, M. 2006. Lidar for Archaeological Landscape Analysis: A Case Study of Two Eighteenth-Century Maryland Plantation Sites. *American Antiquity* 71(4): 649–670.

Hesse, R. 2013. The changing picture of archaeological landscapes: lidar prospection over very large areas as part of a cultural heritage strategy, (w:) R.S. Opitz, D.C. Cowley (red.), *Interpreting Archaeological Topography. 3D Data, Visualisation and Observation*. Oxford, Oakville, 171–183.

Hickman, G.D., Hogg, J.E. 1969. Application of an airborne pulsed laser for near-shore bathymetric measurements, *Remote Sensing of Environment* 1: 47–58.

Holden, N., Horne, P., Bewley, R.H. 2002. High-resolution digital airborne mapping and archaeology, (w:) R.H. Bewley, W. Rączkowski (red.), *Aerial Archaeology: Developing Future Practice*. Amsterdam, 173–180.

Jakubczak, M., Budziszewski, J., Leloch, M., Gryczewska, N., Szeliga, M., Kot, M. 2022. Mining field „Dąbrówka-I". Neolithic Jurassic flint mine with vestigially preserved mine relief. *Sprawozdania Archeologiczne* 74(1): 345–372.

Kiarszys, G., Banaszek, Ł. 2017. Dostrzec i zrozumieć. Porównanie wybranych metod wizualizacji danych ALS wykorzystywanych w archeologii. *Folia Praehistorica Posnaniensia* 22: 233–270.

Kiarszys, G., Banaszek, Ł. 2023 Lotnicze skanowanie laserowe w archeologii, (w:) A. Makowska, W. Rączkowski (red.), *Metody teledetekcyjne dla archeologów. Poradnik część 1*. Warszawa, 116–134.

Kiarszys, G., Szalast, G. 2014. Archeologia w chmurze punktów. Porównanie rezultatów filtracji i klasyfikacji gruntu w projekcie ISOK z wynikami opracowanymi w oprogramowaniu LAStools i Terrasolid. *Folia Praehistorica Posnaniensia* 19: 267–292.

Kobiałka, D. 2019. Archeologia, pamięć, sztuka. Archeoetnografia i sztuka okopowa związana z obozem jeńców wojennych i internowanych w Tucholi, woj. kujawsko-pomorskie. *Folia Praehistorica Posnaniensia* 24: 99–123.

Kobyliński, Z. 2019. Od archeologii osadnictwa do biografii krajobrazu: archeologia polska wobec współczesnych perspektyw badań relacji między człowiekiem a środowiskiem w przeszłości. *Przegląd Archeologiczny* 67: 9–30.

Kobyliński, Z., Borowski, M., Budziszewski, J., Herbich, T., Kobyliński, Ł., Sławik, Ł., Wach, D., Wysocki, J., Jaszewska, A. 2012. Kompleksowe, niedestrukcyjne rozpoznanie zasobów archeologicznych Starego Kraju w województwie lubuskim, *Archeologia Środkowego Nadodrza* 9: 11–42.

Kokalj, Ž., Hesse, R. 2017. *Airborne laser scanning raster data visualization: a guide to good practice*. Ljubljana.

Kokalj, Ž., Somrak, M. 2019. Why Not a Single Image? Combining Visualizations to Facilitate Fieldwork and On-Screen Mapping. *Remote Sensing* 11: 747.

Kokalj, Ž., Zakšek, K., Oštir, K., Pehani, P., Čotar, K., Somrak, M. 2019. *Relief Visualization Toolbox, ver. 2.2.1 Manual*. Ljubljana.

Kostyrko, M., Zamelska-Monczak, K. 2020. Biografia krajobrazu zbiegu Noteci do Warty w perspektywie archeologicznej interpretacji danych teledetekcyjnych. *Przegląd Archeologiczny* 68: 137–162.

Krabill, W.B., Collins J.G., Swift R.N., Butler M.L. 1980. *Airborne Laser Topographic Mapping Results from the Initial Join NASA/U.S. Army Corps of Engineers Experiment*. Wallops Island.

Krasnodębski, D., Małkowski, W. 2018. Badania archeologiczne grodziska w Zbuczu, gm. Czyże, pow. hajnowski. *Historia Slavorum Occidentis* 2(17): 105–121.

Lambers, K., Verschoof-van der Vaart, W.B., Bourgeois, Q.P. 2019. Integrating remote sensing, machine learning, and citizen science in Dutch archaeological prospection. *Remote Sensing* 11(7): 794.

Legut-Pintal, M., Rajski, P. 2019. Podobne czy niepodobne – uwagi na marginesie analizy formalnej obiektów obronnych na podstawie numerycznych modeli terenu. Przykład grodów i zamków z umocnieniami drewniano-ziemnymi na Śląsku, Polska. *Architectus* 1(57): 21–37.

Lindsay, J.B., Cockburn, J.M.H., Russell, H.A.J. 2015. An integral image approach to performing multi-scale topographic position analysis. *Geomorphology* 245: 51–61.

Lozić, E., Štular, B. 2021. Documentation of Archaeology-Specific Workflow for Airborne LiDAR Data Processing. *Geosciences* 11(1): 26.

Łabuz, A., Borowiec, N., Marmol, U. 2023. Automatic Detection of Lusatian Culture Fortified Settlement Based on Data from Airborne Laser Scanning. *International Journal of Conservation Science* 14(1): 83–98.

Machajewski, H. 2013. *Gronowo. Ein Gräberfeld der Wielbark-Kultur in Westpommern*. Warszawa-Szczecin-Gdańsk.

Majewska, A. 2020. Materialna pamięć krajobrazu cmentarzy w wyludnionych wiejskich jednostkach osadniczych polskiej części dawnych Prus Wschodnich – wybór zagadnień. *Studia Geohistorica* 8: 7–25.

Makowska, A., Rączkowski, W. (red.) 2023. *Metody teledetekcyjne dla archeologów. Poradnik część 1*. Warszawa.

Matuszewska, A., Schiller, M. 2022. Is It Just the Location? Visibility Analyses of the West Pomeranian Megaliths of the Funnel Beaker Culture. *Open Archaeology* 8(1): 402–435.

McCormick, P. 2005. Airborne and spaceborne lidar, (w:) C. Weitkamp (red.), *Lidar: range-resolved optical remote sensing of the atmosphere*. New York, 355–397.

Motkin, D. 2001. The assessment of LIDAR for archaeological use. *AARGNews*, 22: 24–25.

Moyano, J., León, J., Nieto-Julián, J.E., Bruno, S. 2021. Semantic interpretation of architectural and archaeological geometries: Point cloud segmentation for HBIM parametrisation. *Automation in Construction* 130: 103856.

NID 2022. Program AZP+. Nieinwazyjne wsparcie zarządzania dziedzictwem archeologicznym. https://nid.pl/dzialalnosc/program-azp-plus/

Opitz, R.S. 2013. An overview of airborne and terrestrial laser scanning in archaeology, (w:) R.S. Opitz, D.C. Cowley (red.), *Interpreting Archaeological Topography. 3D Data, Visualisation and Observation*. Oxford, Oakville, 13–31.

Orengo, H.A., Petrie, C.A. 2018. Multi-scale relief model (MSRM): a new algorithm for the visualization of subtle topographic change of variable size in digital elevation models. *Earth Surface Processes and Landforms* 43: 1361–1369.

Pilarska-Mazurek, M. 2021. Opracowanie metodyki korekcji intensywności sygnału z lotniczego skanowania laserowego w celu poprawy rozpoznawania pokrycia terenu. Warszawa. [maszynopis pracy doktorskiej]

Pingel, T.J., Clarke, K., Ford, A. 2015. Bonemapping: A LiDAR Processing and Visualization Technique in Support of Archaeology Under the Canopy. *Cartography and Geographic Information Science* 42(1): 18–26.

Piotrowski, M., Piotrowska, P., Kłosińska E.M. 2022. Nieinwazyjne i małoinwazyjne badania archeologiczne grodziska w Horbowie-Kolonii, w powiecie bialskim, w województwie lubelskim, w roku 2021. *Materiały i Sprawozdania Rzeszowskiego Ośrodka Archeologicznego* 42: 141–161.

Powlesland, D., Lyall, J., Hopkinson, G., Donoghue, D., Beck, M., Harte, A., Stott, D. 2006. Beneath the sand – remote sensing, archaeology, aggregates and sustainability: a case study from Heslerton, the Vale of Pickering, North Yorkshire, UK. *Archaeological Prospection* 13(4): 291–299.

Quintus, S., Day, S.S., Smith, N.J. 2017. The efficacy and analytical importance of manual feature extraction using lidar datasets. *Advances in Archaeological Practice* 5(4): 351–364.

Rączkowski, W. 2002. *Archeologia lotnicza: metoda wobec teorii*. Poznań.

Rączkowski W., Banaszek Ł. 2013. Osadnictwo w rejonie Jarosławianki – problemy badawcze, (w:) J. Jonczak, W. Florek (red.), Środowisko glebotwórcze i gleby dolin rzecznych. Poznań, Słupsk, 113–122.

van Rees, E. 2013. Rapidlasso: Efficient tools for LiDAR processing. *GeoInformatics* 16(7): 14.

Richards-Rissetto, H., Newton, D., Al Zadjali, A. 2021. A 3D point cloud Deep Learning approach using Lidar to identify ancient Maya archaeological sites. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 8: 133–139.

Risbøl, O., Gjertsen, A.K., Skare, K., Campana, S., Forte, M. 2006. Airborne laser scanning of cultural remains in forests: some preliminary results from a Norwegian project. *BAR International Series* 1568. Oxford, 107.

Risbøl, O., Gustavsen, L. 2018. LiDAR from drones employed for mapping archaeology – Potential, benefits and challenges. *Archaeological Prospection* 25(4): 329–338.

Różycki, S., Zapłata, R., Karczewski, J., Ossowski, A., Tomczyk, J. 2020. Integrated Archaeological Research: Archival Resources, Surveys, Geophysical Prospection and Excavation Approach at an Execution and Burial Site: The German Nazi Labour Camp in Treblinka. *Geosciences* 10: 336.

Scharl A., Tochtermann K. (red.) 2007. *The Geospatial Web. How Geobrowsers, Social Software and the Web 2.0 are Shaping the Network Society*. London.

Sevara, C., Wieser, M., Doneus, M., Pfeifer, N. 2019. Relative radiometric calibration of airborne LiDAR data for archaeological applications. *Remote Sensing* 11(8): 945.

Sheets, P., Sever, T. 1988. High-Tech Wizardry. *Archaeology* 41(6): 28–35.

Sieczkowska, D., Ćmielewski, B., Wolski, K., Dąbek, P., Bastante, J.M., Wilczyńska, I. 2022. Inca water channel flow analysis based on 3D models from terrestrial and UAV laser scanning at the Chachabamba archaeological site (Machu Picchu National Archaeological Park, Peru). *Journal of Archaeological Science* 137: 105515.

Sławik, Ł., Zapłata, R. 2010. Lidar zmienia archeologię. *Geodeta: magazyn geoinformacyjny* 10: 66–68.

Sobala, M. 2023. Detection of past landscape elements in marginal mountain areas – the example of the Western Carpathians. *Archaeological and Anthropological Sciences* 15(4): 48.

Stereńczak, K., Zapłata, R., Wójcik, J., Kraszewski, B., Mielcarek, M., Mitelsztedt, K., Białczak, M., Krok, G., Kuberski, Ł., Markiewicz, A., Modzelewska, A. 2020. ALS-based detection of past human activities in the Białowieża

Forest—New evidence of unknown remains of past agricultural systems. *Remote Sensing* 12(16): 2657.

Stott, D., Boyd, D.S., Beck, A., Cohn, A.G. 2015. Airborne LiDAR for the Detection of Archaeological Vegetation Marks Using Biomass as a Proxy. *Remote Sensing* 7: 1594–1618.

Sun, X. 2012. Space-based lidar systems, (w:) *2012 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*. San Jose, 1–2.

Szubski, M., Niebylski, J., Grużdź, W., Jakubczak, M., Budziszewski, J. 2022. Modern flint mining landscapes and flint knapping evidence from the Kraków Gunflint Production Centre–What we know from LiDAR and field survey. *Sprawozdania Archeologiczne* 74(1): 247–268.

Štular, B., Lozić, E. 2020. Comparison of filters for archaeology-specific ground extraction from airborne LiDAR point clouds. *Remote Sensing* 12(18): 3025.

Štular, B., Lozić, E., Eichert, S. 2023. Interpolation of airborne LiDAR data for archaeology. *Journal of Archaeological Science: Reports* 48: 103840.

Toumazet, J.-P., Simon, F.-X., Mayoral, A. 2021. Self-AdaptIve LOcal Relief Enhancer (SAILORE): A New Filter to Improve Local Relief Model Performances According to Local Topography. *Geomatics* 1: 450–463.

Traviglia, A., Cowley, D., Lambers, K. 2016. Finding common ground: Human and computer vision in archaeological prospection. *AARGnews* 53: 11–24.

Waga, J.M., Szypuła, B., Fajer, M. 2023. The archaeology of unexploded World War II bomb sites in the Koźle Basin, Southern Poland. *International Journal of Historical Archaeology* 27(3): 688–713.

Wandinger, U. 2005. Introduction to lidar, (w:) C. Weitkamp (red.), *Lidar: range-resolved optical remote sensing of the atmosphere*. New York, 1–18.

Wehr, A., Lohr, U. 1999. Airborne laser scanning – and introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54: 68–82.

Wilkinson, M.D., Dumontier, M., Aalbersberg, I.J., Appleton, G., Axton, M., Baak, A., Blomberg, N., Boiten, J.W., da Silva Santos, L.B., Bourne, P.E., Bouwman, J. 2016. The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Scientific data* 3(1): 1–9.

Wroniecki, P. 2020. Biskupin... i co z tego? Wiedza totalna w kontekście rozwoju prospekcji. *Studia Lednickie* 19: 59–80.

Wroniecki, P., Jaworski, M., Kostyrko, M. 2015. Exploring free LiDAR derivatives. A user's perspective on the potential of readily available resources in Poland. *Archaeologia Polona* 53: 612–616.

Zalewska, A., Jakubczak, M., Czarnecki, J. 2015. Archaeological revival of memory of the Great War. The role of LiDAR in tracing the boundaries of the WWI Rawka Battlefield Cultural Park. "The Rawka Battlefield (1914–1915)–in memory of war victims". *Archaeologia Polona* 53: 407–412.

Zapłata, R., Stereńczak, K., Kraszewski, B. 2018. Wielkoobszarowe badania dziedzictwa archeologicznego na terenach leśnych. *Kurier Konserwatorski* 15: 47–51.





Trójwymiarowa dokumentacja zabytków ruchomych

Maksym Mackiewicz

WPROWADZENIE

Ostatnie dekady to czas dynamicznego rozwoju cyfrowych metod obrazowania. Dotyczy to szerokiego spektrum narzędzi i technologii wykorzystujących zaawansowane sensory, wysokiej jakości optykę, wyszukane rozwiązania elektroniczne i mechaniczne, wzrastającą moc obliczeniową komputerów oraz specjalistyczne algorytmy do przetwarzania i analizy pozyskanych danych.

Technologiczne nowinki zawsze szybko przyciągały uwagę badaczy poruszających się w szeroko rozumianym obszarze dokumentacji dziedzictwa kulturowego, próbujących zastosować oferowaną nową funkcjonalność urządzeń do pozyskania niedostępnych wcześniej kategorii danych, usprawnienia prac lub zwiększenia możliwości interpretacyjnych. Szczególne miejsce w tym dynamicznym procesie zajmują metody rejestracji trójwymiarowej, a wzrastająca dostępność relatywnie prostych w obsłudze i racjonalnych cenowo rozwiązań technologicznych sprawiła, że szybko zaczęto postrzegać je jako standard, a nie futurystyczną awangardę. Narzędzia te są obecnie szeroko aplikowane w dokumentacji krajobrazów, architektury, kontekstów zastanych podczas badań terenowych, digitalizacji różnego typu zabytków, materiałów osteologicznych (Apollonio i in., 2021; Bedford 2017; Boardman i Bryan 2018; De Reu i in., 2013; Grosman, Smikt i Smilansky 2008; Remondino 2013; Seguchi i Dudzik 2019; Waltenberger i in., 2021).

Techniki rejestracji 3D oferują przede wszystkim nową jakość dokumentacji, łącząc wysoką precyzję odwzorowania z dużą szybkością pozyskiwania danych (ryc. 1). Ich efektywność jest szczególnie widoczna przy dużej szczegółowości dokumentowanego obiektu lub kontekstu. Co nie mniej ważne, dokumentacja pozyskiwania mechanicznie pozwala na uniknięcie wielu błędów pomiarowych i zminimalizowanie subiektywności dokumentalisty, dostarczając produktów precyzyjnych i powtarzalnych. Zastosowania te przyniosły także wiele zalet czysto praktycznych – środowisko oprogramowania 3D pozwala na pracę w oryginalnej skali i układzie współrzędnych, ułatwiając wykonywanie pomiarów, generowanie przekrojów, zobrazowań w różnych płaszczyznach i konwencjach. Wyspecjalizowane algorytmy otworzyły także nowe

DOI: 10.64158/l2xrub968u



Ryc. 1. Modele trójwymiarowe różnych rodzajów obiektów, wykonanych z różnych materiałów, zadokumentowanych z użyciem różnych technik. Podziałki liniowe odnoszą się do zabytków umieszczonych powyżej

możliwości analityczne, pozwalając na podnoszenie czytelności słabo widocznych w oglądzie makroskopowym ornamentów, porównywanie morfologii serii przedmiotów w celu określenia ich podobieństwa lub stopnia zużycia. Pozwalają również na monitorowanie stanu zachowania albo odtworzenia kształtu zabytku w przypadku jego zniszczenia lub uszkodzenia. Wysokorozdzielcze odwzorowania rzeczywistych obiektów stworzyły też szansę na ich swobodne i szerokie udostępnianie pośród różnych grup odbiorców, zarówno w formie ogólnodostępnych „wirtualnych muzeów" zawierających kolekcje interaktywnych modeli wraz z ich podstawowym opisem, jak i zamkniętych baz danych w postaci platform przeznaczonych dla specjalistów. Uzyskane w ten sposób zobrazowania są też podstawą dla wydruków 3D, fizycznych replik obiektów, mogących pełnić rolę materiałów dydaktycznych lub promocyjnych.

Zadaniem poniższego tekstu jest przedstawienie technik pozyskiwania danych przestrzennych, ich charakterystyki i przykładów zastosowań w kontekście dokumentacji zabytków ruchomych, podstawowych technik ich analitycznego wykorzystania, a także sposobów udostępniania zgromadzonych w ten sposób danych.

METODY POZYSKIWANIA DANYCH

Na potrzeby trójwymiarowej digitalizacji zabytków stosuje się przede wszystkim skanowanie 3D i techniki fotogrametryczne. Terminy te należy rozumieć dość szeroko, gdyż określają dynamicznie rozwijającą się technologię i mieszczą w swoim znaczeniu szerokie spektrum instrumentów, oprogramowania, o różnych sposobach działania, przeznaczonych do pracy w różnej skali i warunkach. Wspólnym mianownikiem jest jednak cel ich użycia, czyli wykonanie trójwymiarowej, cyfrowej reprezentacji istniejącego obiektu, odzwierciedlającej możliwie najwięcej jego fizycznych, metrycznych cech – przede wszystkim wymiarów i kształtu, ale w pewnym stopniu również faktury powierzchni czy barwy. Poszczególne metody mają oczywiście swoją specyfikę, system pracy, szereg zalet, jak i ograniczeń, w związku z tym uzyskane modele będą się charakteryzować różną dokładnością, poziomem szczegółowości i „realizmem" zobrazowania, a sam dobór właściwej techniki dokumentacji, będzie pewnego rodzaju kompromisem.

Wśród technik wykorzystywanych do dokumentacji 3D należałoby wymienić również tomografię komputerową (CT) i mikrotomografię komputerową (mikro-CT), relatywnie kosztowną, wymagającą wykonania w placówkach specjalistycznych, ale dostarczającą informacji na temat wewnętrznej struktury obiektów (Applbaum i Applbaum 2005; Hałuszko i in., 2022; Hughes 2011; Miles i in., 2016). W pewnym

zakresie alternatywną dla stosowania skanerów 3D mogą być współrzędnościowe maszyny pomiarowe (Coordinate Measuring Machine, CMM) – digitizery na ruchomym ramieniu, używane często na potrzeby analiz morfometrycznych (Waltenberger i in., 2021: 847). Inną wymagającą przywołania techniką jest *Reflectance Transformation Imaging/Polynomial Texture Mapping* (RTI/PTM), oparta na fotografii, stosunkowo prosta do aplikacji i nie wymagająca specjalistycznej aparatury (Duffy i in., 2018; Earl i in., 2010; Mytum i Peterson 2018). Choć nie dostarcza ona pełnowartościowych danych 3D (niektóre z jej produktów można jednak uznać za 2.5D), to w wielu sytuacjach może okazać się szybszym i bardziej dostępnym narzędziem do zobrazowania słabo czytelnych śladów lub ornamentów niż skanowanie lub fotogrametria. Kolejną, szybko zyskującą na popularności metodą jest 3D Gaussian Splatting (3DGS), będąca efektywną techniką przetwarzania i wizualizacji danych przestrzennych, opartą o reprezentację obiektu jako chmury rozmytych elipsoid Gaussa (w przeciwieństwie do chmury „zerowymiarowych" punktów), pozwalając na płynne, realistyczne wizualizacje w czasie rzeczywistym, przy relatywnie niskich wymaganiach obliczeniowych (Jamil i Brennan 2025; Lee i in. 2025). Specyfika wspomnianych powyżej metod jest jednak odrębnym, złożonym zagadnieniem, a ich wykorzystanie jest zwykle determinowane konkretną potrzebą i jak się zdaje nie stanowią one „głównego nurtu" w digitalizacji, nie będą zatem bliżej opisywane w niniejszym tekście.

Określenie przestrzeni 3D już intuicyjnie jest dla nas terminem dość zrozumiałym. Znając podstawy pracy z różnego rodzaju urządzeniami pomiarowymi używanymi w archeologii, chociażby niwelatorem lub tachimetrem, możemy założyć, że pewne ogólne prawidłowości pracy w trójosiowym układzie współrzędnych będą dość spójne, niezależne od wielkości środowiska pracy i metody akwizycji danych. Mniej zrozumiałym dla odbiorcy może być określenie przestrzeni 2.5D. Możemy ją sobie wyobrażać jako opis powierzchni obiektu lub krajobrazu, oparty o dwuwymiarową macierz, raster, której poszczególnym punktom przypisana jest trzecia wartość, np. wysokość, odczyty z pomiarów terenowych lub wynik obliczeń zastosowanego algorytmu. Przykładem danych 2.5D mogą zatem być numeryczne modele terenu, czyli dwuwymiarowe pliki rastrowe, których każdy piksel odpowiada konkretnej lokalizacji w terenie, a ich wartość symbolizuje wysokość nad poziomem morza. Dane te mają cechy przestrzenne, opisują bowiem (zazwyczaj) ukształtowanie powierzchni w trzech wymiarach, nie są jednak pełnowartościowym modelem 3D, co uniemożliwia rejestrowanie struktur widzianych z boku lub z dołu, np. nawisów skalnych, jaskiń, ścian budynków. Mapy 2.5D są powszechnie używane w grafice komputerowej do osiągnięcia przestrzennego efektu, np. faktur powierzchni lub drobnego reliefu, bez konieczności dodawania kolejnych wierzchołków do trójwymiarowej bryły, co podnosi szczegółowość scen, nie powodując drastycznego wzrostu zapotrzebowania na moc obliczeniową.

SKANOWANIE 3D

Skanowanie 3D jest szybką i bezkontaktową techniką pozyskiwania danych o kształcie obiektów lub otoczenia za pomocą przeznaczonych do tego celu instrumentów – skanerów. Początkowo miało przede wszystkim zastosowanie w kontroli jakości, projektowaniu, wzornictwie przemysłowym, inżynierii odwrotnej, prototypowaniu, co stawiało przed produkowaną aparaturą wysokie wymagania dotyczące dokładności i precyzji odwzorowania geometrii. Wraz z pojawieniem się bardziej przystępnych cenowo i łatwiejszych w obsłudze urządzeń skanowanie zyskało szeroką popularność wśród przedstawicieli innych branż, w tym muzealników i archeologów (Boardman i Bryan 2018; Opitz 2013).

Dostępne na rynku skanery 3D są urządzeniami o dość wąskiej funkcjonalności, przeznaczonymi do pracy w określonej skali i warunkach. Wynika to z licznych ograniczeń zastosowanych rozwiązań konstrukcyjnych. Innych urządzeń będziemy zatem potrzebowali do digitalizacji przedmiotów niewielkich (np. narzędzi krzemiennych, ozdób, numizmatów, drobnych kości lub zębów), innych zaś do obiektów nieco większych (np. kamiennych toporków, naczyń, kafli, większych kości, detalu architektonicznego), a jeszcze innych do rejestracji dużych przestrzeni)np. architektury lub wycinków krajobrazu). Ograniczeń jest jednak więcej – z różnych typów urządzeń będziemy korzystali przy dokumentacji zabytków o jasnej i matowej powierzchni, które będą relatywnie wdzięcznym materiałem do pracy, w przeciwieństwie do przedmiotów o ciemnej barwie, przezroczystych lub połyskliwych, które mogą wymagać zastosowania innej aparatury. Należy również podkreślić, że głównym zadaniem skanerów 3D jest rejestracja geometrii obiektów, nie zaś informacji o ich barwie. Choć urządzenia te często automatycznie rejestrują kolory



Ryc. 2. Skanowanie 3D; a – skaner światła strukturalnego – za soczewką w środkowej części urządzenia umieszczony jest niewielki projektor emitujący wzory światła, po bokach znajdują się rejestrujące ten obraz matryce. Do urządzenia dołączony jest moduł rejestrujący kolory. Urządzenie pozwala na zintegrowaną pracę z obrotowym stolikiem, na ten nadrukowano markery ułatwiające pozycjonowanie poszczególnych skanów cząstkowych; b – poszczególne produkty skanowania generowania modelu, od lewej: chmura punktów, siatka trójkątów, model powierzchniowy, model powierzchniowy pokryty teksturą; c – wiązka lasera emitowana przez skaner wykorzystujący technikę triangulacji laserowej; d – nieregularny wzór emitowany przez skaner światła strukturalnego; e – spasowane na podstawie geometrii trzy skany cząstkowe (oznaczone różnymi kolorami), tworzące rekonstrukcję znacznej część obiektu

powierzchni, to wykonują to sensory o niewielkich rozdzielczościach i parametrach odstających od tych znanych nam z aparatów fotograficznych. Zastosowane w skanerach matryce służą zwykle jednie podstawowemu kolorowaniu chmury punktów, nie zaś oddaniu realistycznych barw.

Urządzenia przeznaczone do skanowania bliskiego zasięgu (mówiąc ogólnie – przedmiotów) należą do urządzeń aktywnych, posiadających własny emiter podczerwieni, światła widzialnego lub ultrafioletu. W przypadku skanerów wykorzystujących tzw. światło strukturalne (*Structural Light Scanners,* SLS, ryc. 2a), umieszczony w urządzeniu niewielki projektor wyświetla na powierzchni dokumentowanego obiektu obraz, najczęściej w postaci sekwencji prążków, niekiedy mniej powtarzalnego wzoru (ryc. 2d). Ten zaś rejestrowany jest przez położone w pewnej odległości od rzutnika jeden lub klika sensorów optycznych – zazwyczaj matryc RGB. Oprogramowanie urządzenia, na zasadzie triangulacji, analizuje zakrzywienia wzorcowego obrazu rzutowanego na mapowaną powierzchnię, przeliczając je na punkty w przestrzeni. Część urządzeń zamiast wzoru w świetle białym lub w podczerwieni będzie wyświetlało pojedyncze linie lub ich sekwencje, wykorzystując w tym celu wiązkę czerwonego lub niebieskiego lasera (ryc. 2c). Skanery tego typu znacznie lepiej radzą sobie z dokumentacją obiektów ciemnych lub połyskujących, których powierzchnia pochłania lub odbija znaczną część światła. W tym trybie zazwyczaj nie rejestrują kolorów. Coraz częściej producenci oferują jednak urządzenia hybrydowe, pozwalające na naprzemienne korzystanie z obu technik do akwizycji danych.

Dla zniwelowania refleksów utrudniających skanowanie można użyć sprayów matujących, których cienką warstwę napyla się na powierzchnię przedmiotów. Na rynku jest co najmniej kilkanaście specjalistycznych produktów. Część oferowanych aerozoli nie wymaga nawet późniejszego czyszczenia, gdyż powłoki te znikają, sublimując w ciągu kilku godzin od użycia. Producenci tych środków często zapewniają o braku szkodliwości w kontakcie z różnymi materiałami, podpierając się zwykle odpowiednimi certyfikatami, jednakże zdrowy rozsądek podpowiada, aby podczas dokumentacji zabytków i dzieł sztuki do ich stosowania podchodzić szczególnie wstrzemięźliwie, każdorazowo konsultując to z opiekunem lub konserwatorem zabytku.

Pole robocze urządzenia skanującego odpowiada powierzchni mieszczącej się jednocześnie w obszarze widzenia i zakresie ostrości optyki światłoczułego sensora, pokrytej jednocześnie wzorem światła (lub wiązki lasera) – dla większości urządzeń nie przekracza to zwykle rozmiaru kartki A4. Stworzenie modelu pełnej bryły przedmiotu wymaga zatem wykonania serii skanów cząstkowych, dokumentujących mniejsze fragmenty obiektu z różnych stron, składanych następnie w przeznaczonym do obsługi urządzenia oprogramowaniu (ryc. 2e). Odpowiedni software pozwala zwykle na automatyzację tego procesu, samodzielnie dopasowując geometrię sąsiednich skanów na podstawie kształtu zachodzących na siebie części wspólnych. Jeśli bryła obiektu okaże się jednak zbyt powtarzalna i wolna od charakterystycznych elementów geometrii (np. symetryczne, toczone naczynie, przedmiot z powtarzalnym wzorem) albo też przestrzeń wspólna jest niewielka (dwie połówki monety, kamiennego narzędzia) skany te mogą być błędnie lokalizowane. Wówczas pomocne może okazać się stosowanie markerów, najczęściej niewielkich odblaskowych naklejek umieszczanych w kadrze lub na powierzchni obiektu, które wspomagają składanie poszczególnych partii. Innym rozwiązaniem jest umieszczenie w sąsiedztwie dokumentowanego obiektu drobnych przedmiotów o mniej regularnych kształtach, które posłużą do poprawnego złożenia serii skanów cząstkowych, po czym zostaną usunięte ze sceny na dalszym etapie obróbki.

Skanery mogą rejestrować dane w trybie statycznym, poprzez umieszczenie urządzenia na statywie, który przestawiany jest względem obiektu, albo też umieszczenie dokumentowanego przedmiotu na zautomatyzowanym stoliku obrotowym (ryc. 2a). Niektóre urządzenia oferują również pracę w trybie ręcznym, mobilnym, gdy dane dotyczące geometrii rejestrowane są podczas swobodnego poruszania urządzeniem wokół obiektu, a cały proces można na bieżąco śledzić na ekranie komputera, co pozwala ustalić, które powierzchnie zostały już zadokumentowane, a które wymagają uzupełnień. W praktyce skanowanie z użyciem stolika oferuje zwykle lepszą rozdzielczość, zmniejszając liczbę różnego rodzaju błędów pomiarowych, choć może być czasochłonne, szczególnie dla większych struktur o skomplikowanym kształcie. W trakcie skanowania niezbędne może okazać się czyszczenie pojedynczych skanów cząstkowych lub ich serii z niechcianych elementów, które znalazły się w kadrze, np. elementów podłoża, na którym znajduje się dokumentowany obiekt, stolika obrotowego i różnego rodzaju podpórek, które utrzymują przedmiot w miejscu.

Podstawowym odwzorowaniem obiektu jest chmura punktów (*point cloud*) odzwierciedlająca jego kształt (ryc. 2b). Jest ona bazowym, najbardziej surowym i najmniej przetworzonym sposobem rejestrowania geometrii. Lokalizacja poszczególnych punktów opisana zostaje za pomocą trzech wartości odpowiadających ich lokalizacji w trójosiowym, kartezjańskim układzie współrzędnych. Ponieważ skanery natywnie są przygotowane do pracy w znormalizowanych jednostkach długości, chmura punktów będzie opisywała rzeczywistą wielkość obiektu. Jego orientacja może być jednak dość przypadkowa, szczególnie gdy skanowanie wykonywano „z ręki", co będzie wymagało odpowiedniej korekty na dalszym etapie opracowania. Punkty chmury mogą zawierać dodatkowe informacje, np. o kolorze, pozyskane i przypisane w oparciu o dane z sensora RGB skanera. Otrzymujemy wówczas kolorowaną chmurę punktów, która w wielu sytuacjach, w zależności od przeznaczenia, będzie stanowiła produkt końcowy.

Często jednak będziemy potrzebowali innych, bardziej złożonych danych wyjściowych, produktów pochodnych chmury punktów. Zwykle będą nimi poligonalne modele powierzchniowe (ang. *mesh*), czyli siatki wielokątów powstałe z połączenia sąsiadujących punktów chmury płaszczyzny (ryc. 2b). Wygenerowany model powierzchniowy może zawierać mniejsze lub większe „ubytki", wynikające np. z braku możliwości zarejestrowania obszarów w zagłębieniach lub trudno dostępnych przestrzeniach albo też z obecności miejsc wyświeceń powierzchni przedmiotu, gdzie zarejestrowano za mało danych. Oprogramowanie skanujące pozwoli na rekonstrukcję braków, wypełniając je automatycznie lub w trybie półautomatycznym, pozwalając operatorowi zdecydować, które nieciągłości powierzchni powinny zostać uzupełnione i w jaki sposób. Niektóre zastosowania, np. wydruki 3D, mogą wymagać przygotowania tzw. modeli wodoszczelnych (*watertight*), czyli pełnych, zamkniętych brył, o powierzchniach pozbawionych tych ubytków.

W zależności od potrzeb modele należałoby poddać dalszej optymalizacji obejmującej wygładzanie powierzchni płaskich i wyostrzanie krawędzi, a także decymacji, czyli zmniejszeniu liczby wierzchołków, w szczególności na powierzchniach pozbawionych detalu. Choć jest to działanie, które należałoby rozpatrywać jako częściowo powodujące straty, często pozwala ono wielokrotnie zmniejszyć objętość pliku i zwiększyć komfort dalszej pracy z danymi. Ostatnim etapem obróbki jest nałożenie tekstury pozyskanej za pomocą sensorów skanera lub z innego zewnętrznego źródła, np. modelu fotogrametrycznego.

Ważną zaletą skanowania 3D jest szybki podgląd uzyskanych rezultatów. Urządzenia rejestrują setki tysięcy punktów na sekundę w trybie ręcznym lub podczas jednego skanu w trybie stacjonarnym, niemal natychmiast obrazując je na ekranie komputera. Pozwala to na bieżącą kontrolę jakości i wychwytywanie ewentualnych błędów pomiarowych – w przeciwieństwie do fotogrametrii, gdzie błędy powstałe na etapie pozyskiwania danych często stają się zauważalne dopiero podczas generowania modelu. Wykonanie skanu 3D niewielkiego obiektu zajmuje od kilkunastu do kilkudziesięciu minut, w zależności od jego wielkości i stopnia skomplikowania. Uzyskany w tym czasie model jest najczęściej efektem dość bliskim końcowego i (jeśli jest wolny od błędów) zwykle nie wymaga dalszych, czasochłonnych obliczeń.

Skanery 3D przeznaczone do dokumentacji niewielkich przedmiotów są urządzeniami relatywnie mało wielozadaniowymi. Przed ich wypożyczeniem lub zakupem warto zatem sprawdzić czy spełniają nasze oczekiwania. Ich ceny rzadko podawane są publicznie na stronach producentów lub dystrybutorów, którzy tłumaczą to zwykle dynamiką kursu walut czy chęcią personalizowania oferty dla konkretnych użytkowników. Ceny podstawowych zestawów od renomowanych producentów, np. produktów z linii Faro Freestyle, Artec albo Shining 3D, rozpoczynają się na poziomie kilkunastu tysięcy euro. W większości urządzenia dostarczane są z wliczonym w cenę, dostosowanym oprogramowaniem, które przeznaczone jest do akwizycji danych, parowania skanów cząstkowych, optymalizacji uzyskanych modeli i ich podstawowej obróbki. Niekiedy można liczyć na dodatkowe narzędzia przeznaczone do inżynierii odwrotnej lub kontroli jakości. Choć podstawowa funkcjonalność tych programów może być rzadziej używana w codziennej praktyce archeologów czy muzealników, to narzędzia te znacznie usprawniają wykonywanie pomiarów, generowanie przekrojów czy porównywanie modeli między sobą.

Obserwując praktykę zastosowań skanerów 3D dość często można zauważyć, że profesjonalne (kosztowne) urządzenia angażowane są głównie na potrzeby wykonania „wizualizacji" zabytków. W takich sytuacjach wystarczającym byłoby skorzystanie ze skanera, którego głównym adresatem są graficy komputerowi, artyści, twórcy gier komputerowych czy branża e-handlu. Produkty te nie muszą spełniać rygorystycznych norm aparatury metrologicznej, nie zawsze

pozwalają na bieżącą kalibrację i kontrolę precyzji odwzorowania, mają za to kompaktowe rozmiary, prosty system pracy, i często oferują zaskakująco dobrą (w relacji do ceny) jakość odwzorowania. W ostatnich latach pojawiło się wiele nowych urządzeń oferowanych przez startupy, takie jak 3DMakerPro, Creality czy Revopoint, które w atrakcyjnych cenach dostarczają sprzęt o różnych klasach dokładności i przeznaczeniu. Do prezentacji prostych modeli w sieci lub przygotowania modelu do wydruku 3D, który ze względu na charakterystykę materiału straci wiele szczegółów, wystarczające mogą okazać się urządzenia oferowane w cenie dobrej klasy aparatu fotograficznego lub drona.

FOTOGRAMETRIA BLISKIEGO ZASIĘGU

Fotogrametria to określenie pojawiające się w odniesieniu do techniki, technologii i nauki o pozyskiwaniu wiarygodnych informacji o obiektach lub krajobrazie poprzez rejestrację, pomiar i interpretację fotografii lub innych zobrazowań teledetekcyjnych (Lee i McGlone 2013; Wolf, Dewitt i Wilkinson 2000). To szeroka definicja obejmująca różne metody i pola jej stosowania, których zasadniczym celem jest pozyskiwanie metrycznych, trójwymiarowych odwzorowań przedmiotów lub krajobrazów, na podstawie dwuwymiarowych zestawów danych (Aber i in., 2019: 19).

Początkowo głównym obszarem zastosowania fotogrametrii była geodezja i kartografia, gdzie na potrzeby tworzenia map używano zdjęć lotniczych wykonywanych specjalistycznymi wielkoformatowymi aparatami wyposażonymi w optykę o znanej, matematycznie opisanej charakterystyce obrazowania. Do ich dalszej analizy używano mechaniczno-optycznych, potem cyfrowych autografów i stereoploterów. Profesjonalne użycie tej techniki wymagało zatem stosowania specjalistycznej aparatury i odpowiednich umiejętności. Rozwój technik fotograficznych (w szczególności aparatów cyfrowych oferujących wysoką rozdzielczość i jakość rejestrowanych obrazów, również tych umieszczanych na bezzałogowych platformach latających) wraz ze znacznym przyrostem mocy obliczeniowej konsumenckich komputerów pozwolił na wypracowanie i upowszechnienie nowych narzędzi opartych na działaniu złożonych, lecz wydajnych algorytmów, umożliwiających analizowanie dużych zestawów zdjęć. Co ważne, zmianie uległo także podejście samych producentów oprogramowania, którzy zaczęli oferować kompleksowe, przyjazne dla użytkownika narzędzia w znacznie niższych niż wcześniej cenach. Szybko rozrastająca się grupa profesjonalnych i półprofesjonalnych użytkowników udostępnia w sieci liczne testy, przewodniki i filmy instruktażowe dotyczące technik pozyskiwania danych, doboru parametrów ich obróbki oraz różnych pomysłów wykorzystania produktów końcowych, znajdując zastosowanie w kolejnych branżach. Z pewnością znacznie zwiększyło to popularność niegdyś zaawansowanej i niedostępnej technologii, a przyjazne dla użytkownika oprogramowanie pozwalało na relatywnie szybkie osiągnięcie satysfakcjonujących rezultatów. Upowszechnienie tych rozwiązań sprawiło, że metoda zyskała zastosowanie na wielu nowych polach, np. sztuki czy gier komputerowych, a samo określenie „fotogrametria" stało się rozpoznawalne poza wąskim gronem specjalistów.

W dokumentacji dziedzictwa archeologicznego najbardziej rozpowszechniona jest technika fotogrametryczna określana jako *Structure-from-Motion*, w skrócie *SfM* (Apollonio i in., 2021; De Reu i in., 2013; Verhoeven 2011). Metoda pozwala na trójwymiarową rekonstrukcję obiektów lub przestrzeni na podstawie serii fotografii wykonanych z różnych pozycji, pod różnymi kątami względem dokumentowanej sceny. Zautomatyzowane oprogramowanie pozwala następnie na wyszukiwanie wspólnych punktów na poszczególnych fotografiach, na zasadzie triangulacji rekonstruując ich wzajemne położenie, dostarczając w efekcie chmurę punktów, będącą odwzorowaniem powierzchni dokumentowanej sceny. Fotogrametria może być stosowana do dokumentowania obiektów różnej wielkości – od drobnych artefaktów, po budynki czy większe wycinki krajobrazu. W przypadku rejestracji danych z dystansu od kilku centymetrów do kilkuset metrów technika ta jest najczęściej określana jako fotogrametria bliskiego zasięgu (*close-range photogrammetry*).

Metodę działania obrazowo można porównać do ludzkiego wzroku, gdzie obserwowanie otoczenia parą oczu, umieszczonych w pewnym, znanym dla mózgu oddaleniu, pozwala nam na rozpoznawanie głębi i odległości. Zdjęcia fotogrametryczne można zaś porównać do zdjęć stereoskopowych wyświetlanych niegdyś w fotoplastykonach lub stereoskopach. Fotografie te, wykonane z miejsc nieznacznie oddalonych od siebie, świadomie mylą nasz mózg, pozwalając dostrzec wieloplanowość przedstawianych scen.

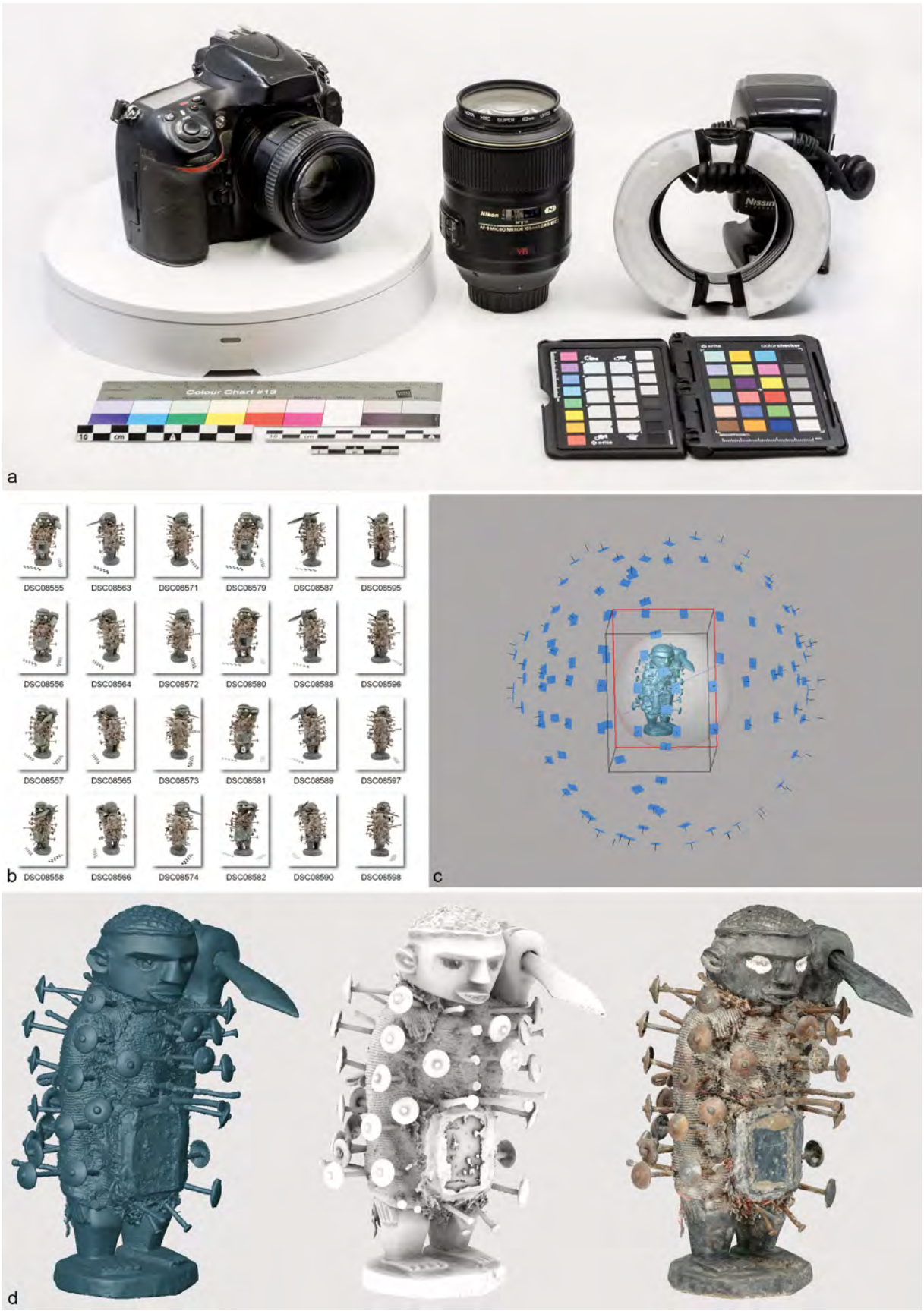
Wśród najczęściej wykorzystywanych w archeologii środowisk fotogrametrycznych należałoby wymienić Agisoft Metashape (do 2018 r. Agisoft Photoscan)

oraz Pix4D. Aplikacje te są dostępne w różnych pakietach funkcjonalnych, z odmiennymi modelami licencjonowania. Pierwszy ma bardzo szeroką funkcjonalność, oferując rekonstrukcję obiektów o różnej skali, pozwalając na wykorzystanie danych z różnych sensorów (zobrazowanie wielospektralne, chmury punktów skanowania laserowego). Trzeba jednak podkreślić, że jest oprogramowanie produkcji rosyjskiej, co może budzić indywidualne obiekcje przy wyborze środowiska pracy, jak również źle wróżyć dla dalszego rozwoju tego pakietu. Drugi sprofilowany jest przede wszystkim do tworzenia modeli krajobrazu z użyciem dronów, oferując wyspecjalizowane narzędzia, np. dla przemysłu wydobywczego lub rolnictwa. Ich silnym konkurentem jest Reality Scan (do 2025 r. Reality Capture), oprogramowanie wykupione przez jednego z gigantów branży gier komputerowych, które oferowane jest bezpłatnie, jeśli nie służy generowaniu wysokich zysków. Na rynku możemy odnaleźć kilka aplikacji dystrybuowanych bezpłatnie na licencji *open-source*, np. AliceVision Meshroom, na tę chwilę ich funkcjonalność, komfort pracy i jakość tworzonych produktów końcowych wyraźnie odstaje od pakietów komercyjnych, mogą jednak być narzędziem wystarczającym do nauki lub realizacji mniej skomplikowanych zadań.

W większości scenariuszy podstawowymi danymi wejściowymi do wykonania trójwymiarowych rekonstrukcji obiektów będą fotografie. Do ich wykonania wystarczy przeciętny, cyfrowy aparat fotograficzny. Profesjonalizacja działań będzie jednak wymagała wykorzystania bardziej zaawansowanego sprzętu (ryc. 3a) z matrycą o dużej rozdzielczości, generującą niskie szumy przy wyższych wartościach ISO, podpiętą do dobrej jakości optyki (np. obiektywy szerokokątne przy dokumentacji architektury lub wnętrz, najlepiej stałoogniskowe, a także obiektywy makro do dokumentacji mniejszych obiektów). Z pewnością pomocny będzie stabilny statyw i wężyk spustowy dla uniknięcia drgań aparatu. W warunkach niedostatecznego oświetlenia można wykorzystać lampę błyskową, a przy dokumentacji przedmiotów sprawdzą się lampy pierścieniowe, co pozwoli uchwycić obiekt z równym oświetleniem, bez dodatkowych cieni. Dla zlikwidowania odblasków na powierzchni niezbędne będzie nałożenie odpowiedniego filtra polaryzacyjnego na obiektyw, a także spolaryzowanie źródeł światła. Do automatyzacji procesu pomocne może być przygotowanie odpowiedniego stanowiska z obrotowym stolikiem oświetlonym równomiernie rozproszonym światłem. Zdjęcia powinny być wykonane w podobnych warunkach oświetleniowych (ryc. 3b), przy niskim ustawieniu ISO, najlepiej przy użyciu tego samego obiektywu i ogniskowej, z optymalnie otwartą przysłoną, co pozwoli na osiągnięcie maksimum ostrości obiektywu. Dbając o jakość odwzorowania kolorów, należałoby skorzystać ze zestandaryzowanego wzornika, wprowadzając następnie odpowiednie korekty podczas wywoływania plików RAW. Zdjęcia te po zaimportowaniu do oprogramowania należy przejrzeć pod kątem występowania potencjalnych nieostrości, błędów kadrowania lub eskpozycji, obecności niechcianych obiektów w kadrze, maskując te elementy lub usuwając całe klatki.

Dalszy proces jest w dużej mierze automatyczny, ogranicza rolę użytkownika do ustawieniaa odpowiednich parametrów i kontroli uzyskiwanych na poszczególnych etapach rezultatów. Efektywne wykonywanie dokumentacji fotogrametrycznej wymaga zatem próby zrozumienia sposobu działania algorytmu, co pozwoli na poprawne wykonywanie optymalnej liczby zdjęć, aby uzyskać modele wolne od błędów pomiarowych, o dużej szczegółowości i dokładności. Większość oprogramowania do fotogrametrii bliskiego zasięgu wykorzystuje dwa charakterystyczne dla tej kategorii produktów algorytmy: *Structure from Motion* i *Multi View Stereo*, często zbiorczo określane jako *rekonstrukcja SfM-MVS* (Bedford 2017: 8). Pierwszy z nich pozwala na określenie pozycji poszczególnych klatek w umownie przyjętej przestrzeni (ryc. 3c) oraz wyliczenia parametrów optycznych obiektywu (co jest ważną innowacją w stosunku do tradycyjnej stereofotogrametrii, gdzie parametry te muszą być znane na wstępie). W efekcie uzyskujemy także pozycję punktów wspólnych poszczególnych ujęć (tzw. *tie-points*), tworzących rzadką chmurę punktów rozlokowanych na powierzchni dokumentowanych struktur. Drugi algorytm, dynamicznie dobierając ujęcia w stereopary, pozwala na wygenerowanie map głębokości (*depth maps*), czyli obrazów, w których wartość poszczególnych pikseli odzwierciedla odległość od rejestrującego je sensora, a te mogą być następnie wykorzystane do zagęszczenia uzyskanej na poprzednim etapie chmury punktów, generując w ten sposób znacznie bardziej szczegółowy opis kształtu.

Aby zobrazowania te miały charakter metryczny, niezbędne jest wprowadzanie informacji o rozmiarach i orientacji dokumentowanej sceny. Do wielu zadań wystarczające będzie wskazanie znanych długości odcinków między punktami referencyjnymi, co pozwoli nadać obiektowi właściwą skalę przedstawienia. Lepszym rozwiązaniem będzie jednak wprowadzenie



Ryc. 3. Rekonstrukcja fotogrametryczna; a - podstawowy zestaw fotogrametryczny do dokumentacji niewielkich obiektów – pełnoklatkowy aparat fotograficzny wyposażony w stałoogniskowe obiektywy 50 mm (standardowy) i 105 mm (makro), lampa pierścieniowa, przymiary i wzorniki kolorów, b – przykładowe kadry z serii fotografii fotogrametrycznych zabytku, wykonane na jednorodnym tle, pod różnymi kątami; c – rozkład zdjęć względem modelu obiektu (niebieskie prostokąty); d – rekonstrukcja fotogrametryczna, od lewej: model powierzchniowy, model w widoku symulującym rozkład rozproszonego światła (ambient occlusion) i pokryty wysokorozdzielczą teksturą

koordynatów dla umieszczonych w scenie punktów kontrolnych, co pozwoli określić zarówno skalę, orientację, jak i położenie w przestrzeni lokalnego trójosiowego kartezjańskiego układu współrzędnych lub zdefiniowanego układu współrzędnych geodezyjnych. W większości programów fotogrametrycznych współrzędne punktów kontrolnych, określanych najczęściej jako *ground control points* (GCP), można wprowadzić na dowolnym etapie obróbki. Operowanie w układzie metrycznym od samego początku pracy nad modelem pomaga jednak w bieżącej kontroli dokładności rekonstrukcji.

Podobnie jak w przypadku skanowania 3D, natywnym produktem końcowym rekonstrukcji fotogrametrycznej może być chmura punktów, siatka wielokątów (*mesh*), na której można następnie rozpiąć bazującą na źródłowych fotografiach teksturę (ryc. 3d). Ponownie będą to modele o bardzo dużej liczbie wierzchołków, więc w miarę możliwości należałoby poddać je optymalizacji. Zdecydowana większość oprogramowania fotogrametrycznego (w przeciwieństwie do aplikacji sterujących procesem skanowania 3D) pozwala na generowanie dwuwymiarowych georeferowanych zobrazowań rastrowych, np. ortofotomap albo numerycznych modeli terenu, które stanowią jedne z podstawowych produktów końcowych stosowania tej techniki dokumentacji.

WYBÓR METODY OBRAZOWANIA

Zestawienie opisów dwóch metod w jednym tekście często prowokuje do pytania o przewagę jednej nad drugą. Wstępie można powiedzieć, że żadna z nich nie jest z natury lepsza lub gorsza, ale będą scenariusze, które będą sugerowały użycie wybranej z nich. Podejmując taką decyzję, należałoby kierować się przede wszystkim celem działań i dalszego wykorzystania modeli. Priorytetem będzie określenie, które cechy odwzorowania będą miały w tej sytuacji kluczowe znaczenie. Jeśli przeznaczone będą do prezentacji w postaci interaktywnych modeli, wszelkich multimediów, z pewnością ważnym aspektem będzie fotorealizm odwzorowania, którego wiele skanerów 3D nie będzie w stanie zapewnić. Wówczas należałoby zastosować zobrazowania fotogrametryczne (choć i tu nie należy zapominać o kontroli jakości rekonstrukcji). Przy wszelkich analizach cech metrycznych, morfologicznych, technologicznych zwykle wybór będzie zmierzał w stronę stosownych urządzeń pomiarowych – skanerów.

Kolejnymi czynnikami, które mogą determinować wybór metody, są miejsce i warunki, w jakich będziemy prowadzili prace. Działania w plenerze będą faworyzować użycie narzędzi bardziej kompaktowych i niezależnych od źródeł zasilania, podczas gdy dokumentacja zabytków w muzealnym magazynie pozwoli na większą niezależność zarówno od prądu, jak i pogody czy oświetlenia. Ważnym aspektem jest też czas dostępu do zbiorów, co może być szczególnie istotne podczas projektów wyjazdowych, być może zagranicznych, wymagających bardziej złożonej koordynacji prac. Należałoby wówczas założyć, że wraz z pozyskiwaniem danych, powinny one zostać opracowane chociażby w stopniu pozwalającym na wstępną kontrolę ich poprawności. W ciągu jednego dnia roboczego możemy zadokumentować kilkanaście lub kilkadziesiąt obiektów z użyciem skanera, niemal na bieżąco obserwując uzyskane wyniki, otrzymując produkt jakości bliskiej końcowemu efektowi. Rekonstrukcja fotogrametryczna jest jednak procesem wymagającym dłuższego czasu na opracowanie danych. Podczas gdy w ciągu jednego dnia możemy wykonać sekwencje zdjęć dla kilkudziesięciu obiektów, to już ich przeliczenie do postaci pozwalającej na ocenę uzyskanego rezultatu, w szczególności przy użyciu mobilnego komputera, nie będzie możliwe z dnia na dzień, a zauważone wówczas błędy wynikające z niepoprawnie wykonanych zdjęć, mogą być niemożliwe do skorygowania.

KOMPUTER, OPROGRAMOWANIE I FORMATY ZAPISU

Do komfortowej i wydajnej pracy, zarówno z większymi zestawami danych fotogrametrycznych, jak i skanerami 3D, niezbędny będzie komputer o podwyższonej specyfikacji – przede wszystkim wyposażony w szybki wielordzeniowy procesor, dużą ilość pamięci RAM, wydajny układ graficzny i zapas szybkiej przestrzeni dyskowej. Uwagę powinny zwracać przede wszystkim komputery określane jako „stacje graficzne", ale też „zestawy dla graczy", gdyż większość oprogramowania zoptymalizowana jest do współpracy z popularnymi, konsumenckimi kartami graficznymi. Decydując się na konkretne rozwiązania należałoby jednak na wstępie zapoznać się z rekomendacjami sprzętowymi producentów instrumentów i oprogramowania oraz sugerowanymi przez nich parametrami podzespołów, często bowiem tworzą swoje algorytmy

do współpracy z urządzeniami konkretnego typu lub wręcz producenta.

Producenci skanerów 3D wraz z urządzeniami rozwijają własne, zamknięte oprogramowanie przeznaczone do akwizycji danych i ich wstępnej obróbki. Dane robocze, obejmujące indywidualne skany cząstkowe, informacje o wzajemnym ich dopasowaniu, sposób nakładania tekstury z założenia są rozwiązaniami autorskim i nie są kompatybilne z oprogramowaniem innych producentów. W przypadku aplikacji fotogrametrycznych sytuacja jest podobna. Chociaż dane wejściowe, czyli fotografie są zwykle w uniwersalnych formatach zapisu, to już same pliki projektu nie będą dostępne dla zewnętrzego oprogramowania. Dopiero finalne produkty rekonstrukcji będą możliwe do wyeksportowania do popularnych typów plików, pozwalających na import do innego środowiska pracy. Najbardziej popularnymi i rekomendowanymi standardami wymiany danych o charakterze chmur punktów będą E57 (*ASTM E57*) lub LAS (*ASPRS LAS* lub jego wersja skompresowana LAZ). Dla modeli powierzchniowych (*mesh*) proponuje się przede wszystkim formaty STL (*Stanford Triangle Format*), PLY (*Polygon File Format*) i OBJ (*Wavefront OBJ*). Dwa ostatnie pozwalają na zapisanie modelu z teksturą (udostępniając dane, należy jednak pamiętać, że znajduje się ona w osobnych plikach). Objętość danych w tych formatach nie przekracza zwykle 100 MB na 1 milion wierzchołków, zatem w większości sytuacji umożliwi ich swobodne przesyłanie za pomocą ogólnodostępnych usług sieciowych. Fotogrametryczne dane 2.5D, najczęściej będą używane w aplikacjach GIS, zatem praktycznym sposobem ich zapisu będzie np. GeoTiff.

Udostępnianie danych roboczych ze względu ogólną niekompatybilność i dużą objętość, zdaje się nie mieć większego sensu, jeśli nie przemawia za tym konkretna potrzeba. Warto je jednak archiwizować, często bowiem nowe wersje oprogramowania zawierają zaktualizowane algorytmy, wpływające na jakość produktów końcowych. Podczas gdy jakość modelu 3D uzyskanego techniką skanowania będzie wynikała z parametrów i ustawień instrumentu, w przypadku opracowań fotogrametrycznych głównym czynnikiem ograniczającym szczegółowość finalnej rekonstrukcji będzie prawdopodobnie moc obliczeniowa komputera. Można się zatem spodziewać, że w niedalekiej przyszłości powstanie możliwość generowania modeli o znacznie wyższej szczegółowości na podstawie dokładnie tych samych danych.

Modele uzyskiwane za pomocą skanowania 3D lub fotogrametrii bliskiego zasięgu cechują się zwykle bardzo dużą liczbą wielokątów, sięgającą kilku- lub kilkunastu milionów. Dalsza praca na danych wymaga zatem wydajnego środowiska pracy. Producenci oprogramowania oferują szeroki wachlarz rozwiązań. Znajdziemy pośród nich narzędzia przeznaczone do diagnostyki (naprawy błędów i nieciągłości powierzchni modeli, a także optymalizacji), wizualizacji (zarówno jako obrazy statyczne, jak i animacje), inżynierii odwrotnej lub CAD (*Computer Aided Design* pozwalające na wymiarowanie, cięcie i projektowanie w oparciu o modele), modelowania (w tym narzędzia określane jako cyfrowy rzeźbiarz – *digital sculptor*, pozwalające na większą ingerencję w wygenerowaną bryłę, uzupełnianie braków), analizy (oferujące liczne algorytmy i narzędzia do wizualizacji wyników). Niestety trudno doszukiwać się rozwiązań o szerokiej funkcjonalności, zaspokajających większość dalszych potrzeb. Często zatem na różnych etapach obróbki modelu, chcąc skorzystać z konkretnego narzędzia, będziemy zmuszeni do przerzucania danych pomiędzy różnymi aplikacjami. Warto jednak zwrócić uwagę, że dostępnych jest wiele pakietów dystrybuowanych bezpłatnie, często na licencji open-source, jak np. przeznaczony do modelowania i wizualizacji Blender (blender.org) albo oferujący liczne narzędzia analityczne MeshLab (meshlab.net). Narzędzia te mają bardzo liczną grupę użytkowników, a zastosowane w nich algorytmy szczegółową dokumentację.

RZUTOWANIE I WYMIAROWANIE

Modele trójwymiarowe, paradoksalnie, najczęściej przedstawiamy w postaci dwuwymiarowej. Przygotowanie ryciny do publikacji lub statycznego obrazu w prezentacji multimedialnej wymaga bowiem przetworzenia trójwymiarowej sceny na płaski, zwykle rastrowy obraz. Nawet pracując nad modelem przy komputerze, używamy zwykle dwuwymiarowego medium, standardowego monitora, a poczucie umownego trzeciego wymiaru zaspokaja interaktywność środowiska pracy polegająca na swobodnym obracaniu modelu, przybliżaniu wirtualnego obserwatora wybranych detali. Wrażenie takie zapewnia także ruch w animacji, choć ta przecież wciąż składa się sekwencji dwuwymiarowych kadrów.

Sposób przetwarzania przestrzeni 3D do postaci dwuwymiarowej w grafice komputerowej określa się jako renderowanie (często używa się też angielskiego

terminu *rendering*). Proces ten obejmuje przeliczanie różnych parametrów sceny, między innymi geometrii wchodzących w jej skład modeli składowych, nałożenia na siatki wielokątów odpowiednich tekstur, obliczenie wpływu oświetlenia na te powierzchnie (w szczególności generowanych przez nie odbić oraz cieni, załamań światła), często także symulację różnego rodzaju efektów optyki (np. głębi ostrości) itp. Celem założonej konwencji obrazowania może być uzyskanie wysokiego realizmu odwzorowania albo nadanie im pewnych „efektów artystycznych" czy też schematyczne podkreślenie krawędzi lub konkretnych cech obiektów. W zależności od oczekiwanej rozdzielczości, stopnia odwzorowania detalu, a także ogólnej złożoności danego stylu przedstawienia renderowanie może odbywać się w czasie rzeczywistym lub wymagać dłuższych obliczeń. Wiele aplikacji pozwala na bieżącą pracę w uproszczonym, zoptymalizowanym trybie wyświetlania, odtwarzając podstawowe cechy geometrii i powierzchni modelu, pozwalając na wygenerowanie wysokiej jakości, wysokorozdzielczych obrazów w ramach osobnego procesu.

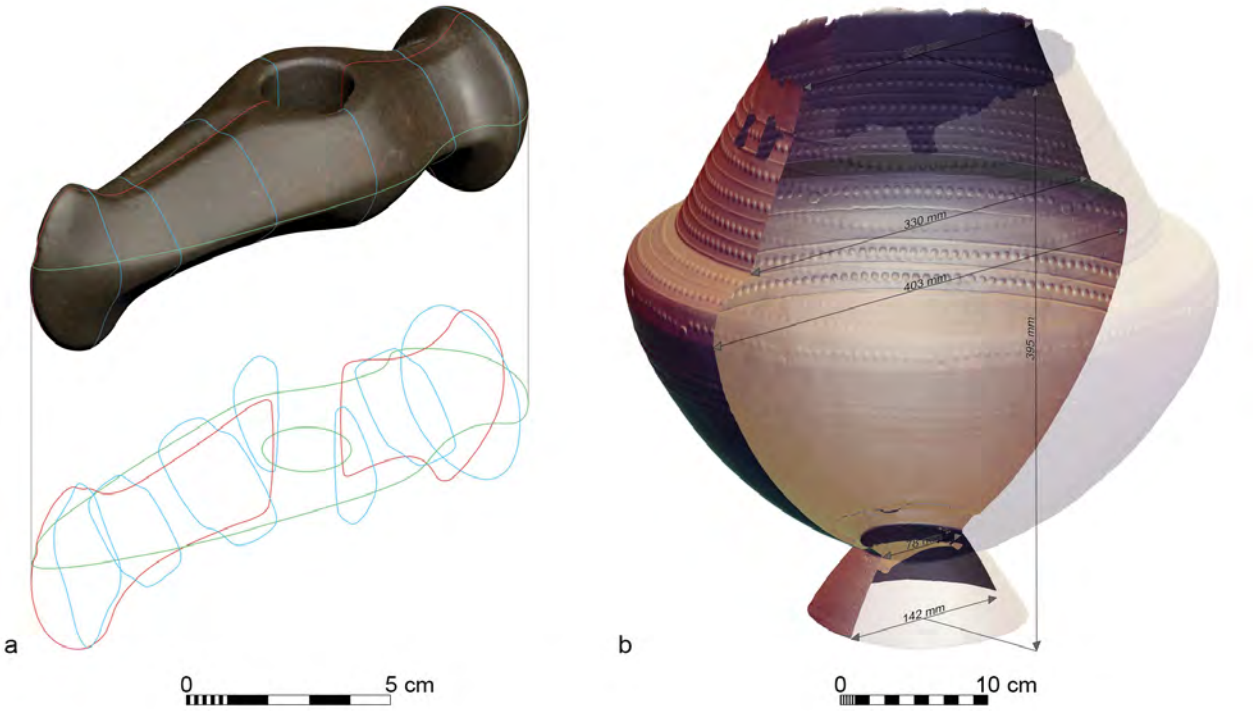
Cyfrowy obiekt umieszczony w przestrzeni 3D oprogramowania komputerowego pozwala na manipulowanie jego położeniem w umownej przestrzeni względem innych obiektów i względem obserwatora (tzw. kamery), umożliwiając swobodne komponowanie kadru. Co ważne, oprogramowanie pozwala zwykle na wygenerowanie rzutów ortogonalnych, czyli projekcji równoległych, pozbawionych skrótu perspektywicznego i to one zapewne znajdą więcej zastosowań podczas tworzenia przedstawień i zestawień zabytków. Odwzorowanie równoległe naśladujemy zwykle za pomocą rysunków, nie jest natomiast możliwe do uzyskania za pomocą tradycyjnej fotografii – skrót perspektywiczny możemy co najwyżej zminimalizować, używając obiektywu o długiej ogniskowej.

Jedną z podstawowych opcji programów inżynierskich przeznaczonych do pracy z modelami 3D są narzędzia ułatwiające wykonywanie różnego rodzaju pomiarów. Mogą to być zarówno proste pomiary odcinkowe, od punktu do punktu, jak i w osiach przestrzeni roboczej (wysokość, szerokość, itp.), ale także kątów, średnic. Pozwalają też na wyliczenie pól powierzchni, objętości lub geometrycznego środka masy. Jeśli mamy dostęp do fizycznego obiektu, to część pomiarów z pewnością szybciej i wygodniej można wykonać za pomocą suwmiarki i nie musimy zaprzęgać do tej pracy skanera 3D (co więcej, może wręcz należałoby posłużyć się oryginalnym wyrobem, wystrzegając się możliwych błędów odwzorowania). Wiele pomiarów może jednak okazać się dość kłopotliwych do wykonania, jeśli nie posiadamy odpowiedniego narzędzia. Pozornie błahy, lecz częsty w archeologii problem tworzą chociażby duże naczynia, gdzie wykonanie pomiarów średnicy na poszczególnych wysokościach wymaga zastosowania dużego cyrkla kabłąkowego lub suwmiarki z długimi szczękami (antropometru), które nie stanowią zwykle podręcznego wyposażenia naszych pracowni. Dla pomiarów maksymalnych wydętości brzuśca można posłużyć się pewnymi sztuczkami, używając grzbietów książek lub pudełek, ale pomiar części nieco bardziej ukrytych, np. średnicy przewężenia szyjki, będzie już bardziej wymagający (ryc. 4b). Stosowanie prowizorycznych rozwiązań będzie oczywiście przekładało się na niedokładne i mało powtarzalne wyniki pomiarów. Jeszcze większych trudności nastręczają pomiary kątów, pól powierzchni czy objętości wyrobów, co w praktyce jest często bardzo trudne do obliczania i często zadowalamy się pomiarami szacunkowymi. Te z pozoru mało przydatne do badań cechy artefaktów zyskują uwagę na przykład badaczy epoki kamienia (Clarkson i Hiscock 2011). Praca na cyfrowych odwzorowaniach rzeczywistych obiektów pozwala zatem na uzyskanie unikatowych zestawów danych, a to z kolei może otwierać nowe możliwości analityczne.

Częstą potrzebą podczas przygotowywania dokumentacji zabytków jest wykonanie przekrojów. W manualnej praktyce wymaga to pewnej wprawy rysownika. Przekroje generowane na podstawie skanów 3D pozwalają sięgać w miejsca o utrudnionym dostępie (przy założeniu, że skaner pozwolił zadokumentować te przestrzenie), np. do wnętrz naczyń, otworów kamiennych toporków, w miejsca, w które trudno wprowadzić szablon profilowy czy inne pomocne w rysowaniu narzędzia (ryc. 4a, b). Serie równo rozmieszczonych przekrojów same w sobie mogą być dość sugestywnym w odbiorze sposobem śledzenia zmienności kształtów. Wygenerowane w oprogramowaniu do skanowania 3D przekroje pozwalają zwykle na zapis w różnych formatach plików, prostych do przeniesienia do programów graficznych lub CAD.

WZMACNIANIE CZYTELNOŚCI DETALU

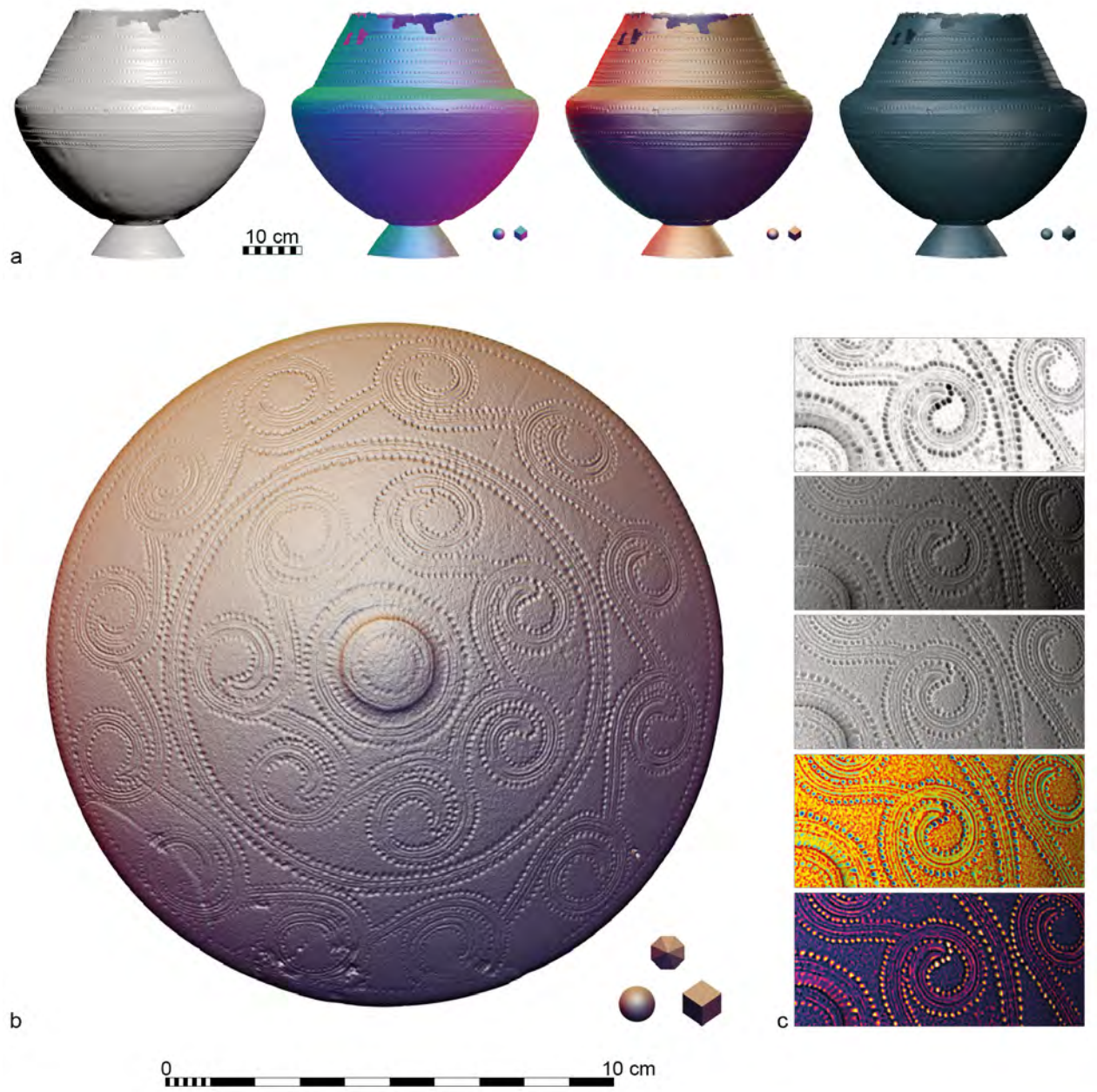
Zobrazowania trójwymiarowe są cyfrową reprezentacją punktów lub płaszczyzn, pozwalając na dość swobodne operowanie sposobem ich wyświetlania. Ten zaś nie zawsze musi dążyć do realizmu, a często wręcz



Ryc. 4. Przekroje i wymiarowanie; a – przekroje przez neolityczny toporek wykonane na podstawie modelu 3D, kontur w poszczególnych osiach oznaczono różnymi kolorami; b – przekrój przez brązowe naczynie oraz wykonane na podstawie modelu wymiarowanie. Wykonanie na fizycznym zabytku wymagałoby użycia dużego cyrkla kabłąkowego lub suwmiarki o długich szczękach

przeciwnie – tworząc za pomocą przypisanych barw, świateł i rzucanych przez nie cieni, mniej konwencjonalne sposoby obrazowania mające na celu podniesienie czytelności wybranych parametrów lub cech obiektów (ryc. 5). Na to, jak odczytujemy geometrię, kluczowe znaczenie ma światło. Zdjęcia lotnicze wykonane rano lub wieczorem, przy słońcu nisko nad horyzontem, znacznie lepiej podkreślają topografię krajobrazu niż te wykonane w południe. Podobnie narzędziem pracy epigrafika badającego hieroglify jest latarka służąca do podświetlania pod ostrym kątem plastycznych reliefów, co pozwala zwiększyć czytelność obserwowanej dekoracji. Również w środowisku cyfrowym manipulowanie położeniem wirtualnego źródła światła względem modelu obiektu pozwala podnieść czytelność plastycznej ornamentyki, inskrypcji i innych nieciągłości kształtu, np. wgnieceń czy pęknięć.

Czynnikiem nieco zaburzającym rozpoznawanie kształtów mogą być tekstury przedmiotów, kolory, ich zaciemnienia i rozjaśnienia, które działając niczym kamuflaż, skutecznie mylą nasz wzrok. W wielu sytuacjach, podczas zobrazowania kształtu, pomocne będzie już samo usunięcie informacji o kolorach i wyświetlenie modelu w postaci monochromatycznej (ryc. 6a). Wirtualne tworzywo może być bardziej matowe albo połyskliwe, zależnie od tego , które będzie bardziej pomocne w rozpoznaniu ukształtowania obiektu. Oświetlenie obiektu jednym źródłem światła spowoduje jednak, że struktury liniowe o przebiegu zgodnym z kierunkiem promieni staną się mniej czytelne. Nieco bardziej sugestywne może być zatem dodanie do sceny kilku źródeł oświetlenia, być może o nieco innym kolorze światła, co pozwoli podkreślić ukształtowanie poszczególnych partii powierzchni (ryc. 5a). Symulującym to zabiegiem może być przypisanie do obiektu materiału typu MatCap (*material capture*), który jest kompozycją barw, świateł, tworzonych przez nie refleksów oraz cieni, które wyliczane są dynamicznie na podstawie pozycji obiektu względem obserwatora (kamery). Zapewnia to większą spójność i schematyczność w prezentacji zestawień zabytków, a po chwilowym opatrzeniu pozwala na dość instynktowne rozpoznawanie geometrii zobrazowanych przedmiotów nawet na podstawie jednego rzutu. Uzupełnieniem tak przygotowanego zobrazowania może być pełniąca rolę legendy miniatura ukazująca przyjęty rozkład kolorów i świateł na prostych bryłach (widoczna na ryc. 5).



Ryc. 5. Wzmacnianie czytelności detalu – dokumentacja naczyń z brązu; a – różne warianty tekstury typu MatCap, odpowiedni obór kontrastowych kolorów pozwala na podniesienie czytelności niewielkich zmian w geometrii wyrobów, ornamentów, załamań powierzchni, zniszczeń; b-c – sposoby podniesienia czytelności subtelnego ornamentu wykonanego na powierzchni naczynia z brązu, w ramkach od góry: ambient occlusion, cieniowanie, radiance scaling, MSII w dwóch konwencjach kolorystycznych i różnym doborze parametrów

Wiele technik wyświetlania zamiast na emisji światła bazuje na wzajemnych relacjach sąsiednich płaszczyzn, np. analizując krzywiznę powierzchni, podkreślając zwiększoną lub zmniejszoną ekspozycję poszczególnych jej punktów na powierzchni o zadanym promieniu. Techniki te podkreślają krawędzie, wszelkie załamania powierzchni, są też dobrym narzędziem dla podnoszenia czytelności subtelnych ornamentów (ryc. 5c). W zależności od używanych pakietów oprogramowania dostępne będą różnego rodzaju algorytmy, np. *ambient occlusion*, *radiance scaling* czy *Multi-Scale Integral Invariants (MSII)* reprezentujące dość odmienne matematycznie podejścia do tego sposobu obrazowania (Carrero-Pazos, Vilas-Estévez i Vázquez-Martínez 2017; Hong i Soatto 2015; Mara 2012). Wyliczone w ten sposób wartości mogą

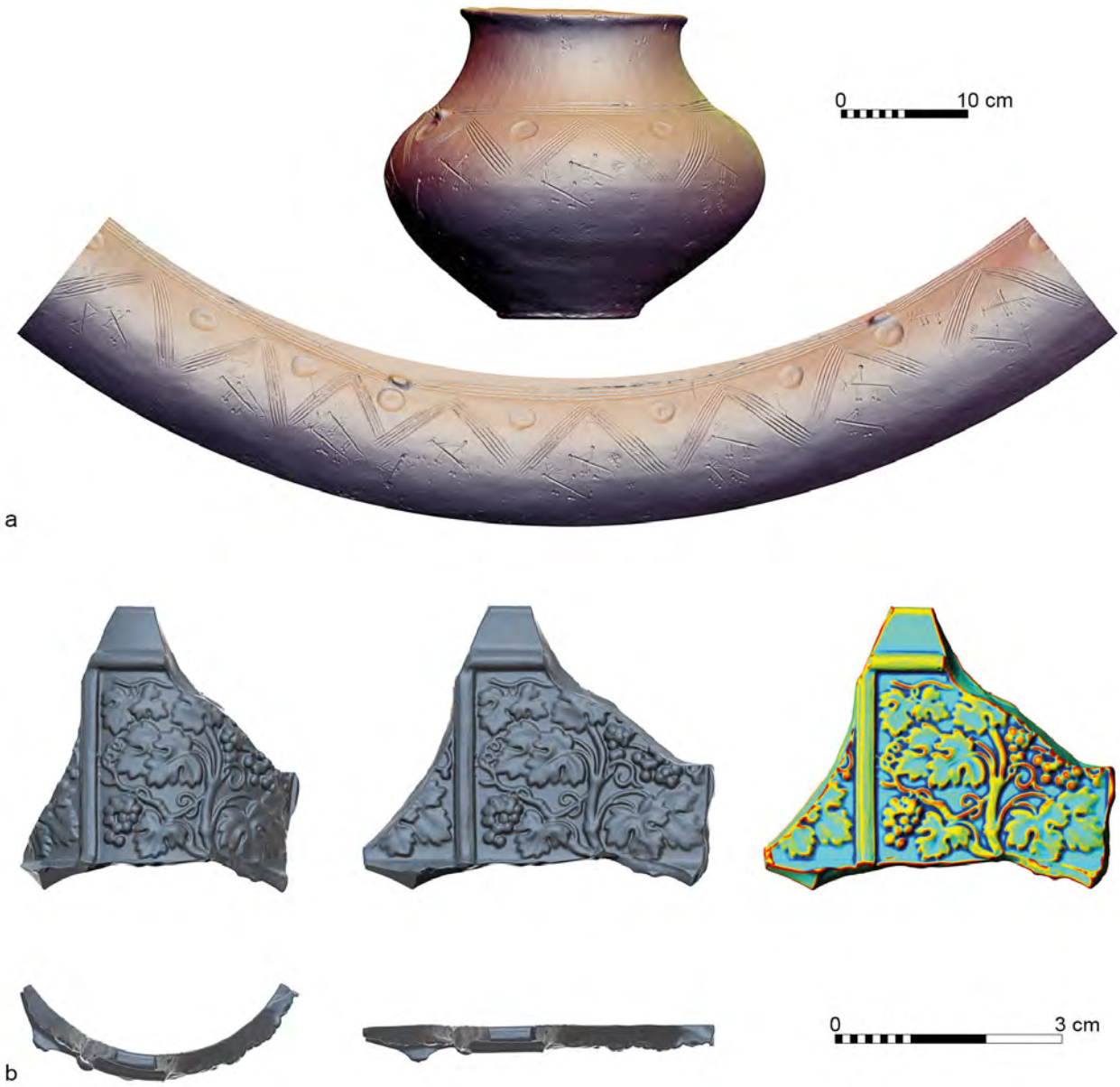
być przedstawione na powierzchni bryły w różnych konwencjach barwnych, mapując drobne szczegóły detalu, a uzyskane w ten sposób zobrazowania atrakcyjnym uzupełnieniem fotografii lub bazą do wykonania rysunków. Zestawienie poszczególnych technik przedstawiono na przykładzie drobnej i dość płytkiej dekoracji brzuśca brązowanego naczynia (Kaczmarek, Szczurek i Krzysiak 2021) – wizualizacje te podkreślają nie tylko wzór, ale też głębokość ornamentu (ryc. 5c).

Wraz z upowszechnianiem danych lotniczego skanowania laserowego (por. Banaszek, w tym tomie) zaadaptowano lub wypracowano wiele technik obrazowania przeznaczonych dla tego rodzaju danych 2.5D. W większości są to zobrazowania bazujące na podobnych założeniach do opisanych powyżej, np. cieniowane jednym lub wieloma źródłami światła, obrazujące nachylenie stoków względem obserwatora, podkreślające pozytywną lub negatywną ekspozycję form terenowych względem otoczenia, a także ich różne kompozycje (Hesse 2010; Verbovšek i in., 2019; Zakšek i in., 2011). Celem ich zastosowania może być odczytywanie słabo widocznych elementów topografii obiektów, np. zatartych napisów, rytów na elementach z kamienia, gdzie naturalny wzór surowca będzie miał wiele drobnych przebarwień i wtrąceń, na co nakładają się różnego rodzaju zacieki i zabrudzenia, ślady powstałe wskutek działania porastającej obiekty roślinności. Ich zastosowanie przedstawiono na przykładzie kamiennego epitafium zadokumentowanego za pomocą fotogrametrii (ryc. 6) – wykorzystanie różnych technik obrazowania stanowi dość sugestywną ilustrację detalu dekoracji, jak również wzmacnia czytelności inskrypcji.

Dla przedmiotów pokrytych dokolnym ornamentem, np. naczyń ceramicznych, dość naturalną potrzebą może być rozwinięcie wzoru na płaską powierzchnię, co w praktyce najczęściej wykonuje się za pomocą tradycyjnego rysunku, przykładając kalkę



Ryc. 6. Wzmacnianie czytelności detalu, dokumentacja nowożytnego epitafium; a – różne techniki wizualizacji, od lewej: model z barwnym odwzorowaniem topografii, jednobarwny model cieniowy, model z fotorealistyczną teksturą, w symulacji światła rozproszonego; b – różne techniki wizualizacji zaaplikowane dla danych 2.5D



Ryc. 7. Sposoby przedstawiania plastycznej ornamentyki; a – naczynie zdobione sceną narracyjną, poniżej jej pełne rozwinięcie po wykonaniu projekcji na powierzchnię ściętego stożka; b – motyw ornamentacyjny naczynia kamionkowego, od lewej: nieprzekształcona forma, model z rozprostowaną ścianką naczynia, ten sam model po zaaplikowaniu algorytmu MSII wzmacniającego czytelność reliefu

do ścianek przedmiotu. Wykonanie podobnego obrazu w oparciu o fotografie polega zwykle na ręcznym, wzajemnym spasowaniu serii ujęć, łącząc sąsiednie kadry poprzez naciąganie ich narożników, co może dostarczyć atrakcyjnych wizualnie rezultatów, lecz wobec mocnej ingerencji w źródłowe obrazy, tracimy możliwość oceny metrycznej dokładności takiego odwzorowania. Pewnym ułatwieniem może być zastosowanie modelu 3D, co nie tylko ułatwia proces, ale też czyni go powtarzalnym, opisując konkretnymi parametrami odwzorowania. Oczywiście reprojekcja okrągłej lub innej nieregularnej powierzchni na płaszczyznę tworzy szereg problemów transformacji, z czym spotykamy się chociażby, próbując przenieść elipsoidalną powierzchnię Ziemi na płaskie, cięte w prostokątne arkusze mapy. Dla zabytków zastosujemy najczęściej mniej wyszukane przekształcenia, rzutując powierzchnię obiektu na cylinder,

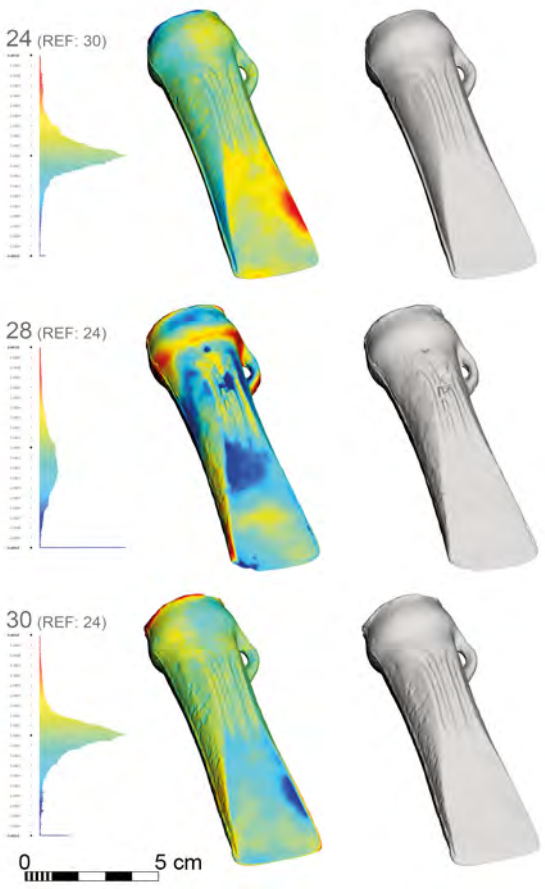
rozwijając jego powierzchnię boczną do postaci prostokąta lub na ścięty stożek, a następnie rozkładając jego ścianki w półkolisty wachlarz.

Dekoracja halsztackiego naczynia zdobionego narracyjną sceną polowania na jelenie przedstawiana była w literaturze za pomocą schematycznych rysunków poszczególnych części dekoracji (Kostrzewski 1970: 101) – skan 3D pozwala na wykonanie pełnego przerysu w skali, zachowując właściwe odległości pomiędzy motywami (ryc. 7a). Elementy zdobnicze nowożytnych naczyń często wykonywane były na płaskich matrycach, a plaster wyciśniętej w nich masy garncarskiej nakładano następnie na ścianki wytoczonego wcześniej wyrobu. Rozwinięcie ścianki trójwymiarowego modelu (nie zaś samej tekstury przedmiotu) zwiększa możliwości dalszego obrazowania subtelności wzoru, a także rekonstrukcję samej matrycy (ryc. 7b).

PORÓWNANIA KSZTAŁTÓW

Jednym z podstawowych zastosowań skanerów 3D w przemyśle jest porównywanie kształtu wyrobu końcowego z wzorcowym modelem CAD lub skanem fizycznego prototypu. Przeznaczone do tego celu narzędzia mogą znaleźć liczne zastosowania w analizach artefaktów. Jednym ze scenariuszy może być porównywanie skanów tego samego obiektu wykonanych w różnym czasie, by monitorować stan zachowania eksponowanej publicznie rzeźby lub innego rodzaju detalu, narażonych na działanie warunków atmosferycznych czy też potencjalne akty wandalizmu. Zestawienie dwóch modeli pozwala wówczas na wskazanie miejsc, w których nastąpiły odkształcenia lub ubytki. Mechanizm ten można zastosować także, porównując morfologię zabytków przed i po pracach restauratorskich.

Przykładem takiego zastosowania może być analiza porównawcza siekierek z epoki brązu (Baron i in., 2019: 73–85). Zabytki znaleziono w sąsiadujących depozytach, dopatrując się wykonania części z nich w jednej formie odlewniczej. Bazą do porównań były skany 3D zabytków (ryc. 8). Zabytki zorientowano w ten sam sposób, wykorzystując półautomatyczny mechanizm opierający się na manualnym wskazaniu tożsamych punktów na modelach (dla uzyskania możliwie najmniejszych dystansów dla możliwie największej liczby wierzchołków). Następnie wyliczono odległości pomiędzy powierzchniami modeli, a uzyskane wartości przypisano do wierzchołków modelu, obrazując za pomocą palety barw. Powstała w ten sposób



Ryc. 8. Porównanie geometrii siekierek brązowych. Zestawiono trzy siekierki wzajemnie, używając ich jako modeli referencyjnych (numery inwentarzowe zabytku referencyjnego i porównywanego). Rozkład kolorów wskazuje na odchylenia między modelami, a histogram rozkład tych wartości

szczegółowa mapa anomalii wskazała strefy bardziej lub mniej zgodne pomiędzy modelami, a histogram – ogólną zgodność kształtów.

Podstawowym ograniczeniem tego podejścia jest możliwość jednoczesnej analizy jedynie pary przedmiotów – referencyjnego i przyrównywanego. Dla serii zabytków pewnym rozwiązaniem może być wykorzystanie w roli wzorca uproszczonej lub uśrednionej bryły. W większości sytuacji powstanie jednak wątpliwość, czy obiekt wytworzony na podstawie syntezy kształtów z mocno przetworzonych przedmiotów byłby w jakimkolwiek stopniu miarodajny. Pewnych wskazówek w doborze par obiektów mogą dostarczyć analizy wykonane z użyciem narzędzi przeznaczonych do morfometrii geometrycznej (ang. *geometric morphometrics*) pozwalające na wstępie wytypować przedmioty podobne do siebie (Herzlinger i in., 2017; Herzlinger i Grosman 2018; Loftus III

2022). Należy mieć jednak na względzie, że poruszając się w obrębie zabytków archeologicznych, nawet zakładając powtarzalność procesu technologicznego, trudno oczekiwać istnienia precyzyjnych metrycznie kopii. Przedmioty te bowiem, nawet przy wykonywaniu za pomocą tej samej formy, wymagały dalszej obróbki zmieniającej ich kształt, mogły ulegać deformacjom podczas użytkowania lub depozycji.

UDOSTĘPNIANIE

W kontekście udostępniania produktów skanowania 3D lub rekonstrukcji fotogrametrycznych, w pierwszej kolejności nasuwa się termin „wirtualne muzeum". Promocja i udostępnianie różnego rodzaju kolekcji za pośrednictwem nowoczesnych mediów i metod obrazowania jest ważnym elementem zdobywania uwagi szerokich grup społeczeństwa i zapewne dość skutecznym narzędziem w edukacji. Wydaje się jednak, że z perspektywy badaczy, wirtualne kolekcje powinny być postrzegane jako wartość dodana, efekt uboczny innych działań, nie a zaś ich główny cel. Sytuacja z ostatnich lat, pandemia i będące jej efektem ograniczenia w przemieszczaniu się, a także w dostępie do różnego rodzaju zbiorów, pokazały wysoką wartość i przydatność cyfrowych repozytoriów, gromadzących różnego rodzaju dane. Choć model 3D rzeczywistego obiektu odzwierciedla jedynie niewielką część cech oryginału, dla wielu badaczy może być wystarczającym źródłem do prowadzenia studiów metrycznych, technologicznych lub porównawczych. W wielu częściach świata toczą się różnego rodzaju konflikty zbrojne, a repozytoria modeli zapewniałyby nie tylko dostęp do materiałów do badań, ale także stanowiłyby pewnego rodzaju zabezpieczenie, pozwalające na wykonanie ich reprodukcji w przypadku grabieży lub zniszczenia. Innym argumentem, który można przywołać, jest wysokie rozproszenie naukowców i ośrodków zajmujących się zbieżnymi tematami badawczymi, a udostępnianie zbiorów w formie cyfrowej pozwala na przeprowadzenie zdalnej konsultacji lub porównania z zabytkiem z odległego repozytorium.

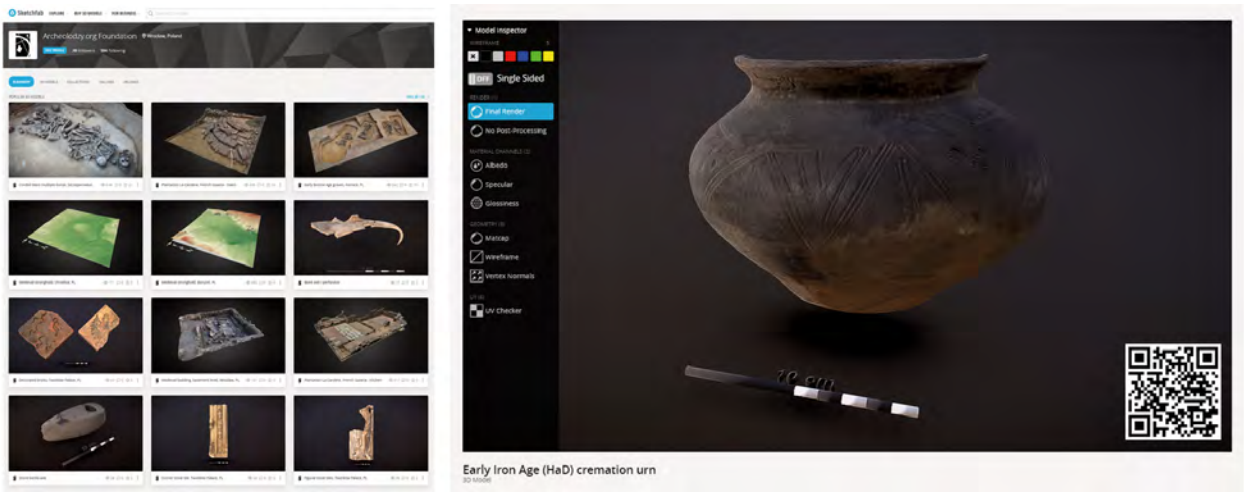
Udostępniając modele szerszym grupom odbiorców, warto skorzystać z platform oferujących dobrą jakość wyświetlania i kompatybilność z różnymi typami przeglądarek lub urządzeń. Dostępny jest szeroki wybór platform jak i serwisów komercyjnych, które można określić jako „YouTube dla modeli", np. Sketchfab (sketchfab.com, ryc. 9). Zamieszczone tam modele można udostępniać dalej, na stronach internetowych lub kanałach w portalach społecznościowych. Dla osób oczekujących większej niezależności dostępne są rozwiązania serwerowe dystrybuowane na licencji open-source np. *3D Heritage Online Presenter* (3dhop.net).

Warto odnotować, że w serwisie Sketchfab, będącym jedną z największych platform do udostępniania modeli w sieci, w kategorii *cultural heritage & history* znajduje się kilkaset tysięcy modeli 3D historycznych miejsc i muzealiów. Wiele placówek muzealnych i uniwersyteckich, a także projektów naukowych i dokumentacyjnych szeroko udostępnia w ten sposób zbiory, bogato opisując eksponaty, tworząc z nich powiązane tematycznie kolekcje. Bardzo często są to modele udostępniane z opcją pobrania plików i ponownego wykorzystania w ramach otwartej licencji, co może być inspiracją dla twórców różnego rodzaju treści internetowych, artystów, projektantów, twórców gier komputerowych. Polski udział w tym repozytorium jest stosunkowo mały i ma bardziej charakter portfolio twórców i dokumentalistów, niż planowego udostępniania zbiorów. Oficjalne kanały dużych polskich instytucji kultury zawierają zwykle kilka lub kilkanaście obiektów, często sprawiając wrażenie, że ich obecność w tej przestrzeni była raczej porzuconym eksperymentem. Z pewnością wirtualne zobrazowania nie zastąpią obcowania z autentycznym zabytkiem, nie są zatem konkurencją. Wobec poszukiwania społecznego zrozumienia naszych działań czy po prostu przykuwania uwagi do prowadzonych przez nas prac, wykorzystanie każdego, otwartego kanału promocji wydaje się być wskazane.

PODSUMOWANIE

Dokumentacja wykonywana za pomocą skanowania 3D i technik fotogrametrycznych ma wiele niepodważalnych zalet. To metody szybkie, dokładne, nieinwazyjne, dostarczające sugestywnych, atrakcyjnych wizualnie, unikatowych zestawów danych. Wydaje się, że cieszą się coraz większą popularnością wśród badaczy czy może raczej pewnych ich grup, gdyż wciąż w ich powszechnej aplikacji wyczuwalna jest bariera wynikająca z kosztów oraz wyczuwalnej niechęci do nazbyt „cyfrowych" rozwiązań.

W praktyce stosowania danych 3D wykorzystujemy najczęściej ich aspekt wizualny, co jest oczywiście jak najbardziej prawidłowym ich zastosowaniem, często jednak w pogoni za „nowatorskimi"



Ryc. 9. Udostępnianie. Po lewej: zrzut ekranu konta na jednej z największych platform przeznaczonych do udostępniania modeli 3D w sieci – Sketchfab, po prawej: przykładowy widok modelu po jego otwarciu, wywołanie panelu „inspektora" pozwala na zmianę trybu wyświetlania i analizę parametrów sceny, kod QR zawiera link do galerii

metodami obrazowania zapominamy o istnieniu rysunków lub fotografii, które w wielu sytuacjach mogą okazać się równie dobrym medium dla zilustrowania przedmiotu. Należy pamiętać, że nowe narzędzia zostały stworzone, aby usprawnić i ułatwić naszą pracę, a aplikowanie ich na wyrost, w imię „nowoczesnej metodyki" działań, może przynieść odwrotny skutek – wydłużenie procesu opracowania zbiorów, zwiększenie kosztów i ogólne zniechęcenie do ich stosowania. Pewien niedosyt może pozostawiać nieco zbyt hermetyczne podejście do użycia tego rodzaju danych. Zbyt często pozostają w zamkniętym, branżowym obiegu. Tymczasem modele trójwymiarowe są świetną bazą do tworzenia wszelkiego rodzaju multimediów, a to z kolei jest ważnym narzędziem popularyzacji nauki.

Należałoby podkreślić wysoki potencjał informacyjny danych trójwymiarowych, unikatowe zestawy danych stwarzają nowe możliwości interpretacyjne na wielu polach, m. in. badań porównawczych, analiz śladów użytkowych, symulacji i rekonstrukcji procesów technologicznych (Garbacz-Klempka i in., 2015; Garbacz-Klempka, Ścibior i Kwak 2016; Herzlinger i Grosman 2018; Loftus III 2022; Loftus III i Seguchi 2022; Molloy i in., 2016). Ich poprawna i świadoma aplikacja często wymaga bardzo specjalistycznej wiedzy i wykracza poza umiejętności „uzdolnionego komputerowo humanisty" – co z drugiej strony należałoby postrzegać jako ważne wyzwanie dla archeologii akademickiej i systemu kształcenia młodych adeptów tej dyscypliny.

LITERATURA

Aber, J.S., Marzolff, I., Ries, J., Aber, S.E.W. 2019. *Small-format aerial photography and UAS imagery: Principles, techniques and geoscience applications*. San Jose.

Apollonio, F.I., Fantini, F., Garagnani, S., Gaiani, M. 2021. A photogrammetry-based workflow for the accurate 3D construction and visualization of museums assets. *Remote Sensing* 13: 486.

Applbaum, N., Applbaum, Y.H. 2005. The use of medical computed tomography (CT) imaging in the study of ceramic and clay archaeological artifacts from the ancient Near East, (w:) M. Uda, G. Demortier, I. Nakai (red.), *X-rays for Archaeology*. Cham, New York, 231–245.

Baron, J., Maciejewski, M., Jarysz, R., Kuźbik, R., Łaciak, D., Łucejko, J.J., Mackiewicz, M., Miazga, B., Nowak, K., Sych, D., Markiewicz, J., Karmin. *Fenomen powtarzalności/Phenomenon of repetition. Deposits from Karmin*. Wrocław.

Bedford, J. 2017. *Photogrammetric Applications for Cultural Heritage: Guidance for Good Practice*. Swindon.

Boardman, C, Bryan, P. 2018. *3D laser scanning for heritage: Advice and guidance on the use of laser scanning in archaeology and architecture*. Swindon.

Carrero-Pazos, M., Vilas-Estévez, B., Vázquez-Martínez, A. 2017. Making Visible the Invisible: Low Cost Methodologies for the Study of Ancient Carvings, (w:) V. Mayoral Herrera, C. Parcero-Oubiña, P. Fábrega-Álvarez (red.) *Archaeology*

and Geomatics. Harvesting the benefits of 10 years training in the Iberian Peninsula (2006–2015). Leiden, 73–89.

Clarkson, C., Hiscock, P. 2011. Estimating original flake mass from 3D scans of platform area. *Journal of Archaeological Science* 38 (5): 1062–1068.

De Reu, J., Plets, G., Verhoeven, G., De Smedt, P., Bats, M., Cherretté, B., De Maeyer, W., Deconynck, J., Herreman, D., Laloo, P. 2013. Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological heritage. *Journal of Archaeological Science* 40 (2): 1108–1121.

Duffy, S. M., Goskar, T., Backhouse, P., Kennedy, H. 2018. *Multilight Imaging Highlight-Reflectance Transformation Imaging (H-RTI) for Cultural Heritage*. Swindon.

Graeme, E., Martinez, K., Malzbender, T. 2010. Archaeological applications of polynomial texture mapping: analysis, conservation and representation. *Journal of Archaeological Science* 37 (8): 2040–2050.

Garbacz-Klempka, A., Ścibior, D., Kwak, Z. 2016. Badania i wizualizacja technologii odlewniczej w epoce brązu na podstawie ceramicznych i kamiennych form z Legnicy z ul. Spokojnej, (w:) K. Nowak, T. Stolarczyk (red.), *Metalurdzy znad Kaczawy. Cmentarzysko ciałopalne z epoki brązu odkryte w Legnicy przy ul. Spokojnej*. Legnica, 109–128.

Garbacz-Klempka, A., Rzadkosz, S., Stolarczyk, S., Kozana, J., Piekoś, M., Kwak, Z., Tenerowicz, M. 2015. Computer modeling for the visualization and geometric reconstruction of artefacts from the casting workshop in Grzybiany. *Metallurgy and Foundry Engineering* 41 (1): 45–56.

Grosman, L., Smikt, O., Smilansky, U. 2008. On the Application of 3-D Scanning Technology for the Documentation and Typology of Lithic Artifacts. *Journal of Archaeological Science* 35 (12): 3101–10.

Hałuszko, A., Kadej, M., Gmyrek, G., Guziński, M. 2022. Let's Make a Mess, Maybe No One Will Notice. The Impact of Bioturbation Activity on the Urn Fill Condition. *PLOS ONE* 17 (9): e0274068.

Herzlinger, G., Goren-Inbar, N., Grosman, L. 2017. A New Method for 3D Geometric Morphometric Shape Analysis: The Case Study of Handaxe Knapping Skill. *Journal of Archaeological Science: Reports* 14: 163–73.

Herzlinger, G., Grosman, L. 2018. AGMT3-D: A software for 3-D landmarks-based geometric morphometric shape analysis of archaeological artifacts, PLOS ONE 13 (11): e0207890.

Hesse, R. 2010. LiDAR-derived Local Relief Models–a new tool for archaeological prospection. *Archaeological Prospection* 17 (2): 67–72.

Hong, B.-W., Soatto, S. 2015. Shape Matching Using Multiscale Integral Invariants. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 37 (1): 151–60.

Hughes, S. 2011. *CT scanning in archaeology*. Rijeka, 57–70.

Jamil, O., Brennan, AM. 2025. Immersive heritage through Gaussian Splatting: a new visual aesthetic for reality capture. *Frontiers in Computer Science* 7:151560

Kaczmarek, M., Szczurek, G., Krzysiak, A., 2021. *Kaliska I. Skarb przedmiotów metalowych z późnej epoki brązu na Pomorzu*. Poznań.

Kostrzewski, J. 1970. *Pradzieje Śląska*. Wrocław.

Lee, G., McGlone J. C. 2013. *Manual of Photogrammetry*. Bethesda.

Lee, J., Park, S., Min, J., Choi, J. 2025. 3D Gaussian Splatting for Enhanced Documentation of Cultural Artifacts. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* X-M-2–2025: 215–222.

Loftus III, J. F. 2022. Reexamining Ceramic Standardization During Agricultural Transition: A Geometric Morphometric Investigation of Initial – Early Yayoi Earthenware, Japan. *Open Archaeology* 8 (1): 1249–1268.

Loftus III, J. F., Seguchi, N. 2022. Visualizing Variability in Ceramic Micro-Curvature though Novel 3D Morphometric Mapping and Sliced Segmental Extraction. *Journal of Computer Applications in Archaeology* 5 (1): 57–77.

Mara, H. 2012. *Multi-scale integral invariants for robust character extraction from irregular polygon mesh data*. Rozprawa doktorska, dokument elektroniczny: https://archiv.ub.uni-heidelberg.de/volltextserver/13890/

Miles, J., Mavrogordato, M., Sinclair, I., Hinton, D., Boardman, R., Earl, G. 2016. The Use of Computed Tomography for the Study of Archaeological Coins. *Journal of Archaeological Science: Reports* 6: 35–41.

Molloy, B., Wiśniewski, M., Lynam, F., O'Neill, B., O'Sullivan, A., Peatfield, A. 2016. Tracing Edges: A Consideration of the Applications of 3D Modelling for Metalwork Wear Analysis on Bronze Age Bladed Artefacts. *Journal of Archaeological Science* 76: 79–87.

Mytum, H., Peterson, J.R. 2018. The Application of Reflectance Transformation Imaging (RTI) in Historical Archaeology. *Historical Archaeology* 52 (2): 489–503.

Opitz, R. S. 2013. An overview of airborne and terrestrial laser scanning in archaeology, (w:) D. Cowley, R. S. Opitz. (red.), *Interpreting archaeological topography: Airborne laser scanning, 3D data and ground observation*. Oxbow, 13–31.

Remondino, F. 2013. Worth a thousand words-Photogrammetry for archaeological 3D surveying, , (w:) D. Cowley, R. S. Opitz. (red.), *Interpreting archaeological topography: Airborne laser scanning, 3D data and ground observation*. Oxbow, 115–122.

Seguchi, N., Dudzik, B. 2019. *3D data acquisition for bioarchaeology, forensic anthropology, and archaeology*. London, San Diego.

Verbovšek, T., Popit, T., Kokalj, Ž. 2019. VAT Method for Visualization of Mass Movement Features: An Alternative to Hillshaded DEM. *Remote Sensing* 11 (24): 2946.

Verhoeven, G. 2011. Taking Computer Vision Aloft - Archaeological Three-Dimensional Reconstructions from Aerial Photographs with Photoscan. *Archaeological Prospection* 18 (1): 67–73.

Waltenberger, L., Rebay-Salisbury, K., Mitteroecker, P. 2021. Three-dimensional Surface Scanning Methods in Osteology: A Topographical and Geometric Morphometric Comparison. *American Journal of Physical Anthropology* 174 (4): 846–58.

Wolf, P.R., Dewitt, B.A., Wilkinson, B.E. 2000. *Elements of photogrammetry: with applications in GIS*. New York.

Zakšek, K., Oštir, K., Kokalj, Ž. 2011. Sky-view factor as a relief visualization technique. *Remote sensing* 3 (2): 398–415.




KEYENCE
VHX

Wybrane narzędzia analizy chemicznej stosowane w archeologii

Jędrzej Proch, Przemysław Niedzielski

WPROWADZENIE

Zastosowanie najnowocześniejszych technik analizy chemicznej umożliwia nowe spojrzenie na badane obiekty. Biorąc pod uwagę, że obiekty dziedzictwa kulturowego mogą składać się z różnych materiałów, odpowiednio dobrana technika analityczna powinna umożliwiać jednoczesne oznaczanie pierwiastków o różnym stężeniu w różnorodnych matrycach. Do najczęściej stosowanych w archeologii technik analitycznych zaliczamy: przenośną fluorescencję rentgenowską (ang. *portable X-ray fluorescence*, pXRF), laserowe odparowanie próbki z detekcją w spektrometrii mas z jonizacją w plazmie sprzężonej indukcyjnie (ang. *laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry,* LA–ICP MS), spektrometrię rozpadu indukowanego laserem (ang. *laser-induced breakdown spectroscopy*, LIBS), skaningową mikroskopię elektronową ze spektrometrią dyspersji energii rentgenowskiej (ang. *scanning electrone microscopy – energy dispersive spectroscopy*, SEM–EDS) oraz spektroskopię podczerwieni z transformacją fourierowską (ang. *Fourier transform infrared spectroscopy*, FTIR). W zależności od wybranej metody obrazowania, możemy przeprowadzać badania archeologiczne w różnej skali (od kilku milimetrów do dziesiątych części mikrometra). Podczas doboru optymalnej techniki instrumentalnej należy wziąć pod uwagę jej zalety i przeznaczenie. Należy pamiętać, że wybór metody badawczej musi być podyktowany nie tylko specyfiką badanego materiału, ale również jego szeroko pojętą wartością i możliwością naruszenia jego stanu. Niemniej każde z dostępnych narzędzi posiada pewne ograniczenia wynikające np. ze sposobu rejestrowania danych. Dlatego wszystkie niedoskonałości posiadanego narzędzia muszą być uwzględnione podczas ustalania toku analitycznego, badania obiektu, jak również analizy danych, gdyż mają one wpływ na końcowe wnioski.

Każda technika analityczna wymaga odpowiedniej kalibracji (wzorcowania), które może być wykonywane na kilka sposobów. Najbardziej precyzyjna

DOI: 10.64158/vuxudzpbl4

Tabela 1. Charakterystyka wybranych narzędzi analizy chemicznej stosowanych w archeologii ze względu na ich inwazyjność, rozdzielczość i właściwości

Technika analityczna	Inwazyjność	Rozdzielczość	Właściwości
Fluorescencja rentgenowska (XRF)	nieniszcząca	kilka milimetrów	• oznaczenie z różnych warstw materiałów (tj. pierwiastków o niższej masie atomowej z powierzchni, a o większej spod powierzchni) • głębokość penetracji promieniowania X zależna od gęstości materiału (zalecane do materiałów o wyższej gęstości) oraz parametrów lamp (napięcie, natężenie, materiał anody) • w przypadku μXRF: możliwość dwuwymiarowego mapowania zawartości pierwiastków
Mikrofluorescencja rentgenowska (μXRF)		od kilkunastu do kilkuset mikrometrów	
Spektrometria mas z jonizacją w plazmie sprzężonej indukcyjnie z układem laserowego odparowania próbki (LA–ICP MS)	mikroniszcząca	od kilkunastu do kilkuset mikrometrów	• zostawia niewielki krater lub wzór na analizowanym przedmiocie (zazwyczaj niewidoczny gołym okiem • stopień inwazyjności zależny od parametrów operacyjnych lasera (energii, częstotliwości, średnicy wiązki) oraz właściwości materiału (fizycznych i chemicznych) • możliwością profilowania głębokości czy dwuwymiarowego mapowania zawartości pierwiastków
Spektrometria rozpadu indukowanego laserem (LIBS)			
Skaningowa mikroskopia elektronowa ze spektrometrią z dyspersją energii (SEM–EDS)	nieniszcząca lub mikroniszcząca*	od kilku do dziesiątych części mikrometra**	• głębokość penetracji elektronów od gęstości materiału oraz parametrów wiązki (zwykle 0,02–1,0 μm) • granica wykrywalności zależna od stanu powierzchni materiału • możliwość dwuwymiarowego mapowania zawartości pierwiastków
Spektroskopia w podczerwieni z transformacją Fouriera (FTIR)	nieniszcząca	kilka milimetrów	• analiza jakościowa każdego typu materiału (z wyłączeniem stopów metali), niezależnie od stanu skupienia • definiowanie odkształceń wibracyjnych wiązań chemicznych na powierzchni materiałów • możliwość identyfikacji minerałów i tworzyw syntetycznych

* zbyt długa ekspozycja w strumieniu elektronów może doprowadzić do uszkodzenia materiału

** dotyczy badań z zakresu archeometrii

jest kalibracja przy użyciu wzorców zewnętrznych, a przypadku wszystkich wyżej wymienionych technik (bazujących na analizie powierzchni próbki), są to certyfikowane materiały odniesienia (ang. *certified reference materials*, CRM). Taki typ kalibracji jest wykonywany przez operatora każdorazowo przed rozpoczęciem pracy, co pozwala na analizę ilościową. W ten sposób kalibrowany jest układ LA–ICP MS. Innym sposobem jest korzystanie z gotowych kalibracji, przygotowywanych przez producentów aparatury (również przy użyciu certyfikowanych materiałów odniesienia). Ten sposób kalibrowania jest stosowany w przypadku technik XRF, LIBS, SEM–EDS. Tego typu rozwiązania są wygodne, jednak mogą być niewystarczające. W tym przypadku kluczowymi atrybutami operatora jest wiedza z zakresu chemii analitycznej oraz doświadczenie w postępowaniu zarówno z wybraną techniką instrumentalną, jak również badaną matrycą (tj. wszystkimi składnikami próbki analitycznej z wyłączeniem analitu, czyli tego składnika, którego zawartość jest oznaczana). Dlatego w przypadku kalibracji producentów warto kontrolować generowane wyniki poprzez analizę materiałów odniesienia o matrycy zbliżonej do badanej próbki. Należy też wspomnieć o kalibracji bezwzorcowej (ang. *calibration-free,* CF), która jest oparta na algorytmach matematycznych, jednak to jest rozwiązanie dostępne dla techniki LIBS.

W poniższym rozdziale zebrano najpopularniejsze narzędzia analityczne stosowane w analizie składu pierwiastkowego próbek archeologicznych (uporządkowane według rosnącej rozdzielczości), w tym narzędzia służące do analizy struktury i degradacji powierzchni materiałów.



Ryc. 1. Podręczny (ang. handheld) spektrometr fluorescencji rentgenowskiej (hhXRF), Bruker Tracer 5g (USA) w pracowni laboratoryjnej Interdyscyplinarnej Grupy Badawczej Archeometria na Wydziale Archeologii UAM. Fot. J. Proch

FLUORESCENCJA RENTGENOWSKA (XRF)

Fluorescencja rentgenowska (ang. *X–ray fluorescence*, XRF) to zjawisko, polegające na wtórnej emisji promieniowania rentgenowskiego z materii. Pod wpływem wzbudzenia wysokoenergetycznym promieniowaniem X atomy każdego pierwiastka zawartego w próbce emitują charakterystyczne dla siebie widmo fotonów. Pierwiastki w badanym obiekcie zostają zidentyfikowane poprzez zliczenie wszystkich fotonów każdej emitowanej energii.

Podstawowy spektrometr XRF składa się ze źródła wzbudzenia, przyrządów optycznych do prowadzenia i skupienia wiązki promieniowania rentgenowskiego na próbce oraz układu detekcyjnego do rejestracji widma fluorescencyjnego. W zależności od rodzaju detektora, wyróżnia się dwie grupy spektrometrów XRF: z dyspersją długości fali (ang. *wavelength dyspersive X–ray fluorescence*, WDXRF) oraz z dyspersją energii (ang. *energy dyspersive X–ray fluorescence*, EDXRF). WDXRF wykorzystuje dyfrakcję na krysztale, zapewniając wysoką rozdzielczość energii i czułość, zaś EDXRF wykorzystuje detektory, zdolne do rozróżnienia energii promieniowania rentgenowskiego do nich docierającego (Carvalho i in., 2018).

Przewagą techniki EDXRF nad WDXRF jest jej zdolność do miniaturyzacji (Kozak i in., 2021) oraz bezpośredniej analizy materiału na miejscu (*in situ*) (Guerra i in., 2015). Osiągnięcia w dziedzinie mikroelektroniki i zaawansowanych układów scalonych pomogły radykalnie zmniejszyć rozmiar specjalistycznych komponentów. Takim przykładem jest zastosowanie technologii generowania triboluminescencyjnego promieniowania rentgenowskiego, które wyeliminowało zasilanie wysokonapięciowe, umożliwiając redukcję kosztów i rozmiarów na skalę niemożliwą w przypadku technologii konwencjonalnej (Camara i in., 2008). Nowe osiągnięcia na polu spektrometrii XRF umożliwiły wyprodukowanie urządzeń przenośnych (ang. *portable*, pXRF) oraz podręcznych (ang. *handheld*, hhXRF), które są łatwe do zabrania w teren i nie wymagają warunków laboratoryjnych. W związku z tym, analizy prowadzone przy użyciu wyżej wymienionych technik, można podzielić na trzy grupy: (1) *in situ* (bez pobierania i przygotowania próbki), (2) w terenie (ang. *in field*) (po pobraniu próbki, np. analiza przez plastikowe torby) oraz (3) *ex situ* (przygotowanie laboratoryjne) (Williams i in., 2020).

Należy zaznaczyć, że spektrometry XRF dostarczają dane analityczne dobrej jakości oraz eliminują dłuższy czas przetwarzania danych z laboratorium, gdy posługuje się nimi wykwalifikowany personel (Balaram 2017). Wydajność pXRF, w tym zdolność do korygowania interferencji spektralnych znacznie się różni dla poszczególnych pierwiastków w układzie okresowym. Zakłócenia matrycowe i widmowe silnie wpływają na dane, których nie można całkowicie skorygować za pomocą algorytmów kalibracji (Gallhofer i Lottermoser 2018). Jednak zdolność pXRF oraz hhXRF (ryc. 1) do szybkiego gromadzenia danych o dużej liczbie próbek i powtórnych analiz, ułatwia ich analizę statystyczną. Wykazano, że wyniki uzyskane dla próbek geologicznych (glina, gleba, osady i skały macierzyste) przez pXRF w terenie, wypadały korzystnie w porównaniu z wynikami uzyskanymi za pomocą konwencjonalnych technik laboratoryjnych (opartych na ekstrakcji wodą królewską). Instrumenty te mogą być wykorzystywane do zadań związanych z selekcją lokalizacji i próbek, dynamicznymi planami pobierania próbek (opartymi na pomiarach terenowych), mapowaniem stanowisk oraz określaniem względnej zawartości pierwiastków (Lemière 2018). Więcej informacji o zastosowaniu ręcznych spektrometrów XRF znaleźć można w pierwszym tomie *Mikroprzeszłości* (Krueger 2021: 443–449).

Chociaż narzędziem konkurencyjnym na polu miniaturyzacji zaczyna być spektrometria rozpadu indukowanego laserem (ang. *laser–induced breakdown spectrometry*, LIBS), niewątpliwą zaletą XRF jest nieniszczący charakter analizy (w przeciwieństwie do LIBS, która zostawia niewielki krater lub wzór na analizowanym obiekcie). Z drugiej strony, w porównaniu z laserowymi układami wprowadzenia próbki, ograniczeniem przenośnych EDXRF jest znacznie większy rozmiar wiązki (tzw. plamki).

MIKROFLUORESCENCJA RENTGENOWSKA (μXRF)

Poprzez zmniejszenie średnicy wiązki promieniowania X, powstała spektrometria fluorescencji mikrorentgenowskiej (ang. *micro X–ray fluorescence*, μXRF). W celu analizy określonego obszaru obiektu, w systemach stacjonarnych przeznaczonych do mikroanalizy, spotykane są obecnie mono– i polikapilary (Jiang i in., 2020), a średnica wiązki promieniowania rentgenowskiego może sięgać do dziesiątek mikrometrów (Hampai i in., 2010). Korzystając z mikrowiązki promieniowania X, można przeprowadzić analizę punktową czy wykonać skany (liniowe lub dwuwymiarowe, tzw. mapy), w celu

stworzenia obrazu mikrochemicznego o wysokiej rozdzielczości (Romaro i in., 2014). Połączenie dwóch polikapilar, skupiającej wiązkę wpadającą na próbkę i zbierającej wychodzące fotony promieniowania rentgenowskiego, pozwala na pomiary konfokalne (Mazel i in., 2011), czyli określanie objętości badanej próbki (Sun i in., 2019).

Obrazowanie pierwiastkowe i mapowanie chemiczne μXRF stało się obiecującym narzędziem w badaniu różnych materiałów (Nikonow i Rammlmair 2016). Zastosowano je w badaniach ceramiki archeologicznej (Papadopoulou i in., 2006; Zeming i in., 2019), obiektów metalowych (Capobianco i in,. 2019), jak również studiując obrazy Vincenta van Gogha (Alfeld i in., 2011) czy Rafaela Santi (Ruberto i in., 2016). Ostatnio dostarczono również dowodów na wczesną metalurgię miedzi w Skandynawii (Gebauer i in., 2020), a także przeprowadzono analizę pierwiastkową powierzchni starożytnych monet (Marussi i in., 2023). W przypadku archeologicznych materiałów biologicznych, mapowanie pierwiastkowe za pomocą μXRF zostało wykorzystane m. in. badaniach rozmieszczenia ołowiu w kościach i zębach (Dias i in., 2018). Poza tym badano również ekshumowane szczątki ludzkie (Guimarães i in., 2016) czy skamieliny dinozaurów (Jinhua Li i in., 2020). Tworzenie map pierwiastkowych zębów stało się również pomocnym narzędziem do oceny wpływu środków wybielających na szkliwo (Silveira i in., 2015), a także pośrednio do określania mineralogii i tekstur mineralogicznych, co zostało przedstawione na przykładzie mapowania próbek rdzeni piaskowca (Motanated 2022) czy drobnoziarnistych skał osadowych (Barker i in., 2021). Utworzono również mapy pierwiastkowe próbek z okolicy kopalni złota (Shaltout i in., 2020).

Wyniki mapowania μXRF są zestawiane z wynikami otrzymanymi za pomocą innych narzędzi, m. in. ręczny lub podręczny XRF w badaniach certyfikowanych materiałów odniesienia (de Winter i in., 2017) czy LIBS oraz spektrometrii mas z jonizacją w plazmie sprzężonej indukcyjnie poprzedzonej układem laserowego odparowania próbki (ang. *laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry*, LA–ICP MS) w badaniach szkła (Naes i in., 2008; Martinez–Lopez i in., 2022). Taka strategia pozwala osiągnąć znaczenie dokładniejszy obraz pierwiastkowy ze względu na zalety i ograniczenia każdej wyżej wymienionej techniki.

SPEKTROMETRIA MAS Z JONIZACJĄ W PLAZMIE SPRZĘŻONEJ INDUKCYJNIE Z UKŁADEM LASEROWEGO ODPAROWANIA PRÓBKI (LA–ICP MS)

Spektrometria mas z jonizacją w plazmie sprzężonej indukcyjnie (ang. *inductively coupled plasma mass spectrometry*, ICP MS), ze względu na bardzo wysoką czułość, niskie granice wykrywalności i możliwość analizowania małych objętości próbek, używana jest do oznaczania pierwiastków w zakresie śladowym. Pierwiastki oznaczane są na podstawie stosunku masy atomowej do ładunku utworzonego jonu (*m/z*). Próbka w postaci roztworu pompowana przez rozpylacz, gdzie pod wpływem szybkiego przepływu gazu (argon) przeprowadzana jest w aerozol i trafia do komory mgielnej. Tam oddzielany jest nadmiar roztworu, żeby do palnika ICP trafiły wyłącznie małe krople cieczy. Palnik składa się z trzech rurek (zwykle kwarcowych), ułożonych koncentrycznie, między którymi przepływa argon. Szczyt palnika otacza miedziana cewka podłączona do generatora energii o częstotliwości fal radiowych (MHz). Prąd oscylujący w cewce powoduje powstanie pola elektromagnetycznego i prowadzi do jonizacji argonu, czyli wytworzenia wysokotemperaturowej plazmy (osiągającej nawet 10000 K). Próbka, wprowadzana wewnętrzną rurką palnika, ulega natychmiastowemu odparowaniu, zatomizowaniu i zjonizowaniu. Utworzone jony przepuszczane są dalej przez układ dwóch stożków (próbnika i zgarniacza) pod wpływem różnicy ciśnień, gdyż jonizacja odbywa się w ciśnieniu atmosferycznym, a w spektrometrze panuje wysoka próżnia. Analizę utrudniają interferencje pochodzące od jonów izobarycznych (izotopy innego pierwiastka o tej samej masie), jonów podwójnie naładowanych i wieloatomowych (np. masa jonu $^{40}Ar^{16}O$ jest taka sama jak ^{56}Fe a jonu $^{40}Ar^{35}Cl$ jak ^{75}As). Takie zakłócenia można minimalizować przy pomocy komór kolizyjnych lub reakcyjnych, gdzie neutralizowane są jony interferujące w wyniku zderzeń lub reakcji z odpowiednim gazem (np. hel, wodór, amoniak). Końcowy etap to przejście jonów przez analizator mas i trafienie do detektora. Jednym z powszechnie stosowanych analizatorów mas jest kwadrupol, zbudowany z czterech prętów metalowych ułożonych symetrycznie i równolegle. Ten analizator mas pozwala na swobodny przepływ jonów o określonym stosunku masy do ładunku (*m/z*), dzięki przyłożeniu prądu o odpowiedniej częstotliwości i napięciu do naprzeciwległych par elektrod. Jony wychodzące z analizatora trafiają do detektora, wywołując emisję wtórnych elektronów.



Ryc. 2. Spektrometria mas z jonizacją w plazmie sprzężonej indukcyjnie (PlasmaQuant MS Q, Analytik Jena, Germany) poprzedzona układem laserowego odparowania próbki (J200 LA, Applied Spectra, USA) w laboratorium grupy badawczej Analizy Specjacyjnej i Technik Łączonych w Zakładzie Chemii Analitycznej Wydziału Chemii UAM. Fot. J. Proch

Sygnał jest wzmacniany i rejestrowany jako liczba zliczeń na sekundę (ang. *counts per second*, cps).

Spektrometria mas z jonizacją w plazmie sprzężonej indukcyjnie (ICP MS) wymaga, aby próbki były w postaci rozpuszczonej, co niewątpliwie wydłuża proces analityczny. Chcąc uzyskać informację o całkowitej zawartości pierwiastków w próbkach pochodzenia geologicznego, niezbędne jest roztworzenie w kwasie fluorowodorowym (HF). Niestety praca z tym odczynnikiem stanowi zagrożenie dla człowieka. Ponadto wprowadzenie roztworu HF do palnika ICP wymaga osobnego układu wprowadzenia próbki (pozbawionego elementów szklanych) lub wstępnej neutralizacji kwasem borowym, która wyklucza spektrometrię mas jako sposób detekcji (ze względu na jego wysokie stężenie). Co więcej, uzyskanie zadowalającej szybkości roztwarzania próbek jest bardzo trudne w przypadku skał zawierających wybrane minerały. W kontekście badań obiektów i przedmiotów archeologicznych analizy takie wymagają całkowitego zniszczenia części próbki, co nie zawsze jest możliwe.

Starając się sprostać wszystkim powyższym ograniczeniom, spektrometria mas z jonizacją w plazmie sprzężonej indukcyjnie została poprzedzona układem laserowego odparowania próbki (ang. *laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry*, LA–ICP MS). Próbkę do analizy umieszcza się w zamkniętej komorze (zwanej komorą ablacyjną). Komora jest zwykle ruchoma (osie x, y, z), a próbka jest obserwowana pod mikroskopem w celu ustawienia odpowiedniej pozycji. Wiązka lasera jest ogniskowana na powierzchni próbki przez przezroczyste okienko (typowa średnica skupionej wiązki od 10 do 200 μm). Strumień gazu nośnego (argonu lub helu) przenosi odparowany laserem materiał z komory do palnika ICP. Tam wytworzone laserem cząstki są rozkładane w plazmie oraz

zjonizowane. Następnie wytworzone jony pierwiastków są rozdzielane i mierzone zgodnie z zastosowanym analizatorem masy, tj. kwadrupolem (ryc. 2), analizatorem sektorowym (ang. *sector field*, SF) lub analizatorem czasu przelotu (ang. *time–of–flight*, TOF) (Giussani i in., 2009). Gray (1985) jako pierwszy zademonstrował potencjał tej techniki do analizy ciał stałych bezpośrednio przy użyciu lasera rubinowego w celu odparowania (ablacji) próbki do kwadrupolowego ICP MS.

Obecnie technika ta stosowana jest jako rutynowa dla bezpośredniej analizy ciał stałych z możliwością wykonywania sondowania *in situ* poszczególnych minerałów, w tym wtrąceń płynnych i stopionych. Umożliwia ona wykonywanie unikalnych analiz pierwiastkowych próbek stałych m. in. z możliwością profilowania głębokości czy dwuwymiarowego mapowania zawartości pierwiastków. Głównym ograniczeniem LA–ICP MS jest konieczność kalibracji tej techniki w oparciu o wzorce zewnętrzne (np. certyfikowane materiały odniesienia). Takie podejście daje najdokładniejsze wyniki, chociaż dostępność wzorców jest ograniczona do tylko wybranych typów materiałów. Ponadto wysoka homogeniczność certyfikowanych materiałów odniesienia: szkła (np. NIST SRM 610-616) (ryc. 3) lub stopów (np. NIST SRM 1110–1115), przy równoczesnej niskiej homogeniczności badanego obiektu, powoduje, że termin „analiza ilościowa" nie powinien być nadużywany.

LA–ICP MS jest obecnie powszechnie wykorzystywanym narzędziem w badaniach archeologicznych. Pod koniec lat 90. XX wieku zbadano obsydiany z basenu Morza Śródziemnego w celu scharakteryzowania ich źródła pochodzenia i szlaków dystrybucji (Gratuze 1999), a później (2001) analizowano już wiele różnych materiałów archeologicznych, takich jak obsydiany, szkła, szkliwa i krzemienie (Gratuze i in., 2001). Najnowsze badania charakterystyki chemicznej oraz źródła obsydianu przeprowadzono również przy asyście technik XRF, m. in. w Argentynie i Chile (De Francesco i in., 2018), Korei (Chang i Kim 2018), Kanadzie (McMillan i in., 2019), Japonii (Suda i in., 2021) oraz Iranie (Orange i in., 2021). W przypadku artefaktów archeologicznych, wykonywanych z krzemieni warto wspomnieć o badaniach źródeł surowca i jego transportu w brytyjskiej kulturze magdaleńskiej. Ustalono, że krzemienie transportowano do 200 km (Pettitt i in., 2012). Ostatnio (2022), przeprowadzono analizy geochemiczne surowców z Bułgarii (Gurova i in., 2022).

Za pomocą LA–ICP MS prowadzono badania szklanych koralików o specyficznym składzie bogatym w tlenek glinu z Afryki Wschodniej, Indii i Sri Lanki (Dussubieux i in., 2008), a także szklanych paciorków z RPA, w celu określenia składu pierwiastkowego, źródeł szkła i szlaków handlowych (Robertshaw i in., 2010). Na podstawie wyników tych badań, wskazywano na stosunki handlowe między Afryką a Azją. Przykłady analizy szklanych paciorków za pomocą LA–ICP MS podawane są z wielu krajów, np. Nigru ((Robertshaw i in., 2014), Bułgarii (Tzankova i Mihaylov 2019), Polski (Purowski i in., 2020), Egiptu (Kemp i in., 2020), Kenii (Siu i in., 2021) oraz Tanzanii (Wood i in., 2022). Ostatnio (2023), opisano badania szkieł datowanych na epokę żelaza (znalezionych w Polsce) (Krzyżanowska i in., 2023), a także naczyń z wykopalisk archeologicznych w Salapii (Włochy) (Gliozzo i in., 2023). Badano również islamskie szkła znalezione na terenie Jordanii (Barfod i in., 2018), Egiptu (Schibille i in., 2019) oraz Iranu (Schibille i in., 2022). Z kolei archeologiczne tessery mozaiki szklanej o różnych stężeniach ołowiu do 35% wag. PbO były przebadane za pomocą LA–ICP MS i pXRF. Autorzy wskazali, że niejednorodność wynikająca z niepełnego wymieszania może stanowić problem przy porównywaniu analiz za pomocą pXRF i LA–ICP MS. Analizy pXRF (z plamką o średnicy 1 cm) obejmą w przybliżeniu całą powierzchnię tessery, podczas gdy analizy LA–ICP–MS, przy średnicy wiązki 100 μm lub mniejszej, będą miały miejsce na znacznie mniejszym obszarze i technika ta może łatwiej unikać dużych wtrąceń i celować w poszczególne fazy w szkle. Może to prowadzić do słabej zgodności między tymi dwiema technikami (Adlington i in., 2020). W przypadku innych materiałów pochodzenia mineralnego, zbadano np. archeologiczne zaprawy z Pompei za pomocą kilku technik analitycznych m.in. LA–ICP MS, a następnie pojęto identyfikację faz budowy budynków (na podstawie analizy statystycznej) (Miriello i in., 2010).

LA–ICP MS znajduje również zastosowanie w badaniach innych materiałów kopalnych, np. zaprezentowano metodologię analizy ludzkiego szkliwa zębów. Badano różnice pomiędzy pionowym piłowaniem zęba (konwencjonalna procedura w celu uzyskanie płaskiej powierzchni), a naturalnym, tafonomicznym uszkodzeniem. Nie wykazano różnic istotnych statystycznie pomiędzy obiema powierzchniami, co pozwoliło zminimalizować uszkodzenia zębów kopalnych i otworzyło drogę do analizy ważnych okazów archeologicznych (Cucina i in., 2007). Przeprowadzono badania prehistorycznych zębów zwierzęcych, używając LA–ICP MS oraz LIBS, w czasie których na podstawie stosunków Sr/Ca oraz Ba/Ca ustalono listę produktów

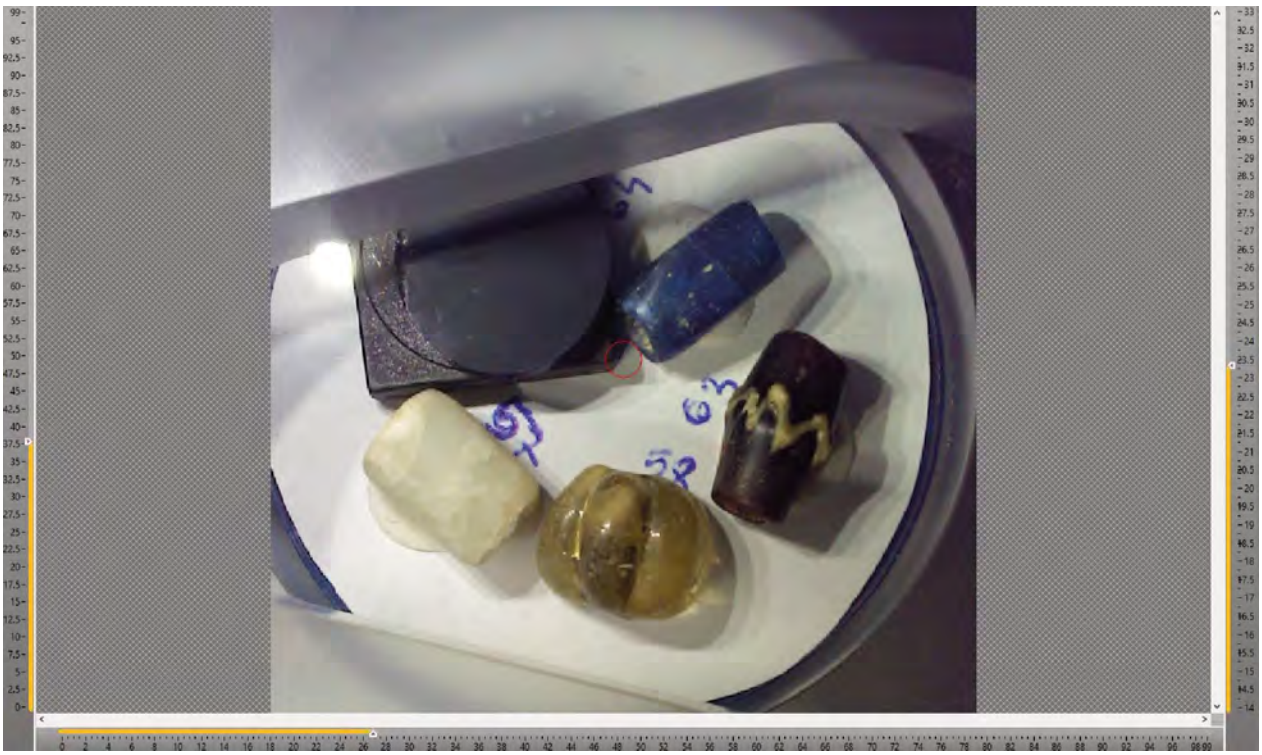
spożywczych pochodzenia zwierzęcego i roślinnego w diecie niedźwiedzia brunatnego (Galiová i in., 2010). Opisano również charakterystykę i rozmieszczenie pierwiastków śladowych w kościach ssaków lądowych wydobytych z historycznych wraków statków (Guareschi i in., 2022).

SPEKTROMETRIA ROZPADU INDUKOWANEGO LASEREM (LIBS)

Jako technika analityczna, spektrometria rozpadu indukowanego laserem (ang. *laser–induced breakdown spectroscopy*, LIBS) formalnie pojawiła się na początku lat 80. XX wieku (Radziemski i in., 1983a, Radziemski i in., 1983b). W 2004 roku dosyć odważnie zasugerowano, że technika LIBS będzie „następną supergwiazdą" w grupie technik spektroanalitycznych (Winefordner i in., 2004) i przewidywania te okazały się słuszne. Obecnie (2024) obserwuje się najdynamiczniejszy okres w rozwoju tej techniki. Według bazy Scopus (Elsevier) od początku lat 80. pojawiło się 7760 publikacji pod hasłem „laser–induced breakdown spectroscopy", z czego aż 6704 artykułów (83,4%) powstało w ostatnich latach (2007–2022). Z kolei pod hasłem „laser–induced breakdown spectroscopy archaeology" pojawiło się tylko 70 publikacji od początku zastosowania tej techniki w archeologii (2001), z czego ponad połowa (37 artykułów) w latach 2019–2024.

LIBS wykorzystuje plazmę indukowaną laserem (ang. *laser–induced plasma*, LIP) w celu oznaczenia składu pierwiastkowego próbki za pomocą optycznej spektrometrii emisyjnej (ang. *optical emission spectrometry*, OES). Impulsowy laser o dużej intensywności zostaje skupiony na powierzchni docelowej, a niewielka ilość materiału ulega odparowaniu, atomizacji i wzbudzeniu, generując plazmę nad powierzchnią badanego obiektu. Najczęściej stosowane są lasery typu Nd:YAG, pracujące przy różnych długościach fal promieniowania, np. 1064 nm (fundamentalna), 532 nm (druga harmoniczna), 355 nm (trzecia harmoniczna), 266 nm (czwarta harmoniczna). Warto dodać, że wybór długości fali (np. 355 nm zamiast 532 nm lub 1064 nm) jest podyktowany względami bezpieczeństwa (poza ogniskiem wiązka UV stosunkowo szybko osiąga bezpieczne dla oka poziomy natężenia) (Grönlund i in., 2005). Następnie promieniowanie emitowane przez wzbudzone atomy zostaje zebrane za pomocą odpowiedniego spektrometru emisji optycznej (np. typu Echelle, zdolnego do równoczesnej analizy wielopierwiastkowej). Pojedynczy „strzał" laserowy może być użyty do śledzenia intensywności widmowej poszczególnych pierwiastków (zgodnie z długościami fal charakterystycznych linii emisyjnych) lub rejestrowania szerokopasmowych widm emisyjnych, które są unikalnymi chemicznymi „odciskami palców" materiału (Harmon i in., 2009). Dodatkową zaletą techniki LIBS jest możliwość wykonania analizy pierwiastkowej właściwie bez wcześniejszego przygotowania próbek (także bezpośrednio z zabytków), niezależnie od tego, czy są one w stanie stałym, ciekłym, gazowym czy koloidalnym (Li i in., 2021). Ponadto urządzenia w tej technice mogą być wykorzystywane w wersji zminiaturyzowanej, zdolnej do bezpośredniej analizy materiału na miejscu (ang. *in situ*) (Zhao i in., 2016), jak np. spektrometry przenośne (Rakovský i in., 2012) czy ręczne typu handheld (Connors i in., 2016). Dzięki temu spektrometry LIBS zaczynają konkurować z EDXRF.

Należy pamiętać, że w przeciwieństwie do EDXRF jest to metoda mikroniszcząca (zostawiająca niewielki krater lub wzór na analizowanym przedmiocie, zazwyczaj niewidoczny gołym okiem). Z jednej strony jest to zaletą, gdy np. analizujemy zanieczyszczenia powstałe na powierzchni badanych materiałów, które mogą być jednocześnie badane i usuwane za pomocą lasera (Kim i in., 1998). W ten sposób można nie tylko dotrzeć w głąb próbki, do jej właściwego materiału, ale również wykonać oznaczenie pierwiastków z każdej warstwy badanego obiektu, np. prześledzić zmianę składu pierwiastkowego od warstwy korozji do właściwego stopu metali. Z drugiej strony, destrukcyjny charakter ablacji laserowej nie pozwala na uśrednienie kilku pomiarów z jednego obszaru próbki, dlatego też strategia ilościowa musi być zastosowana bez użycia informacji statystycznych (Zeisler 1998). Dokładność instrumentalną można uzyskać tylko na wzorcach jednorodnych, np. certyfikowanych materiałach odniesienia (NIST SRM 610, NIST SRM 612, NIST SRM 614). Dlatego termin „analiza ilościowa" nie powinien być nadużywany w eksperymentach obrazowania opartych na LIBS, choć pojawiają się nowe strategie kalibracji (Costa i in., 2021). Jednakże wiele prac wnosi znaczący „półilościowy" obraz w postaci map pierwiastkowych (Piñon i in., 2013; Limbeck i in., 2021; Jolivet i in., 2019). Warto dodać, że układem konkurencyjnym dla LIBS, bazującym na laserowym systemie wprowadzenia próbki, jest LA–ICP MS. Niestety zintegrowanie systemów LA oraz ICP MS wymaga często czasu i umiejętności, w przeciwieństwie do komercyjnie dostępnych systemów LIBS, które stanowią zintegrowany laserowy



Ryc. 3. Wnętrze komory (J200 LA, Applied Spectra, USA), wypełnionej paciorkami szklanymi (próbki o nr. 57, 58, 63, 64) oraz certyfikowanym materiałem odniesienia (NIST SRM 610). Zdjęcie wykonano w laboratorium grupy badawczej Analizy Specjacyjnej i Technik Łączonych w Zakładzie Chemii Analitycznej Wydziału Chemii UAM. Fot. J. Proch

system odparowania z mikrokamerą oraz detekcją w optycznej spektrometrii emisyjnej. Ponadto LIBS pozwala uzyskać dane profilowania głębokości (ang. *depth profiling*), jeśli widma są rejestrowane sekwencyjnie po „strzałach" lasera w tym samym punkcie (Ruan i in., 2019). Natychmiastowy odczyt emitowanego promieniowania przez detektor sprawia, że w tym przypadku sprawdza się znaczenie lepiej od LA–ICP MS. Ponadto technika LIBS jest zdolna do bezpośredniego i równoczesnego oznaczania litu czy innych pierwiastków lekkich (np. H, Be, B, C, O, F), które są niedostępne dla XRF czy skaningowego mikroskopu elektronowego (ang. *scanning electron microscope*, SEM) (Rifai i in., 2022).

Tym sposobem LIBS stał się obiecującym narzędziem m. in. w analizie materiałów biologicznych, geologicznych, archeologicznych. W 2001 roku LIBS został również wykorzystany do analizy składu zębów i kości ludzkich w celu oznaczenia pierwiastków potencjalnie toksycznych, takich jak Al, Pb oraz Sr (Samek i in., 2001). Najnowsze aplikacje w badaniach próbek geologicznych i środowiskowych dotyczą analiz na miejscu (ang. *in situ*), m. in. badania wykonywane bezpośrednio na dnie oceanu (Takahashi i in., 2020). Natomiast analizy minerałów są chętnie prowadzone przy użyciu laboratoryjnych wersji LIBS z wykorzystaniem technik komplementarnych, np. LA–ICP MS (Holá i in., 2021). Dzięki zastosowaniu laboratoryjnie opracowanego tzw. domowego (ang. *home–made* lub *lab–made*) połączenia obiektywu mikroskopu oraz techniki LIBS stworzono niedawno (2022) trójwymiarowe mapy wielopierwiastkowe o mikronowej rozdzielczości (He i in., 2022). Sugeruje to, że komercyjne połączenie LIBS i mikroskopu cyfrowego może przynieść obiecujące rezultaty badawcze, a w przeciwieństwie do rozwiązań „domowych" wniosłoby również wsparcie techniczne (ryc. 4).

Ze względów na zdecydowanie mikroniszczący charakter technika LIBS jest coraz chętniej wykorzystywana do zobrazowania rozmieszczenia pierwiastków w próbkach archeologicznych. W 2005 roku LIBS został przedstawiony jako potencjalne narzędzie do usuwania i analizy zanieczyszczeń powstałych na powierzchni obiektów dziedzictwa kulturowego. W ten sposób usunięto m.in. zanieczyszczenia pochodzenia organicznego na zwietrzałych powierzchniach zaprawy murarskiej, białych płytach alabastrowych czy głowie posągu wykonanej z białego marmuru (Grönlund



Ryc. 4. Zintegrowany, miniaturowy spektrometr LIBS (głowica do analizy pierwiastkowej EA–300) z mikroskopem cyfrowym (obiektyw VH–Z20UT) firmy KEYENCE (Japonia) w pracowni laboratoryjnej Interdyscyplinarnej Grupy Badawczej Archeometria na Wydziale Archeologii UAM. Fot. A. Kurzawska

i in., 2005). Natomiast potencjał LIBS w analizie szkła został zauważony jeszcze wcześniej (Müller i Stege 2003). Równolegle do składu chemicznego można określić jakościowo różne warstwy korozji za pomocą profilowania głębokości (Carmona i in., 2005). Analiza stratygraficzna LIBS pozwoliła na scharakteryzowanie poszczególnych cech, m.in. składu chemicznego, pierwiastków zmętniających, chromoforów i patologii degradacji powierzchni (warstwy dealkalizujące i osady) w próbkach szkła późnorzymskiego (Palomar 2013; Oujja 2015). W przypadku połączenia mikroskopii cyfrowej z techniką LIBS, przedstawiono aplikacje w charakterystyce zmian zachodzących w warstwach szkła (imitującego szkło średniowieczne) (Oujja i in., 2021).

Poza tym, techniki LIBS były wykorzystane do oznaczenia pierwiastków we fragmentach ceramiki archeologicznej (Pagnotta i in., 2018), rozpoznania fizykochemicznych własności dekoracji wykonanej na ceramice datowanej na IV wiek p.n.e. (Pirovska i in., 2020). Technika posłużyła również m. in. do oznaczenia i porównania zawartości Cu, Zn, Sn i Pb w stopach antycznych brązów (Pagnotta i in., 2015). Dzięki kombinacji LIBS i spektroskopii Ramana przedstawiono nowe możliwości w analizie profilu głębokości m.in. na przykładzie próbek archeologicznych (Glaus i Hahn 2014). Jednocześnie LIBS był jedną z technik analitycznych użytych do identyfikacji artefaktów, np. waz (Legnaioli i in., 2013). Badania archeometryczne *in situ* dotyczyły m. in. analizy zabytków z Malagi (Hiszpania) za pomocą spektrometru LIBS montowanego na operatorze (ang. *man–portable*) (Fortes i in., 2007), a ostatnio (2021) prowadzono analizy zapraw materiałów budowlanych użytych w fundamentach Twierdzy Smederevo (Serbia) (Živković i in., 2021). Nieco wcześniej, „domowe" połączenie mikroskopii cyfrowej z techniką LIBS zostało wykorzystane do oznaczenia H, C, O, Na, K, Al, Si, Ca, Mg, Mn, Fe, Ti w zaprawie pochodzącej z późnego okresu rzymskiego (IV–V w. AD) (Pagnotta i in., 2017).

SKANINGOWA MIKROSKOPIA ELEKTRONOWA ZE SPEKTROMETRIĄ Z DYSPERSJĄ ENERGII (SEM–EDS)

W pierwszym tomie Mikroprzeszłości poświęcono rozdział mikroskopom stosowanym w archeologii, a wśród nich fragment dotyczy skaningowej mikroskopii elektronowej (ang. *scanning electron microscope*, SEM) (Gunia i in., 2021: 431–440). Jest to rodzaj

mikroskopii elektronowej tworzącej obrazy próbki poprzez skanowanie powierzchni zogniskowaną wiązką elektronów. Technika spektrometrii z dyspersją energii (ang. *energy dispersive spectrometry*, EDS) jest najczęściej stosowana do jakościowej analizy materiałów, ale umożliwia również uzyskiwanie wyników półilościowych. Połączenie SEM z detektorem EDS umożliwia analizę chemiczną obszarów obserwowanych na monitorze mikroskopu. Technika SEM–EDS może być korzystna w przypadkach, w których analiza punktowa staje się niezwykle istotna w dochodzeniu do prawidłowych wniosków. Jakościowe i półilościowe techniki mikroanalizy rentgenowskiej w SEM ewoluowały jako naturalny postęp techniki EPMA (ang. *electron probe micro–analyzer*) (Balaram 2021).

Wiązka elektronów jest wytwarzana na szczycie kolumny, a kształt wiązki elektronów jest zmieniany za pomocą soczewek oraz cewek magnetycznych. Następnie wiązka elektronów trafia na próbkę, która jest skanowana na niewielkim obszarze. Elektrony oddziałują z atomami w próbce, wytwarzając sygnały zawierające informacje o topografii powierzchni i składzie próbki. Sygnały wytwarzane w systemie SEM–EDS obejmują elektrony wtórne (ang. *secondary electrons*, SE) i rozproszone wstecznie (ang. *backscattered electrons*, BSE), wykorzystywane do tworzenia obrazu do analizy morfologicznej i topograficznej, a także promieniowanie rentgenowskie, służące do identyfikacji i półilościowego oznaczania pierwiastków (obecnych w stężeniach oznaczalnych dla detektora EDS). Charakterystyczne widma rentgenowskie umożliwiają identyfikację i oznaczenie większości pierwiastków układu okresowego pierwiastków z wyjątkiem H, He i Li (Newbury i Ritchie 2013).

Technika SEM–EDS ma bardzo szeroki zakres zastosowań w dziedzictwie kulturowym i archeologii ze względu na możliwość zapewnienia analizy morfologicznej z wysoką rozdzielczością przestrzenną, w połączeniu z informacjami chemicznymi w mikroskali. Jednak gdy rozmiar analizowanych materiałów zbliża się do skali mikro– i submikrometrowej (co często stwierdza się w badaniach dziedzictwa kulturowego i archeologii), należy wziąć pod uwagę kilka efektów związanych z generowaniem i transportem elektronów i promieniowania rentgenowskiego, aby uniknąć błędów ilościowych (Moro i in., 2020). Skład pierwiastkowy w punkcie, wzdłuż linii lub na określonym obszarze można łatwo określić z dużą precyzją. Niemniej ze względu na dużą rozdzielczość nie zaleca się wyłącznie pomiarów punktowych, które mogą wpływać na reprezentatywność pomiarów. Elektrony wnikają w próbkę na głębokość 0,02–1,0 μm, dlatego należy zadbać o jej odpowiednie przygotowanie. Granica wykrywalności w SEM–EDS zależy od stanu powierzchni próbki (im gładsza powierzchnia, tym niższa granica wykrywalności). Zazwyczaj SEM–EDS może wykrywać pierwiastki w stężeniach od 1 do 10% wag. oraz wyższych niż 10% wag. (w przypadku pierwiastków głównych). Z tego względu mapy pierwiastków są często używane do lokalizowania obszarów, w których badane pierwiastki występują na poziomie wyższym niż 1% wagowy (Goldstein i in. 2017).

Ze względu na swoje możliwości SEM–EDS jest szeroko stosowany do badania próbek metalowych i ceramicznych, a także związanych z nimi degradacji powierzchni lub produktów korozji. Niemniej rzadko jest jedynym narzędziem analitycznym użytym do badań archeologicznych. Na przykład zbadano artefakty z brązu i powiązane próbki gleby ze stanowisk archeologicznych w pobliżu Sztokholmu (Szwecja). Produkty korozji oraz metalowy rdzeń zostały przeanalizowane metodami SEM–EDS i dyfrakcją rentgenowską (XRD), dzięki czemu zidentyfikowano tlenki, węglany, siarczany, chlorki i fosforany metali (Tronner i in., 1995). Interesującym przykładem badania obiektów metalowych były badania elementów kadłuba brytyjskiego statku zatopionego w 1813 r., którego próbkę poddano charakteryzacji za pomocą EDXRF oraz SEM–EDS (Ciarlo i in., 2016). Z kolei analiza powierzchni starożytnych monet została przeprowadzona za pomocą μXRF, lecz aby lepiej obserwować morfologię ich powierzchni, zastosowano SEM–EDS. Ponadto przeanalizowano również związki pokrywające monety, pochodzące zarówno z procesów korozyjnych (patyny), jak i osadów glebowych za pomocą ATR–FTIR (Marussi i in., 2023). Podczas badań figurek z terakoty, tynku ściennego oraz lokalnych źródeł gliny (Mongolia) również zastosowano kilka technik analitycznych SEM–EDS, FTIR, XRF oraz dyfrakcję rentgenowską (XRD) (Solongo i in., 2023).

Archeometryczna charakterystyka ceramiki jest często uzupełniona analizą przy pomocy SEM–EDS. Próbki ceramiki, znalezione w pobliżu dzisiejszej granicy turecko–gruzińskiej, przebadano SEM–EDS oraz XRD w celu scharakteryzowania składu chemicznego (Trojsi i in., 2002). W połączeniu z mikrospektroskopią Ramana wyjaśniono pochodzenie niemineralnych czarnych powłok na ceramice (Łaciak i in., 2019). Kompleksowa charakterystyka petrograficzna, mineralogiczna i geochemiczna ceramiki od XIV do XVIII wieku (Kongo), została przeprowadzona m.in. na podstawie wyników SEM–EDS (Tsoupra



Ryc. 5. Spektroskop w podczerwieni z transformacją Fouriera (Alpha II, Bruker, USA), z przystawką ATR (a) oraz odbicia lustrzanego (b. c) w pracowni laboratoryjnej Interdyscyplinarnej Grupy Badawczej Archeometria na Wydziale Archeologii UAM. Fot. J. Proch, A. Kurzawska

i in., 2022). W starożytnym imperium rzymskim pokruszona ceramika była powszechnie stosowana jako dodatek do zapraw powierzchniowych. Poprzez połączenie SEM–EDS i mikrospektroskopii Ramana wykazano rolę tej ceramiki jako długoterminowego źródła reaktywnych glinokrzemianów (Seymour i in., 2022). W przypadku analizy szkła SEM–EDS wraz z EPMA, XRPD (ang. *X-ray Powder Diffraction*) i spektrometrią absorpcji rentgenowskiej (ang. *X–ray absorption spectrometry* XAS) zostały wykorzystane do szczegółowej charakterystyki chemicznej i mineralogicznej próbek szklanych i tesser mozaiki szklistej z Messyny (Sycylia, Włochy) (Arletti i in., 2008). Natomiast charakterystyka mikrostrukturalna szkieł z celtyckiego oppidum (Třísova, Czechy) została określona technikami SEM–EDS oraz LA–ICP MS (Křížová i in., 2020)

Tabela 2. Najczęściej stosowane techniki postępowania z próbkami oraz ich zalety (na podstawie Mohammed i in., 2017)

Technika postępowania z próbkami	Zalety	Przykłady badanych materiałów
Osłabione odbicie całkowite (ATR)	• minimalne przygotowanie próbki (umieszczenie próbki na krysztale) • analiza próbek w ich naturalnym stanie (bez konieczności prasowania w pastylki w celu zebrania widma) • doskonała do grubych lub silnie absorbujących próbek • szybkie i łatwe czyszczenie kryształu • możliwość zastosowania przystawki mikroskopowej	• wszystkie ciała stałe, które można zmielić • materiały sypkie • proszki naturalne • tworzywa sztuczne • próbki biologiczne
Odbicie rozproszone (DRIFT)	• minimalne przygotowanie próbki (umieszczenie próbki w pojemniku) • próbki można analizować w stanie czystym lub rozcieńczonym proszkiem KBr • analiza próbek w ich naturalnym stanie (bez konieczności prasowania w pastylki w celu zebrania widma) • szybkie i łatwe czyszczenie pojemnika	• wszystkie ciała stałe, które można zmielić • małe obiekty, które zmieszczą się w pojemniku • ciecze
Odbicie lustrzane	• analiza nieniszcząca – brak kontaktu lub uszkodzenia próbki podczas analizy • szeroka gama dostępnych akcesoriów umożliwia wszechstronne zastosowanie spektrometru • możliwość użycia przystawki mikroskopowej (w zależności od wielkości próbki i grubości warstwy powierzchniowej)	• materiały, których nie można zmielić • powierzchnie metalowe • kamienie szlachetne • materiały laminowane • duże obiekty

Ostatnio (2022) produkcję miedzi zbadano w dorzeczu Niari (Kongo), wykorzystując tym razem kombinację pXRF, SEM–EDS oraz FTIR (Cordivari i in., 2022). Ponadto w celu zrekonstruowania procesów technologicznych produkcji miedzi przebadano dwie późnorzymskie hałdy zlokalizowane w pobliżu Polis Chrysochous (Cypr), stosując hhXRF oraz mniejszy podzbiór próbek za pomocą SEM–EDS (Sdralia i in., 2023).

SPEKTROSKOPIA W PODCZERWIENI Z TRANSFORMACJĄ FOURIERA (FTIR)

Techniką uzupełniającą analizę składu pierwiastkowego jest spektroskopia w podczerwieni z transformacją Fouriera (ang. *Fourier transform infrared*, FTIR), która służy do definiowania odkształceń wibracyjnych wiązań chemicznych. Instrument wytwarza wiązkę promieniowania podczerwonego, która trafia do interferometru. Dzięki rekombinacji wiązek o różnych długościach drogi powstaje interferencja sygnału zwana interferogramem. Dalej wiązka trafia na próbkę, która pochłania charakterystyczne dla niej częstotliwości energii. Następnie detektor mierzy energię sygnału dla wszystkich częstotliwości jednocześnie. W międzyczasie wiązka jest nakładana, aby zapewnić odniesienie (tło) dla pomiaru. Poprzez odjęcie widma tła od widma próbki (za pomocą oprogramowania komputerowego do transformacji Fouriera) uzyskuje się ostateczne widmo. Energie przejścia odpowiadające zmianom w wibracyjnym stanie energetycznym dla grup funkcyjnych znajdują się w obszarze średniej podczerwieni (podawanego w postaci liczb falowych i odpowiadającego zakresowi 400–4000 cm^{-1}) (Mohammed i in., 2017).

W spektroskopii FTIR możliwe jest zatem identyfikowanie wiązań chemicznych łączących różne pierwiastki, a zatem określenie związków lub grup związków, które są obecne w badanym materiale. Dzięki temu spektroskopia FTIR pozwala zidentyfikować nieznane materiały, dostarczyć informacji mineralogicznych, a także służy do analizy jakościowej składników badanej próbki. W zależności od wybranej przystawki, można ją zastosować do analizy wstępnej materiałów w różnych stanach skupienia (Tkachenko i Niedzielski 2022).

Cztery najczęściej stosowanie techniki postępowania z próbkami przypadku spektroskopii FTIR to: transmisja, osłabione odbicie całkowite (ang. *attenuated total reflection*, ATR), odbicie rozproszone (ang. *diffuse reflectance infrared Fourier transform*, DRIFT) oraz odbicie lustrzane (tabela 2). W przypadku transmisji wiązka podczerwieni przechodzi przez próbkę, mierzona jest przesyłana energia i generowane jest widmo. Warunkiem koniecznym jest przepuszczalność promieniowania przez badany obiekt, co znacznie ogranicza możliwości tej przystawki (Mohammed i in., 2017). Dlatego przystawka transmisyjna zazwyczaj znajduje zastosowanie w analizie związków organicznych w postaci tabletek, (które są mieszaniną próbki i matrycy przezroczystej dla promieniowania podczerwonego (najczęściej bromek potasu (KBr)).

Każda z technik postępowania z próbkami ma odrębną zasadę działania. Przystawka ATR (ryc. 5a) służy do pomiaru zmian zachodzących w odbitej wiązce promieniowania podczerwonego, gdy wiązka styka się z próbką. Wiązka podczerwieni jest kierowana pod odpowiednim kątem do optycznie gęstego kryształu o wysokim współczynniku załamania światła, np. diament, selenek cynku (ZnSe) i german (Ge). Tam następuje wielokrotne wewnętrzne odbicie wiązki. W trakcie tego procesu energia wiązki zostaje osłabiona (pochłonięta) przez próbkę umieszczoną na krysztale ATR. Osłabiona wiązka odbija się z powrotem do kryształu, a następnie opuszcza przeciwległy koniec kryształu i jest kierowana do detektora. Detektor rejestruje stłumioną wiązkę jako sygnał interferogramu, dzięki czemu generowane jest widmo IR (Liu i Kazarian 2022). Przystawka DRIFT służy do kierowania wiązki IR do pojemnika na próbkę wypełnionego mieszaniną próbki lub/i matrycy przezroczystej dla promieniowania podczerwonego (np. KBr). Wiązka odbija się od ich powierzchni, powodując jej rozproszenie. Lustro wyjściowe kieruje tę rozproszoną energię do detektora. Detektor rejestruje zmienioną wiązkę podczerwieni wykorzystywaną do wygenerowania widma (Smith 2011). Padająca wiązka może oddziaływać z materiałem na jeden z kilku sposobów. Na przykład padająca wiązka może zostać odbita od górnej powierzchni materiału (bez rozproszenia). Następnie osłabiona wiązka zostaje zarejestrowana przez detektor, dzięki czemu generowane jest widmo. W przypadku takich przystawek (ryc. 5b) przygotowanie próbek nie jest konieczne. W badaniach obiektów dziedzictwa kulturowego możliwość zastosowania analizy nieniszczącej jest kluczowa. Ponadto badania obiektów można wykonywać również *in situ*, dzięki urządzeniom przenośnym (Maguregui i in., 2012). Tym samym spektroskopia FTIR stała się potencjalnym i użytecznym narzędziem w badaniach archeologicznych.

Spektroskopia FTIR jest idealnym narzędziem do badania obrazów olejnych, ponieważ obrazy składają się z wielu warstw, które zawierają różnorodne składniki organiczne i nieorganiczne, które można zidentyfikować za pomocą spektroskopii FTIR lub obrazowania spektroskopowego. Pigmenty w obrazach były szeroko badane, np. opisano różnicowanie ochry i sjeny (Genestar i Pons 2005), indygo, ftalocyjaniny miedzi i błękitu pruskiego (Kuckova i in., 2005), a także prowadzono analizy śladowych ilości barwników nową techniką spektroskopii ATR–FTIR o podwyższonej czułości (Prati i in., 2016). Z kolei połączenie detektora liniowego z przystawką do obrazowania micro–ATR (co umożliwiło uzyskanie rozdzielczości przestrzennej około 5 mikronów, rozmiar piksela w próbce równy 6,25 μm) zastosowano do identyfikacji pigmentów, spoiw, wypełniaczy i produktów degradacji w XVII–wiecznym obrazie „Koronacja i Wniebowzięcie Najświętszej Marii Panny" (Polska) (Pięta i in., 2019).

Spektroskopia FTIR znajduje również zastosowanie w przypadku analizy próbek bursztynów. Takie badania są często wykonywane równolegle ze spektroskopią Ramana i mogą być użyte jako wstęp do prac konserwatorskich (Shashoua i in., 2006) czy do zbadania proweniencji obiektów, np. rozróżniać bursztyn rumuński i bałtycki, aby potwierdzić lokalne lub bałtyckie pochodzenie materiałów znalezionych na stanowiskach archeologicznych na terytorium Rumunii (Teodor i in., 2009). W ten sposób odkryto, że znaczna część bursztynu ze złoża Cioclovina ma pochodzenie rumuńskie, a zatem nie ma związku ze Szlakiem Bursztynowym (Teodor i in., 2010). Wykazano również, że próbki archeologiczne z Moraw (Czechy) pochodziły z bursztynu bałtyckiego, co potwierdza pogląd, że to terytorium stanowiło centrum handlu lub targowiska dla tego surowca w drodze do południowej i południowo-wschodniej Europy (Havelcová i in., 2016).

W kontekście spektroskopii FTIR warto również wspomnieć o badaniach naczyń ceramicznych, w tym pozostałości organicznych i nieorganicznych. Połączone badanie za pomocą technik FTIR oraz ^{13}C NMR w stanie stałym (ang. *solid–state nuclear magnetic resonance*), poparte analizą elementarną doprowadziło do klasyfikacji stałych pozostałości organicznych, znalezionych na naczyniach ceramicznych

z Uitgeest–Groot Dorregeest (Holandia) (Oudemans i in. 2007). Ponadto scharakteryzowano czarną warstwę pokrywającą powierzchnię garnka z epoki brązu (okres VI). Oprócz FTIR zastosowano mikroskopię światła spolaryzowanego w płaszczyźnie (PLM), SEM–EDS oraz mikroskopię ramanowską. Analizy spektroskopowe (Raman i FTIR) wykazały, że zastosowano dziegieć brzozowy lub brzozowo-sosnowy. Autorzy wykluczyli hipotezę o dodaniu do dziegciu proszku kostnego lub popiołu na rzecz zastosowania domieszek materiałów ilastych (Trąbska i in., 2011). Z kolei DRIFT–FTIR zastosowano w badaniu obecności pozostałości oleju we fragmentach amfor archeologicznych z III wieku n.e. (Monte Testaccio, Rzym, Włochy) (Tarquini i in., 2014). Ostatnio (2022) spektroskopia ATR–FTIR pozwoliła na identyfikację głównych składników próbek z różnych prehistorycznych artefaktów kompozytowych, ceramiki i amorficznych brył z Europy Wschodniej i Uralu (Chen i in., 2022).

W przypadku szkieł spektroskopia FTIR może być wykorzystana do określenia stopnia ich degradacji (MacDonald i in., 2000). Ponadto zmiany strukturalne (wynikające z wypłukiwania metali alkalicznych ze szkła) powodują przesunięcia liczby falowej i zmiany intensywności przy 950 cm^{-1} i 1050 cm^{-1} (Liu i Kazarian 2022). W ten sposób zbadano degradację szkła w dziewiętnastowiecznych dagerotypach za pomocą spektroskopii ATR–FTIR (Thickett i Pretzel 2020). FTIR zastosowano do modelowania dyfuzji wody do powierzchni dwóch szkieł sodowo–wapniowych jako potencjalnego narzędzia do datowania szkła historycznego (równolegle ze spektrometrią masową jonów wtórnych, SIMS) (Stevenson i in., 2014). Analiza mikro–FTIR fragmentów witraży wykazała warstwę powierzchniową zubożoną w krzem i potas, natomiast wzbogaconą w wapń (migracja jonów Ca na powierzchnię jest znanym procesem korozji szkła) (Vilarigues i da Silva 2004). Badanie mikro–FTIR narzędzi krzemiennych i obsydianowych wykazało wysoki procent wykrywalnych pozostałości na ich krawędziach roboczych, potwierdzając sugestie dotyczące przetwarzanego materiału oraz procedur pracy (Nunziante Cesaro i Lemorini 2012).

Spektroskopia FTIR jest również stosowana podczas badania tkanek szkieletowych, np. szkliwa zębów mlecznych i stałych (DRIFT) pod kątem oceny zmian diagenetycznych, kluczowych w badaniach archeologicznych i antropogenicznych (Greene i in., 2004). Dzięki analizie spalonych kości (ATR) zbadano zmiany wskaźnika krystaliczności, stosunku grup karbonylowych do węglanów oraz Ca/P (Thompson i in., 2009). Za pomocą spektroskopii ATR–FTIR zbadano również archeologiczne próbki drewna, np. pochodzącego z wraku statku oraz drewna belkowego starej nawy katedry (Hiszpania), gdzie zaobserwowano wzmożone utlenianie ligniny w warunkach napowietrzania (drewno belek) i hydrolizę węglowodanów w zanurzonych warunkach beztlenowych (drewno wraku statku) (Traoré i in., 2016). Określono również postęp naturalnej degradacji struktury drewnianych artefaktów z Maroka (Boukir i in., 2019).

PODSUMOWANIE

Nowoczesne techniki analityczne pozwalają na badania obiektów dziedzictwa kulturowego w najróżniejszej skali (od kilku milimetrów do dziesiątych części mikrometra). Specyfikacja i wartość badanego materiału pozwalają na zastosowanie mniej lub bardziej niszczących analiz. W trakcie projektowania procesu analitycznego należy wziąć pod uwagę sposób działania dostępnych technik analitycznych, ich przeznaczenie oraz ograniczenia. Wybór musi być zawsze uzasadniony potrzebami badawczymi. Każda z wyżej wymienionych technik stanowi niezależne narzędzie, a otrzymane wyniki można traktować jako podstawę rozważań archeologicznych. Jednakże dla uzyskania możliwości interpretacji wyników analiz niezbędna jest obszerna wiedza z zakresu chemii analitycznej, a także odpowiedni warsztat. Warto posiłkować się kilkoma technikami, jeśli uzupełniają obraz badanego obiektu, a nie powielają swoich obserwacji. Należy mieć świadomość, że wyniki analiz mogą być nieporównywalne, o czym wspominali cytowani autorzy. Mimo coraz większej dostępności technik analitycznych w badaniach archeologicznych, niewiele grup badawczych może pozwolić sobie na nieograniczony dostęp do tych narzędzi, co może mieć fundamentalne znaczenie podczas ich doboru.

Podziękowania

Autorzy mieli możliwość pracy z powyższymi technikami analitycznymi we współpracy Wydziału Archeologii i Wydziału Chemii Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu jako Interdyscyplinarna Grupa Badawcza Archeometria (irga.web.amu.edu.pl).

LITERATURA

Adlington, L.W., Gratuze, B., Schibille, N. 2020. Comparison of pXRF and LA–ICP–MS analysis of lead–rich glass mosaic tesserae. *Journal of Archaeological Science: Reports* 34, 102603.

Alfeld, M., Janssens, K., Dik, J., de Nolf, W., van der Snickt, G. 2011. Optimization of mobile scanning macro–XRF systems for the in situ investigation of historical paintings. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 26(5): 899–909.

Arletti, R., Quartieri, S., Vezzalini, G., Sabatino, G., Triscari, M., Mastelloni, M. A. 2008. Archaeometrical analyses of glass cakes and vitreous mosaic tesserae from Messina (Sicily, Italy). *Journal of Non–Crystalline Solids* 354(45–46): 4962–4969.

Balaram, V. 2017. Field–portable instruments in mineral exploration: Past, present and future. Journal of Applied Geochemistry 19(4): 382–399.

Balaram, V. 2021. Current and emerging analytical techniques for geochemical and geochronological studies. *Geological Journal 56*(5): 2300–2359.

Barfod, G.H., Freestone, I.C., Lichtenberger, A., Raja, R., Schwarzer, H. 2018. Geochemistry of Byzantine and Early Islamic glass from Jerash, Jordan: Typology, recycling, and provenance. *Geoarchaeology* 33(6): 623–640.

Barker, R.D., Barker, S.L.L., Wilson, S.A., Stock, E.D. 2021. Quantitative Mineral Mapping of Drill Core Surfaces I: A Method for μXRF Mineral Calculation and Mapping of Hydrothermally Altered, Fine–Grained Sedimentary Rocks from a Carlin–Type Gold Deposit. *Economic Geology* 116: 803–819.

Boukir, A., Fellak, S., Doumenq, P. 2019. Structural characterization of *Argania spinosa* Moroccan wooden artifacts during natural degradation progress using infrared spectroscopy (ATR-FTIR) and X-Ray diffraction (XRD). *Heliyon* 5(9), e02477.

Camara, C.G., Escobar, J.V., Hird, J.R., Putterman, S.J. 2008. Correlation between nanosecond X–ray flashes and stick–slip friction in peeling tape. *Nature* 455: 7216.

Capobianco, G., Sferragatta, A., Lanteri, L., Agresti, G., Bonifazi, G., Serranti, S., Pelosi, C. 2020. MXRF Mapping as a Powerful Technique for Investigating Metal Objects from the Archaeological Site of Ferento (Central Italy). *Journal of Imaging* 6(7): 59.

Carmona, N., Oujja, M., Rebollar, E., Römich, H., Castillejo, M. 2005. Analysis of corroded glasses by laser induced breakdown spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 60(7): 1155–1162.

Carvalho, G.G.A. de, Guerra, M.B.B., Adame, A., Nomura, C.S., Oliveira, P.V., de Carvalho, H.W.P., Santos, D., Nunes, L.C., Krug, F.J. 2018. Recent advances in LIBS and XRF for the analysis of plants. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 33(6): 919–944.

Chang, Y., Kim, J.C. 2018. Provenance of obsidian artifacts from the Wolseongdong Paleolithic site, Korea, and its archaeological implications. *Quaternary International* 467: 360–368.

Chen, S., Vahur, S., Teearu, A., Juus, T., Zhilin, M., Savchenko, S., Oshibkina, S., Asheichyk, V., Vashanau, A., Lychagina, E., Kashina, E., German, K., Dubovtseva, E., Kriiska, A., Leito, I., Oras, E. 2022. Classification of archaeological adhesives from Eastern Europe and Urals by ATR–FT–IR spectroscopy and chemometric analysis. *Archaeometry* 64(1): 227–244.

Ciarlo, N.C., Maxia, G., Rañi, M., De Rosa, H., Geli Mauri, R., Vivar Lombarte, G. 2016. Craft production of large quantities of metal artifacts at the beginnings of industrialization: Application of SEM–EDS and multivariate analysis on sheathing tacks from a British transport sunk in 1813. *Journal of Archaeological Science: Reports* 5: 263–275.

Connors, B., Somers, A., Day, D. 2016. Application of Handheld Laser–Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) to Geochemical Analysis. *Applied Spectroscopy* 70(5): 810–815.

Cordivari, B.W., Nikis, N., Martinón–Torres, M. 2022. Smelting copper in decorated pottery: Communities of practice in the Niari Basin, Republic of the Congo, fifteenth–seventeenth centuries CE. *Archaeological and Anthropological Sciences* 14(11): 210.

Costa, V.C., Babos, D.V., Castro, J.P., Andrade, D.F., Gamela, R.R., Machado, R.C.A., Sperança, M.A., Araújo, A.S., Garcia, J.A., Pereira–Filho, E.R. 2020. Calibration Strategies Applied to Laser–Induced Breakdown Spectroscopy: A Critical Review of Advances and Challenges. *Journal of the Brazilian Chemical Society* 31(12): 2439–2451.

Cucina, A., Dudgeon, J., Neff, H. 2007. Methodological strategy for the analysis of human dental enamel by LA–ICP–MS. *Journal of Archaeological Science* 34(11): 1884–1888

De Francesco, A.M., Barca, D., Bocci, M., Cortegoso, V., Barberena, R., Yebra, L., Durán, V. 2018. Provenance of obsidian artifacts from the Natural Protected Area Laguna del Diamante (Mendoza, Province Argentina) and upper Maipo valley (Chile) by LA–ICP–MS method. *Quaternary International* 468: 134–140.

Dias, A.A., Carvalho, M., Carvalho, M.L., Pessanha, S. 2015. Quantitative evaluation of ante–mortem lead in human remains of the 18th century by triaxial geometry and bench top micro X–ray fluorescence spectrometry. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 30(12): 2488–2495.

Dussubieux, L., Kusimba, C.M., Gogte, V., Kusimba, S.B., Gratuze, B., Oka, R. 2008. The trading of ancient glass beads: New analytical data from South Asian and East African soda–alumina glass beads. *Archaeometry* 50(5): 797–821.

Fortes, F.J., Cuñat, J., Cabalín, L.M., Laserna, J.J. 2007. In situ analytical assessment and chemical imaging of historical buildings using a man–portable laser system. *Applied Spectroscopy* 61(5): 558–564.

Galiová, M., Kaiser, J., Fortes, F.J., Novotný, K., Malina, R., Prokeš, L., Hrdlička, A., Vaculoviš, T., Fišáková, M.N., Svoboda, J., Kanický, V., Laserna, J.J. 2010. Multielemental analysis of prehistoric animal teeth by laser–induced breakdown spectroscopy and laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry. *Applied Optics* 49(13): 191–199.

Gallhofer, D., Lottermoser, B.G. 2018. The Influence of Spectral Interferences on Critical Element Determination with Portable X–Ray Fluorescence (pXRF). *Minerals* 8(8): 320.

Gebauer, A.B., Sørensen, L.V., Taube, M., Wielandt, D.K.P. 2021. First Metallurgy in Northern Europe: An Early Neolithic Crucible and a Possible Tuyère from Lønt, Denmark. *European Journal of Archaeology* 24(1): 27–47.

Genestar, C., Pons, C. 2005. Earth pigments in painting: Characterisation and differentiation by means of FTIR spectroscopy and SEM–EDS microanalysis. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 382(2): 269–274.

Giussani, B., Monticelli, D., Rampazzi, L. 2009. Role of laser ablation–inductively coupled plasma–mass spectrometry in cultural heritage research: A review. *Analytica Chimica Acta* 635(1): 6–21.

Glaus, R., Hahn, D.W. 2014. Fiber–coupled laser–induced breakdown and Raman spectroscopy for flexible sample characterization with depth profiling capabilities. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 100: 116–122.

Gliozzo, E., Giannetti, F., Goffredo, R., Totten, D.M. 2023. Late antique glass from Salapia: Tracking production and trading networks. *Archaeometry* 65(1): 118–135.

Goldstein, J.I., Newbury, D.E., Michael, J.R., Ritchie, N.W.M., Scott, J.H.J., Joy, D.C. 2017. *Scanning electron microscopy and X–ray microanalysis*, Springer, Nowy Jork.

Gratuze, B. 1999. Obsidian Characterization by Laser Ablation ICP–MS and its Application to Prehistoric Trade in the Mediterranean and the Near East: Sources and Distribution of Obsidian within the Aegean and Anatolia. *Journal of Archaeological Science* 26(8): 869–881.

Gratuze, B., Blet–Lemarquand, M., Barrandon, J.N. 2001. Mass spectrometry with laser sampling: A new tool to characterize archaeological materials. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 247(3): 645–656.

Greene, E.F., Tauch, S., Webb, E., Amarasiriwardena, D. 2004. Application of diffuse reflectance infrared Fourier transform spectroscopy (DRIFTS) for the identification of potential diagenesis and crystallinity changes in teeth. *Microchemical Journal* 76(1–2): 141–149.

Grönlund, R., Lundqvist, M., Svanberg, S. 2005. Remote imaging laser–induced breakdown spectroscopy and remote cultural heritage ablative cleaning. *Optics Letters* 30(21): 2882–2884.

Guareschi, E.E., Nicholls, P.K., Evans, N.J., Barham, M., McDonald, B.J., Magni, P.A., Tobe, S.S. 2022. Bone diagenesis in the marine environment–I: Characterization and distribution of trace elements in terrestrial mammalian bones recovered from historic shipwrecks. *International Journal of Osteoarchaeology* 32(2): 509–523.

Guerra, M.B.B., Adame, A., Almeida, E. de, Carvalho, G.G.A. de, Brasil, M.A.S., Santos Jr, D., Krug, F.J. 2015. Direct analysis of plant leaves by EDXRF and LIBS: Microsampling strategies and cross–validation. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 30(7): 1646–1654.

Guimarães, D., Dias, A.A., Carvalho, M., Carvalho, M.L., Santos, J.P., Henriques, F.R., Curate, F., Pessanha, S. 2016. Quantitative determinations and imaging in different structures of buried human bones from the XVIII–XIXth centuries by energy dispersive X–ray fluorescence—Postmortem evaluation. *Talanta* 155: 107–115.

Gunia, P., Lisowska, E, Kurzawska, A. 2021. Mikroskopy stosowane w archeologii, (w:) A. Kurzawska, I. Sobkowiak-Tabaka (red.), *Mikroprzeszłość. Badania specjalistyczne w archeologii.* Poznań, 431–440.

Gurova, M., Andreeva, P., Stefanova, E., Aladzhov, A., Bonsall, C. 2022. Petrographic and geochemical analyses of flint raw materials from Bulgaria: A reliable combination for provenance studies of archaeological flint. *Quaternary International* 615: 18–32.

Hampai, D., Dabagov, S.B., Cappuccio, G., Cibin, G., Longoni, A., Frizzi, T., Marcelli, A., Maggi, V. 2010. Research and Development of X-Ray Spectroscopy Based on Polycapillary Optics at Laboratori Nazionali di Frascati. *AIP Conference Proceedings* 1221(1): 196–202.

Harmon, R.S., Remus, J., McMillan, N.J., McManus, C., Collins, L., Gottfried, J.L., DeLucia, F.C., Miziolek, A.W. 2009. LIBS analysis of geomaterials: Geochemical fingerprinting for the rapid analysis and discrimination of minerals. *Applied Geochemistry* 24(6): 1125–1141.

Havelcová, M., Machovič, V., Linhartová, M., Lapčák, L., Přichystal, A., Dvořák, Z. 2016. Vibrational spectroscopy with chromatographic methods in molecular analyses of Moravian amber samples (Czech Republic). *Microchemical Journal* 128: 153–160.

He, C., Huang, W., Mao, Y., Li, A., Xu, K., Cui, H., Qiu, L., Zhao, W. 2022. Three–dimensional topographic and multi–elemental mapping by unilateral–shift–subtracting confocal controlled LIBS microscopy. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 188: 106340.

Holá, M., Novotný, K., Dobeš, J., Krempl, I., Wertich, V., Mozola, J., Kubeš, M., Faltusová, V., Leichmann, J., Kanický, V. 2021. Dual imaging of uranium ore by Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry and Laser Induced Breakdown Spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 186: 106312.

Jiang, Q., Shuai, Q., Liu, J., Cheng, L. 2020. Micro–X–Ray Diffractometer Focused by Polycapillary Optics and Its Applications for Materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 768(2): 022046.

Jinhua Li, R.P. 2020. Micro–XRF Study of the Troodontid Dinosaur Jianianhualong Tengi Reveals New Biological and Taphonomical Signals. *Atomic Spectroscopy* 42(1): 1–11.

Jolivet, L., Leprince, M., Moncayo, S., Sorbier, L., Lienemann, C.P., Motto–Ros, V. 2019. Review of the recent advances and applications of LIBS–based imaging. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 151: 41–53.

Kemp, V., McDonald, A., Brock, F., Shortland, A.J. 2020. LA–ICP–MS analysis of Late Bronze Age blue glass beads from Gurob, Egypt. *Archaeometry* 62(1): 42–53.

Kim, T., Lin, C. T., Yoon, Y. 1998. Compositional Mapping by Laser–Induced Breakdown Spectroscopy. *The Journal of Physical Chemistry B* 102(22): 4284–4287.

Kozak, L., Silva Souza, J., Nawrot, A., Proch, J., Kaźmierski, M., Zawieja, A., Niedzielski, P. 2021. Handheld ED–XRF spectrometers in geochemical investigation: Comparative studies for glacial deposits from Spitsbergen. *Polish Polar Research* 42(3): 163–172.

Křížová, Š., Venclová, N., Vaculovič, T., Dillingerová, V. 2020. Multi–analytical approach and microstructural characterisation of glasses from the Celtic oppidum of Třísov, Czech Republic, second to first centuries BC. *Archaeological and Anthropological Sciences* 12: 17.

Krueger, M. 2021. Ręczny spektrometr fluorescencji rentgenowskiej (XRF) w archeologii, (w:) A. Kurzawska, I. Sobkowiak-Tabaka (red.), *Mikroprzeszłość. Badania specjalistyczne w archeologii.* Poznań, 443–449.

Krzyżanowska, M., Syta, O., Kępa, L., Wagner, B. 2023. Small and overlooked: Roman glass counters from archaeological sites in Poland. *Journal of Archaeological Science: Reports* 47: 103786.

Kuckova, S., Nemec, I., Hynek, R., Hradilova, J., Grygar, T. 2005. Analysis of organic colouring and binding components in colour layer of art works. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 382(2): 275–282.

Legnaioli, S., Garcia, F.A., Andreotti, A., Bramanti, E., Pace, D.D., Formola, S., Lorenzetti, G., Martini, M., Pardini, L., Ribechini, E., Sibilia, E., Spiniello, R., Palleschi, V. 2013. Multi–technique study of a ceramic archaeological artifact and its content. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 100: 144–148.

Lemière, B. 2018. A review of pXRF (field portable X–ray fluorescence) applications for applied geochemistry. *Journal of Geochemical Exploration* 188: 350–363.

Li, L.N., Liu, X.F., Yang, F., Xu, W.M., Wang, J.Y., Shu, R. 2021. A review of artificial neural network based chemometrics applied in laser–induced breakdown spectroscopy analysis. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 180: 106183.

Limbeck, A., Brunnbauer, L., Lohninger, H., Pořízka, P., Modlitbová, P., Kaiser, J., Janovszky, P., Kéri, A., Galbács, G. 2021. Methodology and applications of elemental mapping by laser induced breakdown spectroscopy. *Analytica Chimica Acta* 1147: 72–98.

Liu, G.L., Kazarian, S.G. 2022. Recent advances and applications to cultural heritage using ATR–FTIR spectroscopy and ATR–FTIR spectroscopic imaging. *Analyst* 147(9): 1777–1797.

Łaciak, D., Borowski, M.P., Łydżba–Kopczyńska, B., Baron, J., Furmanek, M. 2019. Archaeometric characterisation and origin of black coatings on prehistoric pottery. *Chemie Der Erde* 79(3): 453–466.

MacDonald, S.A., Schardt, C. R., Masiello, D.J., Simmons, J.H. 2000. Dispersion analysis of FTIR reflection measurements in silicate glasses. *Journal of Non–Crystalline Solids* 275(1): 72–82.

Maguregui, M., Knuutinen, U., Trebolazabala, J., Morillas, H., Castro, K., Martinez–Arkarazo, I., Madariaga, J.M. 2012. Use of in situ and confocal Raman spectroscopy to study the nature and distribution of carotenoids in brown patinas from a deteriorated wall painting in Marcus Lucretius House (Pompeii). *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 402(4): 1529–1539.

Martinez–Lopez, C., Ovide, O., Corzo, R., Andrews, Z., Almirall, J. R., Trejos, T. 2022. Homogeneity assessment of the elemental composition of windshield glass by μ–XRF, LIBS and LA–ICP–MS analysis. *Forensic Chemistry* 27: 100384.

Marussi, G., Crosera, M., Prenesti, E., Callegher, B., Baracchini, E., Turco, G., Adami, G. 2023. From Collection or Archaeological Finds? A Non–Destructive Analytical Approach to Distinguish between Two Sets of Bronze Coins of the Roman Empire. *Molecules 28*(5): 2382.

Mazel, V., Reiche, I., Busignies, V., Walter, P., Tchoreloff, P. 2011. Confocal micro–X–ray fluorescence analysis as a new tool for the non–destructive study of the elemental distributions in pharmaceutical tablets. *Talanta* 85(1): 556–561.

McMillan, R., Amini, M., Weis, D. 2019. Splitting obsidian: Assessing a multiproxy approach for sourcing obsidian artifacts in British Columbia. *Journal of Archaeological Science: Reports* 28: 102040.

Miriello, D., Barca, D., Bloise, A., Ciarallo, A., Crisci, G.M., De Rose, T., Gattuso, C., Gazineo, F., La Russa, M.F. 2010. Characterisation of archaeological mortars from Pompeii (Campania, Italy) and identification of construction phases by compositional data analysis. *Journal of Archaeological Science* 37(9): 2207–2223.

Mohamed, M.A., Jaafar, J., Ismail, A.F., Othman, M.H.D., Rahman, M.A. 2017. Chapter 1—Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy, (w:) W.N. Hilal, A.F. Ismail, T. Matsuura, D. Oatley–Radcliffe (red.), *Membrane Characterization*.Amsterdam, 3–29.

Moro, D., Ulian, G., Valdré, G. 2020. SEM–EDS microanalysis of ultrathin glass and metal fragments: Measurement strategy by Monte Carlo simulation in cultural heritage and archaeology. *International Journal of Conservation Science* 11(1): 223–232.

Motanated, K. 2022. Application of X–ray fluorescence mapping in turbiditic sandstones, Huai Bo Khong Formation of Nam Pat Group, Thailand. *Open Geosciences* 14(1): 57–69.

Müller, K., Stege, H. 2003. Evaluation of the Analytical Potential of Laser–Induced Breakdown Spectrometry (LIBS) for the Analysis of Historical Glasses. *Archaeometry* 45(3): 421–433.

Naes, B.E., Umpierrez, S., Ryland, S., Barnett, C., Almirall, J.R. 2008. A comparison of laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry, micro X–ray fluorescence spectroscopy, and laser induced breakdown spectroscopy for the discrimination of automotive glass. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 63(10): 1145–1150.

Nasrazadani, S., Hassani, S. 2016. Chapter 2—Modern analytical techniques in failure analysis of aerospace, chemical, and oil and gas industries, (w:) W.A.S.H. Makhlouf, M. Aliofkhazraei (red.), *Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Oil and Gas Industry*. Oxford, 39–54.

Newbury, D.E., Ritchie, N.W.M. 2013. Elemental mapping of microstructures by scanning electron microscopy– energy dispersive X–ray spectrometry (SEM–EDS): Extraordinary advances with the silicon drift detector (SDD). *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 28(7): 973–988.

Nikonow, W., Rammlmair, D. 2016. Risk and benefit of diffraction in Energy Dispersive X–ray fluorescence mapping. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 125: 120–126.

Nunziante Cesaro, S., Lemorini, C. 2012. The function of prehistoric lithic tools: A combined study of use–wear analysis and FTIR microspectroscopy. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 86: 299–304.

Orange, M., Abedi, A., Le Bourdonnec, F.X., Vosough, B., Ebrahimi, G., Razani, M., Marro, C. 2021. Consuming local: The new obsidian source of Ideloo (Northwestern Iran) and first evidence of use by neighbouring prehistoric communities. *Geoarchaeology* 36(2): 266–282.

Oudemans, T. F. M., Boon, J. J., Botto, R. E. 2007. FTIR and Solid-State 13C CP/MAS NMR Spectroscopy of Charred and Non-Charred Solid Organic Residues Preserved in Roman Iron Age Vessels from the Netherlands. *Archaeometry* 49(3): 571–594.

Oujja, M., Sanz, M., Agua, F., Conde, J.F., García–Heras, M., Dávila, A., Oñate, P., Sanguino, J., Aldana, J. R. V. de, Moreno, P., Villegas, M. A., Castillejo, M. 2015. Multianalytical characterization of Late Roman glasses including nanosecond and femtosecond laser induced breakdown spectroscopy. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 30(7): 1590–1599.

Oujja, M., Palomar, T., Martínez–Weinbaum, M., Martínez–Ramírez, S., Castillejo, M. 2021. Characterization of medieval–like glass alteration layers by laser spectroscopy and nonlinear optical microscopy. *The European Physical Journal Plus* 136(8): 859.

Pagnotta, S., Grifoni, E., Legnaioli, S., Lezzerini, M., Lorenzetti, G., Palleschi, V. 2015. Comparison of brass alloys composition by laser–induced breakdown spectroscopy and self–organizing maps. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 103–104: 70–75.

Pagnotta, S., Lezzerini, M., Ripoll–Seguer, L., Hidalgo, M., Grifoni, E., Legnaioli, S., Lorenzetti, G., Poggialini, F., Palleschi, V. 2017. Micro–Laser–Induced Breakdown Spectroscopy (Micro–LIBS) Study on Ancient Roman Mortars. *Applied Spectroscopy* 71(4): 721–727.

Pagnotta, S., Legnaioli, S., Campanella, B., Grifoni, E., Lezzerini, M., Lorenzetti, G., Palleschi, V., Poggialini, F., Raneri, S. 2018. Micro–chemical evaluation of ancient potsherds by μ–LIBS scanning on thin section negatives. *Mediterranean Archaeology and Archaeometry* 18: 171–178.

Palomar, T., Oujja, M., García–Heras, M., Villegas, M.A., Castillejo, M. 2013. Laser induced breakdown spectroscopy for analysis and characterization of degradation pathologies of Roman glasses. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 87: 114–120.

Papadopoulou, D., Zachariadis, G., Anthemidis, A., Tsirliganis, N., Stratis, J. 2006. Development and optimisation of a portable micro–XRF method for in situ multi–element analysis of ancient ceramics. *Talanta* 68(5), 1692–1699.

Pettitt, P., Rockman, M., Chenery, S. 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.

Pięta, E., Olszewska–Świetlik, J., Paluszkiewicz, C., Zając, A., Kwiatek, W.M. 2019. Application of ATR–FTIR mapping to identification and distribution of pigments, binders and degradation products in a 17th century painting. *Vibrational Spectroscopy* 103: 102928.

Piñon, V., Mateo, M.P., Nicolas, G. 2013. Laser–Induced Breakdown Spectroscopy for Chemical Mapping of Materials. *Applied Spectroscopy Reviews* 48(5): 357–383.

Pirovska, A., Antonova, K., Malcheva, G., Tankova, V., Blagoev, K. 2020. Nature and physicochemical features of the incrusted white decoration on pottery from two sites in Bulgaria, dated to the chalcolithic period (IV mill BC). *Journal of Archaeological Science: Reports* 29: 102142.

Purowski, T., Syta, O., Wagner, B. 2020. Between east and west: Glass beads from the eighth to third centuries BCE from Poland. *Archaeometry* 62(4): 752–773.

Radziemski, L.J., Loree, T.R., Cremers, D.A., Hoffman, N.M. 1983. Time–resolved laser–induced breakdown spectrometry of aerosols. *Analytical Chemistry* 55(8): 1246–1252.

Radziemski, L.J., Cremers, D. A., Loree, T.R. 1983. Detection of beryllium by laser–induced–breakdown spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 38(1): 349–355.

Rakovský, J., Musset, O., Buoncristiani, J., Bichet, V., Monna, F., Neige, P., Veis, P. 2012. Testing a portable laser–induced breakdown spectroscopy system on geological samples. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 74–75: 57–65.

Rifai, K., Constantin, M., Yilmaz, A., Özcan, L. Ç., Doucet, F.R., Azami, N. 2022. Quantification of Lithium and Mineralogical Mapping in Crushed Ore Samples Using Laser Induced Breakdown Spectroscopy. *Minerals* 12(2): 253.

Robertshaw, P., Wood, M., Melchiorre, E., Popelka–Filcoff, R. S., Glascock, M. D. 2010. Southern African glass beads: Chemistry, glass sources and patterns of trade. *Journal of Archaeological Science* 37(8): 1898–1912.

Robertshaw, P., Wood, M., Haour, A., Karklins, K., Neff, H. 2014. Chemical analysis, chronology, and context of a European glass bead assemblage from Garumele, Niger. *Journal of Archaeological Science* 41: 591–604.

Ruan, F., Zhang, T., Li, H. 2019. Laser–induced breakdown spectroscopy in archeological science: A review of its application and future perspectives. *Applied Spectroscopy Reviews* 54(7): 573–601.

Ruberto, C., Mazzinghi, A., Massi, M., Castelli, L., Czelusniak, C., Palla, L., Gelli, N., Betuzzi, M., Impallaria, A., Brancaccio, R., Peccenini, E., Raffaelli, M. 2016. Imaging study of Raffaello's "La Muta" by a portable XRF spectrometer. *Microchemical Journal* 126: 63–69.

Samek, O., Beddows, D.C.S., Telle, H.H., Kaiser, J., Liška, M., Cáceres, J.O., Gonzáles Ureña, A. 2001. Quantitative laser–induced breakdown spectroscopy analysis of calcified tissue samples. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 56(6): 865–875.

Sarah, G., Gratuze, B., Barrandon, J.N. 2007. Application of laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA–ICP–MS) for the investigation of ancient silver coins. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 22(9): 1163–1167.

Schibille, N., Gratuze, B., Ollivier, E., Blondeau, É. 2019. Chronology of early Islamic glass compositions from Egypt. *Journal of Archaeological Science* 104: 10–18.

Schibille, N., Lankton, J.W., Gratuze, B. 2022. Compositions of early Islamic glass along the Iranian Silk Road. *Geochemistry* 82(4): 125903.

Sdralia, A.M., Kassianidou, V., Rehren, T. 2023. Late Roman copper smelting in Polis Chrysochous, Cyprus. *Journal of Archaeological Science: Reports* 48: 103889.

Seymour, L.M., Keenan–Jones, D., Zanzi, G.L., Weaver, J.C., Masic, A. 2022. Reactive ceramic aggregates in mortars from ancient water infrastructure serving Rome and Pompeii. *Cell Reports Physical Science* 3(9): 101024.

Shaltout, A.A., Mahamoud, M.H., Abd–Elkader, O.H., Yassin, M.A. 2020. Elemental mapping of some collected gold samples from Al–Amar gold mine in Saudi Arabia. *Environmental Earth Sciences* 79(24): 527.

Shashoua, Y., Degn Berthelsen, M.-B. L., Nielsen, O. F. 2006. Raman and ATR-FTIR spectroscopies applied to the conservation of archaeological Baltic amber. *Journal of Raman Spectroscopy* 37(10): 1221–1227.

Silveira, J., Godinho, J., Mata, A., Carvalho, M., Pessanha, S. 2015. Assessment of teeth elemental content using μ–EDXRF: Effects by in–office and at–home bleaching products. *X–Ray Spectrometry* 44(1): 3–6.

Siu, I., Henderson, J., Qin, D., Ding, Y., Cui, J. 2021. A study of 11th–15th centuries AD glass beads from Mambrui, Kenya: An archaeological and chemical approach. *Journal of Archaeological Science: Reports* 36(3):102750.

Smith, B.C. (2011). *Fundamentals of Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (2. wyd.). Boca Raton.

Solongo, S., Tengis, S., Enkhbat, G., Orgil, B., Erdenebold, L. 2023. Multimethod characterization of terracotta figurines and lime mortar from the elite burials Shoroon Bumbagar I and II, Mongolia. *Archaeometry* 65(1): 49–63.

Stevenson, C.M., Gleeson, M., Novak, S.W. 2014. The surface hydration of soda–lime glass and its potential for historic glass dating. *Journal of Archaeological Science* 52: 293–299.

Suda, Y., Adachi, T., Kazutaka, S., Osanai, Y. 2021. Archaeological significance and chemical characterization of the obsidian source in Kirigamine, central Japan: Methodology for provenance analysis of obsidian artefacts using XRF and LA–ICP–MS. *Journal of Archaeological Science* 129: 105377

Sun, X., Zhang, X., Wang, X., Wang, Y., Li, Y., Peng, S., Shao, S., Liu, Z., Shang, H., Sun, T. 2020. Confocal three–dimensional micro–X–ray fluorescence spectroscopy used to retrieve the information covered in printed paper. *X–Ray Spectrometry* 49(2): 267–273.

Takahashi, T., Yoshino, S., Takaya, Y., Nozaki, T., Ohki, K., Ohki, T., Sakka, T., Thornton, B. 2020. Quantitative in situ mapping of elements in deep–sea hydrothermal vents using laser–induced breakdown spectroscopy and multivariate analysis. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 158: 103232.

Tarquini, G., Nunziante Cesaro, S., Campanella, L. 2014. Identification of oil residues in Roman amphorae (Monte Testaccio, Rome): A comparative FTIR spectroscopic study of archeological and artificially aged samples. *Talanta* 118*:* 195–200.

Teodor, E. D., Lițescu, S. C., Neacșu, A., Truică, G., Albu, C. 2009. Analytical methods to differentiate Romanian amber and Baltic amber for archaeological applications. *Central European Journal of Chemistry* 7(3): 560–568.

Teodor, E. S., Teodor, E. D., Virgolici, M., Manea, M. M., Truică, G., Lițescu, S. C. 2010. Non-destructive analysis of amber artefacts from the prehistoric Cioclovina hoard (Romania). *Journal of Archaeological Science* 37(10): 2386–2396.

Thickett, D., Pretzel, B. 2020. FTIR surface analysis for conservation. *Heritage Science* 8(1): 5.

Thompson, T. J. U., Gauthier, M., Islam, M. 2009. The application of a new method of Fourier Transform Infrared Spectroscopy to the analysis of burned bone. *Journal of Archaeological Science* 36(3): 910–914.

Tkachenko, Y., Niedzielski, P. 2022. FTIR as a Method for Qualitative Assessment of Solid Samples in Geochemical Research: A Review. *Molecules* 27(24): 8846.

Traoré, M., Kaal, J., Martínez Cortizas, A. 2016. Application of FTIR spectroscopy to the characterization of archeological wood. *Spectrochimica Acta – Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 153: 63–70.

Trąbska, J., Wesełucha-Birczyńska, A., Zięba-Palus, J., Runge, M. T. 2011. Black painted pottery, Kildehuse II, Odense County, Denmark. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 79(4): 824–830.

Trojsi, G., Positano, M., Palumbi, G., Di Lorenzo, A. 2002. Archaeometrlcal issues related to transcaucasian pottery from Georgia. *Periodico Di Mineralogia* 71: 239–246.

Tronner, K., Nord, A. G., Borg, G. Ch. 1995. Corrosion of archaeological bronze artefacts in acidic soil. *Water, Air, & Soil Pollution* 85(4): 2725–2730.

Tsoupra, A., Clist, B., da Conceição Lopes, M., Moita, P., Barrulas, P., da Piedade de Jesus, M., da Silva Domingos, S., Bostoen, K., Mirao, J. 2022. A multi–analytical characterization of fourteenth to eighteenth century pottery from the Kongo kingdom, Central Africa. *Scientific Reports* 12(1): 9943.

Tzankova, N., Mihaylov, P. 2019. Chemical characterization of glass beads from the necropolis of Dren–Delyan (6th–4th century BC), Southwest Bulgaria. *Geologica Balcanica* 48(2): 31–50.

Vilarigues, M., da Silva, R. C. 2004. Ion beam and infrared analysis of medieval stained glass. *Applied Physics A* 79(2): 373–378.

Williams, R., Taylor, G., Orr, C. 2020. PXRF method development for elemental analysis of archaeological soil. *Archaeometry* 62(6): 1145–1163.

Winefordner, J. D., Gornushkin, I. B., Correll, T., Gibb, E., Smith, B. W., Omenetto, N. 2004. Comparing several atomic spectrometric methods to the super stars: Special emphasis on laser induced breakdown spectrometry, LIBS, a future super star. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 19(9): 1061–1083.

Winter, N. J. de, Sinnesael, M., Makarona, C., Vansteenberge, S., Claeys, P. 2017. Trace element analyses of carbonates using portable and micro–X–ray fluorescence: Performance and optimization of measurement parameters and strategies. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 32(6): 1211–1223.

Wood, M., Dussubieux, L., Wynne–Jones, S., Fleisher, J. 2022. Glass Beads from Songo Mnara, Tanzania: Chemical Composition and Evidence for Local Bead Manufacture. *African Archaeological Review* 40: 357–376.

Zeisler, R. 1998. Reference materials for small–sample analysis. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry* 360(3): 376–379.

Zeming, D., Jun, L., Qili, J., Qiuli, P., Lin, C. 2019. A type of portable micro–EDXRF spectrometer with laser displacement sensor. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 442: 13–18.

Zhao, C., Dong, D., Du, X., Zheng, W. 2016. In–Field, In Situ, and In Vivo 3–Dimensional Elemental Mapping for Plant Tissue and Soil Analysis Using Laser–Induced Breakdown Spectroscopy. *Sensors* 16(10): 1764.

Živković, S., Botto, A., Campanella, B., Lezzerini, M., Momčilović, M., Pagnotta, S., Palleschi, V., Poggialini, F., Legnaioli, S. 2021. Laser–Induced Breakdown Spectroscopy elemental mapping of the construction material from the Smederevo Fortress (Republic of Serbia). *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 181*:* 106219.





Wykaz autorów

Łukasz Banaszek
Historic Environment Scotland
16 Bernard Terrace,
EH8 9NX Edynburg
Wielka Brytania
OCID: 0000-0001-7574-0319
e-mial: lukasz.banaszek@hes.scot

Cezary Bahyrycz
Badacz niezależny
ORCID: 0000-0001-6822-1481
email: cezary.bahyrycz@gmail.com

Ryszard Krzysztof Borówka
Instytut Nauk o Morzu i Środowisku
Uniwersytet Szczeciński
ul. Mickiewicza 18
70-383 Szczecin
ORCID: 0000-0002-7232-3453,
e-mail: ryszard.borowka@usz.edu.pl

Janusz Czebreszuk
Wydział Archeologii
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu
ul. Uniwersytetu Poznańskiego 7
61-614 Poznań
ORCID: 0000-0001-8487-6031
email: jancze@amu.edu.pl

Rafał A. Fetner
Katedra Bioarcheologii
Wydział Archeologii
Uniwersytet Warszawski
Ul. Krakowskie Przedmieście 26/28
00-927 Warszawa
ORCID: 0000-0002-9489-0424
e-mail: rafetner@uw.edu.pl

Anna Gruszczyńska-Ziółkowska
Instytut Muzykologii
Wydział Nauk o Kulturze i Sztuce
Uniwersytet Warszawski
ul. Krakowskie Przedmieście 26/28
00-927 Warszawa
ORCID: 0000-0002-3168-3460
e-mail: a.gruszczynska@uw.edu.pl

Jarosław Jasiewicz
Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych,
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu
ul. Bogumiła Krygowskiego 10
61-880 Poznań
ORCID: 0000-0003-2837-9078
e-mail: jarekj@amu.edu.pl

Anna B. Kowalska
Muzeum Narodowe w Szczecinie
ul. Staromłyńska 27
70-561 Szczecin
ORCID: 0000-0003-2086-0713
e-mail: a.kowalska@muzeum.szczecin.pl

Aldona Kurzawska
Wydział Archeologii
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu
ul. Uniwersytetu Poznańskiego 7
61-614 Poznań
ORCID: 0000-0003-0215-046X
e-mail: aldkur@amu.edu.pl

Dagmara Łaciak
Instytut Archeologii
Uniwersytet Wrocławski
ul. Szewska 48
50-137 Wrocław
ORCID: 0000-0003-2472-8226
e-mail: dagmara.laciak@uwr.edu.pl

Maksym Mackiewicz
Fundacja Archeolodzy.org
Rynek 21/6
58-100 Świdnica
ORCID: 0000-0003-2509-4739
e-mail: max@archeolodzy.org

Piotr Majorek
Muzeum Archeologiczne w Poznaniu
ul. Wodna 27
61-781 Poznań
e-mail: piotr.majorek@muzarp.poznan.pl

Magdalena Majorek-Lipowicz
Pracownia Datowania i Konserwacji Zabytków
Instytut Archeologii
Wydział Filozoficzno-Historyczny
Uniwersytet Łódzki
ul. Narutowicza 68
90-136 Łódź
ORCID: 0000-0003-1254-9917
e-mail: magdalena.majorek@uni.lodz.pl

Beata Marciniak-Maliszewska
Wydział Geologii
Uniwersytet Warszawski
ul. Żwirki i Wigury 93
02-089 Warszawa
ORCID: 0000-0001-9147-6693
e-mail: b.maliszewska@uw.edu.pl

Andrzej Michałowski
Wydział Archeologii
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu
ul. Uniwersytetu Poznańskiego 7
61-614 Poznań
ORCID: 0000-0003-1778-9725
e-mail: andrzej.michalowski@amu.edu.pl

Ewelina Miśta-Jakubowska
Narodowe Centrum Badań Jądrowych
ul. Andrzeja Sołtana 7
08-400 Otwock

Instytut Archeologii
Uniwersytetu Jagiellońskiego
ul. Gołębia 11
31-007 Kraków
ORCID: 0000-0002-0053-8711
e-mail: ewelina.mista@ncbj.gov.pl

Jakub Niebieszczański
Wydział Archeologii
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu
ul. Uniwersytetu Poznańskiego 7
61-614 Poznań
ORCID: 0000-0002-2147-7620
e-mail: niebieszczanski@amu.edu.pl

Przemysław Niedzielski
Interdyscyplinarna Grupa Badawcza Archeometria
Wydział Archeologii i Wydział Chemii
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu
ul. Uniwersytetu Poznańskiego 7–8
61–614 Poznań
ORCID: 0000-0002-2787-9057
e-mail: przemyslaw.niedzielski@amu.edu.pl

Daniel Okupny
Instytut Nauk o Morzu i Środowisku
Uniwersytet Szczeciński
ul. Mickiewicza 18
70-383 Szczecin
ORCID: 0000-0002-8836-6044
e-mail: daniel.okupny@usz.edu.pl

Justyna Orłowska
Instytut Archeologii
Uniwersytet Mikołaja Kopernika
ul. Szosa Bydgoska 44/48
87-100 Toruń
ORCID: 0000-0002-7843-3506
e-mail: justyna.orlowska@umk.pl

Grzegorz Osipowicz
Instytut Archeologii
Uniwersytet Mikołaja Kopernika
ul. Szosa Bydgoska 44/48
87-100 Toruń
ORCID: 0000-0002-4393-655X
e-mail: grezegor@umk.pl

Jędrzej Proch
Wydział Archeologii
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu
ul. Uniwersytetu Poznańskiego 7
61–614 Poznań

Wydział Chemii
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu
ul. Uniwersytetu Poznańskiego 8
ORCID: 0000-0003-0023-044X
e-mail: jedrzej.proch@amu.edu.pl

Tomasz Purowski
Instytut Archeologii i Etnologii
Polskiej Akademii Nauk
al. Solidarności 105
00-140 Warszawa
ORCID 0000-0003-1916-7698
e-mail: t.purowski@iaepan.edu.pl

Magdalena Przymorska-Sztuczka
Muzeum Archeologiczne w Biskupinie
Biskupin 17
88-410 Gąsawa
ORCID: 0000-0002-4169-0154
e-mail: m.przymorska@biskupin.pl

Iwona Sobkowiak-Tabaka
Wydział Archeologii
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu
ul. Uniwersytetu Poznańskiego 7
61-614 Poznań
ORCID: 0000-0001-5913-1177
e-mail: iwosob@amu.edu.pl

Dawid Sych
School of Archaeology and Ancient History
University of Leicester
University Road
LE1 7RH Leicester
Wielka Brytania
ORCID: 0000-0002-3166-521
e-mail: dawid.sych@gmail.com,
das51@leicester.ac.uk

Olga Syta
Wydział Chemii
Uniwersytet Warszawski
ul. Pasteura 1
02-093 Warszawa
ORCID: 0009-0006-0297-2593
e-mail: osyta@chem.uw.edu.pl

Sebastian Teska
Muzeum Archeologiczne w Poznaniu
ul. Wodna 27
61-781 Poznań
ORCID: 0000-0002-2913-6898
email: sebastian.teska@gmail.com

Joanna Trąbska
Instytut Archeologii
Uniwersytet Rzeszowski
ul. Moniuszki 10
35-015 Rzeszów
ORCID: 0000-0003-2160-6629
email: jtrabska@ur.edu.pl

Agata Ulanowska
Wydział Archeologii
Uniwersytet Warszawski
ul. Krakowskie Przedmieście 26/28
00-927 Warszawa
ORCID: 0000-0002-4946-2711
e-mail: a.ulanowska@uw.edu.pl

Barbara Wagner
Wydział Chemii
Uniwersytet Warszawski
ul. Żwirki i Wigury 101
02-089 Warszawa
ORCID: 0000-0002-5398-6438
e-mail: barbog@chem.uw.edu.pl