

# MIKROPRZESZŁOŚĆ

Badania specjalistyczne w archeologii



pod redakcją  
Aldony Kurzawskiej i Iwony Sobkowiak-Tabaki



WYDZIAŁ  
ARCHEOLOGII

# MIKROPRZESZŁOŚĆ

Badania specjalistyczne w archeologii

pod redakcją

Aldony Kurzawskiej i Iwony Sobkowiak-Tabaki

Poznań 2021

Mikroprzeszłość  
Badania specjalistyczne w archeologii

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

Redakcja:  
Aldona Kurzawska  
Iwona Sobkowiak-Tabaka

Opracowanie techniczne i skład komputerowy:  
Bartłomiej Gruszka

Korekta językowa:  
Agnieszka Gruszka

Projekt okładki i rycin poprzedzających rozdziały:  
Przemysław Matejko

ISBN: 978-83-946591-8-9

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

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

Wydział Archeologii  
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu

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

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

Poznań 2021

Nakład:  
200 egz.

## SPIS TREŚCI

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



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



# Antropologia fizyczna

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

---

## WSTĘP

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

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

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

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

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

Według innych kryteriów stosuje się podział antropologii na:

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

## BADANIA MIKROSKOPOWE W ANTROPOLOGII

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

### Mikromorfometria

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

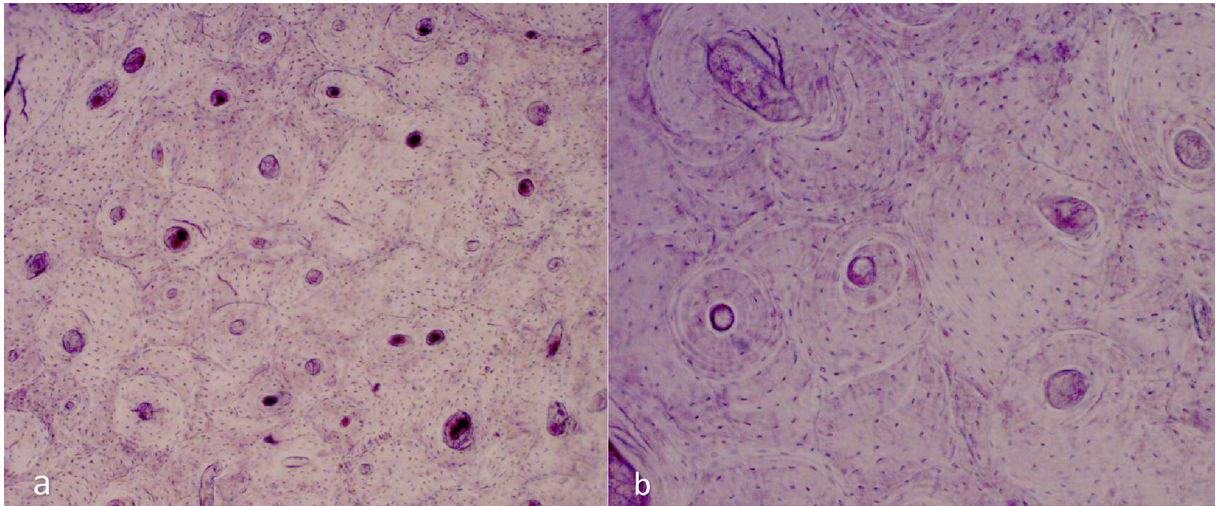
Prowadzone w praktyce medyczno-sądowej badania na próbkach pobranych ze szczątków, dające możliwość weryfikacji otrzymanych wyników obserwacji i pomiarów z wiekiem metrykalnym zmarłych osób, pozwoliło na opracowanie metod, które z powodzeniem można stosować w badaniach materiałów szkieletowych ze stanowisk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

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

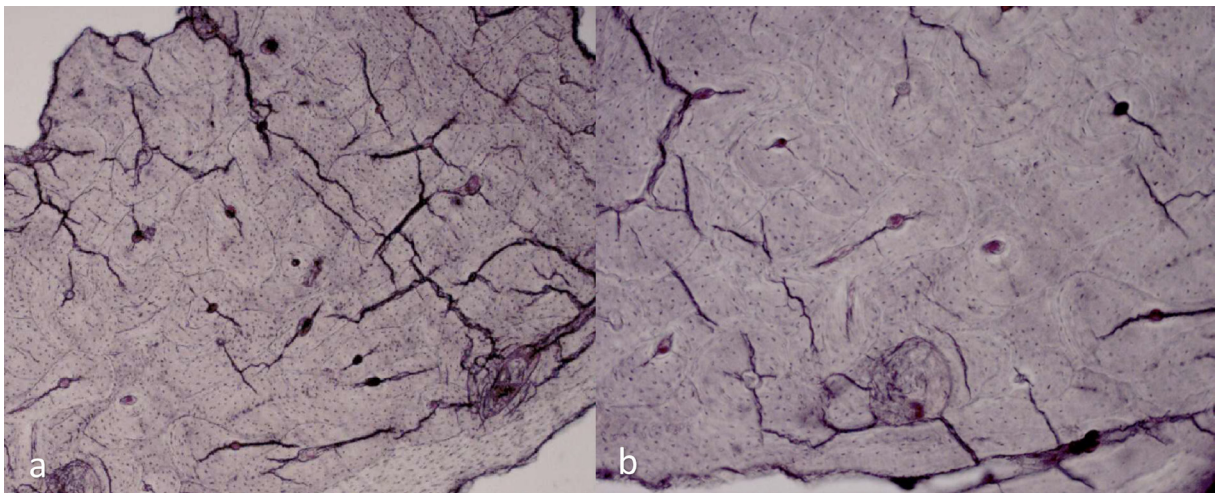
### **Analiza mikroskopowa wybranych elementów kostnych, przykłady badań**

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

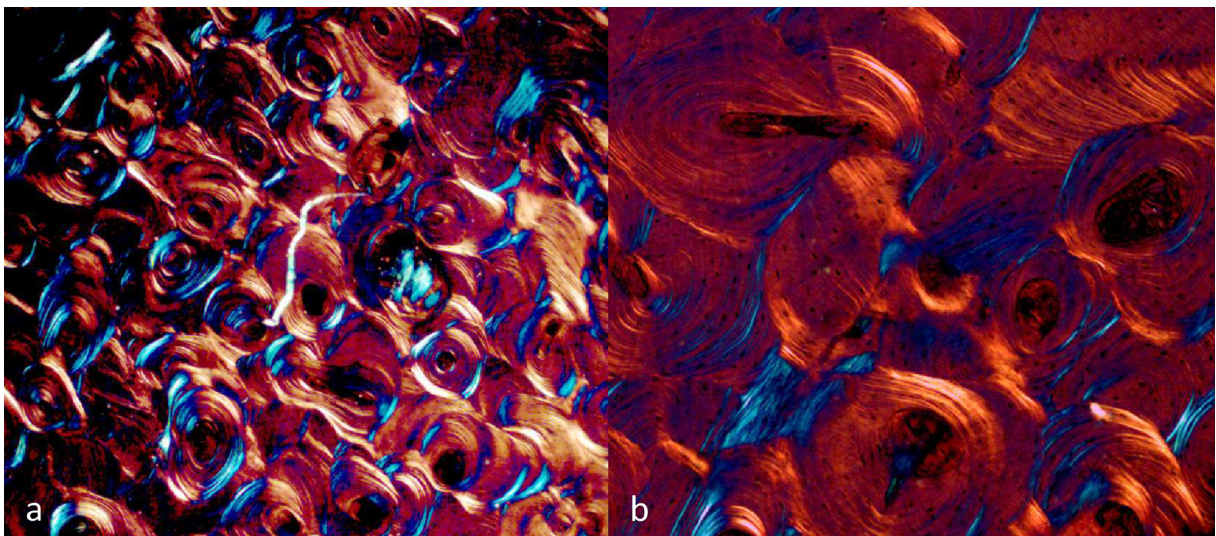




**Ryc. 1.** Szlif trzonu obojczyka 59-letniego mężczyzny, światło przechodzące, powiększenie 50× (a) i 100× (b) (wyk. J. Sobol)

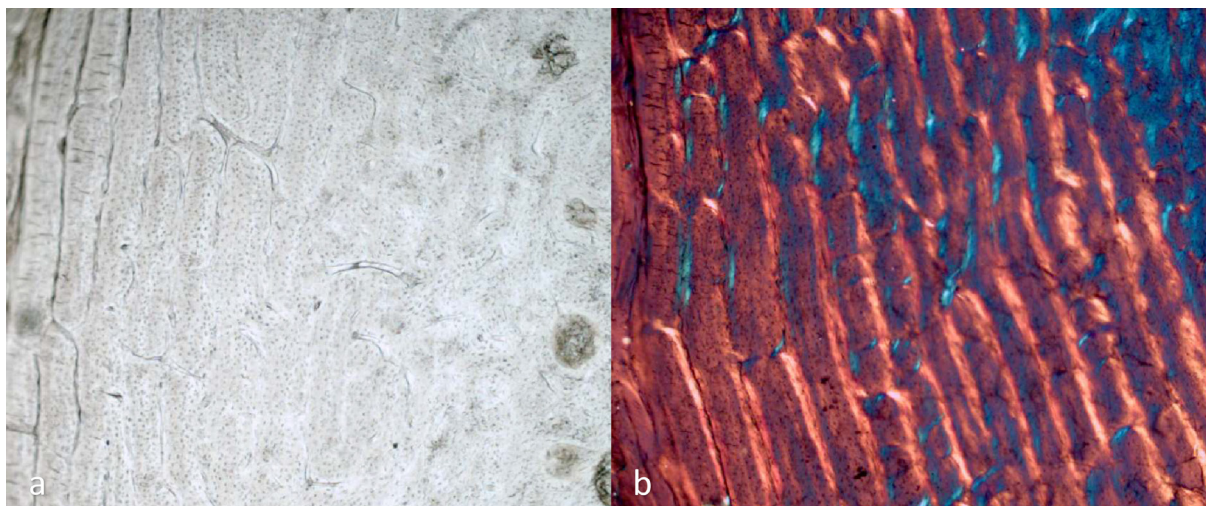


**Ryc. 2.** Szlif trzonu spalonego obojczyka 22-letniego mężczyzny, światło przechodzące, powiększenie 50× (a) i 100× (b) (wyk. J. Sobol)

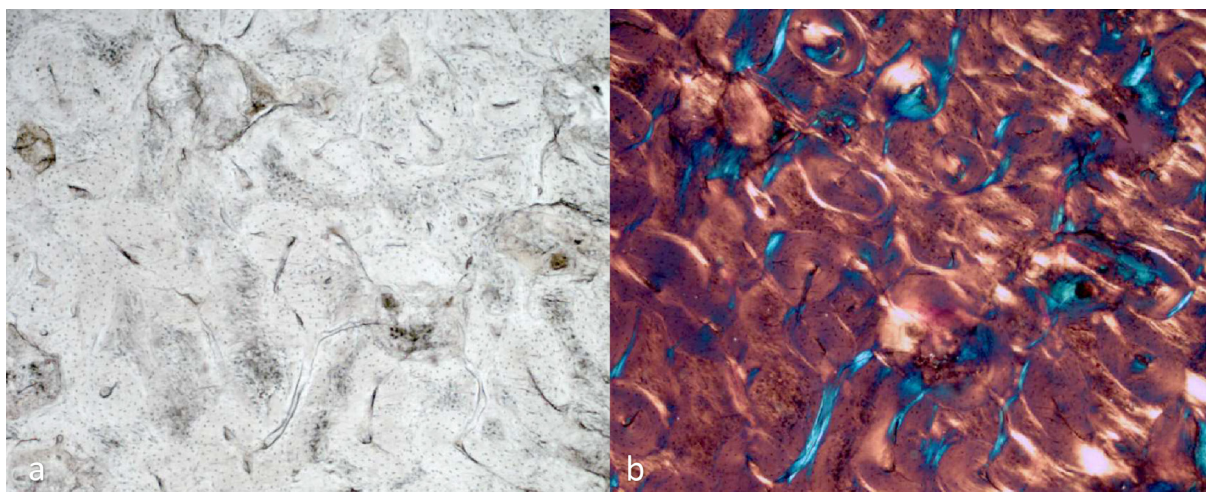


**Ryc. 3.** Szlif trzonu obojczyka 54-letniego mężczyzny, światło spolaryzowane, powiększenie 50× (a) i 100× (b) (wyk. J. Sobol)

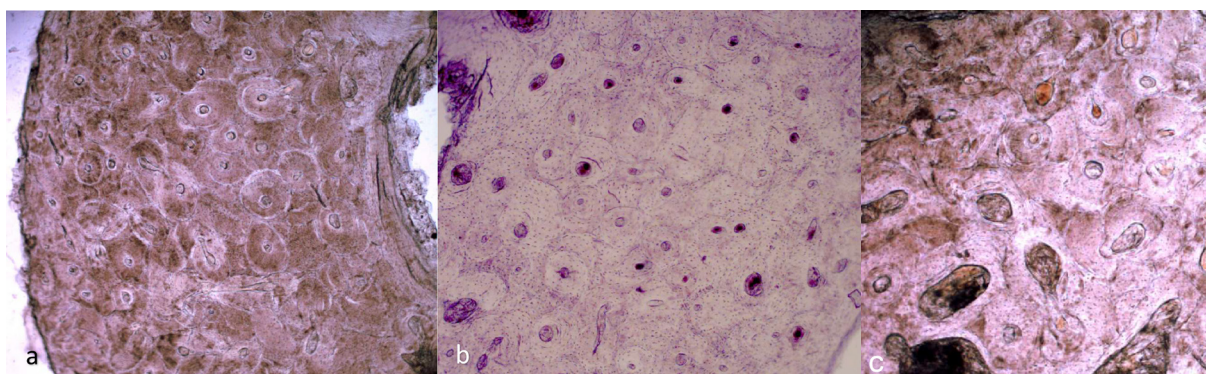




**Ryc. 4.** Szlif trzonu kości udowej świni, światło przechodzące (a) i światło spolaryzowane (b), powiększenie 50× (wyk. J. Sobol)



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



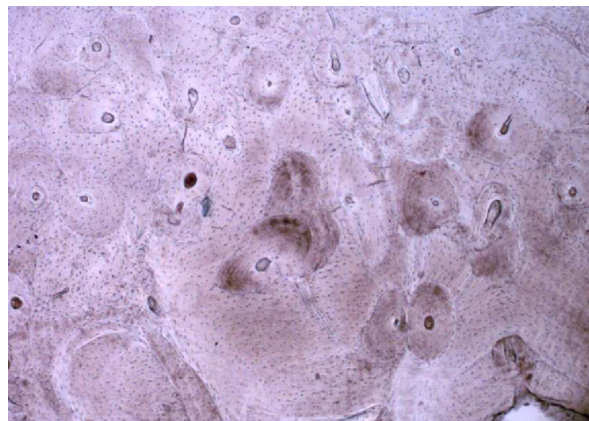
**Ryc. 6.** Preparaty histologiczne obojczyka osób płci żeńskiej w wieku: 42 lata (a), 66 lat (b), 72 lata (c) (wyk. J. Sobol)



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

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

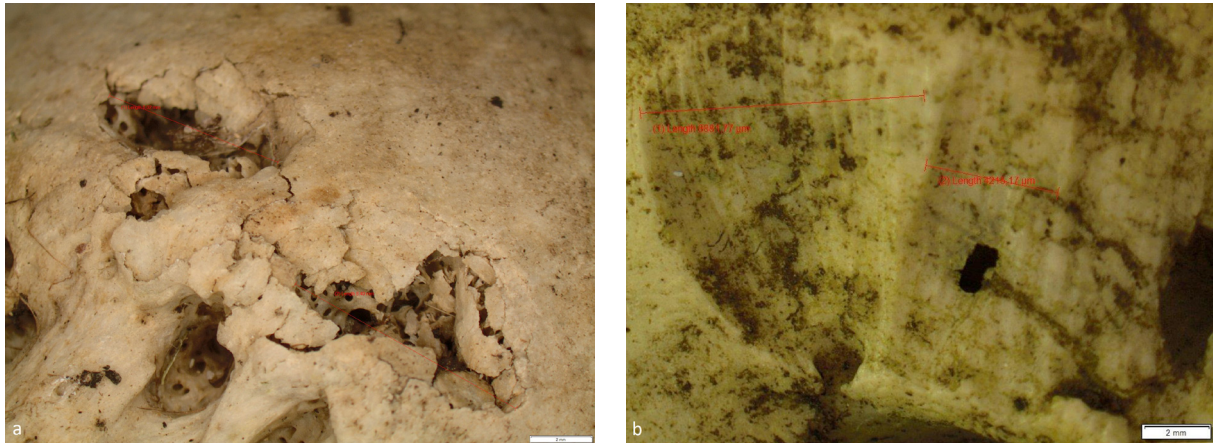
Przykłady z badań archeologicznych na rycinach 11a, b, c i d przedstawiają kość strzałkową szkieletu osobnika dorosłego płci żeńskiej z grobu nr 13 ze stanowiska Hrubieszów-Podgórze, datowanego na wczesną epokę brązu. Na kości strzałkowej prawej stwierdzono dwie grupy ubytków powierzchniowej warstwy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



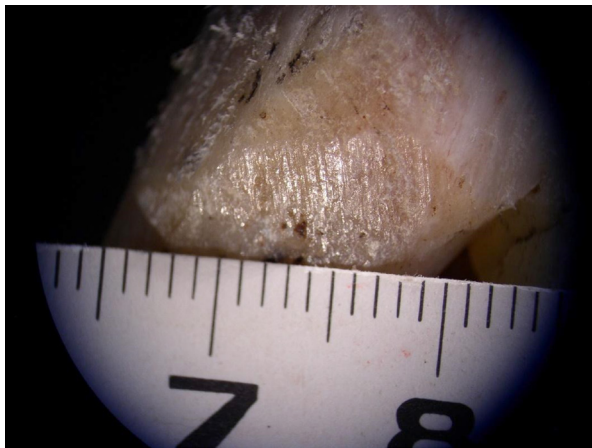
**Ryc. 7.** Preparat histologiczny obojczyka osoby płci męskiej w wieku 23 lata (wyk. J. Sobol)



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



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



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

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

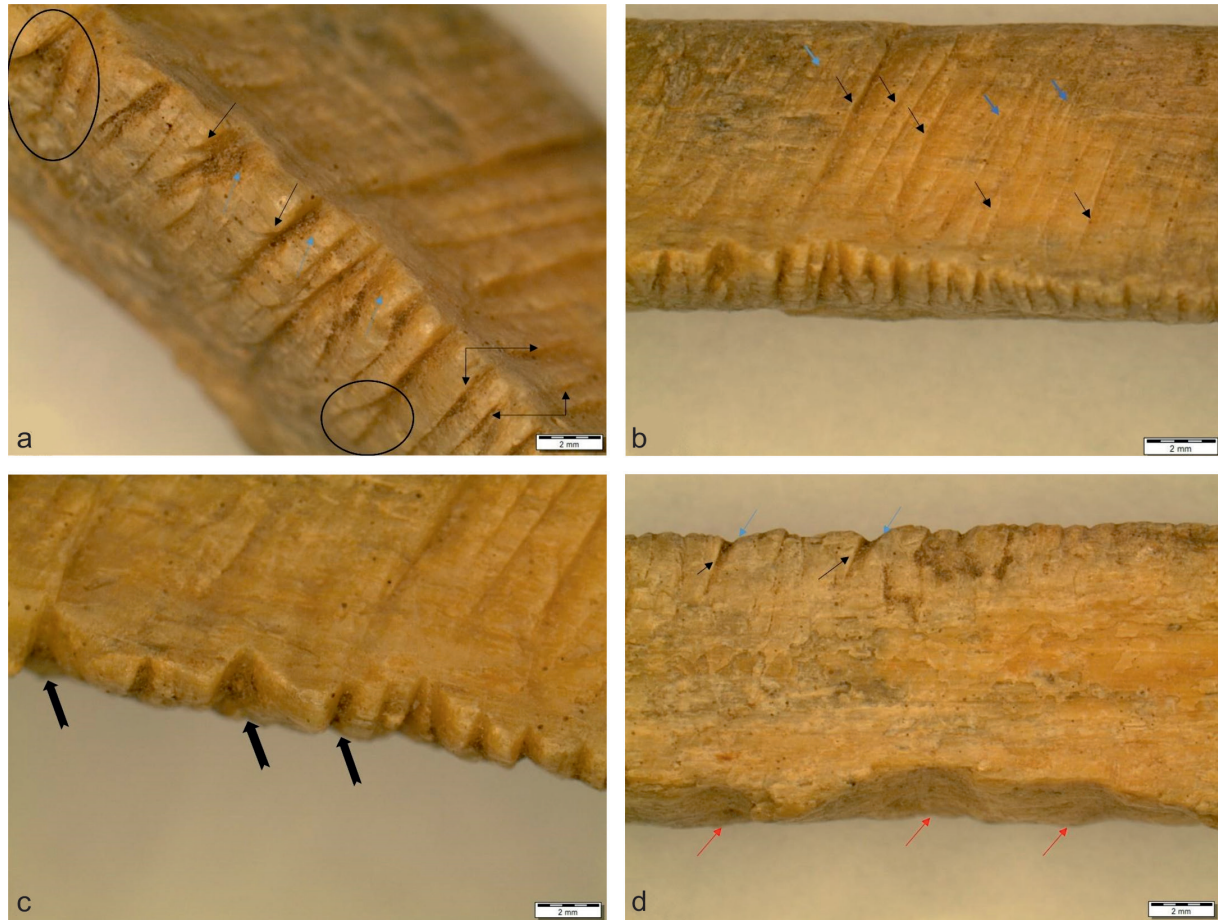
Charakter drugiego rodzaju ubytków wskazuje, że powstały one w wyniku działania narzędzia ostrokrawędzistego na skutek postępującego przesuwania względem powierzchni i brzegu trzonu kości z wywieraniem pewnego nacisku na tę ostrą krawędź. Ostrze użytego przedmiotu było ustawione prostopadle do osi długiej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

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

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

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





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

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

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

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

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



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

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

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

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

### Badania mikroskopowe zębów

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





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



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

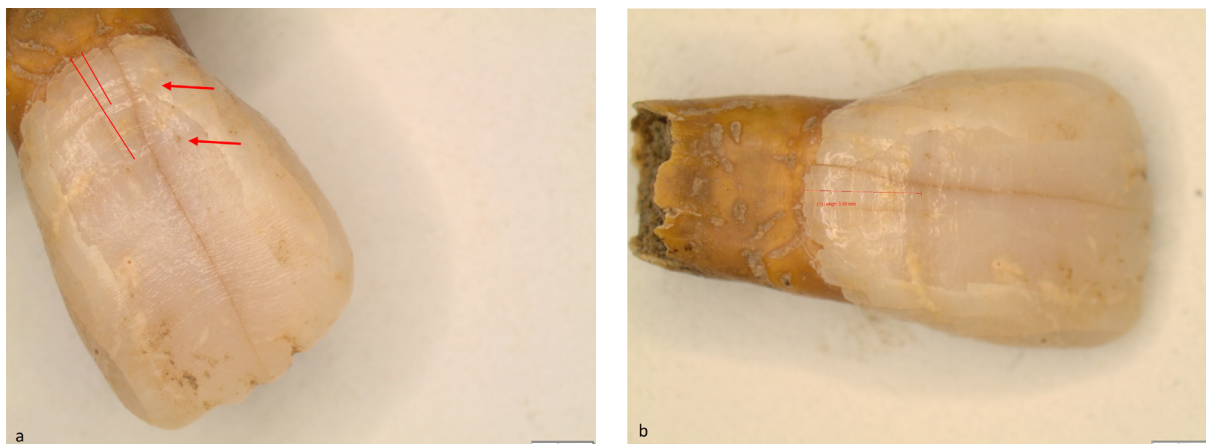
warunków życia populacji pradziejowych (Przystańska i in. 2016). Na podstawie obserwacji budowy zewnętrznej i badania mikrostruktury zębów uzyskuje się wiele informacji dotyczących morfologii, kształtu, wielkości, warunków zgryzowych, jak również miejscowych i uogólnionych stanach chorobowych czy anomaliach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

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

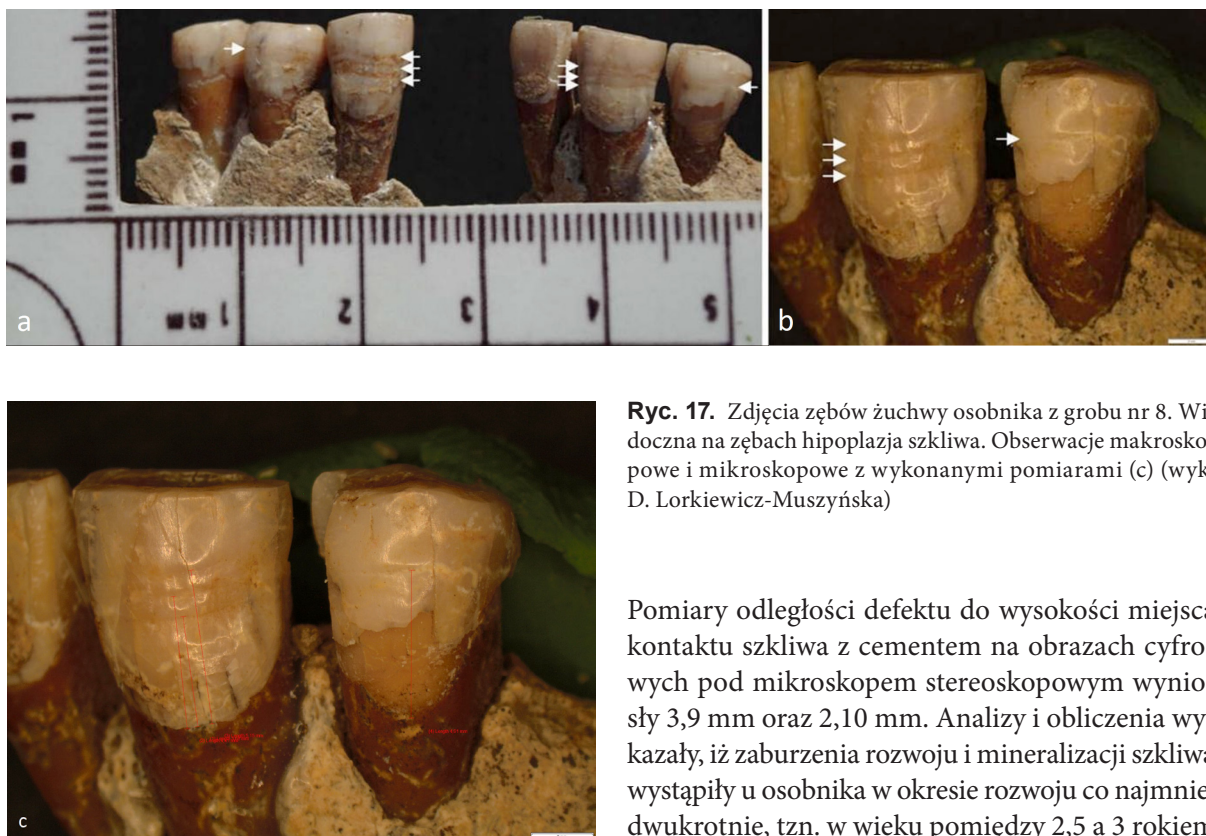


**Ryc. 15.** Zdjęcie fragmentu wzoru pod mikroskopu stereoskopowego (kość łokciowa lewa) – widoczne regularne wzory w formie łańcuszka pokrywające jednolicie powierzchnię kości, obserwuje się nagromadzenie barwnika w zagłębieniach o charakterze naturalnych zmian erozyjnych (wyk. D. Lorkiewicz-Muszyńska)

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



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



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

Pomiary odległości defektu do wysokości miejsca kontaktu szkliwa z cementem na obrazach cyfrowych pod mikroskopem stereoskopowym wyniosły 3,9 mm oraz 2,10 mm. Analizy i obliczenia wykazały, iż zaburzenia rozwoju i mineralizacji szkliwa wystąpiły u osobnika w okresie rozwoju co najmniej dwukrotnie, tzn. w wieku pomiędzy 2,5 a 3 rokiem życia i w wieku około 3,5 lat.

Na rycinie 17 przedstawiono analizy makroskopowe i mikroskopowe zębów z hipoplazją szkliwa osobnika z grobu nr 8 (ryc. 17a, b i c) ze stanowiska w Rogalinie, gm. Horodło, datowanego na wczesną epokę brązu. Hipoplazja występowała obustronnie na zębach żuchwy po stronie prawej i lewej.

oszacowano wiek wystąpienia defektu z dokładnością do pół roku. Szacowanie wieku wystąpienia defektu przeprowadzono przy użyciu diagramu mineralizacji szkliwa uzębienia stałego, wykonanego przez Masslera i współpracowników (1941), w modyfikacji Swardstedta (1966) (Goodman i in. 1984).



### Badania obrazowania medycznego w antropologii

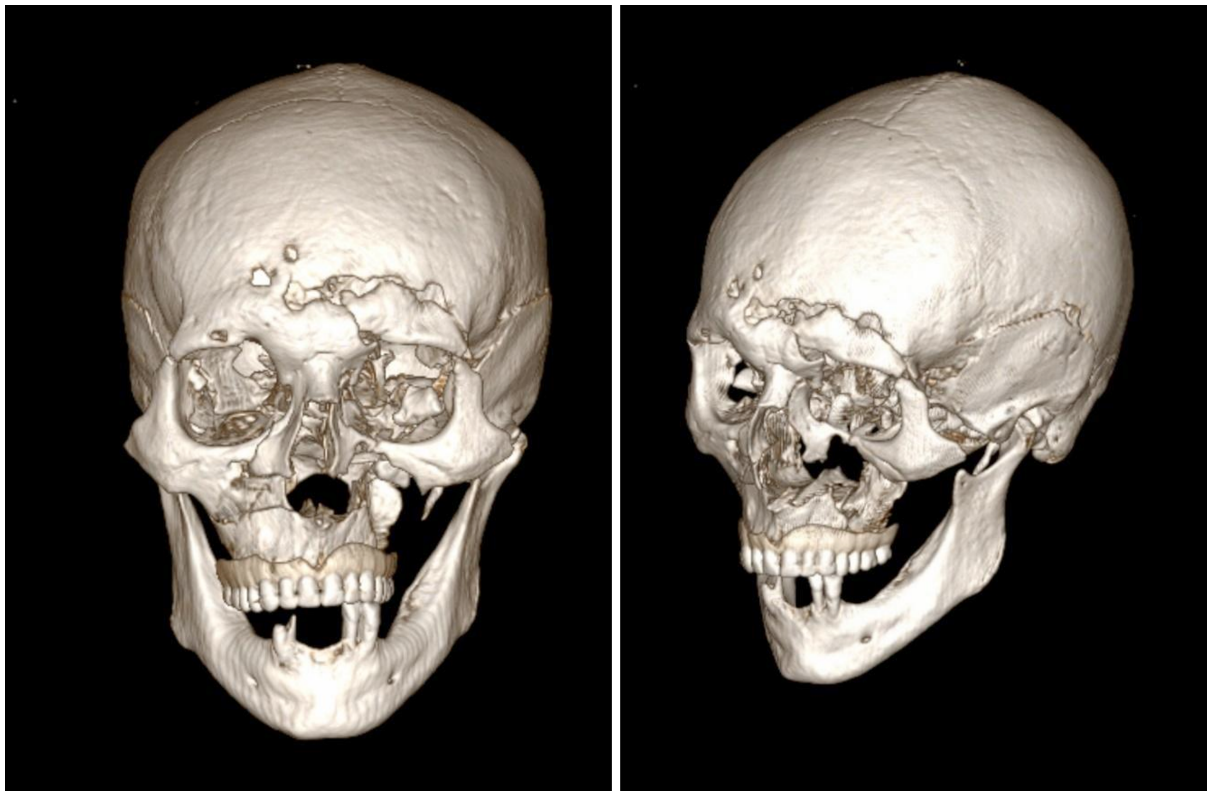
W badaniach materiałów szkieletowych z wykorzystaniem tomografii komputerowej (CT), tomografii stożkowej (CBCT) czy mikrotomografii (micro-CT) nie są wymagane specjalna preparatyka próbek, barwienie czy cięcie. Badania pozwalają na prowadzenie analiz na poszczególnych projekcjach przekrojowych 2D i przestrzennych 3D. Można wybierać dowolny region zainteresowania oraz prowadzić badania ilościowe i jakościowe, tworząc realistyczne modele 3D obiektu oraz jego struktury wewnętrznej. Tomografia komputerowa pozwala m.in. na zobrazowanie charakteru i dokładnej lokalizacji złamań, stopnia zaawansowania kostnienia, zmian chorobowych czy analizy zamkniętych struktur kostnych.

W trakcie dwóch sezonów badawczych w okresie 27.11-1.12.2017 r. i 7-18.5.2018 r. prowadzono prace archeologiczne na terenie dzisiejszego Parku Heweliusza w Poznaniu. Prace realizowane były w ramach projektu Instytutu Pamięci Narodowej: „Poszukiwanie nieznanych miejsc pochówku ofiar terroru komunistycznego z lat 1944-1956”. Odkryte i przebadane jamy grobowe zawierały szczątki kostne od 1 do 11 osób, łącznie 44 szkielety. Podczas badań antropologicznych i medyczno-sądowych w wielu przypadkach obserwowano zaleczone zmiany pourazowe oraz obrażenia bez cech gojenia wskazujące na udział osób trzecich. W badaniach wykorzystano klasyczne metody stosowane w antropologii sądowej, a także badania specjalistyczne z wykorzystaniem mikroskopii stereoskopowej oraz metod obrazowania medycznego (tomografia komputerowa, radiografia cyfrowa). W przypadku szkieletu oznaczonego numerem 12 w zakresie części twarzowej i części mózgowej czaszki ujawniono złamanie wieloodłamowe kości czołowej w okolicy nadoczołowej z wgłobieniem kości oraz przemieszczeniem niektórych fragmentów kostnych do zatoki czołowej. Obrażenia powstały w mechanizmie czynnym, energia była znaczna, skutkująca złamaniem z wgłębieniem kości do zatoki czołowej. Ściany oczodołu z licznymi szczelinami złamań. Kość jarzmowa lewa i kość szczękowa lewa były uszkodzone, przemieszczone przyśrodkowo i ku tyłowi. Trzon kości szczękowej lewej wykazywał na przedniej i bocznej powierzchni ubytki kości z otwarciem zatoki szczękowej. Kości nosowe były

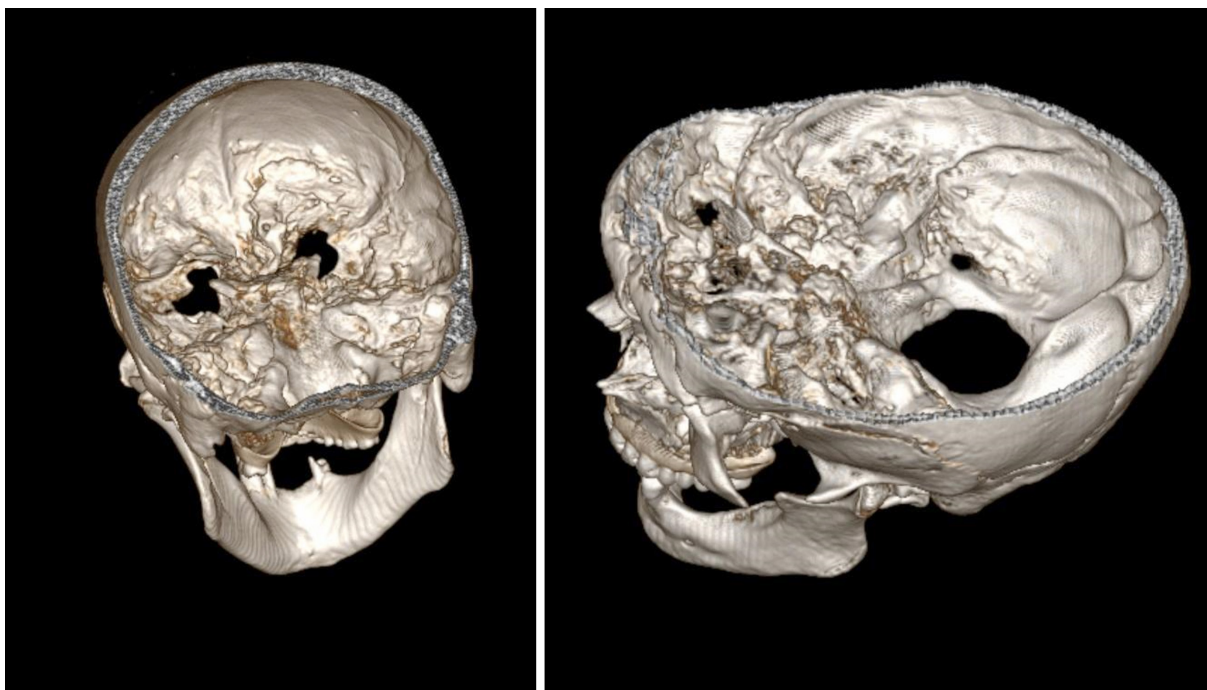
złamane w połowie ich długości. Doszło ponadto do rozejścia się kości w szwach jarzmowo-czołowych po stronie lewej i prawej. Klasyczne badania metodami makroskopowymi poszerzono o badania tomografii komputerowej, dokonano wirtualnego otwarcia czaszki celem oceny stanu kości od strony wewnętrznej (ryc. 18 i 19). Obrażenia powstały w wyniku działania osób trzecich, a przyczyną zgonu mogły być obrażenia czaszkowo-mózgowe w wyniku doznanych urazów czaszki.

Główną zaletą wykorzystania tomografii komputerowej w archeologii jest możliwość przeprowadzenia wielu analiz bez konieczności otwierania zamkniętych przestrzeni. W przypadku osobnika dorosłego z grobu 166 ze stanowiska archeologicznego na poznańskiej Śródce (wystawa stała w Rezerwacie Archeologicznym Genius Loci w Poznaniu, projekt „Pokolenie 966”), datowanego na okres średniowiecza, „otwarcie” jamy czaszki mózgowej pozwoliło na ocenę powierzchni wewnętrznej kości czaszki, a szczególnie w okolicy otworu trepanacyjnego. Uwidoczniono dobrze zachowane rowki żył na powierzchni wewnętrznej, jeden z nich „przerwany” wykonaną trepanacją, co pozwala na wysunięcie przypuszczenia, iż mogło dojść do krwawienia żylnego podczas zabiegu. Całkowite wyoblenie kości na obwodzie otworu wskazuje na zaleczony charakter zmian i pozwala wnioskować, iż niewątpliwie osoba przeżyła zabieg i z pewnością trepanacja nie była przyczyną zgonu osobnika (ryc. 20 i 21).

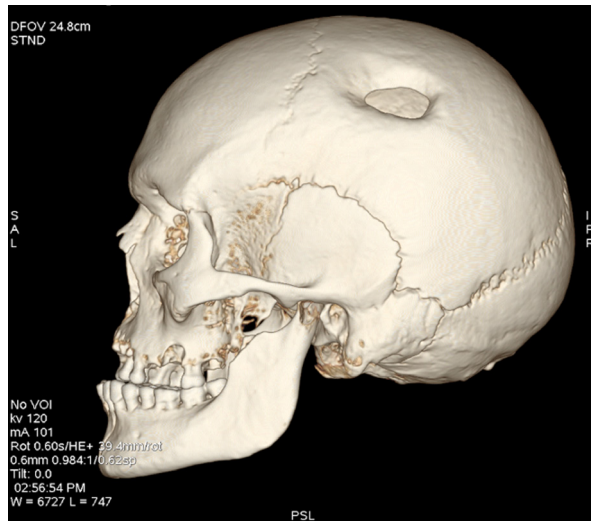
Badania tomografii komputerowej pozwalają na analizy kształtu, wykonywanie pomiarów liniowych i obliczanie objętości zamkniętych struktur czaszki, jak np. zatok przynosowych, w celu analizy ich zmienności międzyosobniczej, międzypłciowej czy międzypopulacyjnej. Z powodu ukrytej lokalizacji zatok przynosowych ich badanie możliwe jest jedynie z wykorzystaniem metod obrazowania medycznego. Zatoki przynosowe, w skład których wchodzi zatoka czołowa, zatoka szczękowa, zatoka klinowa, zatoka sitowa, to złożone struktury, które wykazują indywidualne zróżnicowanie. Rozmiar i kształt zatok, obecność przegród kostnych wykazują dużą zmienność w różnych czaszkach, a w przypadku parzystych zatok szczękowych zlokalizowanych obustronnie w kościach szczękowych tej samej czaszki obserwuje się generalnie podobieństwo, lecz z pewnego stopnia zróżnicowaniem cech morfometrycznych



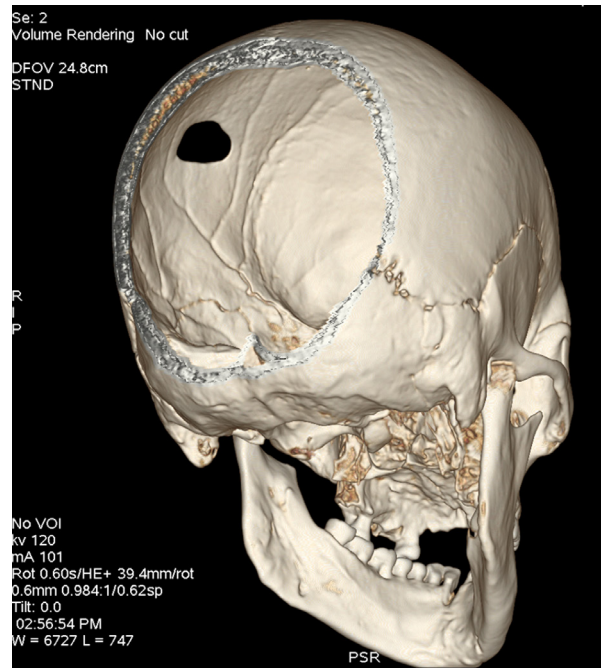
**Ryc. 18.** Szkielet nr 12, stanowisko Park Heweliusza. Trójwymiarowe rekonstrukcje przestrzenne czaszki na podstawie badania tomografii komputerowej. Widoczne jest wieloodłamowe złamanie kości czołowej z wgłobieniem oraz złamanie kości twarzoczaszki z przemieszczeniem (wyk. D. Lorkiewicz-Muszyńska)



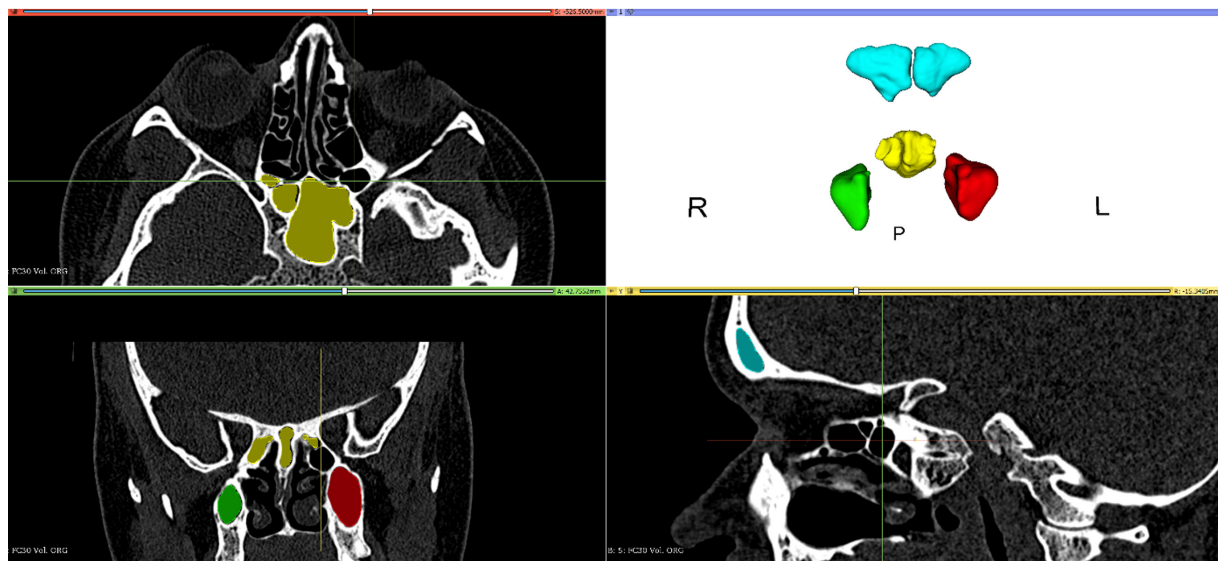
**Ryc. 19.** Szkielet nr 12, stanowisko Park Heweliusza, II wojna światowa. Wirtualne otwarcie jamy czaszki celem oceny stanu kości od strony wewnętrznej. Stwierdzono liczne szczeliny złamania kości dołu przedniego (wyk. D. Lorkiewicz-Muszyńska)



**Ryc. 20.** Grób nr 166, Poznańska Śródka, średniowiecze. Trójwymiarowe rekonstrukcje przestrzenne czaszki na podstawie badania tomografii komputerowej. Widoczne zaleczone zmiany po trepanacji. Rekonstrukcja 3D czaszki w celu oceny zmian po przeprowadzonej za życia trepanacji czaszki (wyk. W. Kociemba)



**Ryc. 21.** Grób nr 166, Poznańska Śródka – „otwarta” jama czaszki mózgowej w celu oceny otworu po przeprowadzonej trepanacji od strony wewnętrznej (wyk. W. Kociemba)

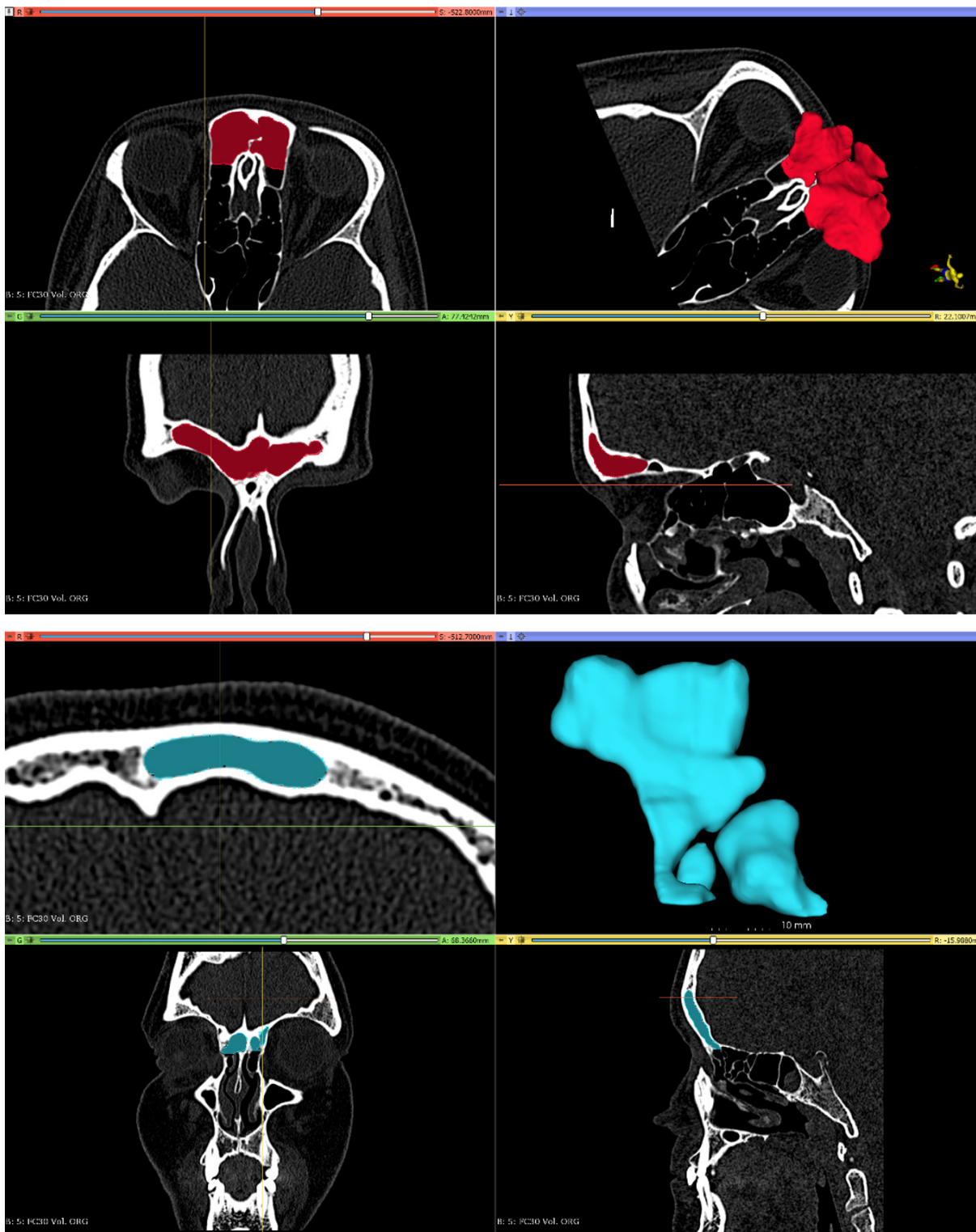


**Ryc. 22.** Segmentacja i rekonstrukcja 3D zatok przynosowych: zatoki czołowej, zatoki szczękowej i zatoki klinowej na podstawie badań tomografii komputerowej (wyk. D. Lorkiewicz-Muszyńska)

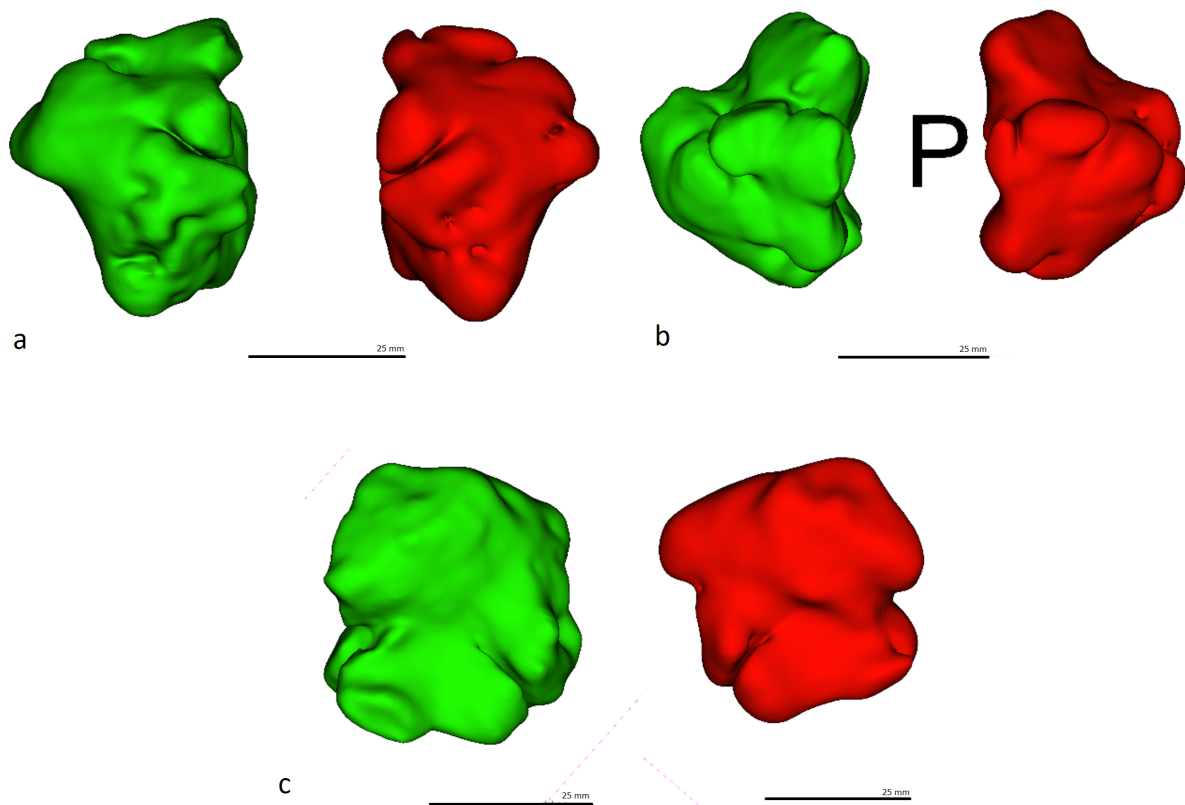
(kształtu, wymiarów, objętości, przegród kostnych). Poprzez segmentację i wolumetryczną rekonstrukcję 3D poszczególnych zamkniętych struktur czaszki można uzyskać ich modele 3D, które następnie można analizować ze wszystkich stron i powierzchni (ryc. 22-24). Poniższe rekonstrukcje wykonano z wykorzystaniem programu

Slicer 3D. Wykorzystując badania tomografii komputerowej, można badać i porównywać zmienność tych struktur między populacjami współczesnymi i pradziejowymi. Z uwagi na dużą zmienność międzyosobniczą badania dotyczące zatok przynosowych mają także ogromne znaczenie w identyfikacji osobniczej.





**Ryc. 23.** Segmentacja i rekonstrukcja 3D zatoki czołowej. Przestrzenne modele 3D wskazują na dużą zmienność międzyosobniczą morfologii zatoki czołowej (wyk. D. Lorkiewicz-Muszyńska)



**Ryc. 24.** Segmentacja i rekonstrukcja 3D zatoki szczękowej prawej i lewej z licznymi przegrodami kostnymi. Wizualizacja modeli przestrzennych od różnych stron i ich powierzchni (a, b i c) (wyk. D. Lorkiewicz-Muszyńska)

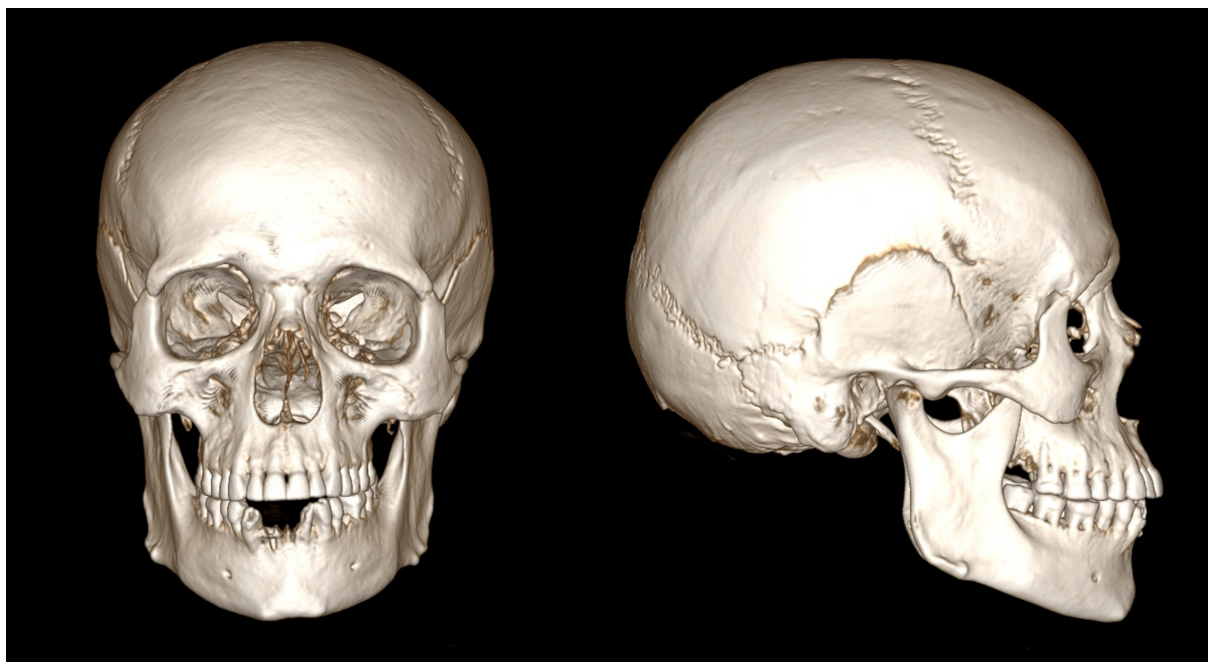
Badania tomografii komputerowej, będące metodą nieinwazyjną, pozwalają także na badania przekrojów kości długich na różnych ich długościach, w celu badania zmienności geometrii, kształtu trzonów kości i grubości istoty zbitiej bez ich niszczenia (Gosman i in. 2013). Badania na przekrojach kości udowej i piszczelowej na próbkach archeologicznych prowadzone były przez wielu badaczy (Ruff i in. 1994; Sumner i Andriacchi 1996; Cowgill i in. 2010). Zmiany związane ze wzrostem kości długich i ich morfologii oraz cechy biomechaniczne są kluczowymi elementami dla zrozumienia zmienności i funkcjonalnego znaczenia struktury kości osób dorosłych (Ruff 2005). Na zmienność kształtu i wielkości trzonu kości długich następującą podczas ontogenezy mają wpływ czynniki genetyczne, żywieniowe, hormonalne i mechaniczne (Gosman i in. 2011). Modelowanie kości to szereg złożonych procesów zachodzących na poziomie tkanki, głównie podczas wzrostu i rozwoju, który prowadzi do

zmian wielkości i kształtu kości szkieletu. Na kształt kości duży wpływ mają aktywność fizyczna i czynniki mechaniczne oddziałujące na kość.

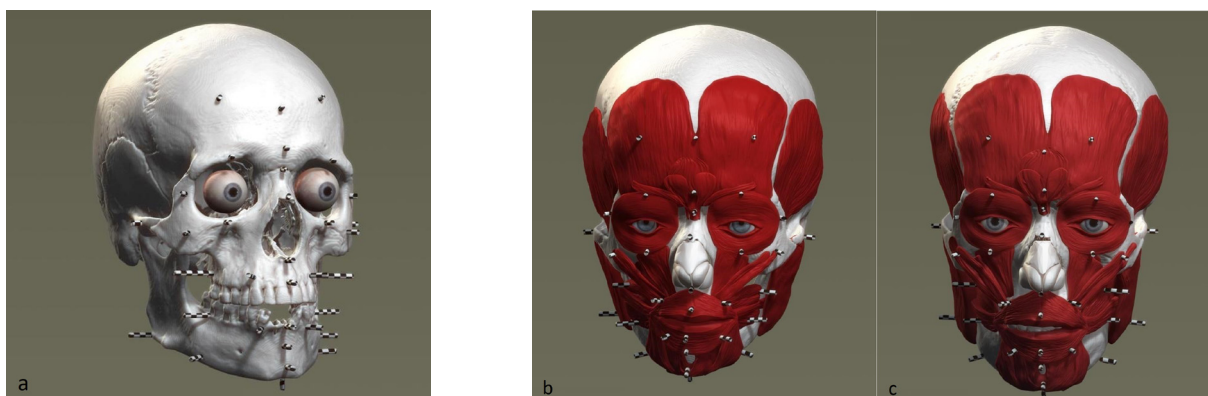
Pochówek z wczesnej epoki brązu odkryto w 2012 r. podczas budowy obwodnicy Hrubieszowa na stanowisku nr 5 w Świerszczowie. Przeprowadzono klasyczne badania antropologiczne i odontologiczne, a następnie wiele uzupełniających badań specjalistycznych. W analizach wykorzystano metody obrazowania medycznego oraz badania mikroskopowe. Zdjęcia rentgenowskie wybranych elementów kostnych wykonano z wykorzystaniem mobilnego aparatu rentgenowskiego DX-D-100. Badania tomografii komputerowej wykonano z wykorzystaniem 16 rzędowego tomografu komputerowego Somatom marki Siemens. Obserwacje pod mikroskopem stereoskopowym wykonano z wykorzystaniem mikroskopu marki Optimus. Określono płeć żeńską osobnika, a wiek biologiczny oszacowano w kategorii *juvenis/adultus* (około  $20 \pm 1$  rok). Na szczególną uwagę,



**Ryc. 25.** Analiza kształtu i geometrii kości udowych szkieletu młodej kobiety z grobu stanowiska nr 5, Świerszczów, gm. Hrubieszów. Wczesna epoka brązu (wyk. D. Lorkiewicz-Muszyńska)



**Ryc. 26.** Rekonstrukcje przestrzenne czaszki (3D) mężczyzny z wczesnośredniowiecznego cmentarzyska w Brześciu Kujawskim na podstawie badania tomografii komputerowej. (wyk. W. Kociemba)



**Ryc. 27.** Model czaszki 3D mężczyzny z wczesnośredniowiecznego cmentarzyska w Brześciu Kujawskim z osadzonymi gałkami ocznymi i wyznaczonymi grubościami tkanek miękkich (a). Modele czaszki 3D kobiety (b) i mężczyzny (c) z wczesnośredniowiecznego cmentarzyska w Brześciu Kujawskim z osadzonymi gałkami ocznymi i wyznaczonymi grubościami tkanek miękkich oraz wymodelowanymi mięśniami (wyk. D. Lorkiewicz-Muszyńska)

w przypadku badanego szkieletu młodej kobiety, zasługuje geometria kości długich. Zaobserwowano silnie ukształtowaną rzeźbę przyczepów mięśniowych w zakresie kości miednicznych oraz kości długich kończyn górnych i dolnych, co wskazuje na intensywną aktywność fizyczną. W przypadku kości długich kończyn górnych i dolnych na podstawie badań tomografii komputerowej wykonano analizy na przekrojach poprzecznych z wykorzystaniem programu

RadiAnt DICOM Viewer 2020.2. W przypadku kości udowych analizy wykonano na pięciu i ośmiu przekrojach (*cross-sections*), a wizualizację z otrzymanych przestrzennych modeli kości udowych z badań tomografii (CT) komputerowej i ośmiu ich przekrojów przedstawiono na rycinie 25.

Badania tomografii komputerowej wykorzystywane są dziś powszechnie w badaniach identyfikacyjnych w antropologii sądowej, ale także mają





**Ryc. 28.** Rekonstrukcje wyglądu twarzy (a i b) metodą komputerową 3D na podstawie czaszki kobiety i mężczyzny z wczesnośredniowiecznego cmentarzyska w Brześciu Kujawskim. Wizualizacja twarzy kobiety (c) i mężczyzny (d) z widocznymi czaszkami, wyznaczonymi grubościami tkanek miękkich oraz wymodelowanymi mięśniami ze zjawiskiem przenikania warstw/obrazów (c i d). Badania wykonano w ramach projektu „Cyfrowe udostępnianie zasobów biomolekularnych i opisowych Biobanku i Katedry Antropologii Uniwersytetu Łódzkiego – charakterystyka populacji zamieszkujących tereny dzisiejszej Polski na przestrzeni dziejów. Platforma informacyjna e-Człowiek.pl” (wyk. D. Lorkiewicz-Muszyńska)

zastosowanie w badaniach materiałów kostnych ze stanowisk archeologicznych. Jedną z metod coraz częściej wykorzystywanych w archeologii są badania rekonstrukcji wyglądu twarzy na podstawie czaszki. W zależności od wybranej metody badawczej i różnych narzędzi badawczych w procesie rekonstrukcji tkanek miękkich twarzy wykorzystać można zdjęcie czaszki, wirtualny model 3D lub replikę czaszki (Lorkiewicz-Muszyńska 2020). Model przestrzenny czaszki 3D można uzyskać m.in. na podstawie badania tomografii komputerowej i na podstawie danych biomedycznych, tj. plików DICOM. W dalszych wieloetapowych czynnościach, wykorzystując model czaszki 3D, w oczodołach osadza się gałki oczne, rekonstruuje się nos chrząstny, modeluje mięśnie i pozostałe tkanki miękkie. Cały proces kończą czynności związane z nałożeniem kolorów oraz uzupełnieniem modelu o elementy owłosienia głowy, odzieży. Poniżej przedstawiono przykłady rekonstrukcji wyglądu twarzy na podstawie czaszek kobiety i mężczyzny z wczesnośredniowiecznego cmentarzyska w Brześciu Kujawskim, z wykorzystaniem metody 3D, w tym programu 3D ZBrush 021.6.2 (ryc. 27 i 28). Przestrzenne modele czaszek uzyskano wykorzystując dane DICOM z badań tomografii komputerowej (ryc. 26).

## PODSUMOWANIE

Dynamiczny rozwój technik obrazowania, w tym medycznego czy mikroskopowego, pozwala na uzyskiwanie coraz lepszych powiększeń obiektów, a następnie daje możliwości analiz i archiwizacji tych obrazów z wysoką rozdzielczością.

Badanie kości czy zębów, w tym ich mikrostruktur, przy dużych powiększeniach przekłada się na jakość otrzymanych obrazów o najwyższej wartości diagnostycznej w medycynie, medycynie sądowej, antropologii, jak również archeologii.

Techniki obrazowania stosowane w radiologii okazują się niezwykle przydatne także w badaniach archeologicznych. Główną zaletą wykorzystania tomografii komputerowej w archeologii jest nieinwazyjność i brak konieczności otwierania zamkniętych przestrzeni – przykładowo, można badać zamknięte przestrzenie i struktury czaszki (Lynnerup i in. 1997; Kociemba 2015), można „zajrzeć” do zamkniętej amfory czy urny

kremacyjnej (Truszkiewicz i in. 2018), prowadzić nieinwazyjne badania zwłok w stanie mumifikacji (Lynnerup i in. 1997; Urbanik i in. 2001; Harvig i in. 2012), czy wreszcie oceniać części szkieletu pod kątem ich wieku, ewentualnych uszkodzeń, zmian chorobowych czy urazów (Saleem i Hawaass 2014; Glapiński i in. 2015; Kociemba 2015; Lorkiewicz-Muszyńska i in. 2015: 130–139; Przysańska i in. 2016; Przysańska i in. 2017). Dzisiejsze tomografy komputerowe z dużą dokładnością i w krótkim czasie pokazują struktury kostne czy zęby, pozwalają na wykonanie w celach diagnostycznych ich rekonstrukcji trójwymiarowych, nie tracąc na jakości i dokładności obrazowania (Kociemba 2015; Rychlik 2015: 184–193; Kulczyk i in. 2019). Dokładność skanowania umożliwia odwzorowanie badanych kości, zębów w modelach trójwymiarowych z zachowaniem najdrobniejszych szczegółów (Kulczyk i in. 2019). Z wykorzystaniem odpowiednich narzędzi wirtualnych możemy zabezpieczyć w wersji wirtualnej skanowane elementy szkieletu, jak również wykonać replikę dowolnego obiektu w postaci wydruków 3D (Rychlik 2015: 194–205; Rychlik i in. 2015: 206–209; Kulczyk i in. 2019).

## LITERATURA

- Ahlqvist, J., Damsten, O. 1969. Modification of Kerley's method for the microscopic determination of age in human bone. *Journal of Forensic Sciences*, 14: 205–212.
- Bednarek, J. 2008. Metody oceny wieku w chwili śmierci w oparciu o histomorfometrię istoty zbitą tkanki kostnej. *Archiwum Medycyny Sądowej i Kryminologii* 58: 197–204.
- Bello, S.M., Wallduck, R., Parfitt, S.A. Stringer, Ch.B. 2017. An Upper Palaeolithic engraved human bone associated with ritualistic cannibalism. *PLoS One* 12: e0182127.
- Boyde, A., Jones, S.J. 1968. Scanning electron microscopy of cementum and sharpey fibre bone. *Zeitschrift für Zellforschung und Mikroskopische Anatomie* 92: 536–548.
- Boyde, A. Hobdell, M.H. 1969. Scanning electron microscopy of lamellar bone. *Zeitschrift für Zellforschung und Mikroskopische Anatomie* 93: 213–231.
- Boyde, A., Wood, C. 1969. Preparation of animal tissues for surface scanning electron microscopy. *Journal of Microscopy* 90: 221–249.
- Cowgill, L.W., Warrenner, A., Pontzer, H., Ocobock, C. 2010. Waddling and toddling: the biomechanical effects of an immature gait. *American Journal of Physical Anthropology* 143: 52–61.

- Dudar, J.O., Pfeiffer S., Saunders S.R. 1993. Evaluation of morphological and histological adult skeletal age-at-death estimation techniques using ribs. *Journal of Forensic Sciences* 38: 677–685.
- Dziedzic-Gociławska, A. 1995. Tkanka kostna, (w:) Ostrowski K. (red.), *Histologia*. Warszawa, 244–304.
- Eriksen, E.F. 1986. Normal and pathological remodeling of human trabecular bone: Three dimensional reconstruction of the remodeling sequence in normals and in metabolic bone disease. *Endocrine Reviews* 7: 379–408.
- Glapiński, M., Przysańska, A., Kulczyk, T. 2015. Zabawa w Puzzle i rozwiązywanie zagadek, (w:) A. Hyrczała, B. Bartecki (red.), *Wojownik i księżniczka – archeologia – medycyna sądowa – sztuka*. Hrubieszów, 154–161.
- Goodman, A.H., Armelagos, G. J., Rose J.C. 1984. The chronological distribution of enamel hypoplasia from prehistoric Dickson Mounds populations. *American Journal of Physical Anthropology* 65: 259–266.
- Gosman, J.H., Hubbell, Z.R. Shaw, C.N. Ryan, T.M. 2013. Development of cortical bone geometry in the human femoral and tibial diaphysis. *The Anatomical Record* 296: 774–787.
- Gosman, J.H., Stout, S.D., Larsen, C.S. 2011. Skeletal biology over the life span: a view from the surfaces. *American Journal of Physical Anthropology* 146: 86–98.
- Harvig, L., Lynnerup, N., Amsgaard Ebsen, J. 2012. Computed tomography and computed radiography of late bronze age cremation urns from Denmark: an interdisciplinary attempt to develop methods applied in bioarchaeological cremation research. *Archaeometry* 54: 369–387.
- Johnson, K.A., Howlet, C.R., Bellenger, C.R., Armati-Cukson, P. 1988. Osteogenesis by canine and rabbit bone marrow in diffusion chambers. *Calcified Tissue International* 42: 113–118.
- Jones, Ch.G. 2012. Scanning Electron Microscopy: Preparation and Imaging for SEM, (w:) Bell L.S (red.), *Forensic Microscopy for Skeletal Tissues: Methods and Protocols*. New York, 1–20.
- Jowsey, J. 1960. Age changes in human bones. *Clinical Orthopedics* 17: 210–217.
- Kerley, E.R. 1965. Microscopic determination of age in human bone. *American Journal of Physical Anthropology* 23: 149–164.
- Kim, Y., Kim, D., Park, D., Lee, J., Chung, N., Lee, W., Han, S. 2007. Assessment of histomorphological features of the sternal end of the fourth rib for age estimation in Koreans. *Journal of Forensic Sciences* 52: 1237–1241.
- Kociemba, W. 2015. Techniki obrazowania w radiologii, rola tomografii komputerowej i rezonansu magnetycznego w archeologii, (w:) A. Hyrczała, B. Bartecki (red.), *Wojownik i księżniczka – archeologia – medycyna sądowa – sztuka*. Hrubieszów, 124–129.
- Kuryszek, J., Zarzycki, J. 2000. *Histologia zwierząt*. Warszawa, 139–158.
- Kulczyk, T., Glapiński, M., Przysańska, A. 2015. Uwidocznienie niewidoczne, (w:) A. Hyrczała, B. Bartecki (red.), *Wojownik i księżniczka – archeologia – medycyna sądowa – sztuka*. Hrubieszów, 150–153.
- Krenz, M. 1994. Enamel hypoplasia in contemporary population from Poznań (Poland). Methodics and preliminary results. *Variability and Evolution* 4: 73–88.
- Krenz-Niedbała, M., Piontek, J. 1996. Hipoplazja szkliwa a średniowiecznej populacji ze Słaboszewa. *Przegląd Antropologiczny* 59: 87–90.
- Kulczyk, T., Rychlik, M., Lorkiewicz-Muszyńska, D., Abreu-Głowacka, M., Czajka-Jakubowska, A., Przysańska, A. 2019. Computed Tomography versus Optical Scanning: A Comparison of Different Methods of 3D Data Acquisition for Tooth Replication. *Hindawi BioMed Research International*, Volume 2019, ID 4985121, 985121-1 – 985121-7, <https://doi.org/10.1155/2019/4985121>
- Morales, J.P., Roa, I.H., Zavando, D., Galdames, I.S. 2012. Determination of the Species from Skeletal Remains Through Histomorphometric Evaluation and Discriminant Analysis. *International Journal Morphology* 30: 1035–1041.
- Lanfranco, L.P., Eggers, S. 2012. Caries through time: An anthropological overview, contemporary approach to dental caries, (w:) Ming-Yu Li (red.), *Contemporary approach to dental caries*. Shanghai Jiao Tong University, 1–33.
- Lorkiewicz, W. 2011. Nonalimentary tooth use in the Neolithic population of the Lengyel Culture in Central Poland (4600–4000 BC). *American Journal of Physical Anthropology* 144: 538–551.
- Lorkiewicz-Muszyńska, D. 2015. Zapisane w kościach ... Wyczytane z kości..., (w:) A. Hyrczała, B. Bartecki (red.), *Wojownik i księżniczka – archeologia – medycyna sądowa – sztuka*. Hrubieszów, 116–123.
- Lorkiewicz-Muszyńska, D., Sobol, J., Kociemba, W. 2020. Wirtualna Identyfikacja, (w:) Grzegorz Teresiński (red), *Medycyna sądowa. T. 2. Diagnostyka sądowa*. Warszawa, 714–723.
- Lorkiewicz-Muszyńska, D., Kociemba, W., Rewekant, A. 2015. Charakterystyka szczątków kostnych z cmentarzyska w Rogalinie, (w:) A. Hyrczała, B. Bartecki (red.), *Wojownik i księżniczka – archeologia – medycyna sądowa – sztuka*. Hrubieszów, 130–139.
- Lorkiewicz-Muszyńska, D., Kociemba, W., Rychlik, M. 2016. Badania identyfikacyjne szczątków, (w:) T. Dzieńkowski (red.), *Horodysko. Od epoki kamienia do wczesnego średniowiecza. Badania 2005–2006*. Lublin, 309–322.
- Lorkiewicz-Muszyńska, D., Sobol, J., Langer, J.J., Koško, A., Włodarczak, P., Żurkiewicz, D., Potupchyk, M. 2017. Ritual position and “tattooing” techniques in the funeral practices of the “barrow cultures” of the Pontic-Caspian steppe/forest steppe area. Porohy 3A, Yampil Region, Vinnytsia Oblast: specialist analysis research perspectives. *Baltic-Pontic Studies* 22: 64–90.



- Lorkiewicz-Muszyńska, D. 2020. Rekonstrukcja wyglądu twarzy nieznanych osób, (w:) G. Teresiński (red.), *Medycyna sądowa. T. 2. Diagnostyka sądowa*. Warszawa, 757–765.
- Lorkiewicz-Muszyńska, D., Sobol, J. 2021. Identyfikacja żyjących osób na podstawie danych wizyjnych, (w:) G. Teresiński (red.) *Medycyna sądowa. T. 3. Opiniowanie i kliniczna medycyna sądowa*. Warszawa, 498–513.
- Lorkiewicz-Muszyńska, D., Thannhauser, A., 2021. Szacowanie wieku szkieletowego oraz ustalanie długości ciała na podstawie badań antropometrycznych, (w:) G. Teresiński (red.), *Medycyna sądowa. T. 3. Opiniowanie i kliniczna medycyna sądowa*. Warszawa, 855–886.
- Lynnerup, N., Hjalgrim, H., Nielsen, L.N., Gregersen, H., Thuesen, I. 1997. Non-invasive Archaeology of Skeletal Material by CT Scanning and Three-dimensional Reconstruction. *International Journal of Osteoarchaeology* 7: 91–94.
- Łasińska, A. 2013. Skaningowa mikroskopia elektronowa w badaniach kryminalistycznych. *Prokuratura i Prawo* 10: 145–166.
- Malinowski, A. 1999. *Wstęp do antropologii i ekologii człowieka*. Łódź.
- Malinowski A., Bożilow, W. 1997. *Podstawy antropometrii. Metody, techniki, normy*. Warszawa.
- Malinowski, A., Strzałko, J. 1985. *Antropologia*. Warszawa.
- Malinowski, A., Wolański, N. 1988. *Metody badań w biologii człowieka. Wybór metod antropologicznych*. Warszawa.
- Novitskaya, E., Chen, P., Hamed, E., Li, J., Lubarda, V.A., Jasiuk, I., McKittrick, J. 2011. Recent advances on the measurement and calculation of the elastic moduli of cortical and trabecular bone: a review. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics* 38: 209–297.
- Piontek, J. 1996. *Biologia populacji pradziejowych*. Poznań.
- Przystańska, A., Kulczyk, T., Glapiński, M., Lorkiewicz-Muszyńska, D. 2016. Badania odontologiczne szczątków. Odontological research of remains, (w:) T. Dzieńkowski (red.), *Horodysko. Od epoki kamienia do wczesnego średniowiecza. Badania 2004–2005*. Lublin.
- Przystańska, A., Lorkiewicz-Muszyńska, D., Abreu-Głowacka, M., Glapiński, M., Sroka, A., Rewekant, A., Hyrczała, A., Bartecki, B., Żaba, Cz., Kulczyk, T. 2017. Analysis of human dentition from Early Bronze Age: 4000-year-old puzzle. *Odontology* 105: 13–22.
- Ruff, C.B., Hayes, W.C. 2005. Sex differences in age-related remodeling of the femur and tibia. *Journal of Orthopaedic Research* 6: 886–896.
- Ruff, C.B., Walker, A., Trinkhaus, E. 1994. Postcranial robusticity in Homo. III. Ontogeny. *American Journal of Physical Anthropology* 95: 35–54.
- Ruff, C.B., Scott, W.W., Liu, A.Y.C. 1991. Articular and diaphyseal remodeling of the proximal femur with changes in body mass in adults. *American Journal of Physical Anthropology* 86: 397–413.
- Rychlik, M. 2015. Opracowanie trójwymiarowego modelu komputerowego czaszki osobnika z grobu nr 10 na podstawie obrazowania TK, (w:) A. Hyrczała, B. Bartecki (red.), *Wojownik i księżniczka – archeologia – medycyna sądowa – sztuka*. Hrubieszów, 184–193.
- Rychlik, M. 2015. Wykonanie rzeczywistego modelu czaszki osobnika z grobu nr 10 z zastosowaniem technik szybkiego prototypowania, (w:) A. Hyrczała, B. Bartecki (red.), *Wojownik i księżniczka – archeologia – medycyna sądowa – sztuka*. Hrubieszów, 194–205.
- Rychlik, M., Lorkiewicz-Muszyńska, D., Kociemba, W. 2015. Porównanie obiektu rzeczywistego z komputerowym modelem 3D oraz wydrukowanym modelem fizycznym, (w:) A. Hyrczała, B. Bartecki (red.), *Wojownik i księżniczka – archeologia – medycyna sądowa – sztuka*. Hrubieszów, 206–209.
- Saleem, S.N., Hawaass, Z. 2014. Ankylosing Spondylitis or Diffuse Idiopathic Skeletal Hyperostosis (DISH) in Royal Egyptian Mummies of 18th–20th Dynasties? CT and Archaeology Studies. *Arthritis & Rheumatology* 66: 3311–3316.
- Seiler, R., Spielman, A.I., Zink, A., Rühli, F. 2013. Oral pathologies of the Neolithic Iceman, c. 3,300 BC. *European Journal of Oral Sciences* 121: 137–141.
- Shah, F.A., Ruscsák, K., Palmquist, A. 2019. 50 years of scanning electron microscopy of bone – a comprehensive overview of the important discoveries made and insights gained into bone material properties in health, disease, and taphonomy. *Bone Research* 7: 15.
- Shishlina, N., Belkevich, E.V., Usachuk, A.N. 2013. Bronze age Tattoos: Sympathetic magic or decoration? *Zurich Studies in Archaeology* 9: 67–74.
- Sobol, J., Ptaszyńska-Sarosiek, I., Charuta, A., Oklota-Horba, M., Żaba, Cz., Niemcunowicz-Janica, A. 2015. Estimation of age at death: examination of variation in cortical bone histology within the human clavicle. *Folia Morphologica* 74: 378–388.
- Stewart, A.D., Boyde, A. 1962. Ion etching of dental tissues in a scanning electron microscope. *Nature* 196: 81–2.
- Stock, S.R., Ignatiev, K., Dahl, T., Barss, J., Fezzaa, K., Veis, A., Lee, W.K., De Carlo, F. 2003. Multiple microscopy modalities applied to a sea urchin tooth fragment. *Journal of Synchrotron Radiation* 10: 393–397.
- Stout, S.D. 1988. Histomorphometric Analysis of Human Remains, (w:) M.Y. Iscan MY, K.A.R. Kenedy (red.), *Reconstruction of Life from the skeleton*. New York, 41–52.
- Streeter, M. 2012. The Determination of Age in Subadult from the Rib Cortical Microstructure, (w:) L.S Bell (red.), *Forensic Microscopy for Skeletal Tissues: Methods and Protocols*. New York, 1–20.
- Sumner, D., Andriacchi, T. 1996. Adaptation to differential loading: comparison of growth-related changes in

- cross-sectional properties of the human femur and humerus. *Bone* 19: 121–126.
- Temple, D.H. 2010. Patterns of systematic stress during the agricultural transition in prehistoric Japan. *American Journal of Physical Anthropology* 142:112–24.
- Teresiński, G. 2019. Ocena czasu wystąpienia urazu głowy, (w:) G. Teresiński (red.), *Medycyna sądowa. T. 1. Tanatologia i traumatologia sądowa*. Warszawa, 548–551.
- Teslenko, D.L. 1996. Ritual covering of skulls in the yamnaya culture graves, *North – East Asov coastline area in the System of Eurasian Antiquity (Eneolith – Bronze Age)*. Donetsk, Part 1: 28–30.
- Thannhauser, A., Szleszkowski, Ł., Wochna, K. 2019. Antropologia, tafonomia i odontologia sądowa, (w:) G. Teresiński (red.), *Medycyna sądowa. T. 1. Tanatologia i traumatologia sądowa*. Warszawa, 187–199.
- Thannhauser, A., Lorkiewicz-Muszyńska, D. 2019. Szacowanie wieku szkieletowego oraz ustalanie długości ciała na podstawie badań antropometrycznych, (w:) G. Teresiński (red.), *Medycyna sądowa. T. 1. Tanatologia i traumatologia sądowa*. Warszawa, 200–203.
- Thannhauser, A., Lorkiewicz-Muszyńska, D. 2019. Ocena wieku dziecka i osoby dorosłej, (w:) G. Teresiński (red.), *Medycyna sądowa. T. 1. Tanatologia i traumatologia sądowa*. Warszawa, 204–213.
- Thannhauser, A., Lorkiewicz-Muszyńska, D. 2019. Szacowanie wysokości i masy ciała, (w:) G. Teresiński (red.), *Medycyna sądowa. T. 1. Tanatologia i traumatologia sądowa*. Warszawa, 218–219.
- Tomczyk, J., Tomczyk-Gruca, M., Zalewska, M. 2012. Frequency and chronological distribution of linear enamel hypoplasia (LEH) in the Late Neolithic and Early Bronze Age population from Żerniki Górne (Poland) – preliminary report, *Anthropological Review* 75: 61–73.
- Truskiewicz, A., Bober, Z., Wojtasik, A., Ożóg, Ł., Rogóż, J. 2018. Metodyka badania techniką tomografii komputerowej urn kremacyjnych (popielnic). *Iżynier i Fizyk Medyczny* 7: 391–394.
- Turner-Walker, G., Mays, S. 2007. Histological Studies on Ancient Bone, (w:) R. Pinhasi, S. Mays (red.), *Advances in Human Palaeopathology*, Sussex.
- Ubelaker, D. 1989. *Human Skeletal Remains. Excavation, Analysis, Interpretation*. taraxacum. Washington, Appendix 2.
- Urbanik, A., Chrzan, R., Wojciechowski, W., Szymańska, H., Babraj, K., Czubak, A. 2001. Badanie mumii egipskich. *Polski Przegląd Radiologii* 66: 79–83. <https://sjp.pwn.pl/>



