

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



Mikromorfologia

Karolina Leszczyńska, Michał Jankowiak

Mikromorfologia to metoda oparta na ilościowej i jakościowej analizie, komponentów organicznych i nieorganicznych (mineralnych) gleb i osadów nieskonsolidowanych, tworzących struktury sedymentacyjne w mikroskali. Analiza mikromorfologiczna zakłada określenie przestrzennego stosunku wszystkich składowych osadu do siebie nawzajem oraz do wolnych przestrzeni. Obserwacje mikromorfologiczne są prowadzone na niezaburzonych, impregnowanych próbach w postaci monolitów lub cienkich płytek (cienkiego szlifu) (Bullock i in. 1985; Courty i in. 1989; Stoops 2003; Budek 2010).

Analizy mikromorfologiczne oparte są na trzech podstawowych założeniach:

- wszystkie elementy osadów utrwalonych w monolitach i płytkach cienkich przetrwały proces impregnacji, są zachowane i występują w naturalnym, niezaburzonym położeniu (Courty i in. 1989; Goldberg 1980; Fedoroff i in. 1990; Macphail i in. 1990; Goldberg i Macphail 2006; Goldberg i Berna 2010);
- wszystkie elementy i struktury opisane z cienkich płytek są świadectwem występujących w przeszłości zjawisk naturalnych i antropogenicznych (Drees i Wilding 1987);
- żadne z elementów budujących osady utrwalone w cienkich płytkach nie mogą być prawidłowo zinterpretowane bez zrozumienia kontekstu sedymentologicznego (Mucher i Morozova 1981).

Metodami mikromorfologicznymi bada się szerokie spektrum osadów i zapisanych w nich procesów i zjawisk, zarówno naturalnych, jak i antropogenicznych. W płytkach cienkich identyfikowane i opisywane są komponenty organiczny i nieorganiczny, ale również artefakty archeologiczne, fragmenty wytworów ludzkich. Analiza organizacji przestrzennej elementów budujących osad w mikroskali, czyli mikrostruktur, pozwala zrekonstruować występujące w przeszłości naturalne oraz antropogeniczne procesy depozycyjne i postdepozycyjne.

HISTORIA MIKROMORFOLOGII

Początki mikromorfologii sięgają lat 30. XX w., kiedy to Austriak Walter Kubiena opublikował pierwsze opracowanie dotyczące zasad, założeń, celów badawczych i metod mikromorfologicznych (Kubiena 1938), później rozszerzone przez niego w kolejnych pracach w 1953 i 1970 roku (Kubiena 1953; 1970). W początkowej fazie mikromorfologia była stosowana głównie w gleboznawstwie. Pierwsze analizy osadów w mikroskali miały na celu opis i identyfikację gleb, wyjaśnienie ich genezy oraz powiązania ich ewolucji z procesami rzeźbotwórczymi.

Nieco szerzej w różnych dziedzinach nauki metody mikromorfologiczne zaczęto stosować w latach 60. XX w. W 1964 r. Jongerius (Holandia)

opracował publikację zawierającą zbiór artykułów na temat różnych zastosowań mikromorfologii w analizie osadów, badaniach paleośrodowiskowych, paleogeograficznych i paleopedologicznych. Zamieszczone tam prace dotyczyły zastosowania techniki analizy osadów w mikroskali do badania np.: paleogleb interglacjalnych (Morozova 1964), osadów morenowych (Korina i Faustova 1964) czy rozwoju gleb na osadach wulkanicznych na Islandii (Dalrymple 1964).

Od lat 70. XX w. nastąpił rozkwit mikromorfologii i metoda ta weszła na stałe do kanonu badań osadów. Powstała Międzynarodowa Grupa Robocza ds. Mikromorfologii Gleb i zostało wydanych wiele prac traktujących o metodyce i terminologii badań mikromorfologicznych, zarówno w czasopismach o tematyce gleboznawczej (np. *Catena*, *Geoderma*, *Journal of Soil Science*, *European Journal of Soil Science*), jak i podręczników, m.in.: Bullock i Murphy (1981), Delgado (1978), Douglas (1990), Fedoroff i in. (1987), Ringrose-Voase i Humphreys (1994), Rutherford (1974).

W latach 80. XX w. mikromorfologia wkroczyła w kolejny etap rozwoju: erę zastosowania nowoczesnych technik badawczych. W tomie edytowanym przez Bullocka i Murphiego (1981) opisane zostały pierwsze zastosowania mikroskopu elektronowego (SEM) (Eswaran i Shoba 1985), analiz mikrochemicznych (Bisdom 1985) oraz zautomatyzowanych analiz obrazu (Delgado i Dorronsoro 1985; Guilloire 1985). W tym samym tomie Goldberg (1985) podsumował pierwsze wykorzystanie analizy mikromorfologicznej do rozwiązywania zagadnień archeologicznych. W pracy Fitzpatricka (Fitzpatrick 1984) ukazały się artykuły szczegółowo opisujące proces przygotowania zaimpregnowanych osadów w postaci monolitów i cienkich szlifów do analiz (Fitzpatrick 1984), a także zastosowania technik rentgenowskich, analizy fluorescencyjne oraz barwienia minerałów w zaimpregnowanych w cienkich szlifach osadach.

Zastosowanie mikromorfologii w archeologii, datuje się na lata 50. XX w. i początkowo dotyczyło ono jedynie badania ceramiki i wytworów ludzkich. Przez lata osady, w których znajdowano artefakty archeologiczne, uważano za substrat, tło, znajdujące się poza zasięgiem zainteresowania archeologii (Macphail i in. 1990). Dopiero wraz z rozwojem geoarcheologii (Butzer 1973; 1974; 1977), która zajmuje się badaniem kontekstu,

otoczenia fizycznego (Butzer 1977; Hildebrandt-Radke 2007) geologicznego i sedimentologicznego (Renfrew i Bahn 2002) i ekologicznego (Butzer 1973; 1974), w jakim odkrywane są znaleziska archeologiczne, mikromorfologia zyskała na znaczeniu w tej dziedzinie nauki. Mikromorfologia w geoarcheologii wpisuje się w nurt archeologii kontekstualnej, w której stanowiska archeologiczne, są badane jako część ekosystemu ludzkiego, w którym dawne cywilizacje współoddziaływały wzajemnie w przestrzeni geograficznej, ekonomicznej i społecznej ze środowiskiem naturalnym (Butzer 1980). Mikromorfologia szybko stała się jedną z ważniejszych technik geoarcheologii, umożliwiającą ujęcie znalezisk archeologicznych w kontekście procesów naturalnych na podstawie zapisu ich interakcji w mikroskali.

W 1958 r. Dalrymple jako pierwszy wykorzystał metody mikromorfologiczne do badania osadów ze stanowisk archeologicznych i odróżnienia gleb naturalnych od antropogenicznych (Dalrymple 1958). Kolejne wczesne prace wykorzystujące techniki mikromorfologiczne w archeologii były związane z badaniem środowiskowego i paleoklimatycznego kontekstu rozwoju kultur i cywilizacji (np.: van Vliet 1976; Schuldenrein i Goldberg 1985; Courty i Fedoroff 1982; Macphail 1983), genezą i ewolucją osadów jaskiniowych (np.: Bowler i Thorne 1976; Dalrymple 1958; Goldberg 1979), a także analizą mikromorfologiczną artefaktów, materiałów budowlanych (Goldberg 1979) czy ceramiki (Shepard 1966). Od lat 70. i 80. XX w. zakres tematów badawczych w archeologii i geoarcheologii, w których wykorzystuje się metody mikromorfologiczne stale rośnie.

MIKROMORFOLOGIA – TEMATY BADAWCZE

Mikromorfologia jako metoda badawcza znajduje zastosowanie w różnych dyscyplinach naukowych zajmujących się opisem stanu i ewolucji środowiska oraz wpływem działalności człowieka na jego elementy. Od lat 80. XX w. jest techniką analityczną powszechnie stosowaną w takich dziedzinach nauki, jak inżynieria drogowa i budowlana, gleboznawstwo, mikrobiologia i mikrobiologia gleb, paleopedologia, geomorfologia, paleoklimatologia, archeologia i geoarcheologia.

Omówienie tematyki badawczej w ramach powyższych dyscyplin jest szerokim zagadnieniem poza zasięgiem prezentowanego artykułu, który przedstawia jedynie zastosowania mikromorfologii w archeologii i geoarcheologii.

Badania gleboznawcze i sedimentologiczne

Analizy mikromorfologiczne w pedologii i paleopedologii (nauce o glebach i glebach kopalnych) dotyczą głównie zagadnień genezy i ewolucji gleb. W osadach, na poziomie mikroskali, zapisane są zarówno naturalne procesy glebotwórcze (procesy ilotwórcze, bielcowania, brunatnienia, glejowienia, torfienia, wmywania, wymywania, mineralizacji), sedimentacyjne, postdepozycyjne (wysychanie, zamrażanie i rozmarzanie, przesiąkanie wodą), jak i te związane z działalnością antropogeniczną, jak np.: orka, przekopywanie, deptanie, zmiatanie (Courty i in. 1989; Goldberg i Macphail 2006; Wattez i in. 1990; Angelucci i in. 2009; Miller i in. 2010). Analizy mikromorfologiczne gleb pozwalają na odróżnienie gleb naturalnych od gleb antropogenicznych oraz stopień i rodzaj wpływu działalności człowieka na naturalne środowisko glebowe (Dalrymple 1958).

Badania paleoklimatyczne

Na podstawie różnorodnych cech mikromorfologicznych można wyodrębnić okresy charakteryzujące się różnymi typami klimatu. Można wyodrębnić okresy chłodne i ciepłe, suche i wilgotne, a także okresy stabilizacji klimatycznej środowiska. Fedoroff i Goldberg (za Goldberg 1980), opisując występowanie ilastych otoczek wewnątrzkanalikowych (*clay coatings*) wnioskowali o zmianach klimatycznych gleb kopalnych z czasów późnego Pleistocenu. Schuldenrein i Goldberg (1985) i Van Vliet (1976) odtworzyli okresy naprzemiennego zamrażania i rozmarzania gleb kopalnych na podstawie analizy mikrolaminacji obecnych w szlifach cienkich. Podobnie rekonstrukcji paleoklimatycznych dokonali Vandermeersch (1969) i Fedoroff (1986), analizując charakter ilastych otoczek wewnątrzkanalikowych (*clay coatings*) w osadach jaskiniowych Quafzeh (Nazareth) i jaskini Lazaret (Nicea). Analizy mikromorfologiczne pomogły

również scharakteryzować zmiany klimatyczne zapisane w osadach Wyżyny Chińskiej 130 000-80 000 lat temu (Kemp i in. 2001), na Równinach Gangesu i Indusu 13 500-5 000 lat temu (Srivastava i in. 2001) czy jeziora Anderson w Tennessee, w USA od 14 300 lat temu do współczesności (Driese i in. 2017).

Badania nad chronologią

Badania mikromorfologiczne pomagają w ustalaniu chronologii stanowisk. Bordes (1954) na podstawie cech mikromorfologicznych wyróżnił dwie różnowiekowe generacje lessu, co pozwoliło na uporządkowanie chronologii stanowisk paleolitycznych w dolinie Sekwany (za Goldberg 1980). Analizy mikromorfologiczne jaskiniowych osadów ilastych wykonane przez Bowlera i Thorne'a (1976) umożliwiło ich wzajemne korelacje.

Badania artefaktów archeologicznych

Bezpośrednie zastosowanie metod mikromorfologicznych do analizy artefaktów i materiałów archeologicznych pozwala ustalać ich skład i pochodzenie czy nawet warunki powstawania lub przetwarzania, jak np. temperatura. Mikromorfologia pozwoliła wyjaśnić, z czego są zrobione cegły. Analizy ceramiki (Shepard 1942; Peacock 1969; 1970; Cornwall i Hodges 1964; Hays i Hassan 1974; Mathieu i Stoops 1972) czy materiałów budowlanych (Goldberg 1979) pozwoliły na ustalenie miejsca pochodzenia surowców, z których były wytworzone artefakty, oraz sposobów ich produkcji (Mathieu i Stoops 1972).

POBÓR PRÓB W TERENIE

Strategia pobierania prób w terenie i ich wielkość zależą od charakterystyki materiału, który jest pobierany, oraz od pytań badawczych i testowanych hipotez, zasobów finansowych i możliwości laboratorium przygotowującego monolity i cienkie szlify (Stoops i Nicosia 2017; Mroczek 2001).

Próby z osadów w terenie mogą być pobrane w dwojaki sposób: 1) z odkrywki za pomocą metalowych puszek, form przypominających formy do ciasta, tzw. puszek Kubieny (ang. *Kubiena*



Ryc. 1. Pobór prób do analiz mikromorfologicznych w terenie za pomocą puszek Kubieny: a – wbijanie puszek Kubieny w oczyszczoną odkrywkę; b – wbita puszka Kubieny z oznaczoną orientacją stropu i spągu; c – okopywanie puszek Kubieny; d – pobrana próba, wygląd tuż po odjęciu jej od odkrywki; e – zapakowane do transportu monolity. Fot. K. Leszczyńska, R. Leszczyński

tins) (ryc. 1) lub 2) z materiału podpowierzchniowego za pomocą rdzeniownika wbijanego w ziemię. Pierwsza metoda, częściej wykorzystywana w badaniach mikromorfologicznych stosowanych w archeologii, wykorzystująca puszki Kubieny wbijane w ścianę odkrywki (ryc. 1), gwarantuje większą kontrolę nad zniekształceniami struktur sedymentacyjnych spowodowanymi procesem opróbowywania. Metoda wykorzystująca rdzeniownik sprawdza się do opróbowania materiału podpowierzchniowego, do którego nie ma dostępu w formie odkrywki i umożliwia pobranie długich sekwencji osadu. W przypadku obu metod należy dołożyć wszelkich starań, aby oryginalne struktury sedymentacyjne nie zostały naruszone. Praktyka pokazuje jednak, że osad graniczący z próbnikiem (puszką Kubieny czy rdzeniownikiem) zawsze zostaje nieznacznie zdeformowany

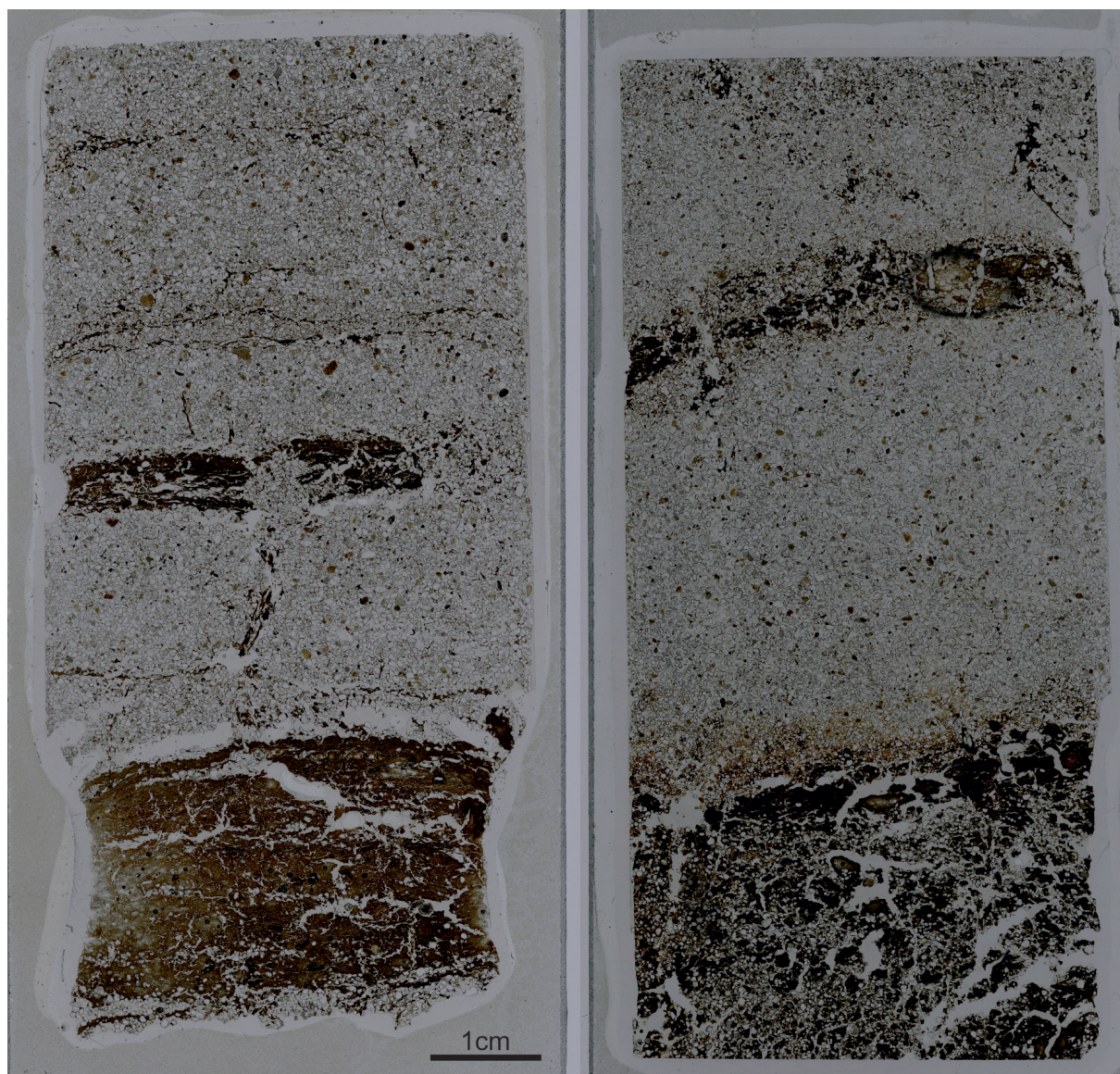
i należy te części odrzucić podczas analizy i interpretacji.

Przed pobraniem próby za pomocą puszek Kubieny cała odkrywka musi być oczyszczona i wyrównana; należy pamiętać, że proces czyszczenia musi odbywać się w poziomie (od prawej do lewej lub odwrotnie), względnie wzdłuż naturalnego biegu warstw osadów, tak aby granice między poszczególnymi warstwami nie zostały zaburzone lub rozmażane. Przygotowaną odkrywkę należy udokumentować: opisać, narysować i sfotografować, tak aby znany był kontekst sedymentologiczny pobranego materiału. Na puszkach oprócz standardowego opisu zawierającego lokalizację poboru próbki (najlepiej długość i szerokość geograficzną i wysokość n.p.m.), numer identyfikacyjny i datę poboru powinna być zaznaczona orientacja względem stropu i spągu oraz zapisana głębokość/wysokość, z jakiej pobrana została próbka oraz głębokość, na jaką została wbita w ścianę odkrywki.

Aby bezpiecznie wydobyć wbita w ścianę puszkę, należy ją ostrożnie okopać (ryc. 1), aż do końca ścian puszek, a następnie odjąć od ściany, odcinając jej spód od ściany odkrywki długim cienkim ostrzem. Po odjęciu puszek od ściany należy ją jak najszybciej zabezpieczyć, pakując szczelnie w dużą ilość folii, uzupełniając ewentualne braki osadu na powierzchni odjętej od ściany odkrywki miękką, zgniecioną folią (ryc. 1). Tak pobrane próby należy ostrożnie transportować do laboratorium, najlepiej tak, aby układ góra-dół z odkrywki był zachowany podczas transportu.

PREPARATYKA LABORATORYJNA

W laboratorium próbki muszą być jak najszybciej poddane preparatyce, czyli utwardzeniu, tak aby luźna frakcja, często przewarstwiona materiałem organicznym, nie uległa dezintegracji, uniemożliwiając opisanie mikrostruktur, a tym samym odtworzenie procesów w niej zachodzących. Kiedy pobrane monolity lub rdzenie nie mogą być od razu poddane preparatyce, muszą być zabezpieczone przed niekontrolowanym wysychaniem. Pobrane próby najlepiej przechowywać w lodówce, względnie w temperaturze do 10°C. Wysychanie próbek pobranych jako rdzenie lub w puszkach Kubieny powoduje pękanie zawartego w nich osadu i powstanie zaburzeń pierwotnych struktur.

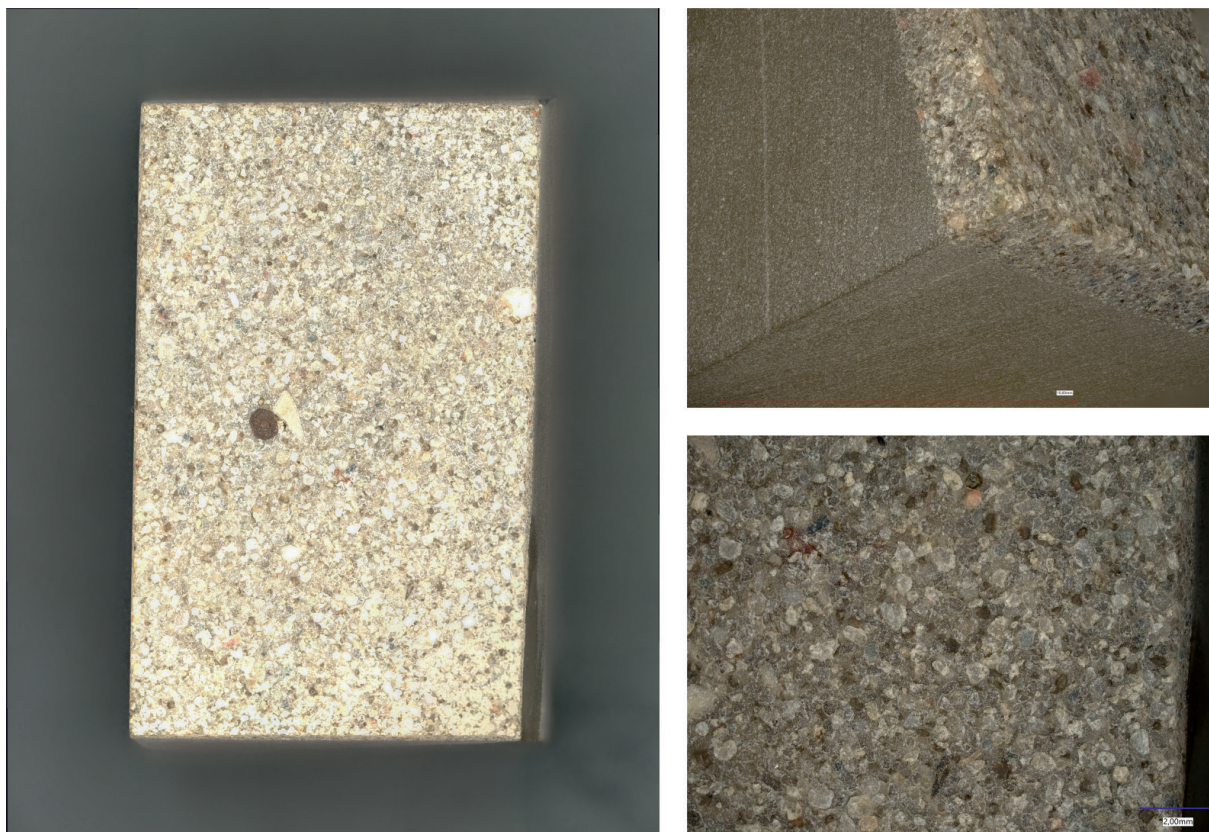


Ryc. 2. Przykłady gotowych do analizy mikroskopowej cienkich szlifów o różnych rozmiarach. wykonanie szlifów: Michał Jankowiak (Instytut Geologii, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza), Julie Boreham (Earthslides). Fot. K. Leszczyńska, A. Kurzawska

Suszenie poprzedzające impregnację musi odbywać się w temperaturze pokojowej, a osoba odpowiedzialna za preparatykę musi kontrolować przebieg procesu. Wyższa temperatura suszenia powoduje rekrytalizację minerałów ilastych będących składnikiem osadu, a także nadmierne pękanie osadu.

Płytką cienką to podstawowy preparat mikroskopowy wykorzystywany do badań mikromorfologii osadów (ryc. 2). Ze względu na specyfikę materiału, z którego ma zostać wykonany szlif, należy go najpierw zaimpregnować. Impregnacja próbki ma na celu utwarcenie materiału w nienaruszonej

strukturze. Impregnacja odbywa się metodą próżniową przy użyciu żywicy epoksydowej wraz z utwardzaczem (np. Epidian 35, Araldite 2020). Sama impregnacja przebiega przy użyciu pompy próżniowej podłączonej do szczelnego naczynia, w którym umieszcza się próbkę razem z formą, w której został pobrany, a następnie odpompowuje powietrze, jednocześnie zasysając żywicę epoksydową, która uzupełnia wolne przestrzenie w impregnowanym materiale. Postęp utwardzania musi być kontrolowany tak, aby tworzenie próżni i wypełnianie żywicą nie następowało zbyt szybko, ponieważ mogą zostać naruszone pierwotne struktury.



Ryc. 3. Wycięty z rdzenia, zaimpregnowany preparat, z którego następnie ma być skrojony cienki preparat przyklejony do szkiełka podstawowego i poddany szlifowaniu (ten sam preparat w różnych ujęciach). Fot. A. Kurzawska

Ze względu na ograniczenia sprzętowe (przede wszystkim wielkość szlifierek do przygotowywania cienkich płytek oraz stolików mikroskopowych) niemożliwe jest wykonanie i analiza cienkich płytek z całych pobranych monolitów czy rdzeni. Po wyschnięciu zaimpregnowanego materiału należy zaznaczyć najważniejsze dla późniejszych analiz i interpretacji fragmenty, które muszą być zawarte w tworzonych preparatach mikroskopowych. Preparaty do opisu mikromorfologicznego z osadów luźnych mogą mieć wielkość 25 mm × 38 mm lub być wielokrotnością tego pola, nierzadko osiągając wartości 110 mm × 55 mm. VandenBygaart i Protz (1999) podejmowali próby ustalenia optymalnej wielkości szlifów, jednakże jego wielkość zależy tylko i wyłącznie od celu i pytania badawczego.

Wytypowane fragmenty rdzeni wycina się z całości (ryc. 3) za pomocą piły mechanicznej z tarczą tnącą o nasypie diamentowym, a następnie szlifuje się do uzyskania płaskiej powierzchni. Ważne jest zaznaczenie orientacji (stropu i spągu) wyciętej próbki, gdyż często z jednego rdzenia wycina się

kilka fragmentów i ważne jest zachowanie ciągłości profilu. Należy zwrócić uwagę na powstanie wolnych przestrzeni w trakcie szlifowania, które należy uzupełnić, impregnując powierzchniowo wszystkie ubytki, najlepiej żywicą epoksydową o współczynniku załamania światła zbliżoną do kwarcu.

Tak przygotowaną powierzchnię należy przykleić do mikroskopowego szkiełka podstawowego przy użyciu tej samej żywicy i następnie wyszlifować do zadanej grubości. Szlifowanie wstępne odbywa się za pomocą luźnych proszków ściernych wykonanych z węgliku krzemu SiC nanoszonych na płaską tarczę żeliwną szlifiarki mechanicznej, np. Logitech PM5 (ryc. 4). Szlifowanie wykańczające przeprowadza się do zadanej grubości szlifów mechanicznie lub ręcznie przy użyciu drobniejszych frakcji węgliku krzemu lub zawieszin diamentowych.

Nie ma ściśle określonej standardowej grubości szlifów (płytek) wykonywanych do analizy mikromorfologicznej osadów nieskonsolidowanych, ponieważ zależy ona od celu analizy, cech osadu, które chcemy opisać, a także stosunku ilości minerałów



Ryc. 4. Szlifierka Logitech PM5 do szlifowania preparatów mikroskopowych do zadanej grubości (a i b). Grubość wyjściowa materiału przyklejonego do szkiełka podstawowego może wynosić do 2 mm, a wynikowa od 100 do 30 μm . Proces szlifowania trwa od kilkunastu minut do kilku godzin, w zależności od szlifowanego materiału oraz wielkości i grubości szlif. Podczas szlifowania w ruch obrotowy wprawiana jest tarcza żeliwna wraz z dozowanym materiałem ściernym. Jej obrót wymusza rotację głowicy z umieszczonym w niej szlifowanym preparatem; a – czerwona ramka – głowica szlifierki z nałożoną na nią płytką, która ma być szlifowana; b – czerwona ramka – głowica nałożona na szlifierkę. Płytką, która jest szlifowana (na zdjęciu A) położona na głowicy), znajduje się pomiędzy głowicą a dyskiem żeliwnym z naniesionym materiałem ściernym. Fot. K. Leszczyńska

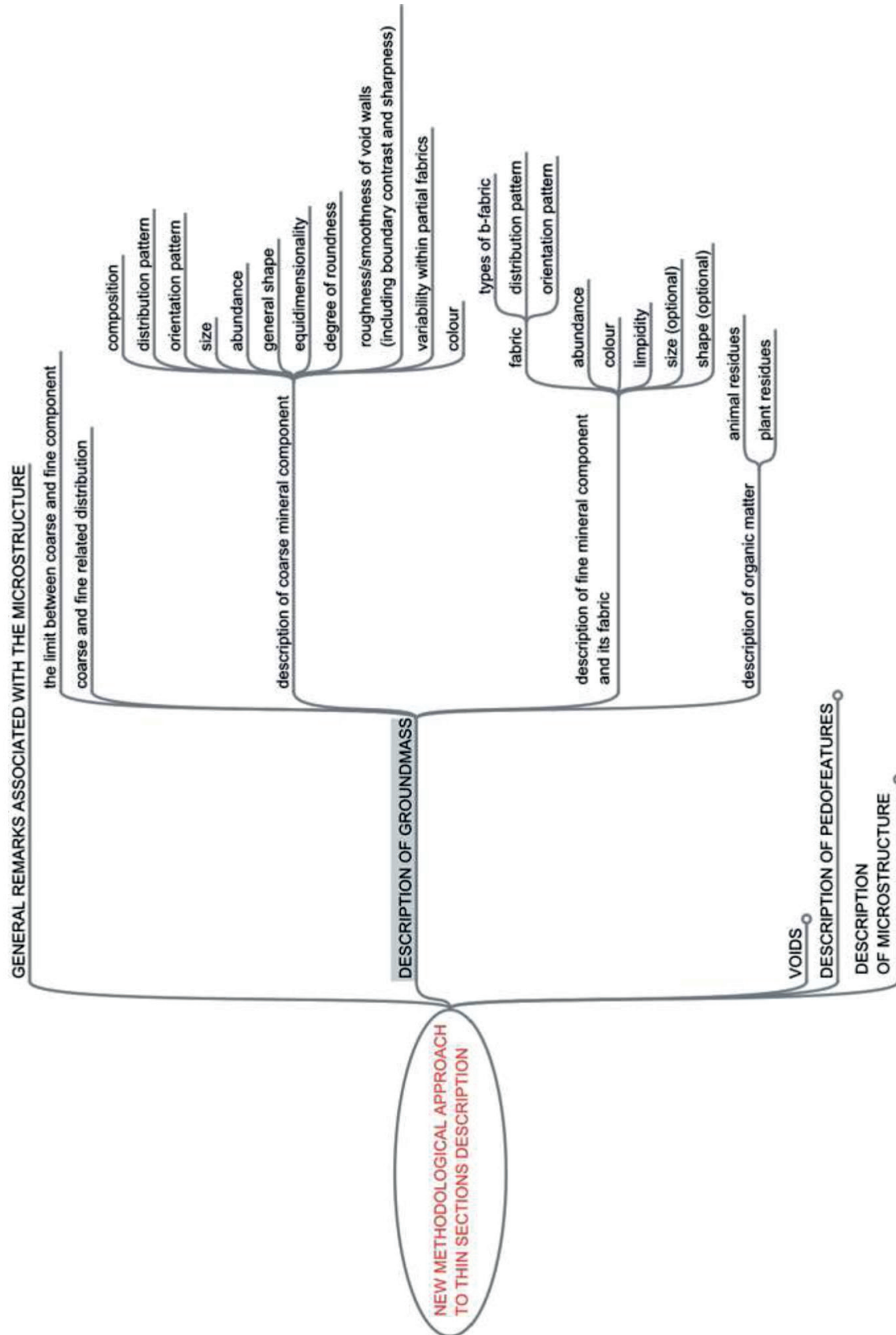
twardych (kwarc, skałen) do części miękkich (np. torf, bituminy). Najczęściej płytki mają grubość od 100 do 30 μm . Podczas szlifowania znacznie szybciej szlifują się miękkie części. Z tego powodu należy dobrać optymalną grubość preparatu, która z jednej strony nie zaburzy obrazu, a z drugiej pozostawi wszystkie elementy obrabianego materiału. Wykończeniem powierzchni po uzyskaniu satysfakcjonującej grubości szlif jest poler, czyli wygładzenie preparatu do lustrzanej powierzchni lub nakrycie preparatu szkiełkiem nakrywkowym. Szkiełko nakrywkowe ma na celu utrwalić powierzchnię, a poler powierzchni umożliwi podjęcie dalszych badań.

ANALIZA MIKROSKOPOWA I OPIS PŁYTEK CIENKICH

Po zaimpregnowaniu osadów i przygotowaniu cienkich szlifów kolejnym etapem jest analiza preparatu pod polaryzacyjnym mikroskopem petrograficznym

ze zmiennym oświetleniem. Szczegółowy opis komponentów i ich wzajemnego ułożenia, a także stosunku do przestrzeni wolnych pozwala na odróżnienie pierwotnych i wtórnych elementów osadu i jego struktury. Pomimo wieloletniej tradycji metody mikromorfologicznej nie ma jednolitego, uniwersalnego systemu metodologicznego opisu cienkich szlifów ani ogólnie uznanej terminologii. Według Goldberga i Aldeiasa (2016) jest to związane przede wszystkim z jakościowym i subiektywnym charakterem metody i szerokim wachlarzem tematycznym zastosowania analiz mikromorfologicznych, obejmującym liczne dyscypliny naukowe i niezliczone pytania badawcze. Pytania badawcze, do których rozwikłania dąży analiza mikromorfologiczna, oraz dyscyplina, której wyniki takiego opisu mają posłużyć implikuje terminologię (Hildebrandt-Radke 2007).

Pierwsze próby usystematyzowania *metodyki* opisu cienkich szlifów były podjęte na przełomie lat 60. i 70. (Brewer i Sleeman 1960; 1988; Brewer 1964; 1972; 1976). W roku 1985 Bullock zaproponował



Ryc. 5. Przykład diagramu prowadzącego krok-po-kroku przez szczegółowy opis mikromorfologiczny cienkiego szlifu (za: Leszczyńska i in. 2011: 275)

w książce *Handbook for soil and thin section description* kompleksowy system opisu cienkich szlifów, którego później wersja, rozszerzona przez Stoops'a (2003) stała się najbardziej powszechnym przewodnikiem do przeprowadzania analiz mikromorfologicznych.

Interdyscyplinarnym opracowaniem metodologii opisu cienkich płytek, adresowanym do osób zapoznających się dopiero z metodą tworzenia analiz mikromorfologicznych, jest *New methodological approach for thin sections descriptions* (Leszczyńska 2011). W artykule tym zaprezentowany jest klucz do opisu cienkich szlifów prowadzący krok po kroku przez kolejne etapy analizy. Podążając za rozgałęziającymi się odnogami grafu (ryc. 5), badacz ma pewność, że nie pominie żadnego etapu opisu próbki, a także, że opis poszczególnych elementów i struktur będzie następował zawsze w tej samej kolejności, co sprawi, że będą one łatwe w porównywaniu. Zaprezentowany schemat opisu cienkich szlifów ma charakter interaktywny, co znaczy, że w zależności od pytań badawczych, na jakie ma odpowiedzieć analiza mikromorfologiczna, można go modyfikować, dodając lub usuwając poszczególne etapy. Klucz do opisu jest dostępny w formie cyfrowej (Leszczyńska i in. 2011).

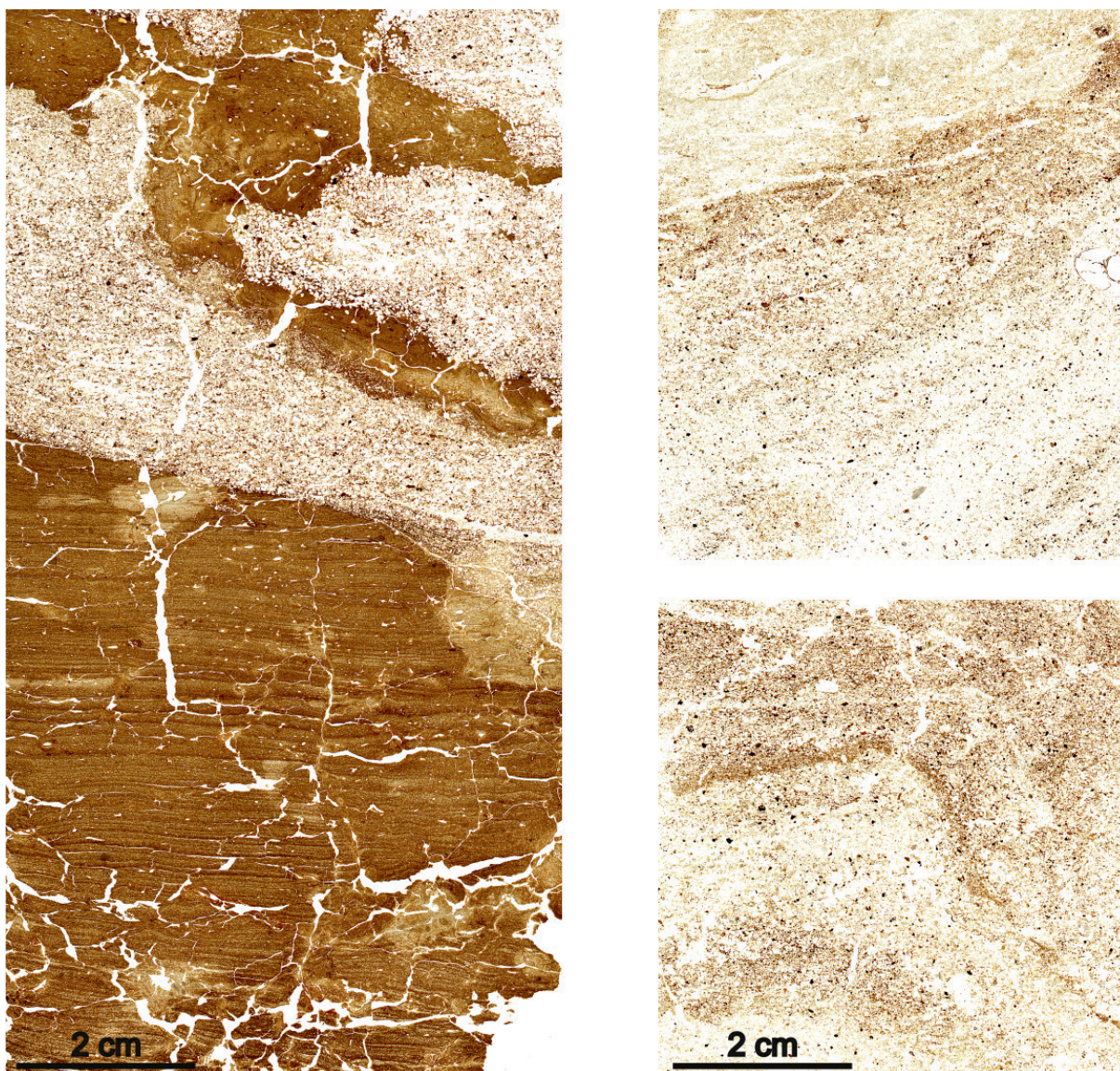
Klucz do szczegółowego opisu próbek mikromorfologicznych pod mikroskopem zaproponowany przez Leszczyńską i in. (2011) dzieli opis preparatów na 5 głównych kategorii cech, jakie należy scharakteryzować, są to: 1) uwagi ogólne o wyglądzie osadu zaimpregnowanego (ang. *general remarks*); 2) opis komponentów budujących osad (ang. *groundmass*): gruboziarnistych, drobnoziarnistych oraz materii organicznej; 3) opis przestrzeni wolnych; 4) opis agregatów (ang. *pedofeatures*) i 5) opis mikrostruktury. W uwagach ogólnych powinna być zawarta informacja o głównych elementach gruboziarnistych i drobnoziarnistych budujących osad utrwalony w cienkim szlifie i mikrostrukturze, a także powinny być wyznaczone, jeśli istnieją, poszczególne facje. Opisując poszczególne komponenty osadu, należy zdefiniować granicę pomiędzy drobno- i gruboziarnistymi komponentami, a także scharakteryzować ich wzajemną przestrzenną organizację (ang. *coarse and fine related distribution: monic, gefuric, chitonic, porphyritic, enaulic*). Charakteryzując komponenty gruboziarniste, należy określić ich rozkład przestrzenny, rozmiar, licznosc, ogólny kształt, orientację,

wymiary i charakter powierzchni oraz kolor i stopień zróżnicowania poszczególnych ziaren. Do najważniejszych cechy komponentów drobnoziarnistych należy ich rozkład w przestrzeni i orientacja ziaren (tworzące teksturę), licznosc, kolor, przezroczystosc lub jej brak i inne cechy optyczne oraz kształt (jeśli widoczny). Opisując przestrzenie wolne, należy określić ich typ (np. kanaliki, szczeliny, pory), kształt, rozmiar, procentowy udział w powierzchni cienkiego szlifu, procentowy udział poszczególnych typów przestrzeni wolnych, stopień wygładzenia ścian, rozkład w przestrzeni i orientację. Agregaty powinny być opisane pod kątem ich licznosci, stopnia oddzielenia od siebie nawzajem i dopasowania, wielkości, kształtu, rozkładu w przestrzeni i orientacji, stopnia wygładzenia ścian i zewnętrznej morfologii, a także licznosci i zróżnicowania. Wszystkie cechy, na jakie należy zwrócić uwagę, zawarte są w kluczu zaproponowanym przez Leszczyńską i in. (2011).

Problem nieujednoliconej *terminologii* staje się szczególnie ważki w przypadku posługiwania się językiem innym niż angielski. Terminologia nieangielskojęzyczna operuje terminami, które często są kalkami językowymi. Brzmiały one obco, jak np.: angielski termin *nodules* w języku polskim: nodule, angielski termin *nucleic nodules* w języku polskim: nodule nukleidowe; często też mają charakter opisowy, jak np. angielski termin *clay coatings* tłumaczy się na język polski jako ilaste otoczki wewnątrzkanalikowe. Dobrą praktyką tworzenia opisów mikromorfologicznych w innych językach niż angielski jest zapisywanie angielskich odnośników, najszerzej znanych i łatwych w interpretacji, w nawiasach za terminami w języku macierzystym.

PREZENTACJA WYNIKÓW ANALIZ MIKROMORFOLOGICZNYCH

Jednym z trudniejszych etapów badań mikromorfologicznych, zarówno w geoarcheologii, jak i innych dziedzinach nauki, jest prezentacja danych, wyników i interpretacji wraz z wnioskami. Wynikiem mikroskopowych analiz mikromorfologicznych, jakościowych w swej naturze, są subiektywne opisy komponentów, struktur i ich wzajemnych powiązań. Dla podniesienia poziomu obiektywności opisów i porównywalności prezentowanych danych



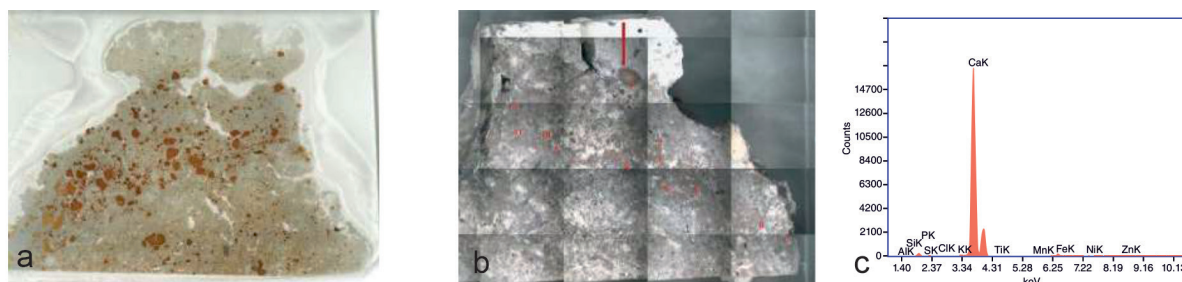
Ryc. 6. Skany szlifów cienkich. Przykłady osadów peryglacialnych z Royak Oak Pit, UK. Zmodyfikowane za: Leszczyńska i in. 2011: 279, ryc. 5 i 6; 282, ryc. 8

konieczny jest dostęp do rozbudowanej kolekcji referencyjnej zawierająca próbki wzorcowe (Goldberg i Macphail 2006; Hildebrandt-Radke 2007) oraz doświadczenie osoby wykonującej opis mikromorfologiczny, a także przejrzysta organizacja prezentowanych wyników.

Jak zauważają Goldberg i Aldeias (2016), prezentacja danych w postaci ciągłego tekstu jest najczęściej zbyt długa, zawiła i niezrozumiała, trudno zwrócić uwagę na najważniejsze cechy i informacje oraz wnioski. Taki sposób prezentacji zmniejsza użyteczność danych mikromorfologicznych. Podobnie zgeneralizowane, syntetyczne tabele nie sprzyjają czytelności prezentowanych danych. Dane

szczegółowe powinny być prezentowane w załącznikach do artykułów, natomiast w części głównej publikowanych tekstów powinien znaleźć się jedynie syntetyczny opis najważniejszych cech charakterystycznych pozwalających odróżnić poszczególne facje.

Przedstawiane dane mikromorfologiczne powinny być zilustrowane. Do tego celu dobrze sprawdzają się zarówno tradycyjne fotografie wykonane pod mikroskopem, jak i skany (ryc. 6). Dobrze wykonane zdjęcia preparatów mikromorfologicznych robione są w mniejszym powiększeniu niż komponent lub struktura, którą chcemy przedstawić, tak aby widoczny był kontekst prezentowanego



Ryc. 7. Przykład wizualizacji wyników analizy XRF: a – cienki szlif, osady ze stanowiska paleolitycznego, widok pod mikroskopem, światło odbite; b – widok obrazu analizowanego metodą XRF; c – spektrum chemiczne charakteryzujące próbę, widoczne podwyższone zawartości Ca i P. Rycina zmodyfikowana za: Mentzer 2017: 437, ryc. 41.3

materiału. Skany całych płytek cienkich prezentują tło dla ujętych w pomniejszeniu elementów, zapewniają kontekst prezentowanych później w pomniejszeniu elementów (Courty i in. 1989; Goldberg i Aldeias 2016); wykonanie zdjęcia całego szlifu jest trudne. Skany powinny być wykonane w rozdzielczości między 1200 a 2400 dpi.

Materiały ilustrujące wyniki analiz mikromorfologicznych muszą zawierać również zdjęcia odkrywek, z których pobrane były monolity. Ważny jest dobrze naszkicowany profil osadów, względnie schematyczny rysunek stratygrafii, z naniesionymi miejscami poboru monolitów, umiejscowieniem puszek Kubieny, a także – w miarę możliwości – cienkich szlifów pobranych z osadów.

ZAAWANSOWANE METODY BADAWCZE W MIKROMORFOLOGII

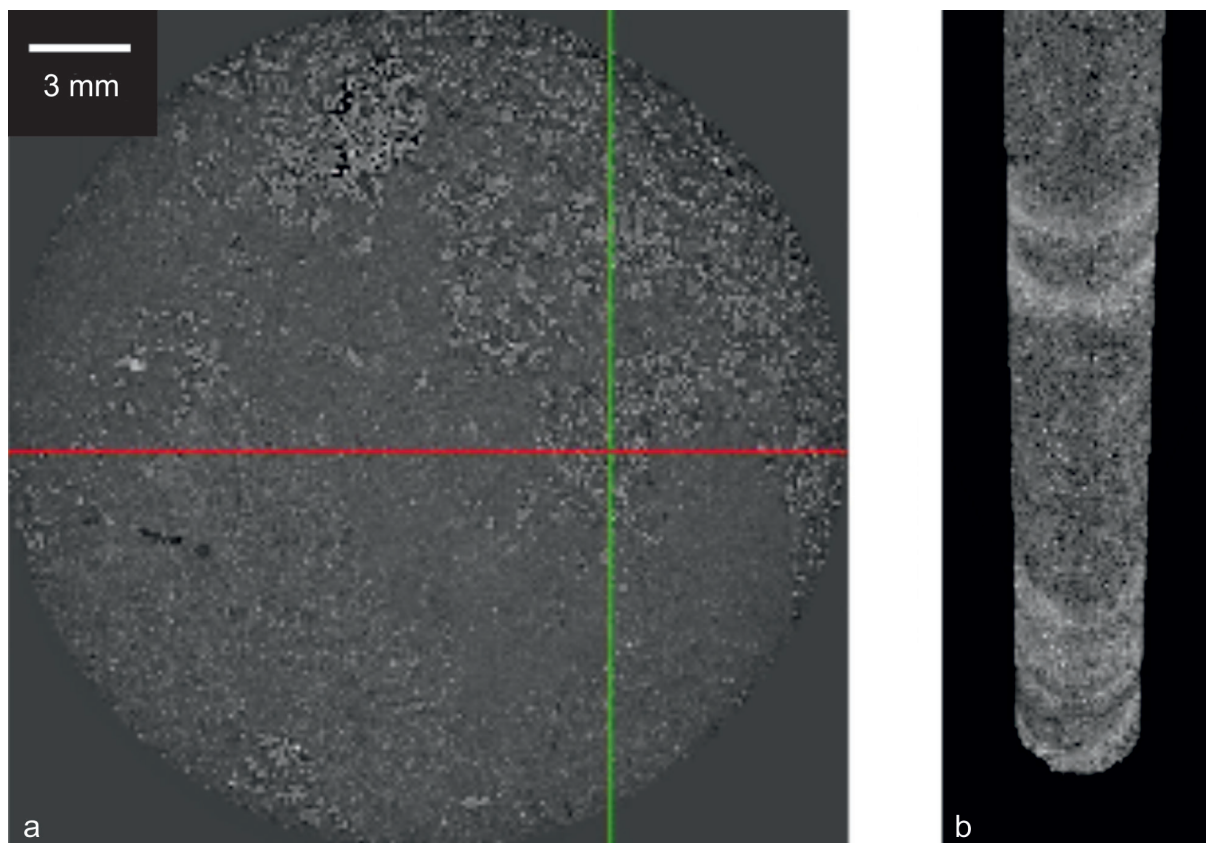
Na przestrzeni lat, wraz z rozwojem nowoczesnych technologii analitycznych, zwiększały się możliwości interpretacyjne mikromorfologii. Obecnie oprócz podstawowej metody opisu cienkich szlifów pod mikroskopem petrograficznym ze zmiennym źródłem światła, omówionej w poprzednim dziale, zaimpregnowane osady można poddawać szeregowi dodatkowych analiz, do których należą, z najważniejszych:

- analizy fluorescencyjne,
- analiza światła odbitego,
- fluorescencyjna spektroskopia rentgenowska,
- analiza rentgenowska w mikroobszarze,
- (izotopowa) spektrometria mas w chromatografii gazowej

Optyczne analizy fluorescencyjne (ang. *fluorescence analysis*) cienkich szlifów wykonuje się

głównie w celu zidentyfikowania materii organicznej i szczątków roślinnych w preparatach. Badania te przeprowadzane są za pomocą mikroskopów fluorescencyjnych, w których obiektywy są jednocześnie kondensatorami. Źródło światła o określonej długości fali, generowane w obiektywie, wysyłane jest w kierunku próbki, a wzbudzona fluorescencja analizowane w kondensatorze. Szczególnym przypadkiem mikroskopii fluorescencyjnej jest mikroskopia katodoluminescencyjna, w której do wzbudzenia fluorescencji wykorzystywana jest wiązka elektronów (Stoops 2017; Barbin 2013). Przykłady zastosowania metody: badania genezy gleb i warunków ich ewolucji w Prowincji Fars w Iranie (Khormali i in. 2006), identyfikacja sposobów kultuwowania i nawożenia gleb w epoce brązu na stanowisku Tofts Ness, Sanday, Orkney (Simpson i in. 1999).

Analiza światła odbitego (ang. *reflected light analysis*) to metoda stosowana podczas analiz mikromorfologicznych impregnowanych osadów organicznych, takich jak torf, węgiel drzewny, węgiel kamienny oraz wszelkich osadów zawierających węgiel organiczny z cienkich szlifów. Pozwala ona na zidentyfikowanie, opisanie i sklasyfikowanie materiału organicznego, jego dojrzałość i stopnia rozkładu (Diessel 1992; Suárez-Ruiz i in. 2012; Sýkorová i in. 2005). Używa się jej również do identyfikacji minerałów metalicznych, takich jak piryt, hematyt, geotyt, mangan i różnego rodzaju tlenki, które w cienkich szlifach są nieprzeźroczyste i niemożliwe do zidentyfikowania (Ligouis 2017). Przykłady zastosowania metody: zidentyfikowanie węglików i popiołów z palenisk pochodzących z różnego rodzaju szczątków roślinnych i zwierzęcych (Kwiecińska i Petersen 2004; Goldberg i in. 2009; Stahlschmidt i in. 2015), szacowanie temperatury



Ryc. 8. Przykład wizualizacji wyników analizy micro-CT: a – 2-wymiarowy widok poprzeczny przez rdzeń; b – 3-wymiarowy widok rdzenia. Rycina zmodyfikowana za: Falvard i Paris, 2017: 456, ryc. 2

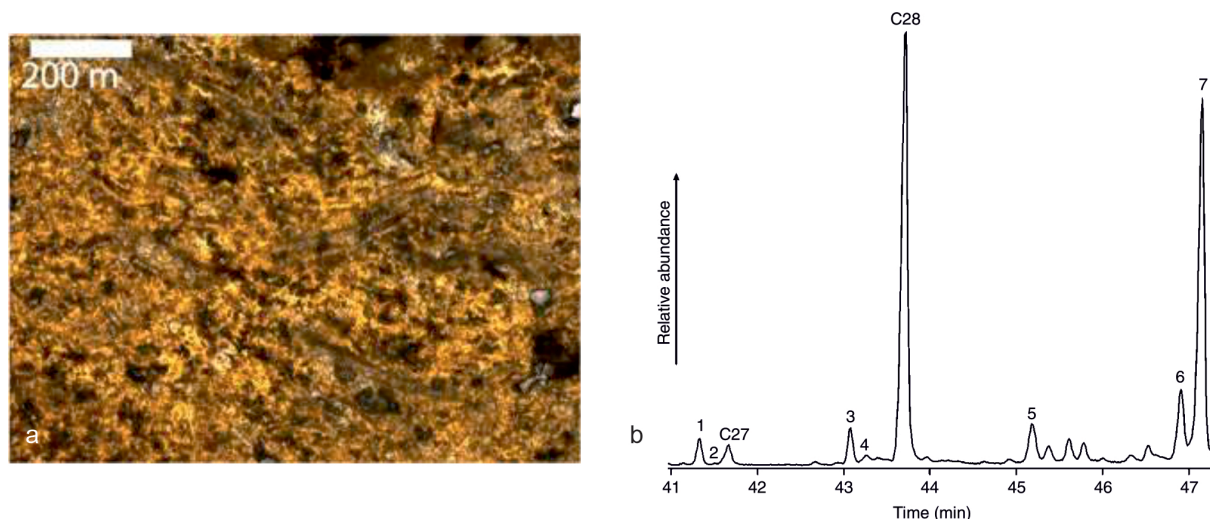
tworzenia się węglików (Jones i Lim 2000; Bustin i Guo 1999; Jones i in. 1991).

Fluorescencyjna spektroskopia rentgenowska (ang. *X-ray fluorescence spectroscopy*, XRF), przeprowadzana zarówno na płytkach cienkich, jak i impregnowanych monolitach (Mentzer i Quade 2013; Mentzer 2017) informuje o składzie chemicznym elementów budujących osady (o XRF Krueger, w tym tomie). Zaletą tej metody jest możliwość prezentacji wyników w formie graficznej w tej samej skali co dane mikromorfologiczne uzyskane pod mikroskopem optycznym (ryc. 7). Przykłady zastosowania metody: badanie procesów wietrzenia gleby, skał i poszczególnych minerałów (Strawn i in. 2002; Thorne i in. 2009); analiza materiału z podłoża neolitycznych konstrukcji Mentzer Quade (2013); analiza stanu zachowania i wpływu środowiska na stan zachowania kości (Adderley i in. 2007).

Analiza rentgenowska w mikroobszarze (ang. *X-ray micro-computed tomography scanning*, micro-CT scanning) może być stosowana do analizy składu wewnętrznego i struktury szerokiego spektrum

materiałów, zarówno bezpośrednio w terenie, w odkrywkach, jak i z impregnowanych monolitów (Ngan-Tillard i Huisman 2017). Jest to metoda wykorzystująca promienie rentgenowskie do tworzenia modeli 3D struktur wewnątrz obiektów (ryc. 8). Przykłady zastosowania metody: stworzenie trójwymiarowej mapy składników gleby, w tym rozmieszczenia minerałów, materii organicznej i wolnych przestworów (Adderley i in. 2001), analiza budowy wewnętrznej termitier na poziomie mikrostruktur, ze szczególnym uwzględnieniem szczątków organicznych i koprolitów, których identyfikacja nie jest możliwa w płytkach cienkich pod mikroskopem optycznym (Husmein i in. 2014; Villagran i in. 2019), analiza wewnętrznych zniekształceń osadów archeologicznych i ich podatność na zniszczenie (Ngan-Tillard i in. 2014; 2016).

(Izotopowa) spektrometria mas w chromatografii gazowej (ang. *gas-chromatography – (isotope ratio) mass spectrometry*, GC-(IR)MC) to metoda ustalania procentowego składu mieszanin chemicznych. Próbkę poddawane tej analizie muszą



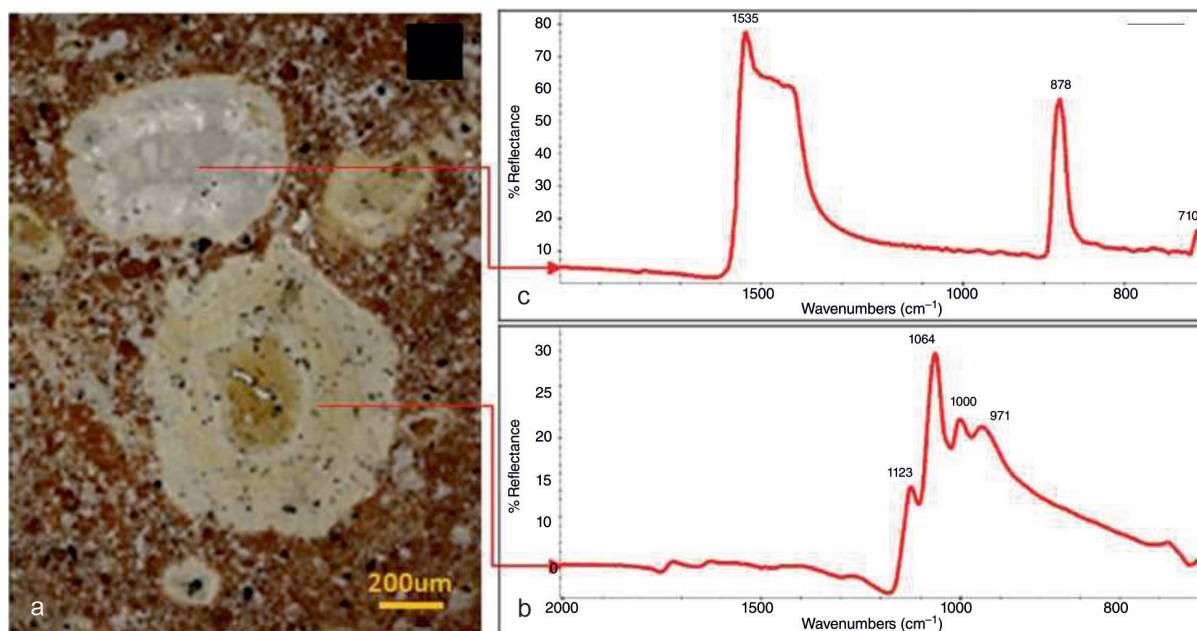
Ryc. 9. Przykład wizualizacji wyników analizy GC IRMC: a – widok próby pochodzi ze stanowiska Sheik-e Abda, analizowanej metodą GC IRMC, pokazujący sterole zawarte w odchodach zwierzęcych; b – spektrum GC IRMC odpowiadające próbie. Rycina zmodyfikowana za: Shillito, 2017: 400, ryc. 37.1

być rozdrobnione przed wprowadzeniem do spektrometru, a więc do niedawna analiza ta była najczęściej wykonywana na osadach nieimpregnowanych jako uzupełnienie analiz mikromorfologicznych. Najnowsze badania wykazują, że metodą GC-MC możliwe jest wykonywanie analiz chemicznych i biochemicznych na osadach impregnowanych, a następnie rozdrobnionych (Rodríguez de Vera i in. 2020). Zastosowanie do analizy GC-MC próbek uprzednio impregnowanych i opisanych pod mikroskopem optycznym zapewnia dużą trafność w pobieraniu materiału do analiz chemicznych. Przykłady zastosowania metody: rozróżnienie mikroskopowo identycznych warstw osadniczych z neolitycznego stanowiska Çatalhöyük, interpretowanych na podstawie analiz mikromorfologicznych jako warstwy spalania, a opisanych jako różne warstwy osadnicze na podstawie wyników analizy spektrometrii mas w chromatografii gazowej (Mallol i in. 2013); rozróżnienie mikroskopowo identycznych warstw spalania na podstawie ich składu chemicznego, który wykazał, że materiał, z którego pochodzą spalone szczątki poszczególnych poziomów, miał inny skład organiczny (Shillito i in. 2011; 2013) (ryc. 9).

Elektronowa analiza rentgenowska w mikroobszarze (pod mikroskopem skaningowym) (ang. *scanning electron microscope – electron probe microanalysis*, SEM-EPMA), to kolejna metoda do określania składu chemicznego prób, którą można wykonywać bezpośrednio na cienkich szlifach lub

impregnowanych monolitach. Polega ona na mierzeniu promieniowania rentgenowskiego wzbudzonego wiązką elektronów skupioną na powierzchni próbki. Wielkość pola analizy wynosi 1 μm, a więc wykorzystanie tej metody umożliwia analizowanie wybranych elementów osadu, np. ziaren czy fragmentów materiału archeologicznego, bez konieczności analizowania całych prób wraz ze wszystkimi komponentami (Bisdom 1981; Jongmans i in. 1999). Przykłady zastosowania metody: zidentyfikowanie elementów składowych gleby antropogenicznej związanej z działalnością człowieka w Krainie Jezior, w regionie Rio de Janeiro w Brazylii (Corrêa i in. 2013), odtworzenie kolejnych etapów ewolucji gleby (Macphail i in. 2013; Nicosia i in. 2012; Macphail i in. 2004), analiza pochodzenia i składu warstw archeologicznych wraz z określeniem tempa i charakteru zmian tafonomicznych artefaktów (Wilson 2017; Falsone i in. 2014; Wilson i in. 2013), analiza stanu rozkładu kości w pokładach archeologicznych (Estévez i in. 2014), analiza sposobu oraz tempa migracji i rozkładu różnych związków chemicznych w glebach o różnym reżimie wilgotności i w potencjalny wpływ tych procesów na zjawiska tafonomiczne (Wilson i in. 2008) czy odtworzenie procesów mumifikacji za pomocą osadów ilastych ze znalezisk Chinchorro, w Arica, w północnym Chile w Ameryce Południowej (van Hoesen i Arriaza 2011).

Spektroskopia w podczerwieni z transformacją Fourier’a (ang. *Fourier transform infrared*



Ryc. 10. Przykład wizualizacji wyników analizy FTIR: a – mikrograf osadów z jakini Manot (Izrael) z krystalicznymi nodulami i fragmentem speleotemu; b – spektrum FTIR fragmentu speleotemu; c – spektrum FTIR fragmentu noduli. Rycina zmodyfikowana za: Berna 2017: 413, ryc. 39.2

spectroscopy, FTIR) – metoda wykorzystywana do identyfikacji grup funkcyjnych związków chemicznych, jak np. amidy, fosforany, węglany, grupy hydroksylowe obecne w związkach organicznych poprzez mierzenie absorpcji fal podczerwonych/promieniowania podczerwonego w różnych spektrach (50 do 5000 cm^{-1} długości fali) (Berna 2017) (ryc. 10). Metoda ma szerokie zastosowanie w archeologii, można nią datować, badać spalone materiały, procesy diagenety i transformacji materiałów archeologicznych oraz procesy na stanowiskach archeologicznych (Weiner 2010). Jest przydatna do badania gleb, a szczególnie do analizy procesów syndepozycyjnych i postdepozycyjnych; w cienkich szlifach mogą być zidentyfikowane minerały, takie jak: wapiń, aluminium, żelazo i fosfory żelaza jak: apatyt, taranakit, mongomeryt, które są dowodem na niektóre procesy geochemiczne. Tą metodą na poziomie molekularnym można zbadać stopień zachowania kości, kości słoniowej, zębów i węgielków (Goldberg i Berna 2010; Weiner 2010), co z kolei pozwala wnioskować o warunkach geochemicznych na stanowisku. Metoda pozwala na określanie temperatury transformacji minerałów ilastych, fosforanów, wapieni (Weiner 2010; Berna i in. 2007; Berna 2010; Weiner i in. 2015). Przykłady

zastosowania: Wonderwerk Cave, South Africa – zidentyfikowano spalone fragmenty kości pomieszczone ze spalonymi szczątkami roślinnymi w materiale *in situ* wraz z wczesnoaszełskimi materiałami archeologicznymi (Berna i in. 2012) – można określić temperaturę palenia, pozwoliło to określić ciągłość użytkowania paleniska. Ograniczenia – nie identyfikuje skaleni, piroksenów i tlenków żelaza i obecności materiału impregnującego.

PODSUMOWANIE

Pomimo tego, że mikromorfologia jest jedną z podstawowych metod analitycznych stosowanych do osadów, jej rola w badaniach archeologicznych i geoarcheologicznych jest niedoceniona. Jak zauważają Goldberg i Aldeias (2016), jedną z przyczyn zaniedbania technik mikromorfologicznych w badaniach osadów może być jej jakościowy charakter i subiektywność analiz, brak usystematyzowanej metodologii i terminologii opisów mikromorfologicznych, duża rola doświadczenia badacza w osiągnięciu zadowalających wyników oraz trudności w prezentacji i komunikowaniu wyników analiz. Uzupełnienie tradycyjnych analiz

mikromorfologicznych nowoczesnymi technikami ilościowymi i półilościowymi, a co za tym idzie bardziej obiektywnymi, jak np.: FTIR, XRF, XRD, micro-CT, SEM, EPMA, znacznie zwiększa potencjał tej metody we współczesnych badaniach archeologicznych i geoarcheologicznych.

LITERATURA

- Adderley, W.P., Simpson, I.A., Barrett, R., Wess, T.J. 2007. *Archaeological soils and sediments: application of microfocus synchrotron X-ray scattering, diffracttion and fluorescence analyses in thin section*. ACS Symposium Series 968.
- Adderley, W.P., Simpson, I.A., MacLeod, A. 2001. Testing high-resolution X-ray computed tomography for the micromorphological analyses of archaeological soils and sediments. *Archaeological Prospection* 8: 107–112.
- Angelucci, D.E., Boschian, G., Fontanals, M., Pedrotti, A., Verges, J.M. 2009. Shepherds and karst: the use of caves and rock shelters in the Mediterranean region during the Neolithic. *World Archaeology* 41(2): 191–214.
- Barbin, V. 2013. Application of cathodoluminescence microscopy to recent and past biological materials: a decade of progress. *Mineralogical Petrology* 107: 353–362.
- Berna, F. 2010. Bone alteration and diagenesis, (w:) G. Artioli (red.), *Scientific methods and cultural heritage. An introduction to the application of materials science to archaeometry and conservation science*. Oxford, 364–367.
- Berna, F. 2017. FTIR microscopy, (w:) C. Nicosia, G. Stoops (red.), *Archaeological soil and sediment micromorphology*. London, 411–415.
- Berna, F., Behar, A., Shahack-Gross, R., Berg, J., Boaretto, E., Gilboa, A., Sharon, I., Shalev, S., Shilstein, S., Yahlom-Mack, N., Zorn, J.R., Weiner, S. 2007. Sediments exposed to high temperatures: reconstructing pyrotechnological processes in late Bronze and Iron Age strata at Tel Dor (Israel). *Journal of Archaeological Science* 34: 358–373.
- Berna, F., Goldberg, P., Kolska Horwitz, L., Brink, J., Holt, S., Bamford, M., Chazan, M. 2012. Microstratigraphic evidence of in situ fire in the Acheulean strata of Wonderwerk Cave, Northern Cape province, South Africa. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 109: 1215–1220.
- Bisdom, E.B.A. 1981. *Submicroscopy of soils and weathered rock*. Wageningen.
- Bisdom, E.B.A. 1985. Microchemical analysis in thin sections of soils, (w:) P. Bullock, C.P. Murphy (red.), *Soil micromorphology*. Rothamsted, 53–70.
- Bordes, F. 1954. Les limons quaternaires du basin de la Seine – stratigraphie at archéologie paléolithique. *Institut du Paléontologie Humaine Memoire* 26: 1–26.
- Bowler, J.M., Thorne, A.G. 1976. Human remains from Lake Mungo, (w:) A.G. Thorne (red.), *The origin of the Australians*. Canberra, 127–138.
- Brewer, R. 1964. *Fabric and mineral analysis of soils*. New York.
- Brewer, R. 1972. The basis of interpretation of soil micromorphological data. *Geoderma* 8: 81–94.
- Brewer, R. 1976. *Fabric and mineral analysis of soils*. New York.
- Brewer, R., Sleeman, J.R. 1960. Soil structure and fabric – their definition and description. *Journal of Soil Science* 11: 172–185.
- Brewer, R., Sleeman, J.R. 1988. *Soil structure and fabric*. Australia.
- Budek, A., 2010. Zastosowanie analizy mikromorfologicznej w badaniach gleb i osadów czwartorzędowych. *Landform Analysis* 12: 23–30.
- Bullock, P., Fedoroff, N., Jongerius, A., Stoops, G., Tursina, T., Babel, U., Aguilar, J., Altemüller, H.-J., Fitzpatrick, E.A., Kowalinski, S., Paneque, G., Rutherford, G.K., Yarilowa, E.A. 1985. *Handbook for thin section description*. Albrighton.
- Bullock, P., Murphy, C.P. 1981. *Soil micromorphology*. Volume 1: techniques and applications. Berkhamsted.
- Bustin, R.M. Guo, Y., 1999. Abrupt changes (jumps) in reflectance values and chemical compositions of artificial charcoals and inertinite in coals. *International Journal of Coal Geology* 38: 237–260.
- Butzer, K.W. 1973. Re-evaluation of the geology of the Elandsfontein Hopefield site, south-western Cape, South Africa. *South African Journal of Science* 69: 234–238.
- Butzer, K.W. 1974. Geo-archeological interpretation of acheulian calc-pan sites at Doornlaagte and Rooidam (Kimberley, South Africa). *Journal of Archaeological Science* 1: 1–25.
- Butzer, K.W. 1977. Geo-archaeology in practice. *Reviews of Anthropology* 4: 125–131.
- Butzer, K.W. 1980. Context in archaeology: an alternative perspective. *Journal of Field Archaeology* 7: 417–422.
- Cornwall, I.W., Hodges, H.W.M. 1964. Thin sections of British Neolithic pottery: Windmill Hill – a test site. *Institute of Archaeology Bulletin, London University* 4: 29–33.
- Corrêa, G.R., Schaefer, C.E., Gilkes, R.J. 2013. Phosphate location and reaction in an archaeoanthrosol on shell-mound in the Lakes region, Rio de Janeiro state, Brazil. *Quaternary International* 315: 16–23.
- Courty, M.A., Fedoroff, N. 1982. Micromorphology of a Holocene dwelling. *PACT* 7: 257–277.
- Courty, M.A., Goldberg, P., Macphail, R., 1989. *Soil and micromorphology in archaeology*. Cambridge.

- Dalrymple, J.B. 1958. The application of soil micromorphology to fossil soils and other deposits from archaeological sites. *Journal of Soil Science* 9: 199–209.
- Dalrymple, J.B. 1964. The application of soil micromorphology to the recognition and interpretation of fossil soils in volcanic ash deposits from the Northern Island, New Zealand, (w:) A. Jongerius (red.), *Soil micromorphology*. Amsterdam, 339–349.
- Delgado, M. 1978. *Micromorphologia de Suelos. Soil microscopy: proceedings of the fifth International Working Meeting on soil micromorphology*. Granada.
- Delgado, M., Dorronsoro, C. 1985. Image analysis, (w:) P. Bullock, C.P. Murphy (red.), *Soil micromorphology*. Rothamsted, 71–86.
- Diessel, C.F.K. 1992. *Coal-bearing depositional systems*. Berlin-Heidelberg.
- Douglas, L.A. 1990. Soil micromorphology: a basic and applied science. *Development in Soil Science* 19.
- Drees, L.R., Wilding, L.P. 1987. Micromorphic record and interpretations of carbonate forms in the Rolling Plains of Texas. *Geoderma* 40: 157–175.
- Driese, S.G., Horn, S.P., Ballard, J.P., Boehm, M.S., Li, Z. 2017. Micromorphology of late Pleistocene and Holocene sediments and a new interpretation of the Holocene chronology at Anderson Pond, Tennessee, USA. *Quaternary Research* 87: 82–95.
- Estévez, J., Villagran, X.S., Balbo, A.L., Hardy, K. 2014. Microtaphonomy in archaeological sites: the use of soil micromorphology to better understand bone taphonomy in archaeological context. *Quaternary International* 330: 3–9.
- Eswaran, H., Shoba, A.S. 1985. Scanning electron microscopy in soil research, (w:) P. Bullock, C.P. Murphy (red.), *Soil micromorphology*. Rothamsted, 19–52.
- Falsone, G., Wilson, C.A., Cloy, J.M., Graham, M.C., Bonifacio, E. 2014. Relating microfeatures of soil organic matter to C stabilization: optical microscopy, SEM-EDS, abiotic oxidation. *Biology and Fertility of Soils* 50: 623–632.
- Falvard, S., Paris, R. 2017. X-ray tomography of tsunami deposits: Towards a new depositional model of tsunami deposits. *Sedimentology* 64: 453–477.
- Fedoroff, N. 1986. Un plaidoyer en faveur de la paléopédologie. *Bulletin Association Français Quaternaire* 1986-3/4: 195–204.
- Fedoroff, N., Bresson, L.M., Courty, M.A. 1987. *Micromorphologie des sols – soil micromorphology*. Plaisir.
- Fedoroff, N., Courty, M.A., Thompson, M.L. 1990. Micromorphological evidence of palaeoenvironmental change in Pleistocene and Holocene paleosols, (w:) L.A. Douglas (red.), *Soil micromorphology: a basic and applied science*. Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo.
- Fitzpatrick, J.A. 1984. *Micromorphology of soil*. London.
- Goldberg, P. 1979. Geology of Late Bronze Age mud brick from Tel Lachish. *Tel Aviv* 6: 60–67.
- Goldberg, P. 1980. Micromorphology in archaeology and prehistory. *Paleorient* 6: 159–164.
- Goldberg, P. 1985. Applications of micromorphology in archaeology, (w:) P. Bullock, C.P. Murphy, (red.), *Soil micromorphology*. Rothamsted, 139–150.
- Goldberg, P., Aldeias, V. 2016. Why does (archaeological) micromorphology have such little traction in (geo)archaeology?. *Journal of Archaeological and Anthropological Sciences* 9: 1005–1015.
- Goldberg, P., Berna, F. 2010. Micromorphology and context. *Quaternary International* 214: 56–62.
- Goldberg, P., Macphail, R. 2006. *Practical and theoretical geoarchaeology*. Oxford.
- Goldberg, P., Miller, C.E., Schiegl, S., Ligouis, B., Berna, F., Conard, N.J., Wadley, L. 2009. Bedding, hearths, and site maintenance in the Middle Stone Age of Sibudu Cave, KwaZulu-Natal, South Africa. *Archaeological and Anthropological Sciences* 1: 95–122.
- Guilloré, P. 1985. Colour photograms of soil thin sections using the Ilford, Cibachrome-A' print system, (w:) P. Bullock, C.P. Murphy (red.), *Soil micromorphology*. Rothamsted, 87–90.
- Hays, T.R., Hassan, F.A. 1974. Mineralogical analysis of Sudanese Neolithic Ceramics. *Archaeometry* 16: 71–79.
- Hildebrandt-Radke, I. 2007. Geochronologiczne aspekty badań pradziejowych i historycznych zespołów osadniczych, (w:) M. Makohonienko, D. Makowiecki, Z. Kurnatowska (red.), *Środowisko – Człowiek – Cywilizacja*. Poznań, 57–70.
- Husmein, D.J., Ngan-Tillard, D.J.M., Tensen, M.A., Laarman, A., Raemaekers, D.C.M. 2014. A question of scale: studying Neolithic subsistence using micro-CT scanning of midden deposits. *Journal of Archaeological Science* 49: 585–594.
- Jones, T.P., Lim, B. 2000. Extraterrestrial impact and wildfires. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 164: 57–66.
- Jones, T.P., Scott, A.C., Cope, M. 1991. Reflectance measurements and the temperature of formation of modern charcoals and implications for studies of fusain. *Bulletin de la Société Géologique de France* 162: 192–200.
- Jongmans, A., van Oort, F., Denaix, L., Jaunet, A. 1999. Mineral micro- and nano-variability revealed by combined micromorphology and in situ submicroscopy. *Catena* 35: 259–279.
- Kemp, R.A., Derbyshire, E., Meng, X. 2001. A high-resolution micromorphological record of changing landscapes and climates on the western Loess Plateau of China during oxygen isotope stage 5. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 170: 157–169.

- Khormali, F., Abtahi, A., Stoops, G. 2006. Micromorphology of calcite features in highly calcareous soils of Fars Province, Southern Iran. *Geoderma* 132: 31–46.
- Korina, N.A., Faustova, M.A. 1964. Microfabric of modern and old moraines, (w:) A. Jongerius (red.), *Soil micromorphology*. Amsterdam, 333–338.
- Kubiena, W.L. 1938. *Micropedology*. Ames.
- Kubiena, W.L. 1953. *The soils of Europe*. Madrid.
- Kubiena, W.L. 1970. *Micromorphological features of soil geography*. New York.
- Kwiecińska, B., Petersen, H.I. 2004. Graphite, semi-graphite, natural coke and natural char classification. *International Journal of Coal Geology* 37: 99–116.
- Leszczyńska, K. 2011. A Novel Methodological Approach for Thin-Section Description and its Application to periglacially disturbed Pleistocene deposits from Danbury, Essex, UK, Netherlands. *Journal of Geoscience* 90: 271–291.
- Ligouis, B. 2017. Reflected light, (w:) C. Nicosia, G. Stoops, (red.), *Archaeological soil and sediments micromorphology*. London, 461–470.
- Macphail, R. 1983. The micromorphology of spodosols in catenary sequence of lowland heathlands in Surrey, England, (w:) P. Bullock, C.P. Murphy (red.), *Soil micromorphology*. Berkhamsted, 647–653.
- Macphail, R., Bill, J., Cannell, R., Linderholm, J., Rødsrud, C.L. 2013. Integrated microstratigraphic investigations of coast archaeological soils and sediments in Norway: the Gokstad ship burial mound and its environs including the Viking harbour settlement of Heimdaljordet, Vestfold. *Quaternary International* 315: 131–146.
- Macphail, R., Courty, M.A., Goldberg, P. 1990. Soil micromorphology in archaeology. *Endeavour New Series* 14: 163–171.
- Macphail, R.I., Cruise, G., Allen, M.J., Linderholm, J., Reynolds, P. 2004. Archaeological soil and pollen analysis of experimental floor deposits; with special reference to Butser Ancient Farm, Hampshire, UK. *Journal of Archaeological Science* 31: 175–191.
- Mallol, C., Hernández, C.M., Cabanes, D., Sistiaga, A., Machado, J., Rodriguez, A., Pérez, L., Galván, B. 2013. The black layer of Middle Palaeolithic combustion structures. Interpretation and archaeological implications. *Journal of Archaeological Science* 40: 2515–2537.
- Mathieu, C., Stoops, G. 1972. Observations pétrographiques sur la paroi d'un four à chaux carolingien creusé en sol limoneux. *Archéologie Médiévale* 2: 347–354.
- Mentzer, S.M. 2017. Micro XRF, (w:) C. Nicosia, G. Stoops (red.), *Archaeological soil and sediment micromorphology*. London, 431–440.
- Mentzer, S.M., Quade, J. 2013. Compositional and isotopic analytical methods in archaeological micromorphology. *Geoarchaeology* 28: 87–97.
- Miller, C.E., Conard, N.J., Goldberg, P., Berna, F. 2010. Dumping, sweeping and trampling: experimental micromorphological analysis of anthropogenically modified combustions features. *P@lethnology* 2: 25–37. <http://www.palethnologie.org>
- Morozova, T.D. 1964. The micromorphological method in paleopedology and paleogeography, (w:) A. Jongerius (red.), *Soil micromorphology*. Amsterdam, 325–331.
- Mroczek, P. 2001. Mikromorfologia osadów klastycznych i gleb. Przedmiot, zastosowanie i wybrane metody analiz. *Czasopismo Geograficzne* 72: 211–229.
- Mucher, H.J., Morozova, T.D. 1981. The application of soil micromorphology in Quaternary geology and geomorphology, (w:) P. Bullock, C.P. Murphy (red.), *Soil micromorphology. Techniques and applications*. Berkhamsted.
- Ngan-Tillard, D.J.M., Brinkgreve, R., Huisman, D.J., van Meerten, H., Muller, A., van Kappel, K. 2016. Tools for predicting damage to archaeological sites caused by one-dimensional loading. *Conservation and Management of Archaeological Sites* 18: 70–85.
- Ngan-Tillard, D.J.M., Huisman, D.J. 2017. Micro-CT scanning, (w:) C. Nicosia, G. Stoops (red.), *Archaeological soil and sediment micromorphology*. London, 441–449.
- Ngan-Tillard, D.J.M., Verwaal, V., Mulder, A., Huisman, H., Muller, A. 2014. Resistance of buried archaeological site to one-dimensional mechanical loading. *Engineering Geology for Society and Territory* 8: 103–106.
- Nicosia, C., Langohr, R., Mees, F., Arnoldus Huyzendveld, A., Bruttini, J., Cantini, F. 2012. Medieval dark earth in an active alluvial setting from the Uffizi Gallery Complex in Florence, Italy. *Geoarchaeology* 27: 105–122.
- Peacock, D.P.S. 1969. A petrological study of certain Iron Age pottery from western England. *Proceedings of Prehistoric Society* 34: 414–427.
- Peacock, D.P.S. 1970. The scientific analysis of ancient ceramics: a review. *World Archaeology* 1: 375–389.
- Renfrew, C., Bahn, P. 2002. *Archeologia. Teorie, metody, praktyka*. Warszawa.
- Ringrose-Voase, A.J., Humphreys, G.S. 1994. *Soil micromorphology: studies in management and genesis*. Amsterdam.
- Rodríguez de Vera, C., Herrera-Herrera, A., Jambrina-Enriquez, M., Sossa-Ríos, S., González-Urquijo, J., Lazuen, T., Vanlandeghem, M., Alix, C., Monnier, G., Pajović, G., G., T., Mallol, C. 2020. Micro-contextual identification of archaeological lipid biomarkers using resin-impregnated sediment slabs. *Scientific Reports* 10: 20574. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77257-x>
- Rutherford, G.K. 1974. *Soil microscopy*. Ontario.
- Schuldenrein, J., Goldberg, P. 1985. Late Quaternary paleoenvironments and prehistoric site distributions in the Lower Jordan Valley: a preliminary report. *Paleorient* 6: 1–13.

- Shepard, A.O. 1942. Rio Grande glaze pain ware. *Carnegie Institute of Washington Publication* 528: 39.
- Shepard, A.O. 1966. Rio Grande glaze paint pottery: a test of petrographic analysis, (w:) F.T. Matson, (red.), *Ceramics and Man*. London, 62–87.
- Shillito, L.-M. 2017. Gas chromatography – mass spectrometry, (w:) C. Nicosi, G. Stoops (red.), *Archaeological soil and sediment micromorphology*. London, 399–401.
- Shillito, L.-M., Bull, I.D., Matthews, W., Almond, M.J., Williams, J.M., Evershed, R.P. 2011. Bimolecular and micromorphological analysis of suspected faecal deposits at Neolithic Çatalhöyük, Turkey. *Journal of Archaeological Science* 38: 1869–1877.
- Shillito, L.-M., Matthews, W., Bull, I.D., Almond, M.J., Williams, J.M., Evershed, R.P. 2013. Integrated geochemical and microscopic analysis of human coprolites, animal dung and organic remains in burials, (w:) I. Hodder, (red.), *Humans and landscapes of Çatalhöyük: reports from the 2000-2008 excavations*. Çatalhöyük Research Project Series Volume 8. Los Angeles, 75–79.
- Simpson, I.A., Dockrill, S.J., Bull, I.D., Evershed, R.P. 1999. Early anthropogenic soil formation at Tofts Ness, Sanday, Orkney. *Journal of Archaeological Science* 25: 729–746.
- Srivastava, P., Aruche, M.K., Arya, K.A., Pal, K.D., Singh, L.P. 2001. A micromorphological record of contemporary and relict pedogenic processes in soils of the Indo-Gangetic Plains: Implications for mineral weathering, provenance and climatic changes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 170:
- Stahlschmidt, M.C., Miller, C.E., Ligouis, B., Goldberg, P., Berna, F., Urban, B., Conard, N.J. 2015. The depositional environments of Schöningen 13 II-4 and their archaeological implications. *Journal of Human Evolution* 89: 71–91.
- Stoops, G. 2003. *Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections*. Wisconsin.
- Stoops, G. 2017. Fluorescence microscopy, (w:) C. Nicosia, G. Stoops (red.), *Archaeological soil and sediment micromorphology*. London, 393–391.
- Stoops, G., Nicosia, C. 2017. Sampling for soil micromorphology, (w:) C. Nicosia, G. Stoops (red.), *Archaeological soil and sediment micromorphology*. London, 383–391.
- Strawn, D., Doner, H., Zavarin, M., MgHugo, S. 2002. Microscale investigation into the geochemistry of arsenic, selenium, and iron in soil developed in pyritic shale materials. *Geoderma* 108: 237–257.
- Suárez-Ruiz, I., Flores, D., Filho, J.G.M., Hackley, P.C. 2012. Review and update of the applications of organic petrology: part 2, geological and multidisciplinary applications. *International Journal of Coal Geology* 98: 73–94.
- Sýkorová, I., Pickel, W., Christianis, K., Wolf, M., Taylor, G.H., Flores, D. 2005. Classification of huminite – ICCP System 1994. *International Journal of Coal Geology* 62: 85–106.
- Thorne, R., Herrington, R., Roberts, S.J. 2009. Composition and origin of the Çaldağ oxide nickel laterite. *Mineralium Deposita* 44: 581–595.
- van Hoesen, J., Arriaza, B. 2011. Characterizing the micromorphology of sediments associated with Chinchorro mummification in Africa, Chile using SEM and EDS. *Archeometry* 53: 986–995.
- van Vliet, B. 1976. Traces de ségrégation de glace en lentilles associées aux sols et phénomènes periglaciaires fossiles. *Biuletyn Peryglacjalny* 26: 41–55.
- VandenBygaart, A.J., Protz, R. 1999. The representative elementary area (REA) in studies of quantitative soil micromorphology. *Geoderma* 89: 333–346.
- Vandermeersch, N.B. 1969. Les nouveaux squelettes moustériens découverts à Qafzeh (Israel) et leur signification. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences* 268: 2562–2565.
- Villagran, X., Strauss, A., Alves, M., Oliveira, R.E. 2019. Virtual micromorphology: the application of micro-CT scanning for the identification of termine mounds in archaeological sediments. *Journal of Archaeological Science: Reports* 24: 785–795.
- Wattez, J., Courty, M.A., Macphail, R. 1990. Burnt organo-mineral deposits related to animal and human activities in prehistoric caves, (w:) L.A. Douglas, (red.), *Soil micromorphology: a basic and applied science*. Amsterdam, 431–441.
- Weiner, S. 2010. *Microarchaeology: beyond the visible archaeological record*. Cambridge.
- Weiner, S., Brumfeld, V., Marder, O., Barzilai, O. 2015. Heating of debitage from Upper Palaeolithic context at Manot Cave, Israel: changes in atomic organization due to heating using infrared spectroscopy. *Journal of Archaeological Science* 54: 45–53.
- Wilson, C.A. 2017. Electron probe X-ray mincroanalysis (SEM-EPMA) techniques, (w:) C. Nicosia, G. Stoops (red.), *Archaeological Soil and Sediment Micromorphology*. London, 451–459.
- Wilson, C.A., Cloy, J.M., Graham, M.C., Hamlet, L.E. 2013. A microanalytical study of iron, aluminium and organic matter relationship in soils with contrasting hydrological regimes. *Geoderma* 202-203: 71–81.
- Wilson, C.A., Davidson, D.A., Cresser, M.S., 2008. Multielement soil analysis: an assessment of its potential as an aid to archaeological interpretation. *Journal of Archaeological Science* 35: 412–424.

